



Ministère de l'Economie,
des Finances et
de l'Industrie

DIRECTION
DÉPARTEMENTALE
DE L'ACTION SANITAIRE
ET SOCIALE
DU HAUT RHIN



Agence de l'eau
Rhin Meuse

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

Rapport final

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 97-J-212

décembre 1997
R 39799



Mots-clés : Haut-Rhin, Ferrette, Jurassique, Aquifère karstique, Contamination des eaux, Arsenic, Origine.

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

BRGM (1997) - Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin. Rapport final. Rap. BRGM R 39799, 91 p., 10 fig., 9 tabl., 1 pl., 3 ann.

© BRGM, 1997, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

Des analyses chimiques réalisées en 1991 selon les directives des contrôles sanitaires avaient montré que plusieurs captages d'eau potable dans le Haut-Rhin (en particulier, 3 captages à Ferrette, Vieux-Ferrette et Bendorf) présentaient des concentrations élevées d'arsenic (jusqu'à 500 µg/l). Ces concentrations, très supérieures à la norme de potabilité (50 µg/l), se sont maintenues jusqu'à ce jour. L'étude hydrogéologique menée en 1991 par le BRGM avait conclu à une origine naturelle de l'arsenic dans les eaux souterraines analysées (libération de cet élément par des minéraux présents dans les formations calcaires ou apport par la remontée d'eaux thermominérales). Il avait été recommandé, cependant, de réaliser des études supplémentaires pour confirmer ces résultats.

C'est dans ce cadre que le ministère de l'Industrie, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et la DDASS du Haut-Rhin ont chargé le BRGM de mener une étude approfondie sur la caractérisation des aquifères, l'origine et la nature de l'arsenic dans le canton de Ferrette mais aussi sur certaines sources du Sundgau des plateaux. L'eau thermominérale du forage de Neuwiller (situé à une vingtaine de kilomètres de Ferrette) a également été examinée. Une source de la région de Sainte-Marie-aux-Mines (partie vosgienne du département) pour laquelle on soupçonne les phénomènes naturels qui sont responsables des concentrations élevées en arsenic dissous a été utilisée comme référence.

Un examen complet des données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéo-chimiques du secteur d'étude a permis de sélectionner et de caractériser très précisément les sites d'intérêt. Une campagne de reconnaissance géologique ainsi qu'une campagne de prélèvements d'eaux et de mesures géochimiques in situ ont été menées au mois d'avril. Pendant la première campagne, les particularités des principaux sites contaminés en arsenic ont été relevées et des prélèvements d'échantillons de roche ont été réalisés. Au cours de la campagne hydrogéo-chimique, 57 échantillons d'eau ont été collectés et conditionnés. Des paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur place. Des séparations As(III)/As(V) ont été réalisées sur le terrain afin de déterminer la spéciation de cet élément.

Les données analytiques obtenues à la suite de ces campagnes confirment les résultats antérieurs. Elles montrent que les eaux possédant des teneurs élevées d'arsenic appartiennent toutes à la formation du Bathonien supérieur-Callovien et se situent près de failles ou de chevauchements majeurs. D'origine météorique et bicarbonatées calciques comme l'ensemble des autres eaux superficielles étudiées, ces eaux circulent rapidement et leur minéralisation (< 600 mg/l) est essentiellement acquise par dissolution des roches carbonatées jusqu'à saturation vis-à-vis de ces dernières. Les localités indiquant des concentrations élevées d'arsenic dans l'eau sont par ordre d'importance : Ferrette, Bendorf, Vieux-Ferrette, Winkel, Ligsdorf et Bouxwiller. Les teneurs en arsenic maximales ont été observées dans les forages privés de Ferrette dont les profondeurs sont proches de 100 m. En particulier, le forage P indique des teneurs en arsenic très élevées (environ 6 mg/l) en présence de concentrations de chlorure et de sulfate plus importantes que celles des autres eaux.

Les concentrations de chlorure ainsi que les teneurs en soufre-34 des sulfates dissous, associées aux concentrations élevées d'arsenic, montrent que ces dernières peuvent s'expliquer par des processus de mélange entre une eau du type de celle du forage P (la plus contaminée) et des eaux plus superficielles. Il est à souligner que la plupart des eaux contaminées en arsenic sont saturées vis-à-vis de la barytine (BaSO_4). La valeur très négative en soufre-34 des sulfates dissous déterminée sur l'eau du forage P ainsi que les concentrations en baryum, fluorure et phosphate plus élevées que celles de l'ensemble des eaux, témoignent d'un apport d'arsenic par l'oxydation d'un minéral sulfuré plutôt secondaire, probablement associé à des minéraux comme la barytine, la fluorite (CaF_2) et l'apatite (phosphate de calcium). Ce minéral pourrait être de la pyrite (FeS_2), qui appartiendrait à des filons minéralisés de remplissage, résultant d'anciennes circulations de fluides profonds. Des échantillons de filons minéralisés, prélevés au cours de cette étude et appartenant à la formation du Bathonien supérieur-Callovien, présentent des teneurs en arsenic élevées. A Sainte-Marie-aux-Mines où l'eau est également enrichie en arsenic, la teneur en soufre-34 des sulfates dissous ($\delta^{34}\text{S}$ proche de 0) indique que les sulfates et l'arsenic sont apportés par l'oxydation d'un minéral sulfuré primaire, qui pourrait être aussi de la pyrite, ou bien de l'arsénopyrite (FeAsS) ou du réalgar (AsS). Tous ces indices permettent de conclure à une origine naturelle de l'arsenic. L'apport en cet élément par des venues d'eaux thermominérales locales a été totalement écarté. Par ailleurs, une origine issue d'un dépôt anthropique ne trouve aucun fondement dans les analyses d'un échantillon de pesticide datant des années 1940.

Les travaux concernant la spéciation de l'arsenic montrent que c'est essentiellement l'arsenic pentavalent As(V) qui est prédominant, une forme moins toxique que l'arsenic trivalent As(III) et plus facile à piéger lors de traitement par floculation avec des sels ferriques. Comme les constantes thermodynamiques concernant les espèces fluorées d'arsenic en solution sont questionnables, les formes H_2AsO_4^- et HAsO_4^{2-} pourraient très bien être les espèces majoritaires dans l'ensemble des eaux.

Les concentrations en arsenic étant élevées et variables dans le temps, l'élimination de cet élément suppose des traitements chimiques complexes et relativement coûteux, qui doivent aboutir à des rendements proches de 100%. Par conséquent, il semble préférable de s'orienter vers la recherche de ressources de substitution en eau naturellement potable. La zone faillée de Ferrette ainsi que la formation du Bathonien supérieur-Callovien sont déconseillées. La source, dite de la Saboterie, constitue une possibilité de ressource de substitution mais offre un intérêt limité. Un forage dans le secteur de Bendorf-Koestlach paraîtrait risqué. Par contre, à Oltingue dans la partie est du canton de Ferrette, la source, dite de la Chapelle-Saint-Martin, anciennement captée, serait en mesure d'apporter de l'ordre de 20 l/s d'une eau issue du Jurassique supérieur. Dans cette même vallée de l'Ill, des forages de reconnaissance pourraient être entrepris, entre Hippolskirch et Raedersdorf, pour investiguer et par la suite, capter les eaux souterraines de la Grande Oolithe et par défaut, du Jurassique supérieur.

Sommaire

Introduction	11
1. Contexte géologique et hydrogéologique.....	13
1.1. Succession lithostratigraphique.....	13
1.2. Structures tectoniques.....	15
1.3. Fracturation profonde et métallogénie régionale.....	15
1.4. Hydrogéologie.....	15
2. Prélèvements et mesures géochimiques in situ	17
2.1. Mission de reconnaissance géologique	17
2.1.1. Roches échantillonnées	20
2.1.2. Filons et minéralisations échantillonnés	20
2.2. Campagne de prélèvements d'eaux.....	21
3. Résultats analytiques.....	23
3.1. Analyses chimiques des roches	23
3.2. Caractérisation minéralogique et chimique d'un pesticide soupçonné d'être la source de contamination en arsenic.....	23
3.3. Analyses chimiques des eaux	25
3.3.1. Mesures géochimiques in situ	25
3.3.2. Analyses chimiques.....	28
3.3.3. Analyses isotopiques.....	34
3.3.4. Analyses des concentrations d'arsenic et spéciation	34

4. Interprétation des résultats	39
4.1. Caractéristiques chimiques et origine des eaux.....	39
4.1.1. Caractéristiques chimiques.....	39
4.1.2. Origine des eaux.....	43
4.2. Origine naturelle de l'arsenic.....	45
5. Recommandations et orientations.....	53
5.1. Traitement de l'eau	53
5.2. Recherche de ressources de substitution en eau potable	54
Conclusion.....	59
Bibliographie.....	61
 Ann. 1 - Analyses chimiques des eaux du secteur d'étude tirées de la Banque des Données du Sous-Sol (BSS)	 63
Ann. 2 - Identification minéralogique de l'échantillon poudreux référencé BEND par diffractométrie des rayons X.....	75
Ann. 3 - Identification minéralogique d'un échantillon de pesticide inconnu par diffractométrie des rayons X.....	83

Liste des illustrations

Fig. 1 -	Série jurassique calcaire du Jura alsacien (Jurassique moyen et supérieur) ...	14
Fig. 2 -	Spéciation de l'arsenic dans l'eau en fonction du pH et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) à 25°C	37
Fig. 3 -	Diagramme de Piper	40
Fig. 4a -	Concentrations en calcium en fonction de celles en bicarbonate	41
Fig. 4b -	Concentrations en magnésium en fonction de celles en bicarbonate.....	41
Fig. 4c -	Concentrations en potassium en fonction de celles en sodium.....	41
Fig. 5a -	Teneurs isotopiques en deutérium en fonction de celles en oxygène-18.....	44
Fig. 5a -	Teneurs isotopiques en deutérium en fonction des concentrations en chlorure	44
Fig. 5a -	Teneurs isotopiques en oxygène-18 en fonction des concentrations en chlorure	44
Fig. 6 -	Concentrations en arsenic en fonction de celles en chlorure	46
Fig. 7 -	Précipitations à la station d'Altkirch et variations des teneurs en arsenic dissous à Bendorf et Ferrette	47
Fig. 8 -	Teneurs isotopiques en soufre-34 en fonction des concentrations en arsenic	49
Fig. 9 -	Concentrations en phosphate en fonction de celles en arsenic	49
Fig. 10 -	Schéma d'orientation pour d'éventuelles ressources de substitution en eau potable dans le canton de Ferrette	57
Pl. 1 -	Situation des prélèvements sur fond de la carte géologique de Ferrette.	

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Caractéristiques des aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin	18
Tabl. 2 - Analyses des éléments traces dans des échantillons de roche et dans un échantillon de pesticide (en ppm)	24
Tabl. 3 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : mesures de terrain	26
Tabl. 4 - Techniques analytiques utilisées.....	29
Tabl. 5 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses chimiques	30
Tabl. 6 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses isotopiques.....	35
Tabl. 7 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : comparaison des analyses d'arsenic.....	36
Tabl. 8 - Calculs des indices de saturation des eaux vis-à-vis de différents minéraux réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR.....	42
Tabl. 9 - Etat d'exploitation actuel des captages AEP qui indiquent des concentrations en arsenic dissous supérieures à 10 mg/l.....	55

Introduction

A la suite de la découverte d'arsenic dans plusieurs captages et réseaux de distribution de l'eau potable dans le canton de Ferrette (Haut-Rhin), une étude approfondie sur la caractérisation des aquifères contaminés, l'origine et la nature de cet élément, a été confiée au BRGM. Cette étude est financée à la fois par le ministère de l'Industrie, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et la DDASS du Haut-Rhin.

Des analyses réalisées en 1991 selon les normes et les directives des contrôles sanitaires avaient montré la présence d'arsenic dans plusieurs captages d'eau potable. En particulier, trois captages (à Ferrette, Vieux-Ferrette et Bendorf) présentaient des teneurs supérieures aux normes de potabilité. L'étude hydrogéologique menée à cette époque par le BRGM (Daesslé, 1991) avait examiné la situation sur l'ensemble des points de captage intégrés dans leur contexte environnemental et avait conclu à une origine naturelle de l'arsenic dans les eaux souterraines analysées. Cet élément serait libéré par des minéraux présents dans les formations calcaires ou bien serait apporté par la remontée d'eaux thermominérales. Néanmoins, il avait été recommandé de réaliser des études supplémentaires pour confirmer cette origine et préciser la nature de l'arsenic dissous. La présence d'arsenic s'est maintenue jusqu'à ce jour. Cinq unités de distribution sont affectées, à présent, par des teneurs dépassant la norme de potabilité actuelle de 50 µg/l (atteignant des maxima temporaires de l'ordre de 1000 µg/l) ou des teneurs inférieures qui restent, néanmoins, supérieures à 10 µg/l, limite projetée dans les directives européennes.

La caractérisation des aquifères arséniés et l'identification de l'origine de l'arsenic dissous dans les eaux captées dans le canton de Ferrette constituent le but principal de cette étude. La détermination de la valence et si possible de la spéciation de l'arsenic dissous dans les eaux contaminées est également un autre objectif de l'étude. En effet, la connaissance de ces caractéristiques est très importante du point de vue sanitaire car une grande différence de toxicité existe entre les différentes formes d'arsenic dissous. Ainsi, As(III) est beaucoup plus toxique que As(V). Les composés organiques arsénicaux sont moins dangereux que les formes inorganiques. D'autre part, les rendements des traitements à mettre en place pour éliminer l'arsenic dissous sont aussi fortement dépendants des formes aqueuses de l'arsenic.

Le domaine géographique d'intervention correspond au canton de Ferrette mais également à des interventions ponctuelles sur des sources indiquant des concentrations élevées d'arsenic dissous, dans le Sundgau des plateaux. Le forage d'eau thermominérale de Neuwiller, situé à une vingtaine de kilomètres de Ferrette, dont la venue d'eau chaude est située à une profondeur de 978 m dans le Jurassique, a également été examiné. La région de Sainte-Marie-aux-Mines, pour laquelle on soupçonne les phénomènes naturels qui sont responsables des concentrations élevées d'arsenic dans les eaux (présence de nombreux minéraux sulfurés contenant de l'arsenic tels que pyrite FeS₂, arsénopyrite

FeAsS, réalgar AsS), a été utilisée comme référence. L'étude comprend plusieurs étapes visant à la connaissance du milieu et des eaux souterraines ainsi qu'à la synthèse des éléments acquis. Il a été effectué un examen complet des données existantes concernant le milieu géologique, la circulation des eaux souterraines ainsi que la qualité des eaux du secteur d'étude. Cet état des lieux et les principales évolutions ont découlé des données de la DDASS, de la DDAF, de la DIREN, du BRGM, des archives communales, et autres (photos aériennes, inventaires spéléologiques...). L'examen de ces données a permis de définir les secteurs sur lesquels des investigations détaillées devaient être réalisées ainsi que le choix et la reconnaissance des points d'échantillonnage des roches et des eaux.

Les analyses chimiques et isotopiques des roches et des eaux ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM (accrédités COFRAC- Essais programme 100, Eaux).

Des recommandations et des orientations en matière de recherche de ressources de substitution et en terme de surveillance des ressources déjà exploitées sont proposées en fin de rapport.

1. Contexte géologique et hydrogéologique

Le canton de Ferrette, situé à l'extrême sud de l'Alsace et du Fossé Rhénan, comprend deux régions géomorphologiques naturelles :

- au nord, le plateau du Sundgau ;
- au sud, les chaînes plissées du Jura.

La région du plateau du Sundgau présente des ressources en eau dans la nappe des cailloutis du Pliocène recouvrant les marnes de l'Oligocène (sources ou forages).

1.1. SUCCESSION LITHOSTRATIGRAPHIQUE

Reposant sur le socle hercynien qui, en profondeur, constitue le prolongement sud des Vosges et de la Forêt Noire, la couverture secondaire se caractérise en surface par la série jurassique du Jura alsacien. Celle-ci comprend deux ensembles calcaires qui constituent les principaux aquifères de cette région (fig. 1) :

- les calcaires de l'Oxfordien supérieur ;
- les calcaires oolithiques du Bajocien-Bathonien.

Ces ensembles sont séparés principalement par les marnes de l'Oxfordien inférieur.

D'une puissance avoisinant 200 m, les calcaires de l'Oxfordien supérieur sont constitués de faciès bioclastiques à microlithiques, à passées de calcaire récifal, en particulier dans les faciès rauraciens, qui forment les rochers ruiniformes de Ferrette. A l'affleurement, les calcaires durs, très cimentés, prédominent sur les faciès crayeux. Diaclases et failles sont fréquentes et la perméabilité est très probablement liée à la fracturation et la fissuration des roches.

L'ensemble calcaire du Bajocien-Bathonien, épais d'une centaine de mètres, est principalement constitué de calcaires oolithiques (Grande Oolithe). A l'affleurement, ces calcaires sont généralement oxydés et présentent une couleur beige. En profondeur, dans les sondages, leur teinte est grise mais la pyrite n'y semble pas fréquente. Ils sont très compacts, bien cimentés et suffisamment durs pour être exploités en granulats (carrière de Durslindorf). Ils n'ont pas de perméabilité de matrice mais généralement, diaclasés et localement fracturés, ils présentent une perméabilité de fissures. Les niveaux supérieurs du Bathonien sont des calcaires plus marneux et argileux se situant sous un niveau caractéristique d'oolithe ferrugineuse (dénommée dalle nacrée) du Callovien.

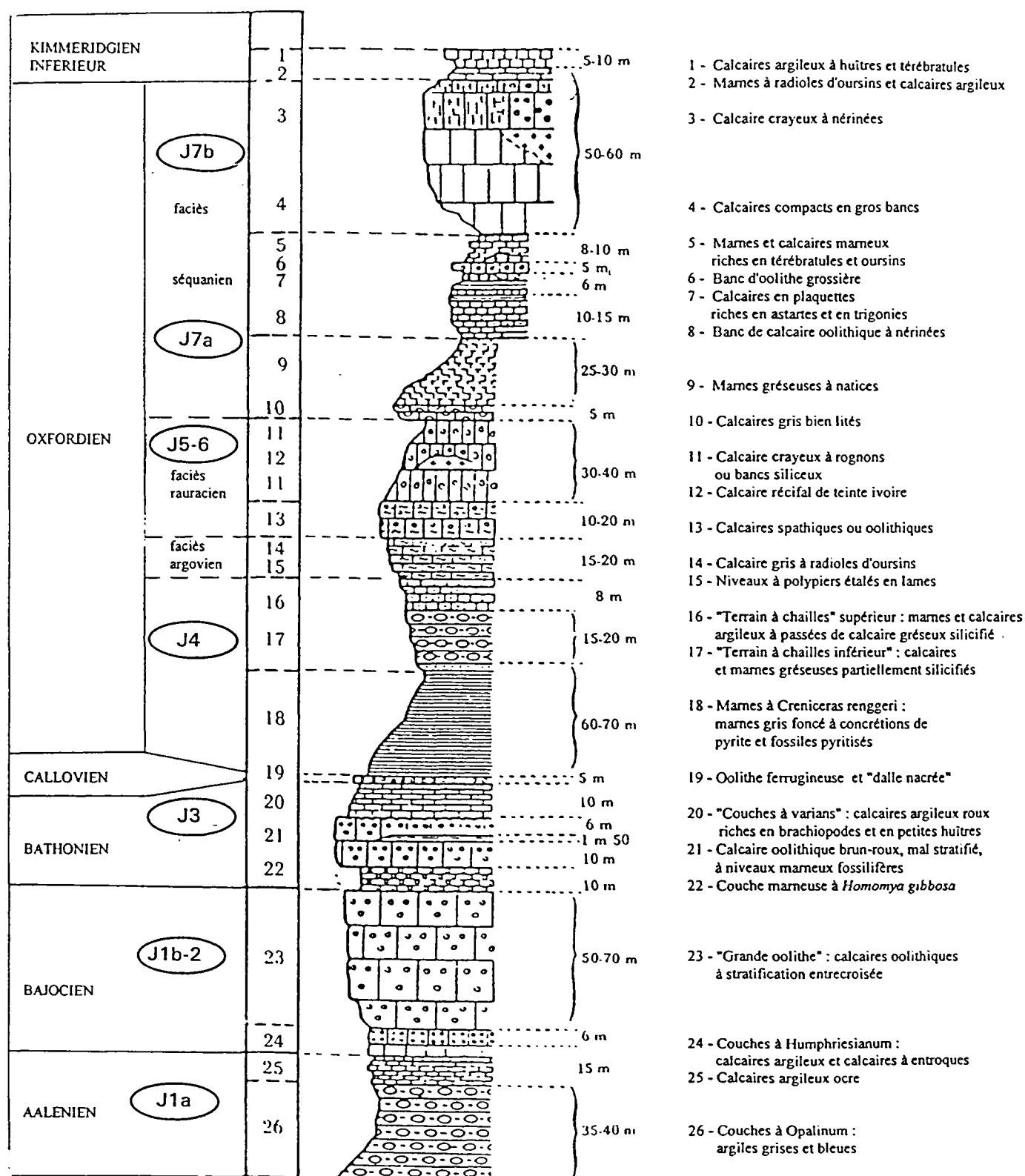


Fig. 1 - Série jurassique calcaire du Jura alsacien (Jurassique moyen et supérieur).

1.2. STRUCTURES TECTONIQUES

Les reliefs du canton de Ferrette appartiennent au Jura plissé dont la structure est caractérisée par la présence de plis coiffés. Au coeur des anticlinaux affleurent les bancs calcaires de la Grande Oolithe et localement, les marnes de l'Aalénien et du Lias (Moernach et Koeslach). La retombée septentrionale des plis anticlinaux est souvent accidentée de failles directionnelles importantes, souvent chevauchantes, en particulier pour le pli de Ferrette. Les plis jurassiques forment des chaînons d'orientation générale E-W, découpés par des accidents N-S, qui présentent un très net jeu décrochant dans le pli de Ferrette. La maille de cette fracturation est dans l'ensemble nettement inférieure au kilomètre.

1.3. FRACTURATION PROFONDE ET METALLOGENIE REGIONALE

Dans une large zone, centrée sur un axe Bretagne - Massif central - Forêt-Noire, les principales failles subméridiennes affectant les couvertures secondaires et tertiaires sont généralement interprétées comme des accidents liés à un jeu de failles du socle. Des minéralisations de même type que celles du socle vosgien dont certaines sont riches en arsenic (Sainte-Marie-aux-Mines, en particulier) peuvent donc y être associées. Si la partie essentielle des minéralisations polymétalliques des Vosges et de la Forêt-Noire est d'âge hercynien, plus de 80 filons (notamment de fer) sont d'âge triasique à tertiaire, illustrant ainsi l'importance des circulations "hydrothermominérales" jusqu'à, sans doute, la période actuelle.

Le canton de Ferrette est à la fois à l'aplomb du Fossé Rhénan et en avant de la zone subalpine, ce qui constitue une zone tectonique complexe où le socle hercynien comporte très vraisemblablement des minéralisations d'âge carbonifère comme à Sainte-Marie-aux-Mines, riches en Pb, Ba, F, As, etc. Dans les sites prospectés, la plupart des failles, qui affectent des formations d'âge jurassique, présentent des remplissages de calcite filonienne, parfois accompagnée d'oxydes de fer. A Ferrette, le filon de calcite et d'oxyde de fer qui suit le vallon entre le Geisberg et le Rossberg (sud de la source du Lavoir) a plus de 10 m de large et a été exploité en carrière.

1.4. HYDROGEOLOGIE

Dans cette région, à prédominance calcaire et karstique, les sources ou forages sont :

- soit liés à la présence de failles ou fissures ;
- soit situés sur les niveaux imperméables du Lias (sources du Jurassique moyen) ou les marnes et les argiles de l'Oxfordien (sources du Jurassique supérieur), sans écarter des niveaux marneux intermédiaires.

La disposition des masses calcaires est variable. La voûte anticlinale des calcaires de la Grande Oolithe est en relief à l'ouest de Ferrette. Les calcaires oxfordiens arment

souvent les crêts (bords en relief d'un anticlinal dont l'axe est creusé en combe) mais peuvent se situer aussi en position synclinale et en zones déprimées (vallée de l'Ill à Ligsdorf). La circulation des eaux souterraines est donc tributaire du contexte géologique local et souvent canalisée par des réseaux karstiques ou fissurés. Cette circulation est très rapide, les filtrations naturelles sont faibles et les débits irréguliers. Les circulations hydrogéologiques dans les formations du Trias et le socle hercynien sous-jacent à la couverture calcaire ne sont bien connues que plus au nord, dans le Fossé Rhénan.

Sans pouvoir certifier de la continuité des aquifères, il n'en résulte pas moins que les écoulements guidés par la gravité et par des chemins préférentiels tels que les failles et les fractures de moindre importance aboutissent à des niveaux de base formés par les axes de drainage des rivières. Dans la zone du plateau jurassique, on peut ainsi distinguer les drainages de la Lucelle (au sud), de la Largue et de Durlinsdorf (à l'ouest) ainsi que de l'Ill (à l'est). Toute la partie nord de Koestlach à Ferrette-Bouxwiller n'a apparemment pas d'exutoire dans un écoulement de surface.

2. Prélèvements et mesures géochimiques in situ

Un examen complet des données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques existantes sur le secteur d'étude (ann. 1) a permis de :

- réaliser une mission géologique de reconnaissance de terrain destinée à acquérir des compléments sur la nature et la structure géologique à proximité des différentes sources ou forages dont l'eau indiquait des concentrations élevées en arsenic. Pendant cette mission, 21 échantillons de roche ont également été prélevés afin de rechercher la présence d'arsenic ;
- sélectionner des points d'eaux (sources, forages), qui ont été prélevés au cours d'une campagne de prélèvements d'échantillons d'eau (pl. 1) ;
- attribuer à chaque point d'eau la nature du captage (source, forage) et l'aquifère dont il est issu (tabl. 1).

Les aquifères qui sont reportés dans le tableau 1 sont les suivants :

- All (E, Eb) : alluvions récentes de rivière ou elluvions, voir éboulis de pente ;
- Fv : cailloutis rhénans du Sundgau ;
- G1 à G3 : Tertiaire divers : calcaires lacustres ou sable silteux (molasse alsacienne) ;
- J7 : Oxfordien, faciès séquanien, calcaires et marnes ;
- J5-6 : Oxfordien, faciès rauracien, calcaires massifs récifaux et oolithiques ;
- J4 : Oxfordien, marnes sableuses et argile : imperméable déterminant ;
- J3 : Bathonien supérieur et Callovien :
calcaires argileux à oolithe ferrugineuse, formation bréchique,
(dalle nacrée) à nombreux fossiles,
calcaires argileux et sableux roux, à Rhynchonelles ;
- J1b-2 : Bajocien supérieur et Bathonien inférieur : Grande Oolithe ;
- J1a : Aalénien et Bajocien inférieur : calcaires marneux et calcaires argileux.

2.1. MISSION DE RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE

Cette mission a permis de relever les particularités des principaux sites contaminés ainsi que de réaliser des prélèvements d'échantillons de roche. L'étude hydrogéologique menée par le BRGM en 1991 avait mis en évidence que tous les points d'eaux enrichis en arsenic appartenaient aux aquifères du Jurassique moyen et se situaient pour la plupart près de failles ou de chevauchements majeurs. Par conséquent, l'échantillonnage destiné à l'analyse chimique des roches a été essentiellement axé sur la Grande Oolithe,

COM	COMMUNE	INDICE	DESIG	LIEU-DIT	NATURE	ENVIRONNEMENT aquifère capté/ /affleurement/ /faciès environnant	ANALYSES AS PRECEDENTES (µg/l)	ANALYSES AS TOTAL 97 (µg/l)
25	BENDORF	04761X0006	S1	AEP ROGGENBRUNNEN	SOURCE-KARSTIQUE	J7 / /		13,9
25	BENDORF	04761X0070	S2	AEP BREITENFELD	FORAGE	J1b-2 / J3 / faille	300	429
25	BENDORF	04761X0093	Sce	LA SABOTERIE Projet AEP	SOURCE-NON-CAPTEE	J1b-2 / /		11,6
34	BETTLACH	04763X0010	HY	AEP COMMUNALE	SOURCE	Fv / . / cailloutis		< 2
35	BIERTHAL	04763X0013	S1	AEP STOECKENMATTEN W A	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / /		< 2
49	BOUXWILLER			SCE AMONT ETANG	SOURCE			< 2
49	BOUXWILLER	04762X0054	S2	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	SONDAGE	J7 / Eb... / faille	20	72,6
49	BOUXWILLER	04762X0042		FONTAINE	FONTAINE	J7	42	47,2
67	COURTAVON	04761X0074	F	AEP FORAGE	FORAGE	J1b-2 / / faille		< 2
74	DURLINSORF	04761X0008	SUD	AEP SUD DE PFIRTWEIER	SOURCE	Alluvions		< 2
74	DURLINSORF	04761X0083	F	AEP LD OBERE MATTEN PA	FORAGE	J1b-2 / / faille	< 2	< 2
74	DURLINSORF	04761X0090	HY	Sce Therm.217 rue de Lucelle	SOURCE-CAPTEE	J5-6 ?	4,5	4,4
90	FERRETTE	04761X0005		AEP SOURCE DU LAVOIR		J1b-2 / J3 / faille	500	473
30	FERRETTE	04762X0064	F	FOR. PRIVE P	Forage prélevé à 80 m	J3 / J4 / faille	6000	5960
30	FERRETTE	04762X0065	F	FOR. PRIVE H	Forage prélevé à 114 m	J3 / J4 /	2135	1860
30	FERRETTE	04762X0066	F	FOR. PRIVE C	Forage prélevé à 96 m	J3 / J4 /	2030	1760
165	KIFFIS	04762X0031	EST	AEP AUF DER WEIDE	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / E . /		< 2
169	KOESTLACH	04761X0085	F2	AEP LD BERGMATTEN	FORAGE	J1b-2 / / faille	< 2	< 2
184	LIEBSORF	04761X0031	S1	AEP TALMATTE AMONT EST	SOURCE KARSTIQUE	J4 / / pli red.		< 2
184	LIEBSORF	04761X0082	F2	AEP FORAGE 1990 F2	FORAGE-CAPTE	J5-6 / /pli couché		< 2
186	LIGSDORF	04762X0014	Milieu	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	SOURCE-KARSTIQUE	J3 / J4 / pli red.	40	152,4
186	LIGSDORF	04762X0016	EST	AEP BENDORF Col du Neunelch	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / /	< 2	< 2
186	LIGSDORF	04762X0020	Ouest	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	SOURCE-KARSTIQUE	J3 / J4 / pli red.		32,3
186	LIGSDORF	04762X0021	Est	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	SOURCE-KARSTIQUE	J3 / J4 / pli red.		119,2
186	LIGSDORF	04762X0034	OUEST	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	SOURCE-KARSTIQUE	J4 / J5-6 /pli red.	< 2	< 2
186	LIGSDORF		Sce	près route entre Ligsdorf et Winkel	SOURCE			< 2
187	LINSORF	04763X0008	N-E	AEP NORD EST	SOURCE	G3 / All. / sable		< 2

Tabl. 1 - Caractéristiques des aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin.

COM	COMMUNE	INDICE	DESIG	LIEU-DIT	NATURE	ENVIRONNEMENT aquifère capté/ /affleurement/ /faciès environnant	ANALYSES AS PRECEDENTES (µg/l)	ANALYSES AS TOTAL 97 (µg/l)
190	LUCELLE	04761X0036	S1	AEP SCHMELZIBRUNNEN	SOURCE-CAPTEE	J7 / /	< 2	< 2
190	LUCELLE	04761X0059	FNE	FONTAINE MAISON FAMILIALE	SOURCE-CAPTEE	J7 / /	< 2	< 2
190	LUCELLE	04762X0050	S2	AEP STATION DE POMPAGE	SOURCE-CAPTEE	J5-6 / /	< 2	< 2
194	LUTTER	04762X0028	HY	AEP KALMIS	SOURCE-CAPTEE	J1b-2 / J3limite/	25	< 2
194	LUTTER		KALMIS	eau superficielle emplacement forage	FORAGE		< 2	< 2
194	LUTTER	04762X0060	KALMIS	AEP KALMIS LD PLATTENW	FORAGE (collecteur)	J1b-2 / J3limite/	15	35
212	- MOERNACH	04761X0092	FOR	AEP MOERNACH à DURL.	FORAGE	J1b-2 / / faille		< 2
243	OBERLARG	04761X0003	NLLE	AEP COMMUNAL (NOUVELLE)	SOURCE	J3 / All./		< 2
243	OBERLARG	04761X0004	HY	AEP RESERVOIR	SOURCE-CAPTEE	J3 / All./		< 2
243	OBERLARG	04761X0078	F4	AEP SEVERAN	FORAGE	J1b-2/J3/ NS -40m		< 2
248	OLTINGUE	04763X0025	HY	AEP CHAPELLE ST MARTIN	SOURCE-CAPTEE	G1 / / cong.sur J7	<2	2,8
259	RAEDERSDORF	04762X0026	S2	AEP SOORMATT MILIEU S2	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / /		< 2
259	RAEDERSDORF	04762X0062	F	RITTY	FORAGE	J5-6 / / niv III	2	2,1
273	RIESPACH	04456X0016	S2	AEP KOHLHOLTZ AMONT S2	SOURCE-CAPTEE	Fv / / cailloutis		24
273	RIESPACH	04456X0017	S1	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	SOURCE	Fv / / cailloutis		14,7
273	RIESPACH	04456X0038	S1	AEP FAEHLIG	SOURCE	Fv / / cailloutis		< 2
312	SONDERSDORF	04762X0023	AVAL	AEP LOECHLE AVAL	SOURCE-KARSTIQUE	J7 / /		< 2
312	SONDERSDORF	04762X0029	HY	AEP OLTINGUE PIED GELSBERG	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / /		< 2
347	VIEUX-FERRETTE	04762X0001	S1	AEP OUEST S1	SOURCE	J1b-2 / J3 / faille	150	147,4
347	VIEUX-FERRETTE	04762X0002	S2	AEP S2	SOURCE	J1b-2 / J3lim./faille	10	11,8
347	VIEUX-FERRETTE	04762X0040	FNE	FONTAINE RUE DE LA MONT.	SOURCE-CAPTEE	J1b-2 / J3 / faille	170	323,2
347	VIEUX-FERRETTE	04762X0061	F	PARC 16/3 SECT C HERRS	FORAGE	J1b-2 / J3lim./faille	15-30	11,6
373	WINKEL	04761X0017	HY	AEP DE L'ILL	SOURCE-KARSTIQUE	J5-6 / /	< 2	< 2
373	WINKEL	04761X0080	S.E	WINKEL FORAGE AEP	FORAGE	J1b-2 / / pli red	4	2,5
373	WINKEL	04761X0089	S.E	WINKEL. REC F2	FORAGE	J1b-2 / J3 / pli red	150	206,2
380	WOLSCHWILLER	04763X0011	S2	AEP ROSENBRUNNEN OUEST	SOURCE-KARSTIQUE	G2c /cong.sur J7		2,3
380	WOLSCHWILLER	04763X0020	S1	AEP OBERFELD	SOURCE-KARSTIQUE	G2c /cong.sur J7		< 2
232	NEUWILLER	04764X0009	THERM	MARGUERITE COEUR	FORAGE DE 900M	J1b-2 / J3 / J5-6	150	226,2
298	STE MARIE AUX M.	03414X0112		Sce St. GUILLAUME	Drain galerie de mine	Exhaure mines As		3852
298	STE MARIE AUX M.	03414X0002		Drain TIEFSTOLLEN	Drain galerie de mines	Exhaure mines As		1048

Tabl. 1 - Caractéristiques des aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin (suite).

les marnes recouvrant la Grande Oolithe et les minéralisations liées aux failles subméridiennes. Des échantillonnages complémentaires ont été réalisés dans l'oolithe ferrugineuse du Callovien et dans les principales assises de l'Oxfordien.

2.1.1. Roches échantillonnées

Des échantillons de roche représentatifs de la Grande Oolithe ont pu être prélevés sur des carottes des sondages pétroliers Sundgau 201 (SUND 1) et Knoeringue (KNO1), en affleurement à Vieux-Ferrette (VF1), à Ferrette (FER2), à Lutter (LUT1), à Ligsdorf (EICH1) et dans la carrière de Durlinsdorf (DURL1). L'oolithe supérieure, à intercalations marneuses, a été échantillonnée dans une carrière à 1 500 m à l'est de Winkel (WINK1 et WINK2).

Les intercalations marneuses, seules, ont été échantillonnées au sud de Ligsdorf (EICH3). L'oolithe ferrugineuse avec des calcaires bréchiques a été échantillonnée à Bendorf, à proximité de la Saboterie (SABOTERIE). Un échantillon de marnes de l'Oxfordien inférieur (EICH4), situées dans une ancienne carrière au sud de Ligsdorf, a également été prélevé. Les calcaires de l'Oxfordien supérieur ont été échantillonnés au sud de Ligsdorf (EICH5) et au sud de Bouxwiller (BOUX).

2.1.2. Filons et minéralisations échantillonnés

Près de la source du Lavoir de Ferrette, en rive droite, une ancienne carrière a exploité un filon de calcite, épais de plusieurs mètres. Ce filon jalonne la faille figurée sur la carte géologique à 1/50 000. Ce filon a été retrouvé en bas de versant, juste à l'ouest de la source. Sa direction est N160°E. Épaisses de plusieurs centimètres, les couches de calcite sont plus ou moins séparées par des couches d'hydroxydes de fer dont la puissance peut atteindre et dépasser le centimètre. Un échantillonnage regroupé des deux parties du filon (FER1) a été réalisé. La faille minéralisée en N160°E joue vraisemblablement un rôle de drain. Elle se poursuit probablement vers le sud, dans l'axe du vallon, en tête duquel un sondage privé exploite de l'eau.

La faille qui suit les différents captages de Vieux Ferrette comprend un filon à calcite et oxydes de fer. Ce filon est subaffleurant sur le flanc ouest du Samstagberg où il a pu être échantillonné de façon satisfaisante (VF2). Des échantillons à calcite et oxydes de fer, recueillis plus au nord-ouest (VF3), ont été prélevés dans de moins bonnes conditions. La zone d'alimentation des captages de Vieux-Ferrette paraît être essentiellement dans la Grande Oolithe.

Le vallon situé au nord du forage de Bendorf représente, selon la structure géologique, la principale zone d'alimentation de ce captage, dans la Grande Oolithe. Une faille de direction subméridienne figure dans la carte géologique à 1/50 000. Cette faille est vraisemblablement minéralisée. Sur le flanc occidental du vallon, on peut signaler une entrée de galerie karstique dans la Grande Oolithe qui est le seul affleurement de roche en place dans le vallon. Quelques centaines de mètres plus en amont, des blocs de

Grande Oolithe, plus ou moins cataclasés et panachés vert et ocre rouge, ont été échantillonnés (BEND). Des remplissages de quelques centimètres de largeur de calcite accompagnée d'oxydes de fer, qui appartiennent à de petits accidents de direction subméridienne dans la Grande Oolithe, ont été prélevés dans deux petites carrières près de Lutter (LUT2) et sur des filonnets à Ligsdorf (EICH2). Des filons minéralisés ont été échantillonnés dans la carrière de Durlinsdorf (DURL2).

2.2. CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS D'EAUX

Afin d'élargir la zone de surveillance et de connaître les mécanismes qui sont responsables des concentrations élevées en arsenic dissous, 57 points d'eaux ont été échantillonnés (pl. 1). Ces prélèvements ont été conditionnés en fonction des analyses à réaliser (filtration à 0,1 µm pour analyses chimiques, acidification à l'acide nitrique pour analyses des cations et des traces, aucun traitement pour les analyses isotopiques). Les mesures de température, conductivité, pH, Eh, oxygène dissous, alcalinité et sulfures ont été réalisées sur le terrain sauf pour les trois forages privés de Ferrette et le collecteur de Lutter dont l'eau a été prélevée après la campagne du 14 au 18 avril. Le forage de Neuwiller a été échantillonné afin d'obtenir un échantillon représentatif d'eau thermominérale régionale. La source Saint-Guillaume et le drain Tiefstollen, à Sainte-Marie-aux-Mines, ont également été prélevés. La composition chimique de ces eaux, enrichies en arsenic très probablement parce qu'elles sont en contact avec des minerais contenant cet élément (pyrite, arsénopyrite, réalgar), est utilisée comme référence.

La séparation As(III)/As(V) a été réalisée sur le terrain pour une vingtaine de points dont on savait, pour la plupart, que les concentrations d'arsenic total étaient élevées. La méthode employée est une technique chromatographique, qui sépare As(III) de As(V) à partir d'une colonne de résine AG1X8 échangeuse d'anions et d'acide chlorhydrique 0,12 M utilisé comme éluant (Ficklin, 1983 ; Criaud et Fouillac, 1986). Cette méthode a été effectuée sur le terrain afin d'éviter toute perturbation ultérieure aux prélèvements (oxydation de As(III) par l'oxygène de l'air). Cette technique ne tient pas compte des complexes organiques d'arsenic qui, s'ils sont présents, se retrouvent essentiellement avec As(III) (Dudermel-Le Cornec, 1992). Dans ce cas, seule la détermination des valeurs des concentrations de As(V) est possible.

3. Résultats analytiques

3.1. ANALYSES CHIMIQUES DES ROCHES

Des analyses d'arsenic et d'éléments traces par plasma à couplage inductif + spectrométrie d'émission (ICP) ont été réalisées uniquement sur 11 échantillons de roche, sélectionnés parmi les 21 échantillons prélevés, en fonction de leur intérêt (tabl. 2). Les analyses montrent que ces échantillons, qui possèdent une matrice essentiellement carbonatée, contiennent en général peu d'éléments traces. Seuls quatre d'entre eux (BEND, FER1, DURL2 et VF2), provenant de filons minéralisés, indiquent des teneurs élevées en arsenic (respectivement 2 738, 2 307, 553 et 209 ppm) qui sont associées aux plus faibles teneurs de strontium observées. Ces filons, reliés à des accidents tectoniques et échantillonnés dans la formation du Bathonien supérieur-Callovien, pourraient très bien constituer la source potentielle d'enrichissement en arsenic des aquifères. Il est à noter que la teneur à partir de laquelle un sol est considéré comme contaminé en arsenic est de l'ordre de 80 ppm.

Pour l'échantillon indiquant la teneur en arsenic la plus élevée (BEND), une identification minéralogique par diffractométrie des rayons X a été menée afin de déterminer la phase minérale associée à l'arsenic (ann. 2). Malheureusement, les résultats indiquent que l'échantillon est essentiellement constitué de calcite. De très faibles quantités de quartz (< 1%) ont été détectées mais aucune autre phase à l'état d'infratrace n'a été observée. Le fait qu'une seule identification minéralogique ait été réalisée sur un échantillon dont la représentativité est questionnable rend difficile toute interprétation de ces résultats. Pour rechercher les phases minérales associées à l'arsenic, une étude plus détaillée sur plusieurs échantillons, incluant des déterminations par microscopie électronique à balayage (MEB), devrait être effectuée.

3.2. CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET CHIMIQUE D'UN PESTICIDE SOUPCONNE D'ETRE LA SOURCE DE CONTAMINATION EN ARSENIC

Un pesticide arsénié de composition inconnue (PEST), dont il ne reste que quelques sacs entreposés dans un grenier et susceptible d'avoir été déversé en grande quantité sur le terrain dans les années 1940, a été identifié par diffractométrie des rayons X (ann. 3). Il s'agit essentiellement d'arséniate de calcium ($\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})$) et en moindre pourcentage, $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$. La perte de poids de ce produit à 450°C est de 7,35 %. Cette composition implique environ une quantité de 350 g d'arsenic par kilogramme de produit. Les éléments traces ont été analysés par ICP. Les résultats sont reportés dans le tableau 2 et indiquent que le plomb, l'antimoine et le cuivre sont les éléments traces prédominants.

Localité	n° échantillon	Faciès	Li	Be	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Y	Nb
Durlinsdorf (carrière)	DURL1	Grande oolithe	< 10	< 2	21	20	24	< 5	23	14	21	77	26	< 20	< 20
Durlinsdorf (carrière)	DURL2	filon minéralisé	< 10	< 2	21	33	31	< 5	27	8	34	553	< 5	< 20	< 20
Bendorf	BEND	filon minéralisé	< 10	< 2	22	20	23	6	23	14	13	2738	< 5	< 20	< 20
Vieux-Ferrette	VF2	filon minéralisé	< 10	< 2	22	18	22	< 5	20	13	14	209	< 5	< 20	< 20
Ferrette	FER1	filon minéralisé	< 10	< 2	27	16	19	< 5	21	14	9	2307	< 5	< 20	< 20
Ferrette	FER2	Grande oolithe	< 10	< 2	19	14	22	< 5	22	12	9	59	25	< 20	< 20
Winkel (carrière)	WINK1	marnes et calcaires (j1b-2)	< 10	< 2	32	24	29	7	31	13	< 5	27	150	< 20	< 20
Ligsdorf	EICH3	marnes (j1b-2)	16	< 2	84	65	61	9	42	16	51	165	101	< 20	< 20
Lutter	LUT1	Grande oolithe	< 10	< 2	21	16	25	5	24	13	12	< 20	25	< 20	< 20
Sundgau 201	SUND1	Grande oolithe	< 10	< 2	32	31	27	5	28	13	< 5	28	96	< 20	< 20
Saboterie	SAB	oolithe ferrugineuse j3	10	< 2	39	123	96	11	39	40	32	129	211	< 20	< 20
Grenier	PEST	pesticide inconnu	< 10	< 2	16	12	23	9	31	304	26	> 50000	< 5	< 20	< 20

Localité	n° échantillon	Faciès	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	La	Ce	W	Pb	Bi	Zr
Durlinsdorf (carrière)	DURL1	Grande oolithe	< 5	< 0,2	< 2	< 10	< 10	< 10	< 20	23	< 10	< 10	< 10	120
Durlinsdorf (carrière)	DURL2	filon minéralisé	< 5	< 0,2	< 2	< 10	< 10	19	< 20	< 10	< 10	12	< 10	< 20
Bendorf	BEND	filon minéralisé	< 5	< 0,2	< 2	< 10	13	11	< 20	34	< 10	< 10	< 10	< 20
Vieux-Ferrette	VF2	filon minéralisé	< 5	< 0,2	< 2	< 10	< 10	15	< 20	26	< 10	< 10	< 10	32
Ferrette	FER1	filon minéralisé	< 5	< 0,2	2	< 10	22	36	< 20	38	< 10	< 10	< 10	< 20
Ferrette	FER2	Grande oolithe	< 5	< 0,2	< 2	< 10	10	< 10	< 20	26	< 10	< 10	< 10	48
Winkel (carrière)	WINK1	marnes et calcaires (j1b-2)	< 5	< 0,2	< 2	< 10	12	16	< 20	40	< 10	< 10	< 10	62
Ligsdorf	EICH3	marnes (j1b-2)	< 5	< 0,2	< 2	< 10	11	112	< 20	41	14	< 10	< 10	76
Lutter	LUT1	Grande oolithe	< 5	< 0,2	< 2	< 10	< 10	< 10	< 20	21	< 10	< 10	< 10	44
Sundgau 201	SUND1	Grande oolithe	< 5	< 0,2	< 2	< 10	< 10	11	< 20	25	< 10	< 10	< 10	54
Saboterie	SAB	oolithe ferrugineuse j3	< 5	< 0,2	< 2	< 10	11	37	< 20	< 10	< 10	20	11	< 20
Grenier	PEST	pesticide inconnu	< 5	< 0,2	< 2	< 10	439	32	< 20	< 10	< 10	969	18	< 20

Tabl. 2 - Analyses des éléments traces dans des échantillons de roche et dans un échantillon de pesticide (en ppm).

Tabl. 2 - Analyses des éléments traces dans des échantillons de roche et dans un échantillon de pesticide (en ppm).

Afin de vérifier si on pouvait écarter définitivement ce produit comme origine potentielle des concentrations élevées d'arsenic dissous observées, un test de lixiviation de 24 h suivi d'analyses d'arsenic, baryum, fluorure et phosphate dans la solution résiduelle a été mené.

Les résultats indiquent que pour 100 g de produit mis en suspension dans 1 litre d'eau déionisée, 139 mg d'arsenic, 145 mg de sulfate, 2,6 mg de phosphate, 0,04 mg de baryum et moins de 0,1 mg de fluorure passent en solution. Cette quantité d'arsenic dissoute est très supérieure à celles trouvées même pour les points d'eau les plus contaminés (6 mg/l). Elle supposerait un processus de dilution de l'eau en contact avec le pesticide relativement important. En revanche, la contamination induite par ce produit ne permettrait pas d'expliquer les valeurs anormalement élevées en sulfate, baryum, phosphate et fluorure observées pour les eaux les plus contaminées. En effet, les valeurs des rapports des concentrations (en mg/l) As/SO_4 , As/Ba , As/PO_4 et As/F d'une eau ayant été mise en contact avec le pesticide (0,96 - 3475 - 53 et > 1390 respectivement) sont beaucoup plus importantes que celles de l'eau du forage P, la plus contaminée en arsenic (0,07 - 149 - 0,9 et 5,7 respectivement).

D'autre part, d'après les résultats obtenus au cours du test de lixiviation, en supposant que l'eau en contact avec ce produit a un débit de 10 m³/h, on peut calculer qu'en 42 ans, environ 500 tonnes d'arsenic et par conséquent, 1400 tonnes de ce produit auraient été dissoutes. Le choix d'un débit supérieur aboutirait à des valeurs encore plus élevées. Ces quantités sont beaucoup trop importantes pour envisager une contamination des eaux par ce produit qui était apparemment livré dans des sacs et qui aurait dû être déversé à une profondeur relativement importante. Il faut noter que l'eau la plus contaminée est environ à 80 m de profondeur.

En conclusion, il n'existe aucun fondement pour affirmer que ce pesticide soit la source de la contamination en arsenic. Les résultats du test de lixiviation, comparés aux analyses chimiques des eaux les plus contaminées, montrent que ce produit ne peut pas être à l'origine de la contamination en arsenic.

3.3. ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX

3.3.1. Mesures géochimiques in situ

Les résultats des mesures géochimiques effectuées sur le terrain sont regroupés dans le tableau 3. A l'exception de l'eau du forage de Neuwiller, qui montre une valeur de conductivité plus élevée, les autres eaux indiquent des valeurs de conductivité qui suggèrent des minéralisations faibles à moyennes. Les valeurs de pH sont proches de la neutralité et comprises entre 6,58 et 8,16.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	T (°C)	débit (l/s)	cond. 20°C (µS/cm)	TDS (mg/l)	Eh (mV)	Oxyg. diss. (mg/l)	pH	alcal. (méq/l)	pCO2 calc. (atm)
BENDORF	04761X0006	AEP ROGGENBRUNNEN	10,1		588	353	171	3,9	7,08		
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	13,3		559	335	150	5,9	7,40	5,86	0,017
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	9,9		532	319	213	8,3	7,08	4,18	0,026
BETTLACH	04763X0010	AEP COMMUNALE	8,7		365	219	237	6,9	6,58		
BIEDERTHAL	04763X0013	AEP STOECKENMATTEN W A	9,6		489	285	239	8,2	7,49		
BOUXWILLER		SCE AMONT ETANG	7,9	1,33	545	337	304	10,0	7,36	5,55	0,018
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	9,3		663	399	-29	7,4	7,39	6,34	0,019
BOUXWILLER	04762X0042	FONTAINE	10,8		573	344	224	7,7	7,02		
COURTAVON	04761X0074	AEP FORAGE	9,0		590	354	282	9,4	6,86		
DURLINSDORF	04761X0008	AEP SUD DE PFIRTWEIER	9,5		679	404	259	4,4	7,28		
DURLINSDORF	04761X0083	AEP LD OBERE MATTEN PA	6,7		436	262	272	9,3	7,54	4,01	0,009
DURLINSDORF	04761X0090	Sce Therm.217 rue de Lucelle	15,3		578	345	218	7,6	7,03	5,58	0,038
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	10,8		540	324	257	9,5	7,28	4,95	0,019
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	14,8		750				6,85	5,67	0,059
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	12,3		664				7,20	5,44	0,025
FERRETTE	04762X0066	FOR. PRIVE C	15,9		657				7,30	5,41	0,020
KIFFIS	04762X0031	AEP AUF DER WEIDE	8,0		565	339	245	10,5	7,05		
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	9,3		515	309	195	10,0	7,40	4,93	0,014
LIEBSDORF	04761X0031	AEP TALMATTE AMONT EST	10,6	0,11	552	331	230	6,2	7,14		
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	9,3		670	404	208	9,2	7,30	6,44	0,024
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vorderer Birgm..	10,8		447	270	187	6,3	7,08	4,19	0,026
LIGSDORF	04762X0016	AEP BENDORF Col du Neuneich	6,7		517	310	237	9,0	7,37		
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vorderer Birgm..	9,5		473	284	190	7,3	7,27	4,58	0,018
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vorderer Birgm.	9,9		447	269	210	8,6	7,31	4,15	0,015
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	7,5	0,16	350	210	277	8,7	7,41	3,12	0,009
LIGSDORF		Sce près route entre Ligsdorf et Winkel	9,4		577	347	254	9,5	7,34	n.d.	
LINS DORF	04763X0008	AEP NORD EST	10,7		506	304	199	6,9	7,39		

Tabl. 3 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : mesures de terrain.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	T (°C)	débit (l/s)	cond. 20°C (µS/cm)	TDS (mg/l)	Eh (mV)	Oxyg. diss. (mg/l)	pH	alcal. (méq/l)	pCO2 calc. (atm)
LUCELLE	04761X0036	AEP SCHMELZIBRUNNEN	10,4		497	298	203	9,7	7,02		
LUCELLE	04761X0059	FONTAINE MAISON FAMILIALE	8,9		587	352	183	9,6	7,14		
LUCELLE	04762X0050	AEP STATION DE POMPAGE	8,3		531	319	205	9,8	7,05	5,41	0,036
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	9,6		500	300	263	5,8	7,34	4,67	0,016
LUTTER		eau superficielle emplacement forage	9,6		500	300	266	5,4	7,34	4,74	0,016
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	n.d.						6,68	4,90	0,076
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	8,9		565	342	254	3,5	7,52	5,45	0,012
OBERLARG	04761X0003	AEP COMMUNAL (NOUVELLE)	10,3	2,00	546	328	407	6,6	6,94		
OBERLARG	04761X0004	AEP RESERVOIR	11,3		560	335	331	4,6	7,09		
OBERLARG	04761X0078	AEP SEVERAN	11,1		538	323	110	7,3	7,00	5,61	0,041
OLTINGUE	04763X0025	AEP CHAPELLE ST MARTIN	10,6		603	362	216	7,3	6,69	6,12	0,092
RAEDERSDORF	04762X0026	AEP SOORMATT MILIEU S2	6,7	0,50	665	399	224	8,6	7,18		
RAEDERSDORF	04762X0062	RITTY	6,2		589	353	218	9,6	7,54	5,52	0,012
RIESPACH	04456X0016	AEP KOHLHOLTZ AMONT S2	8,2	0,33	491	295	270	8,0	7,28		
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	8,9	0,04	443	265	267	8,0	7,09	3,99	0,024
RIESPACH	04456X0038	AEP FAEHLIG	8,8	0,80	517	311	265	7,1	7,15		
SONDERSDORF	04762X0023	AEP LOECHLE AVAL	7,4		417	250	229	8,1	7,48		
SONDERSDORF	04762X0029	AEP OLTINGUE PIED GELSBERG	8,6		476	286	239	8,1	7,48	4,80	0,012
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	10,0		505	303	223	9,0	7,36	5,32	0,017
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	8,1		336	202	207	9,2	7,93	3,52	0,003
VIEUX-FERRETTE	04762X0040	FONTAINE RUE DE LA MONT.	13,3		550	330	131	6,5	7,51		
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	9,7		532	319	211	9,4	7,49	5,51	0,013
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	8,6		517	310	195	10,8	7,06	4,80	0,031
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	8,6		489	296	220	10,8	7,33	4,75	0,016
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	8,7	0,10	512	307	182	5,3	7,39	5,13	0,015
WOLSCHWILLER	04763X0011	AEP ROSENBRUNNEN OUEST	10,8		518	309	261	8,3	7,24		
WOLSCHWILLER	04763X0020	AEP OBERFELD	9,6		398	240	142	9,0	7,38		
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	32,4		1159	693	-147	0,3	7,50	7,39	0,017
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	10,7		387	232	129	8,9	8,16	2,64	0,001
STE MARIE AUX M.	03414X0002	Drain TIEFSTOLLEN	12,6		187	113	170		7,70	1,22	0,002

Tabl. 3 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : mesures de terrain (suite).

Les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) sont des données brutes et n'ont pas été corrigées du potentiel d'électrode. En effet, ce paramètre est reporté à titre indicatif et ne sera pas utilisé pour les calculs de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux car l'équilibre rédox n'est pas atteint dans les eaux naturelles. Il en résulte que la notion même de Eh n'a pas de sens dans ces solutions (Michard, 1989).

Le plus souvent, les potentiels mesurés dans ces eaux sont des potentiels mixtes causés par la présence de plusieurs couples rédox. Pour certains couples rapides comme $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, quand les deux termes sont présents en assez forte concentration, le potentiel mesuré correspond à celui que l'on peut calculer à partir des activités de Fe(II) et de Fe(III) en solution. Toutefois, cela n'implique pas que les différents couples rédox présents soient en équilibre entre eux.

A partir des données mesurées, on peut noter que les eaux des forages de Neuwiller et de Bouxwiller ($\text{Eh} < 0$) indiquent un caractère plus réducteur que celui des autres eaux ($\text{Eh} > 0$), qui appartiennent à un milieu oxygéné. En général, ces valeurs sont en bon accord avec celles en oxygène dissous.

Le calcul de la pression partielle de CO_2 à partir des valeurs de pH et d'alcalinité indique que les valeurs de ce paramètre sont très supérieures à la pression partielle de CO_2 à l'équilibre avec l'atmosphère ($3,2 \cdot 10^{-4}$ atm). La présence de sulfures (utilisation d'acétate de cadmium) n'a été détectée dans aucune source ni forage.

3.3.2. Analyses chimiques

Les techniques d'analyse (tabl. 4) sont toutes des méthodes couramment utilisées en analyse des eaux (plasma à couplage inductif + spectrométrie de masse : ICP-MS, spectrophotométrie par absorption atomique, chromatographie ionique, colorimétrie, titration).

Parmi les eaux échantillonnées, seules 25 ont fait l'objet d'analyses chimiques complètes. Les eaux sélectionnées sont principalement celles qui possèdent des concentrations d'arsenic total élevées (analyses d'arsenic réalisées préalablement) ainsi que quelques eaux qui vont servir de référence (eau de surface, eau thermominérale de Neuwiller, eau source Saint-Guillaume à Sainte-Marie-aux-Mines).

Les résultats des analyses chimiques (tabl. 5) montrent qu'à l'exception de l'eau thermominérale du forage de Neuwiller (bicarbonatée sodique), toutes les eaux sont essentiellement bicarbonatées calciques. Les autres espèces sont en très faible quantité. Seules, les concentrations de sulfates montrent quelques valeurs significatives, essentiellement pour l'eau des forages privés de Ferrette, l'eau du forage de Neuwiller et l'eau de la source Saint-Guillaume (Sainte-Marie-aux-Mines). L'eau du forage de Neuwiller possède la minéralisation la plus élevée (884 mg/l). Celles des autres eaux varient de 313 à 631 mg/l.

<i>Paramètres</i>	<i>Technique analytique</i>	<i>Erreur analytique</i>
<i>Analyses chimiques eaux</i>		
cations majeurs et éléments traces (K, Ca, Mg, SiO ₂ , Sr, Ba, Mn, Li, Al, Fe, B, As, Fe, Cd, Cu, Pb, Zn, Be, Cr, Co, Ni, Ag, Sb, Se)	ICP/MS	5 % (majeurs) - 10 % (traces)
anions (Cl, SO ₄ , NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , F)	chromatographie ionique	5 % (majeurs) - 10 % (traces)
alcalinité	titration au HCl (méthode de Gran)	5 %
NH ₄	chromatographie ionique	10 %
Na, Li	absorption atomique flamme	5-10 %
As, Cs, Rb	absorption atomique four	10 %
<i>Analyses isotopiques eaux</i>		
oxygène-18 (eau)	spectrométrie en phase gazeuse sur CO ₂ équilibré avec l'eau	0,1 ‰
deutérium (eau)	spectrométrie en phase gazeuse sur H ₂ équilibré avec l'eau	0,8 ‰
tritium (eau)	scintillation liquide après enrichissement électrolytique	1 UT
soufre-34 (sulfates)	spectrométrie en phase gazeuse après transformation BaSO ₄ ---> SO ₂	0,3 ‰

Tabl. 4 - Techniques analytiques utilisées.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	T (°C)	pH	salinité (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	13,3	7,40	505	2,4	0,9	102,9	5,6	358	3,4	23,7
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	9,9	7,08	395	1,5	0,7	100,2	3,2	255	3,9	18,1
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	9,3	7,39	588	1,0	1,2	130,6	5,1	387	8,8	33,7
DURLINSDORF	04761X0090	Sce Therm.217 rue de Lucelle	15,3	7,03	482	2,6	1,0	104,9	3,2	340	6,4	9,9
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	10,8	7,28	462	5,5	1,1	101,0	4,6	302	9,1	25,6
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	14,8	6,85	631	13,9	2,5	126,3	14,7	346	16,7	92,2
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	12,3	7,20	551	15,9	3,2	93,6	20,3	332	11,7	59,2
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	9,3	7,40	443	1,2	0,5	103,1	3,9	301	3,3	17,1
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	9,3	7,30	596	3,2	6,1	140,3	3,2	393	7,2	23,3
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	10,8	7,08	389	1,1	0,8	88,7	2,5	256	2,1	25,3
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	9,5	7,27	419	1,0	0,7	94,5	2,2	279	2,1	26,0
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	9,9	7,31	379	1,0	0,7	89,1	2,4	253	2,1	19,5
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	7,5	7,41	301	0,9	0,7	73,6	2,3	190	2,5	15,5
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	9,6	7,34	428	1,7	0,7	94,5	5,4	285	3,8	23,2
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	n.d.	6,68	432	2,9	0,8	90,3	5,5	299	4,8	17,8
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	8,9	7,52	492	7,6	1,6	101,7	10,7	333	6,9	20,2
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	8,9	7,09	376	3,9	0,9	83,3	4,0	243	10,9	8,7
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	10,0	7,36	465	1,8	0,8	103,4	3,9	325	3,3	14,5
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	8,1	7,93	313	0,7	0,4	71,4	0,7	215	4,0	10,0
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	9,7	7,49	483	1,5	0,8	110,8	2,7	336	3,7	14,0
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	8,6	7,06	438	1,0	0,5	100,6	1,6	293	6,0	13,3
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	8,6	7,33	415	1,1	0,5	97,8	1,6	290	3,1	11,6
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	8,7	7,39	452	0,9	0,6	105,8	1,7	313	2,8	18,9
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	32,4	7,50	884	213,7	8,2	28,7	6,8	451	79,6	75,1
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	10,7	8,16	322	8,1	2,3	45,3	17,7	161	3,3	71,4

Tabl. 5 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses chimiques.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	NO3 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	F (mg/l)	PO4 (mg/l)	As* (µg/l)	Ba (µg/l)	Sr (mg/l)	Li (mg/l)	B (µg/l)
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	2,1	6,0	0,2	< 0,1	366	48	0,17	< 0,01	150
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	7,6	5,1	< 0,1	< 0,1	< 10	9	0,13	< 0,01	113
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	< 0,1	20,7	< 0,1	< 0,1	68	55	0,22	< 0,01	173
DURLINSDORF	04761X0090	Sce Therm.217 rue de Lucelle	6,3	7,3	< 0,1	< 0,1	< 10	17	0,14	< 0,01	161
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	6,2	6,0	0,3	0,4	393	72	0,16	< 0,01	135
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	< 0,1	10,2	1,1	7,1	6263	42	0,35	0,04	81
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	< 0,1	11,0	1,8	2,0	2072	50	0,60	0,05	86
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	7,7	5,7	< 0,1	< 0,1	< 10	7	0,11	< 0,01	22
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	12,9	7,3	< 0,1	< 0,1	< 10	25	0,11	< 0,01	52
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	6,9	6,0	0,2	< 0,1	145	36	0,09	< 0,01	117
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	7,5	5,6	0,2	< 0,1	30	39	0,11	< 0,01	106
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	5,5	5,7	0,2	< 0,1	113	32	0,08	< 0,01	91
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	9,9	5,7	< 0,1	< 0,1	< 10	6	0,05	< 0,01	< 20
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	7,2	6,3	0,3	< 0,1	< 10	9	0,19	< 0,01	34
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	4,1	6,9	0,4	< 0,1	36	13	0,19	< 0,01	55
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	1,4	8,7	0,4	< 0,1	< 10	11	0,22	0,03	22
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	10,2	10,4	< 0,1	< 0,1	15	21	0,21	< 0,01	113
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	7,0	5,9	0,2	< 0,1	146	27	0,14	< 0,01	131
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	7,0	3,8	< 0,1	< 0,1	11	9	0,07	< 0,01	70
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	7,7	5,2	< 0,1	< 0,1	12	13	0,11	< 0,01	101
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	17,1	5,5	< 0,1	< 0,1	< 10	6	0,05	< 0,01	22
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	3,1	5,9	0,1	< 0,1	< 10	12	0,10	< 0,01	30
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	2,3	6,0	0,1	< 0,1	197	196	0,12	< 0,01	29
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	< 0,1	17,8	3,0	< 0,1	230	103	0,74	0,37	1020
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	< 0,1	8,6	0,4	3,7	3985	31	0,22	0,05	52

* Concentrations de As analysées par ICP/MS

Tabl. 5 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses chimiques (suite).

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	NH4 (mg/l)	NO2 (mg/l)	Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Mn (µg/l)	Cd (µg/l)	Cu (µg/l)	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	33
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	2	< 2	7
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	< 0,1	< 0,01	< 0,03	1,66	29	< 2	< 2	< 2	100
DURLINS DORF	04761X0090	Sce Therm.217 rue de Lucelle	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	8
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	7
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	< 0,1	< 0,01	< 0,03	0,05	82	< 2	< 2	< 2	< 5
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	18
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
LIEBS DORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	2	< 2	< 5
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	5
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	5
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	2	< 2	8
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	< 0,1	0,02	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	7
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	< 0,1	< 0,01	0,53	0,48	< 5	< 2	64	8	66
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	2	< 2	9
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	< 0,1	0,08	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	< 0,1	0,06	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	3	< 2	7
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	8
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	2	< 2	9
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	< 2	< 2	< 5
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	0,7	< 0,01	< 0,03	1,89	55	< 2	< 2	< 2	< 5
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	< 0,1	< 0,01	< 0,03	< 0,02	< 5	< 2	9	< 2	5

Tabl. 5 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses chimiques (suite).

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	Be (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Ni (µg/l)	Ag (µg/l)	Sb (µg/l)	Se (µg/l)	Cs (µg/l)	Rb (µg/l)
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	< 5	< 5	< 2	16	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
DURLINSDORF	04761X0090	Sce Therm.217 rue de Lucelle	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	11	< 10
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	< 5	< 5	< 2	8	< 5	< 5	< 5	< 5	11
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	< 5	8	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	< 5	7	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	< 5	< 5	< 2	23	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	< 5	< 5	< 2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	21
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	< 5	6	< 2	< 5	< 5	88	< 5	< 5	13

Tabl. 5 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses chimiques (suite).

3.3.3. Analyses isotopiques

Les techniques d'analyses utilisées sont reportées dans le tableau 4. Les analyses isotopiques de deutérium et d'oxygène-18 ont été réalisées sur 13 échantillons d'eau parmi les 25 qui ont été analysés chimiquement. Le soufre-34 a également été déterminé sur ces 13 échantillons. Néanmoins, comme la quantité d'eau échantillonnée sur le forage P était insuffisante pour cette analyse (prélèvement effectué hors campagne), un échantillon constitué de 50 % d'eau de ce forage et 50 % d'eau du forage H a été analysé. Seules 6 analyses de tritium ont été effectuées en utilisant un traitement préalable (enrichissement électrolytique). Tous les résultats sont présentés dans le tableau 6.

3.3.4. Analyses des concentrations d'arsenic et spéciation

Les concentrations d'arsenic total analysées par spectrophotométrie d'absorption atomique four (tabl. 1) et confirmées, pour certaines, par des analyses ICP-MS (tabl. 5), corroborent les résultats précédents (valeurs élevées à Bendorf, Ferrette, Vieux-Ferrette, Ligsdorf, Bouxwiller, Neuwiller, source Saint-Guillaume). On peut remarquer les très fortes concentrations d'arsenic déterminées pour l'eau des forages privés de Ferrette (en particulier, forage P), qui sont relativement profonds (environ 100 m) et sont en prolongation ou proches de la faille qui passe par la source du Lavoir de Ferrette.

Les différentes fractions d'arsenic résultant du traitement de séparation réalisé sur le terrain (As(III) et As(V)) ont été analysées par spectrophotométrie d'absorption atomique four. La bonne concordance de la somme As(III)+As(V) avec la concentration de As total a permis de valider ces données analytiques. Afin de confirmer les résultats obtenus à partir de la méthode de séparation As(III)/As(V) appliquée sur le terrain, une technique polarographique, qui permet d'identifier uniquement As(III), a été utilisée en laboratoire. Malheureusement, cette méthode a un seuil de détection relativement élevé (50 µg/l) et par conséquent, n'a pu être appliquée que sur les échantillons d'eau les plus riches en arsenic.

Des séparations As(III)/As(V) ont également été effectuées en laboratoire. Elles concernent des échantillons qui avaient déjà été traités sur le terrain et quelques échantillons non traités possédant des concentrations en arsenic supérieures à 10 µg/l. Les analyses d'arsenic correspondantes ont été réalisées par ICP/MS.

Pour la majorité des eaux (tabl. 7), les résultats analytiques indiquent que l'arsenic est sous sa forme As(V). Les résultats obtenus après traitement sur le terrain et en laboratoire sont comparables. Pour les quelques eaux qui ne contiennent pas 100 % de As(V), la présence d'arsénite As(III) a seulement été mise en évidence par polarographie dans l'eau thermominérale du forage de Neuwiller. Pour cette eau, la séparation réalisée sur le terrain et celle effectuée en laboratoire conduisent environ à la même valeur de concentration en As(III), qui est en très bon accord avec la valeur déterminée par polarographie. Ceci semble confirmer que l'oxydation de As(III) est relativement lente (Cherry *et al.*, 1979 ; Dherbonez *et al.*, 1994).

COMMUNE	INDICE	LIEU DIT	3 H en UT ± 3	dD ‰ vs SMOW ± 0,8	d18O ‰ vs SMOW ± 0,1	d34S ‰ vs CDT (SO4) ± 0,3
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	20	-66,6	-9,9	-14,5
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	n.a.	-63,0	-9,3	-6,3
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	22	-65,0	-9,6	-12,8
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	n.a.	-66,7	-9,7	n.a.
FERRETTE		50% FOR. P + 50% FOR. H	n.a.	n.a.	n.a.	-17,7
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	n.a.	-64,9	-9,6	-2,9
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	n.a.	-66,2	-9,7	-13,7
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	n.a.	-62,9	-9,2	0,7
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	23	-65,2	-9,6	-9,0
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	20	-64,2	-9,4	-1,0
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	20	-65,2	-9,7	-5,3
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	22	-65,0	-9,5	-12,3
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	n.a.	-73,0	-10,5	20,8
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	n.a.	-61,8	-9,2	0,7

n.a. : non analysé

Tabl. 6 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : analyses isotopiques.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	SEPAR. TERRAIN			ANAL. LABO		SEPAR. LABO			?
			As total (µg/l) SAA	As (V) terrain SAA	As (III) terrain SAA	As (III) polarographie	As total (µg/l) ICP/MS	As total (µg/l) ICP/MS	As (V) labo ICP/MS	As (III) labo ICP/MS	compl. org. As
BENDORF	04761X0006	AEP ROGGENBRUNNEN	14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	28	79%	?	?
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	429	100%	0%	n.a.	366	430	100%	0%	0%
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	12	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	25	n.a.	n.a.	?
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	73	48%	?	n.a.	68	76	57%	?	?
BOUXWILLER	04762X0042	FONTAINE	47	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	58	60%	?	?
DURLINSDORF	04761X0090	See Therm 217 rue de Lucelle	4	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	?
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	473	84%	?	n.d. (< 50 ppb)	393	464	100%	0%	0%
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	5960	n.a.	n.a.	n.d. (< 50 ppb)	6263	5848	100%	0%	0%
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	1860	n.a.	n.a.	n.d. (< 50 ppb)	2072	1898	91%	?	0%
FERRETTE	04762X0066	FOR. PRIVE C	1760	n.a.	n.a.	n.d. (< 50 ppb)	n.d.	1857	100%	0%	0%
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 2
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 2
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	152	100%	0%	n.a.	145	n.a.	n.a.	n.a.	0%
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	32	100%	0%	n.a.	30	n.a.	n.a.	n.a.	0%
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	120	82%	?	n.a.	113	122	100%	0%	0%
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hint. Birgm.	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	< 10	n.a.	n.a.	0%
LUTTER	04762X0028	AEP KALMS	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 2
LUTTER	04762X0060	AEP KALMS LD PLATTENW	35	n.a.	n.a.	n.a.	36	48	100%	0%	0%
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH & DURL.	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 2
RJESPACH	04456X0016	AEP KOHLHOLTZ AMONT S2	24	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	32	n.a.	n.a.	?
RJESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	15	76%	?	n.a.	15	n.a.	n.a.	n.a.	?
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	147	100%	0%	n.a.	146	n.a.	n.a.	n.a.	0%
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	12	100%	0%	n.a.	11	n.a.	n.a.	n.a.	0%
VIEUX-FERRETTE	04762X0040	FONTAINE RUE DE LA MONTAGNE	323	100%	0%	n.d. (< 50 ppb)	n.a.	313	51%	?	0%
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	12	100%	0%	n.a.	12	nd	n.a.	n.a.	0%
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	< 2	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 2
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	3	n.a.	n.a.	n.a.	< 10	n.a.	n.a.	n.a.	< 4
WINKEL	04761X0089	WINKEL REC F2	206	100%	0%	n.a.	197	n.a.	n.a.	n.a.	0%
NEUVILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR (forage thermes)	226	46%	54%	53%	230	238	49%	51%	0%
STE MARIE AUX M.	03414X0112	See St. GUILLAUME	3852	71%	?	n.d. (< 50 ppb)	3985	3828	99%	?	0%

n.a. : non analysé - n.d. : non détecté

Tabl. 7 - Aquifères contaminés par l'arsenic dans le Haut-Rhin : comparaison des analyses d'arsenic.

Il est probable que cette forme soit également présente dans l'échantillon d'eau de Bouxwiller (AEP lisière bois), qui provient d'un milieu plus réducteur que les autres échantillons. Pour les eaux provenant de Bendorf (AEP Roggenbrunnen), de la fontaine de Bouxwiller et de Riespach (S1), les faibles teneurs en As total rendent les mesures de spéciation plus imprécises. L'arsenic pourrait très bien être totalement sous sa forme As(V). La présence de complexes organiques peut être éventuellement envisagée.

Les calculs de spéciation réalisés avec le code géochimique EQ3NR (Wolery, 1995) indiquent que ce sont des complexes fluorés d'arsenic ($\text{AsO}_3\text{F}^{2-}$) qui sont majoritaires dans les eaux où les fluorures ont été détectés. Toutefois, l'existence de ces complexes est peu documentée dans la littérature et les données thermodynamiques, tirées de Wagman *et al.* (1982), sont questionnables. Compte tenu des valeurs de pH, les espèces prédominantes pourraient être alors HAsO_4^{2-} et/ou H_2AsO_4^- (fig. 2) dans la plupart des eaux.

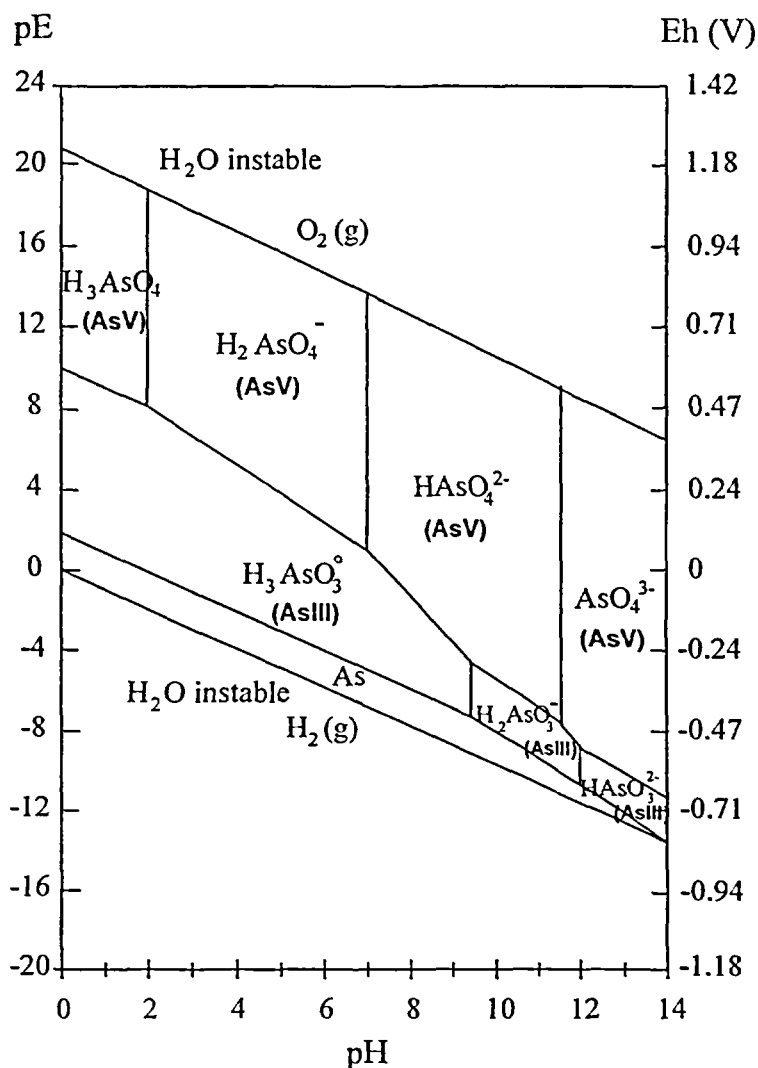


Fig. 2 - Spéciation de l'arsenic dans l'eau en fonction du pH et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) à 25°C (diagramme tiré de Montiel et Welté, 1996).

4. Interprétation des résultats

4.1. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET ORIGINE DES EAUX

4.1.1. Caractéristiques chimiques

Le diagramme de Piper (fig. 3) montre qu'à l'exception de l'eau thermominérale du forage de Neuwiller, toutes les eaux possèdent les mêmes caractéristiques chimiques, à savoir un faciès bicarbonaté calcique. Ce faciès est propre à des eaux superficielles circulant en milieu carbonaté (karst), qui acquièrent leur salinité essentiellement par dissolution de carbonates (principalement calcite) jusqu'à saturation avec ceux-ci. La figure 4a qui indique une bonne régression linéaire entre les concentrations de calcium et de bicarbonate, excepté pour le forage de Neuwiller, illustre ce processus. La figure 4b suggère que des minéraux carbonatés contenant du magnésium tels que la dolomite sont également dissous par la plupart des eaux. Les valeurs relativement élevées des pressions partielles de CO_2 , qui témoignent probablement d'un apport de ce gaz par la dégradation de matière organique, favorisent ce type de processus. Des calculs de saturation réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR (Wolery, 1995) confirment que la plupart des eaux sont à l'équilibre avec la calcite et la dolomite (tabl. 8). Ils montrent, par ailleurs, que ces eaux sont sous-saturées vis-à-vis du gypse, de l'anhydrite, de la strontianite, de la fluorite et sont saturées vis-à-vis de la calcédoine.

Dans le diagramme de Piper, l'eau de la source Saint-Guillaume, à Sainte-Marie-aux-Mines, et à un moindre degré, les eaux des forages profonds de Ferrette (P et H) se distinguent par des concentrations en magnésium, sodium et sulfates supérieures à celles des autres eaux. Ces concentrations plus élevées seront commentées dans le chapitre suivant.

Pour la plupart des eaux analysées, une régression linéaire est constatée entre les concentrations de sodium et celles de potassium (fig. 4c). Cette régression traduit très probablement l'existence d'un processus d'échange d'ions qui contrôle les concentrations en solution de ces deux espèces. Ceci suggère que les concentrations en ions échangeables des minéraux responsables de ces échanges sont peu variables.

En ce qui concerne l'eau thermominérale de Neuwiller, son faciès bicarbonaté sodique (fig. 3) et sa concentration en chlorure plus élevée, caractéristiques d'une eau plus profonde, indiquent qu'elle acquiert sa salinité de façon différente aux eaux des sources et des forages du secteur étudié. D'après l'étude réalisée par Pearson *et al.* (1991), sa concentration beaucoup plus élevée en sodium serait liée à un processus d'échange ionique calcium-sodium.

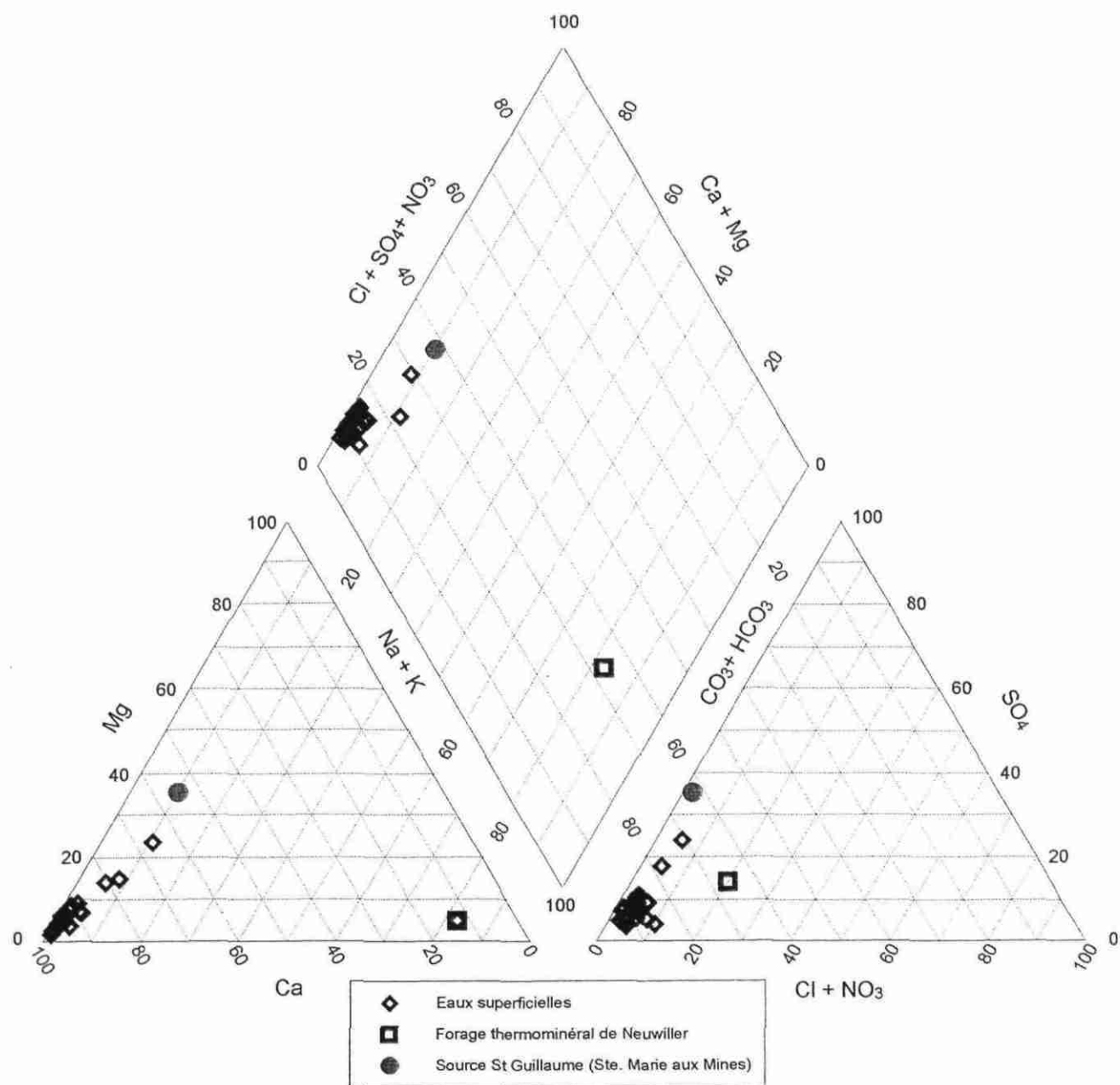


Fig. 3 - Diagramme de Piper.

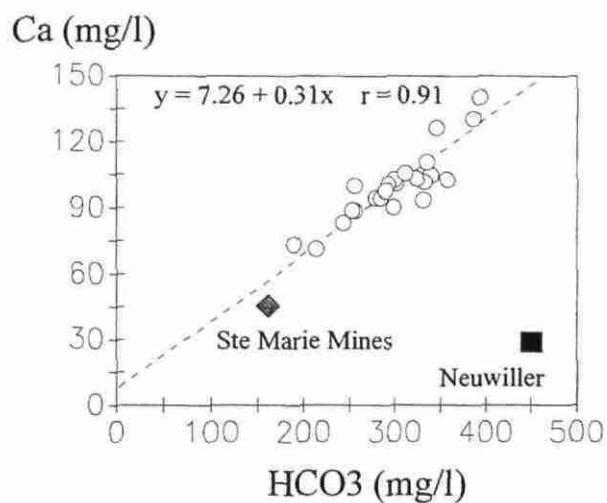


Fig. 4a - Concentrations en calcium en fonction de celles en bicarbonate.

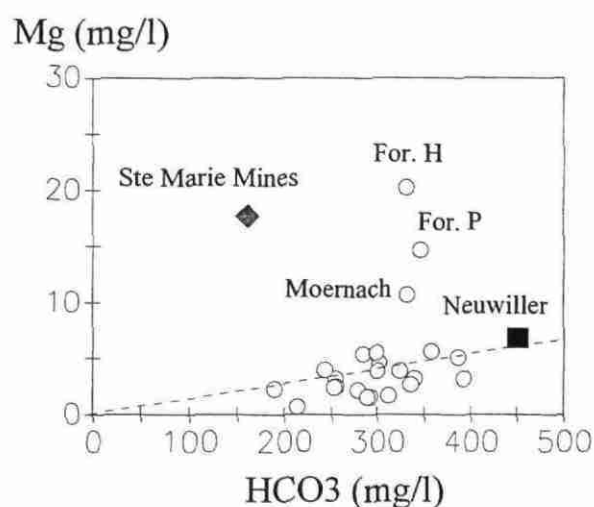


Fig. 4b - Concentrations en magnésium en fonction de celles en bicarbonate.

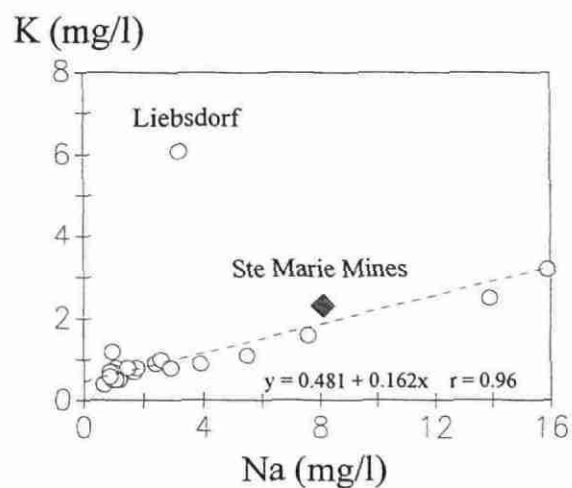


Fig. 4c - Concentrations en potassium en fonction de celles en sodium.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	calcédoine SiO ₂	calcite CaCO ₃	dolomite CaMg(CO ₃) ₂	dolomite dés. CaMg(CO ₃) ₂	strontianite SrCO ₃	withérite BaCO ₃	anhydrite CaSO ₄	gypse CaSO ₄ . 2H ₂ O	barytine BaSO ₄	celestite SrSO ₄	fluorite CaF ₂
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	-0,02 (sat)	0,32 (sat)	0,72	-0,91	-0,49	1,62	-2,41	-2,12	-0,28 (sat)	-4,06	-2,92
BENDORF	04761X0093	LA SABOTERIE Projet AEP	-0,01 (sat)	-0,18 (sat)	-0,54	-2,20	-1,07	0,48	-2,54	-2,21	-1,02	-4,27	-3,23
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	0,61	0,37 (sat)	0,65	-1,01	-0,39	1,73	-2,22	-1,89	-0,01 (sat)	-3,83	n d
DURLINSDORF	04761X0090	Sce Therm 217 rue de Lucelle	0,02 (sat)	-0,02 (sat)	-0,20 (sat)	-1,82	-0,87	0,76	-2,75	-2,48	-1,14	-4,51	n d
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	0,04 (sat)	0,09 (sat)	0,17 (sat)	-1,48	-0,72	1,64	-2,40	-2,08	-0,01 (sat)	-4,05	-2,46
FERRETTE	04762X0064	FOR. PRIVE P	0,17 (sat)	-0,17 (sat)	0,08 (sat)	-1,54	-0,79	0,95	-1,79	-1,51	0,17 (sat)	-3,24	-2,43
FERRETTE	04762X0065	FOR. PRIVE H	0,27 (sat)	-0,01 (sat)	0,66	-0,98	-0,23 (sat)	1,38	-2,1	-1,80	0,13 (sat)	-3,16	-1,02
KOESTLACH	04761X0085	AEP LD BERGMATTEN	0,05 (sat)	0,20 (sat)	0,29 (sat)	-1,37	-0,76	0,76	-2,57	-2,24	-1,16	-4,38	n d
LIEBSDORF	04761X0082	AEP FORAGE 1990 F2	0,16 (sat)	0,32 (sat)	0,31 (sat)	-1,35	-0,77	1,3	-2,36	-2,02	-0,52	-4,30	n d
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	0,04 (sat)	-0,22 (sat)	-0,66	-2,31	-1,22	1,08	-2,42	-2,11	-0,28 (sat)	-4,27	-2,77
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm..	0,04 (sat)	0,01 (sat)	-0,30	-1,96	-0,92	1,35	-2,41	-2,08	-0,21 (sat)	-4,18	-2,67
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm.	0,04 (sat)	-0,01 (sat)	-0,26 (sat)	-1,92	-1,05	1,26	-2,54	-2,21	-0,42	-4,43	-2,74
LIGSDORF	04762X0034	AEP FERRETTE Hlnt. Birgm	0,10 (sat)	-0,13 (sat)	-0,46	-2,13	-1,27	0,56	-2,71	-2,36	-1,17	-4,70	n d
LUTTER	04762X0028	AEP KALMIS	0,09 (sat)	0,08 (sat)	0,25 (sat)	-1,41	-0,60	0,79	-2,46	-2,13	-0,91	-4,00	-2,30
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW	0,13 (sat)	-0,56	-1,01	-2,67	-1,23	0,32 (sat)	-2,58	-2,25	-0,85	-4,10	-2,07
MOERNACH	04761X0092	AEP MOERNACH à DURL.	0,25 (sat)	0,33 (sat)	1,01	-0,65	-0,31 (sat)	1,12	-2,53	-2,19	-0,90	-4,03	-2,03
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL SI	0,33 (sat)	-0,28 (sat)	-0,56	-2,23	-0,86	0,86	-2,92	-2,58	-0,93	-4,35	n d
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST SI	0,05 (sat)	0,20 (sat)	0,30 (sat)	-1,36	-0,67	1,33	-2,64	-2,32	-0,66	-4,35	-2,72
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	-0,09 (sat)	0,43	0,17 (sat)	-1,50	-0,55	1,30	-2,91	-2,56	-1,19	-4,74	n d
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS	0,00 (sat)	0,36 (sat)	0,44	-1,22	-0,63	1,16	-2,63	-2,30	-0,99	-4,47	n d
WINKEL	04761X0017	AEP DE L'ILL	0,06 (sat)	-0,16 (sat)	-0,81	-2,48	-1,45	0,36	-2,68	-2,34	-1,30	-4,82	n d
WINKEL	04761X0080	WINKEL FORAGE AEP	0,09 (sat)	0,09 (sat)	-0,29 (sat)	-1,96	-0,88	0,93	-2,75	-2,41	-1,06	-4,57	-3,22
WINKEL	04761X0089	WINKEL. REC F2	0,09 (sat)	0,20 (sat)	-0,06 (sat)	-1,73	-0,72	2,22	-2,52	-2,18	0,35 (sat)	-4,30	-3,47
NEUWILLER	04764X0009	MARGUERITE COEUR	0,06 (sat)	0,19 (sat)	1,18	-0,31 (sat)	0,36 (sat)	2,02	-2,34	-2,24	0,29 (sat)	-2,94	-1,11
STE MARIE AUX M.	03414X0112	Sce St. GUILLAUME	0,19 (sat)	0,35 (sat)	1,61	-0,04 (sat)	0,02 (sat)	1,89	-2,27	-1,95	0,12 (sat)	-3,44	n d

n d : non déterminé

Tabl. 8 - Calculs des indices de saturation des eaux vis-à-vis de différents minéraux réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR.

4.1.2. Origine des eaux

a) Analyses isotopiques

Les compositions isotopiques en oxygène-18 et en deutérium des eaux étudiées suivent la droite mondiale des eaux météoriques (fig. 5a). L'eau thermominérale de Neuwiller se distingue des autres eaux par des valeurs plus négatives. Ces valeurs parmi les plus basses de la région (Pearson *et al.*, 1991) suggèrent que cette eau a été mise en place pendant une période plus froide et donc plus ancienne. Des analyses de tritium et de ^{14}C réalisées dans des études antérieures semblent confirmer cette hypothèse : l'eau du forage de Neuwiller ne contient pas de tritium en quantité déterminable et affiche une activité en ^{14}C très faible. Selon Pearson *et al.* (1991), le séjour souterrain de cette eau atteindrait au minimum une durée de 26000 ans.

Les valeurs en oxygène-18 et en deutérium des autres eaux sont proches les unes des autres (fig. 5a) et sont semblables aux valeurs déterminées pour les eaux de pluie et de surface régionales (Pearson *et al.*, 1991). Par conséquent, ces eaux sont issues en grande partie de l'infiltration de précipitations relativement récentes. Leurs teneurs en tritium, autour de 20-22 UT, révèlent un caractère jeune et une circulation rapide. D'après le diagramme représentant l'évolution des teneurs en tritium des précipitations mesurées en Suisse en fonction du temps (Pearson *et al.*, 1991) et compte tenu des variations saisonnières qui peuvent exister entre ces valeurs, on peut seulement estimer que le temps de résidence de ces eaux est inférieur à 15 ans. Par ailleurs, le fait que les teneurs en tritium peuvent résulter de processus de mélange avec des eaux plus profondes constitue une source d'incertitude supplémentaire. Néanmoins, comme le suggèrent les valeurs de Eh positives et les teneurs en oxygène dissous élevées, il est probable que ces eaux soient encore plus jeunes. D'après les relations estimées pour $\delta^{18}\text{O}$ et δD en fonction de l'altitude et de la température dans le nord-est du Jura et la Forêt-Noire (Pearson *et al.*, 1991), respectivement :

$$\delta^{18}\text{O} = -0,0019 z(\text{m}) - 8,6 / \delta\text{D} = -0,0156 z(\text{m}) - 59,7 \text{ et}$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0,38 T(^{\circ}\text{C}) - 12,6 / \delta\text{D} = 2,13 T(^{\circ}\text{C}) - 85,7,$$

les aires de recharge se trouveraient à des altitudes comprises entre 300 et 600 m et les températures d'infiltration varieraient de 7 à 11°C. Ces altitudes correspondent à celles que l'on peut trouver dans le plateau jurassique (valeurs comprises entre 400 et 700 m). D'après les diagrammes $\delta^{18}\text{O}$ -Cl et δD -Cl (fig. 5b et 5c) qui concernent des espèces conservés, autrement dit des espèces qui n'interagissent pas avec la roche, l'eau du forage privé de Ferrette (forage P) pourrait contenir une très faible proportion d'eau profonde du type de celle de Neuwiller. Il apparaît que l'eau de la source du Lavoir (Ferrette) est très probablement un mélange entre l'eau du forage P et une eau plus superficielle.

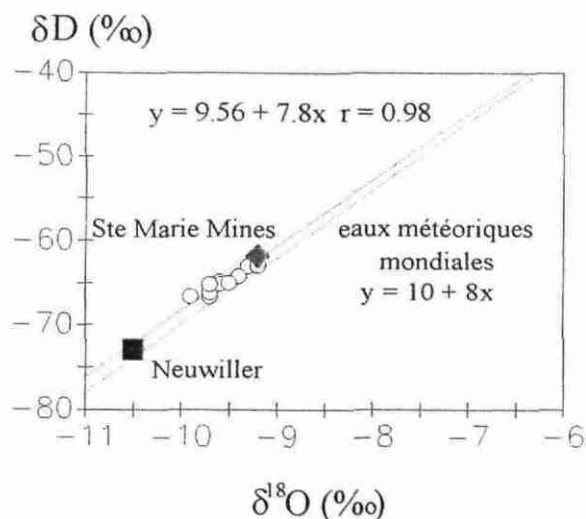


Fig. 5a - Teneurs en deutérium en fonction de celles en oxygène-18.

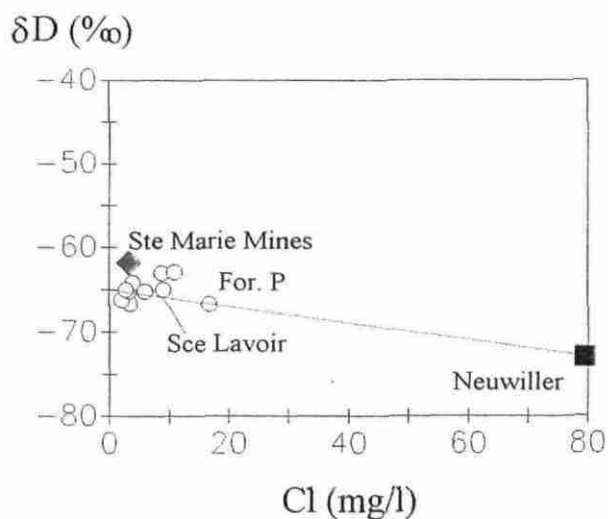


Fig. 5b - Teneurs en deutérium en fonction des concentrations en chlorure.

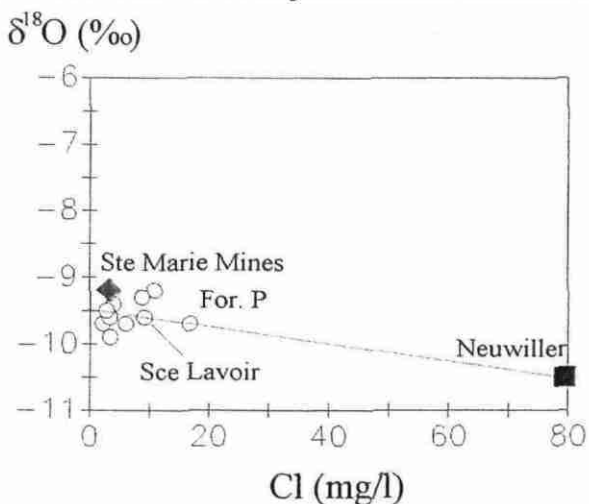


Fig. 5c - Teneurs en oxygène-18 en fonction des concentrations en chlorure.

b) Analyses chimiques

La figure 6, qui représente les concentrations d'arsenic en fonction de celles en chlorure (espèce conservée), indique des processus de mélange entre la plupart des eaux contaminées. Ainsi, dans la zone de Ferrette, l'eau de la source du Lavoir, celle de Bouxwiller et celle provenant du forage H seraient issues d'un processus de mélange entre une eau du type de celle du forage P, qui est la plus contaminée en arsenic, et des eaux plus superficielles ayant des concentrations en chlorure proches de celle de Bouxwiller. En ce qui concerne les eaux contaminées de Bendorf, Winkel et Ligsdorf, elles proviendraient d'un processus de mélange entre une eau du type de celle du forage H et des eaux plus superficielles dont la teneur en chlorure serait semblable à celle de l'eau de Ligsdorf la moins contaminée (04762X0020). Enfin, l'eau de Vieux Ferrette (AEP S1) résulterait d'un mélange entre l'eau de la source du Lavoir et celle de la source de Ligsdorf (04762X0021).

On peut remarquer que c'est l'une des eaux les plus profondes (forage P), qui est la plus exposée à la source de la contamination en arsenic. Les concentrations en arsenic des eaux de Lutter et de Riespach, qui sont moins élevées (inférieures à la norme de potabilité), ne semblent pas être issues de ce type de mélange (fig. 6). Le fait que l'arsenic suive le comportement des chlorures, qui est une espèce conservée, montre que cet élément, après sa mise en solution, n'interagit pas avec la roche (pas de phénomènes de précipitation ni d'adsorption). La figure 7, qui relie les variations des concentrations en arsenic dissous à Bendorf et à Ferrette (source du Lavoir) aux précipitations enregistrées à la station d'Altkirch de 1991 à 1997, est difficilement interprétable et ne permet pas de tirer de conclusions sur les relations qui pourraient exister entre ces deux paramètres.

4.2. ORIGINE NATURELLE DE L'ARSENIC

A partir du tableau 1, on observe dans le secteur d'étude que les fortes valeurs d'arsenic sont reliées à la formation géologique J3 (Bathonien supérieur et Callovien), soit au voisinage des sources, soit en profondeur dans les forages. Ces eaux sont proches de failles ou de chevauchements majeurs. Comme cela a été montré, les concentrations élevées d'arsenic en solution, dans le secteur d'étude, peuvent être expliquées par des processus de mélange entre une eau du type de celle du forage P (la plus contaminée) et des eaux plus superficielles dépourvues d'arsenic. L'eau du forage P présente également la concentration en sulfate la plus importante. Dans cette eau d'origine météorique, cette espèce peut être apportée soit par la dissolution de sulfates sédimentaires tels que le gypse ou l'anhydrite, soit par l'oxydation de minéraux sulfurés (pyrite, arsénopyrite, réalgar) ou par l'oxydation de soufre organique.

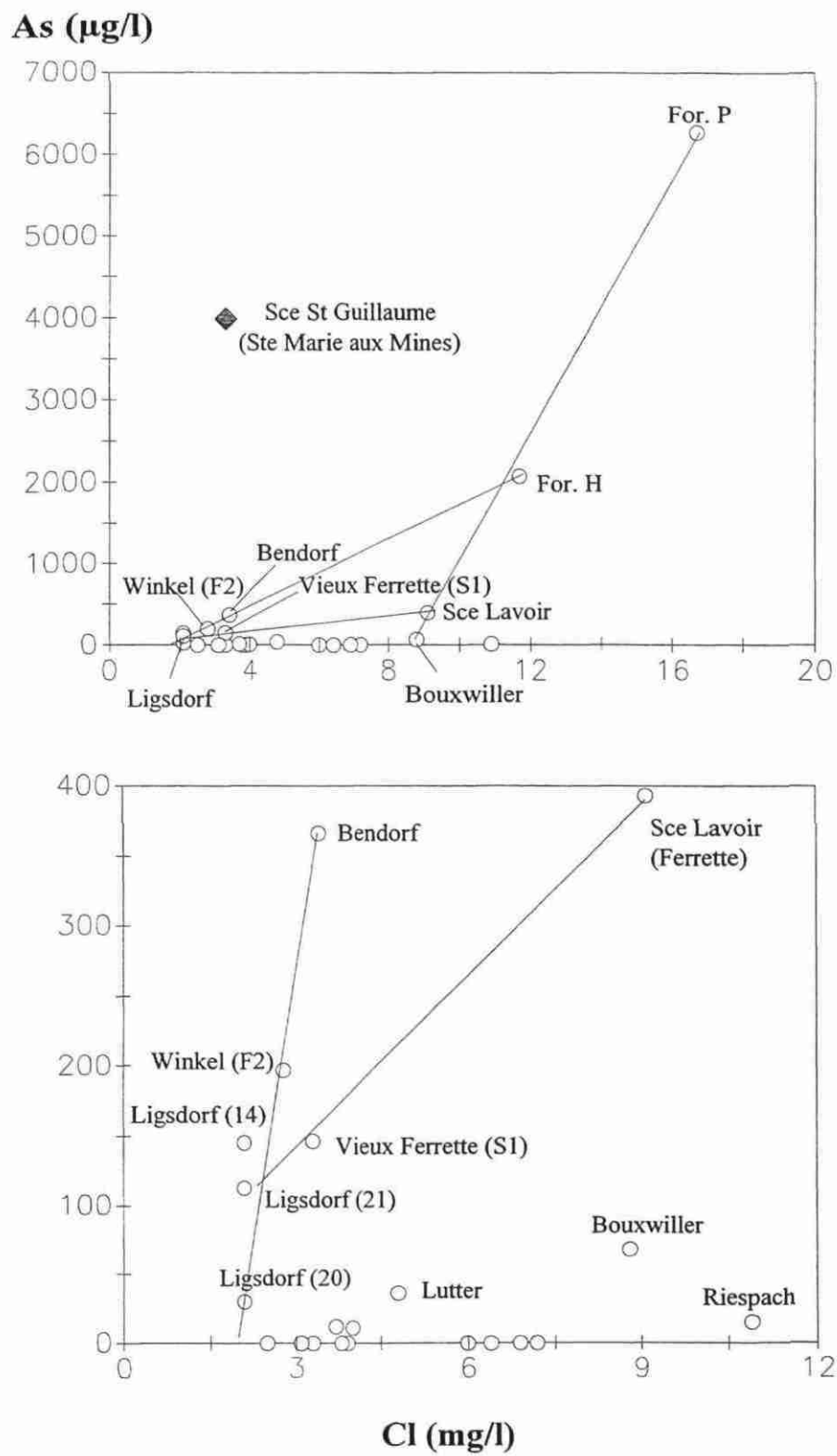


Fig. 6 - Concentrations en arsenic en fonction de celles en chlorure.

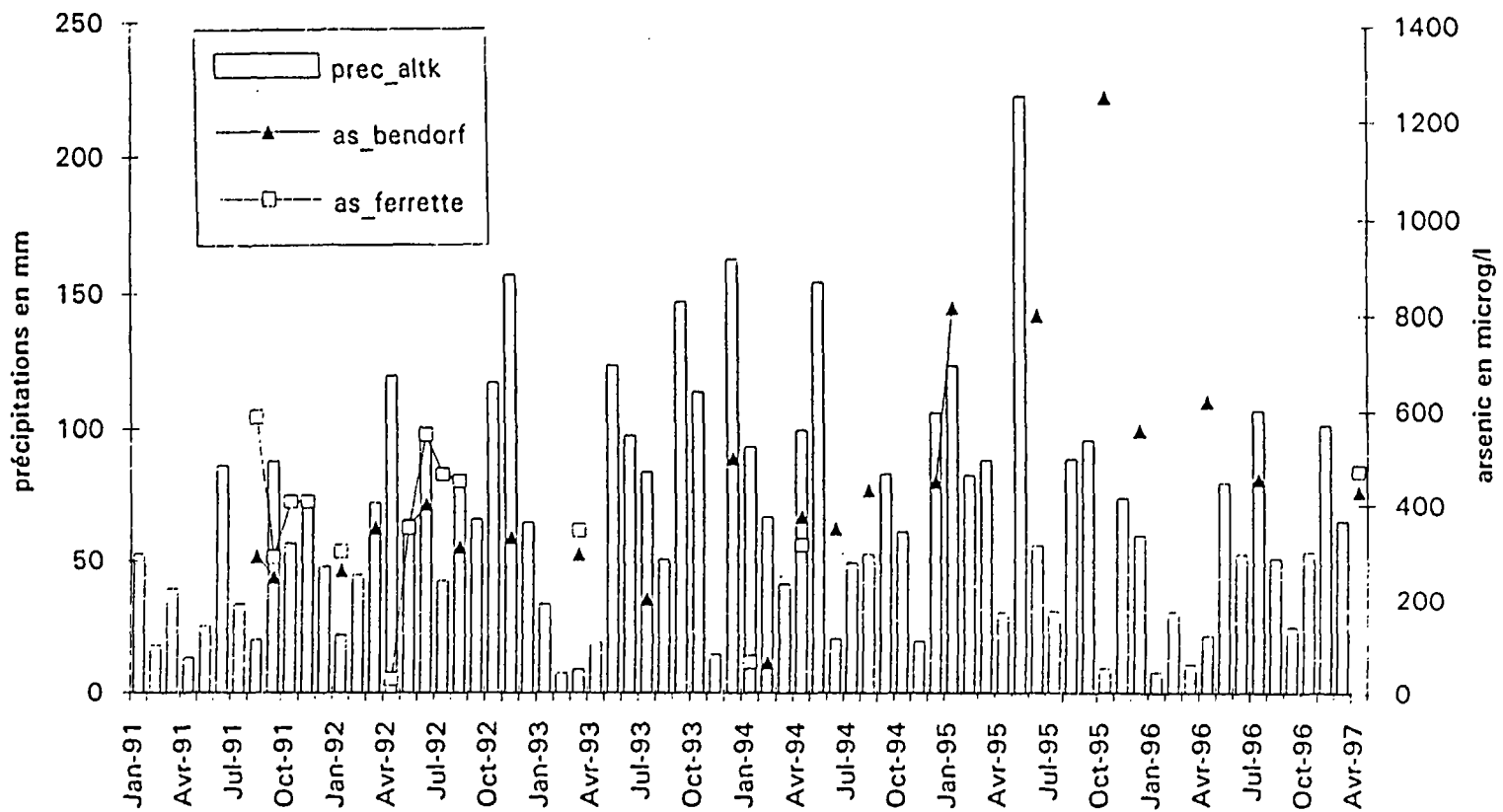
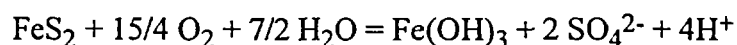


Fig. 7 - Précipitations à la station d'Altkirch et variations des concentrations en arsenic dissous à Bendorf et à Ferrette.

La sous-saturation de cette eau vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite permet d'envisager la dissolution de ces minéraux (tabl. 8). Cependant, les résultats isotopiques du soufre-34, déterminés sur le mélange à quantité égale d'eau des forages P et H, indiquent une valeur très négative (-17,7 ‰) incompatible avec la dissolution de ce type de minéraux. Par contre, cette valeur est caractéristique d'un processus d'oxydation de minéraux sulfurés ou de sulfures organiques (Ohmoto, 1986 ; Michelot, 1988 ; Pearson *et al.*, 1991).

Ce processus d'oxydation n'est pas très prononcé car la concentration de sulfate est peu élevée. Si l'oxydation concerne des minéraux, comme cela est très probable, une valeur en $\delta^{34}\text{S}$ aussi négative est plutôt représentative de minéraux sulfurés secondaires tels que des pyrites remaniées, des pyrites d'origine biogénique ou bien encore des sulfures qui proviennent de la réduction de sulfates (Krouse, 1980). Pour l'eau du forage P, il est fort probable que la pyrite, minéral qui peut posséder d'importantes teneurs en arsenic, soit la phase à l'origine des concentrations élevées en cet élément. L'oxydation de ce minéral provoque un apport de sulfates en solution, une acidification du milieu et généralement, la précipitation d'hydroxydes de fer suivant la réaction :



L'acidification du milieu peut être également responsable des concentrations plus élevées en magnésium et en sodium observées. En effet, ce phénomène favorise la dissolution de minéraux carbonatés tels que la calcite et la dolomite, qui apportent du calcium et du magnésium en solution. Ce calcium peut être ensuite échangé partiellement contre du sodium. La dissolution des minéraux carbonatés a pour effet d'augmenter et de tamponner le pH (consommation de protons H^+), ce qui expliquerait que la valeur mesurée de ce paramètre soit proche de la neutralité. Les hydroxydes de fer constituent d'excellents pièges à arsenic. De telles phases ont été observées dans les filons minéralisés des échantillons prélevés, qui indiquent des teneurs élevées en arsenic. Ces phases pourraient résulter d'un processus semblable à celui qui est à l'origine de la contamination actuelle en arsenic.

Les autres eaux contaminées en arsenic, à l'exception de l'eau thermominérale du forage de Neuwiller et de la source Saint-Guillaume, présentent également des valeurs en $\delta^{34}\text{S}$ négatives (tabl. 6). La valeur mesurée par Pearson *et al.* (1991) pour l'eau de la source thermale de Durlinsdorf (-4,8 ‰) est en bon accord avec ces valeurs. La figure 8, qui relie les teneurs isotopiques en $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates dissous aux concentrations d'arsenic, confirme les processus de mélange mis en évidence antérieurement pour les eaux contaminées. Plus les concentrations d'arsenic sont élevées, plus les teneurs en $\delta^{34}\text{S}$ diminuent suivant une courbe qui caractérise des processus de mélange entre une eau ayant oxydé de la pyrite et des eaux superficielles. Dans un autre contexte, cette courbe pourrait résulter également de différents degrés d'avancement de la réaction d'oxydation. Pour les eaux superficielles ayant des concentrations en arsenic et en sulfates faibles, les valeurs en $\delta^{34}\text{S}$ sont proches de 0 et correspondent probablement à une origine essentiellement atmosphérique des sulfates dissous (Michelot, 1988).

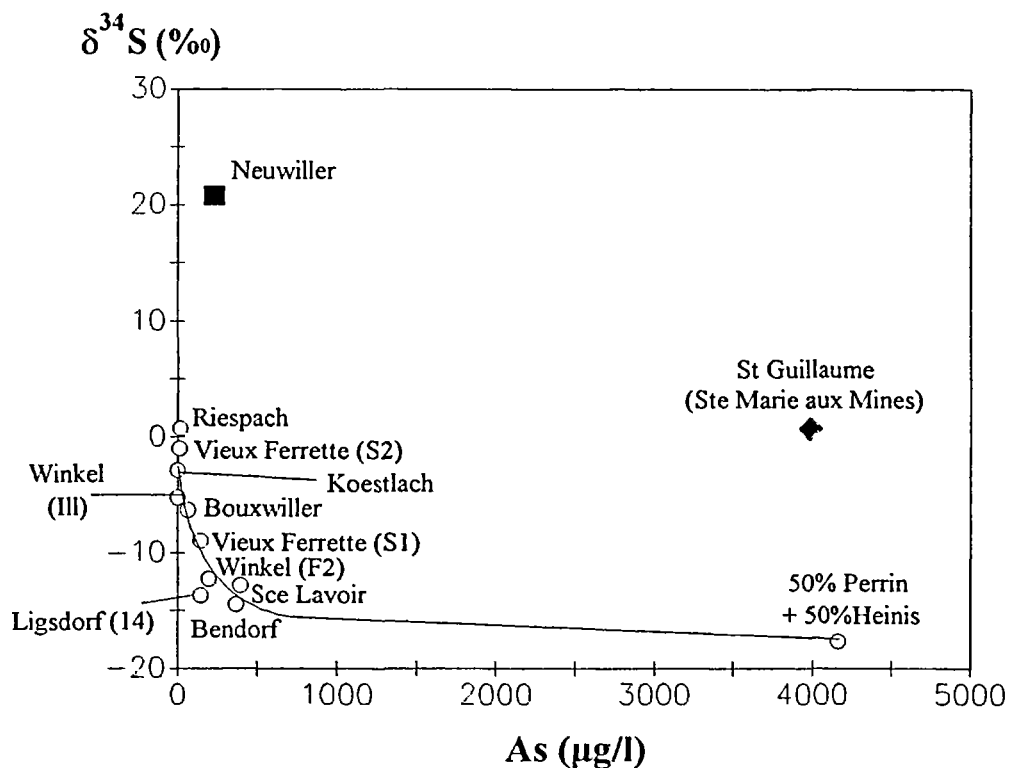


Fig. 8 - Teneurs isotopiques en soufre-34 en fonction des concentrations en arsenic.

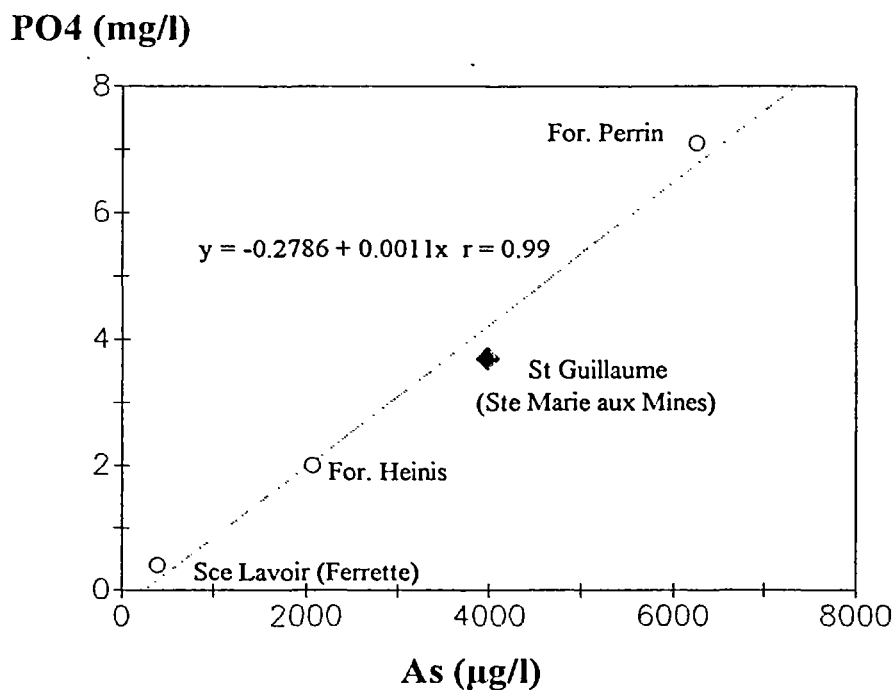


Fig. 9 - Concentrations en phosphate en fonction de celles en arsenic.

Les résultats isotopiques montrent que pour l'eau de la source Saint-Guillaume (Sainte-Marie-aux-Mines), la valeur de $\delta^{34}\text{S}$ est proche de zéro. Les concentrations de sulfates aqueux restent peu élevées. Ces valeurs témoignent d'un processus d'oxydation, comme dans la zone de Ferrette mais dans ce cas, les sulfures concernés sont des minéraux primaires (signature isotopique caractéristique ; Ohmoto, 1986 ; Michelot, 1988). Ces minéraux peuvent être de la pyrite, de l'arsénopyrite ou du réalgar. Cette eau indique également une concentration en antimoine beaucoup plus élevée que celle des eaux du secteur étudié.

En ce qui concerne l'eau thermominérale de Neuwiller, la valeur proche de 20 est caractéristique d'une dissolution de minéraux sulfatés d'origine marine tels que le gypse ou l'anhydrite. Cette valeur, le faciès chimique très différent de cette eau ainsi que sa concentration en arsenic plus faible que celle de l'eau de la source du Lavoir ou des trois forages privés de Ferrette, permettent de rejeter l'hypothèse d'un mélange d'eaux superficielles avec des arrivées d'eaux thermominérales régionales actuelles pour expliquer les concentrations élevées d'arsenic dissous.

Les calculs de saturation (tabl. 8) montrent que la plupart des eaux possédant des concentrations d'arsenic élevées sont à l'équilibre vis-à-vis de la barytine (BaSO_4). Elles sont, par contre, fortement sursaturées vis-à-vis de la withérite (BaCO_3), ce qui mène à s'interroger sur la validité des constantes thermodynamiques de ce minéral. La barytine contrôle, par conséquent, les concentrations de baryum en solution. La présence de ce minéral en milieu karstique en remplissage de fissures est connue et sa dissolution expliquerait l'enrichissement en baryum des eaux. Cependant, cet élément pourrait aussi provenir de la dissolution de carbonates de calcium. Dans ce cas, la barytine qui contrôle les concentrations de baryum aqueux serait un minéral néoformé. L'existence de concentrations de phosphate et de fluorure anormalement élevées dans l'eau du forage privé P favorise l'hypothèse de la présence et de la dissolution de barytine. En effet, en milieu carbonaté, dans des zones minéralisées résultant de circulations de fluides profonds antérieures, il n'est pas rare que ce minéral soit associé à la présence d'apatite (phosphate de calcium), de fluorite (CaF_2), de fluoro-apatite, de pyrite et/ou de sulfures d'arsenic. Pour les autres eaux contaminées, qui sont affectées par des processus de mélange, l'équilibre avec la barytine serait plutôt causé par la précipitation de celle-ci. Il faut rappeler que ce minéral est très peu soluble. La régression linéaire qui relie les concentrations de phosphate à celles d'arsenic (fig. 9) confirme que les eaux du forage H et de la source du Lavoir sont issues de processus de mélange mettant en jeu une eau du type de celle du forage P. Pour l'eau de la source Saint-Guillaume (Sainte-Marie-aux-Mines), l'équilibre avec la barytine ainsi que les fortes concentrations de fluorure et de phosphate confirment l'existence d'un processus similaire à celui qui a lieu dans la zone de Ferrette.

En conclusion, l'eau de l'aquifère capté par le forage P est l'eau qui présente la concentration en arsenic la plus élevée et donc celle qui est la plus exposée à la source de la contamination en arsenic dans les formations calcaires. Cette contamination serait associée à l'altération par oxydation d'une phase sulfurée secondaire telle que la pyrite,

qui serait présente dans des zones minéralisées résultant de circulations de fluides profonds antérieures, où barytine, fluorite, apatite ou fluoro-apatite coexisteraient. L'existence de filons minéralisés de remplissage, associés à des failles et riches en arsenic, a été mise en évidence dans la zone de Ferrette. Des processus de mélange entre une eau du type de celle du forage P et des eaux plus superficielles par le biais des nombreuses failles existantes permettraient la propagation de la contamination.

5. Recommandations et orientations

L'origine de la contamination étant naturelle et associée à des filons minéralisés, celle-ci ne pourra pas être éliminée. Une surveillance et un suivi analytique des teneurs en arsenic sont à poursuivre sur les points d'alimentation en eau potable dans le canton de Ferrette, plus particulièrement, dans les zones contaminées (Ferrette, Bendorf, Vieux-Ferrette, Winkel, Ligsdorf, Bouxwiller) et dans celles considérées à risque (communes proches du réseau de failles de la zone de Ferrette, Lutter, Riespach). Afin de mieux appréhender le phénomène qui provoque la fluctuation des concentrations d'arsenic dans le temps, des analyses de chlorure associées aux analyses de cet élément sont recommandées. Pour subvenir à l'alimentation en eau potable, deux solutions possibles sont envisageables : le traitement de l'eau avant consommation ou la recherche de ressources de substitution.

5.1. TRAITEMENT DE L'EAU

En ce qui concerne le traitement de l'eau, plusieurs procédés peuvent être utilisés (Montiel et Welté, 1996). La valence sous laquelle se trouve l'arsenic et le pH de la solution ont généralement une très grande importance sur les rendements. L'arsenic peut être éliminé par des traitements de coagulation des eaux par réaction avec des sels ferriques ou d'aluminium, les premiers sels donnant de meilleurs résultats. Il peut être aussi adsorbé soit sur des colonnes d'alumine active, soit sur des matériaux imprégnés de fer di- ou trivalent (sable, anthracite, alumine active, charbon actif). D'autres sels de métaux (cuivre, manganèse) ont été employés pour améliorer cette adsorption. Enfin, l'arsenic au contact de sulfures donne des composés insolubles. Une voie de rétention consiste à faire passer de l'eau riche en arsenic sur des colonnes de sulfures de fer.

Pour les forages privés de Ferrette où des concentrations d'arsenic très élevées ont été déterminées, aucun traitement n'est adapté. Pour la majorité des autres eaux, étant donné que celles-ci sont peu minéralisées (absence d'espèces gênantes), que leur pH est inférieur à 8 et que l'arsenic y est pentavalent, le traitement le plus approprié semble être l'élimination de l'arsenic par les sels ferriques (FeCl_3). Ce procédé de coagulation, qui fait intervenir différents phénomènes tels que l'adsorption, la formation d'une solution solide et la précipitation, est préférable à l'adsorption sur des colonnes qu'il faut généralement contrôler et régénérer fréquemment. Toutes les études publiées s'accordent pour conclure que l'arsenic pentavalent s'élimine très bien par les sels ferriques (à plus de 90%) alors que l'arsenic III n'est éliminé qu'à 50 ou 60 %. Ainsi, si l'arsenic n'est pas présent uniquement sous sa forme pentavalente, il est nécessaire d'oxyder préalablement la forme trivalente (utilisation de chlore ou de permanganate de potassium). La quantité de fer ajouté a une influence directe sur le rendement du traitement. Plus la quantité est importante, meilleure est l'élimination de l'arsenic pentavalent (Ramberg *et al.*, 1995).

La présence de manganèse en quantité importante (> 1500 ppm) permet d'augmenter les rendements (Montiel *et al.*, 1984).

De toute évidence, pour optimiser l'application de ce type de procédé, des essais de traitabilité en laboratoire et des essais de traitement sur pilote doivent être menés préalablement. Une première expérience de ce genre, financée par le Conseil Général du département du Haut-Rhin et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, a été réalisée à Bendorf en 1993 par la SOGEST et le CIRSEE de la Lyonnaise des Eaux-Dumez. Il avait été conclu que l'élimination de l'arsenic par traitement de coagulation directe sur filtre était effective. Une dose de 15 g/m^3 de chlorure ferrique avait permis de faire baisser une concentration de 410 µg/l d'arsenic à une valeur moyenne résiduelle de 15 µg/l dans l'eau filtrée. Cette valeur est inférieure à la norme française de potabilité actuelle mais est supérieure à la future norme européenne (10 µg/l). D'autre part, les essais effectués avaient montré que si l'on cherchait un résiduel minimum, il fallait augmenter fortement les doses de coagulant (30 à 60 g/m^3). L'adjuvant le mieux adapté avait été l'aginate au taux de 2 g/m^3 , ce qui permettait d'éviter la crevaision du filtre et donc, un relargage d'arsenic sur le réseau.

En ce qui concerne le traitement de l'arsenic à Ferrette, l'expérience en installation pilote réalisée cette année n'a pas été concluante. Le rendement est resté limité. Les résultats demandent à être analysés.

Ce type d'expériences suggère qu'avant d'entreprendre un traitement, qui risque d'être complexe, coûteux et dont le rendement peut s'avérer insuffisant (valeur encore supérieure à la norme exigée), il est préférable d'essayer de rechercher des ressources de substitution en eau naturellement potable. Il ne faut pas oublier qu'un traitement dont le rendement est de 95% , rendement considéré comme très bon, appliqué sur une eau contenant 400 µg/l laisse une teneur résiduelle en arsenic de 20 µg/l , qui est une valeur supérieure à la future norme européenne. Par ailleurs à Bendorf et à Ferrette, les concentrations d'arsenic fluctuent en fonction du temps et peuvent atteindre des maxima qui rendent le traitement moins efficace (95% de 1000 µg/l d'arsenic éliminé aboutissent à une valeur résiduelle de 50 µg/l).

5.2. RECHERCHE DE RESSOURCES DE SUBSTITUTION EN EAU POTABLE

Compte tenu de la situation de pollution des eaux par de l'arsenic entraînant l'impossibilité de leur utilisation pour l'alimentation en eau potable, il convient de trouver une autre ressource dans la zone du plateau jurassique de Ferrette. Le tableau 9 présente l'état actuel d'exploitation des captages AEP possédant des concentrations en arsenic supérieures à 10 µg/l .

La nouvelle ressource se substituerait, dans un premier temps, aux captages de Ferrette et de Bendorf contaminés au-delà de 50 µg/l . Ultérieurement, en fonction de l'évolution des normes, d'autres points de captage, indiquant aujourd'hui des concentrations comprises entre 10 et 50 µg/l , seraient concernés.

COMMUNE	INDICE	LIEU-DIT	AS TOTAL (µg/l)	STATUS
BENDORF	04761X0070	AEP BREITENFELD	429	arrêté
BOUXWILLER	04762X0054	AEP EX SGE S2 LISIERE BOIS BO	73	non utilisé
FERRETTE	04761X0005	AEP SOURCE DU LAVOIR	473	arrêté
LIGSDORF	04762X0014	AEP LIGSDORF Vordere Birgm. (milieu)	152	arrêté
LIGSDORF	04762X0020	AEP LIGSDORF Vordere Birgm. (ouest)	32	utilisé
LIGSDORF	04762X0021	AEP LIGSDORF Vordere Birgm. (est)	119	arrêté
LUTTER	04762X0060	AEP KALMIS LD PLATTENW (collecteur)	35	utilisé
RIESPACH	04456X0016	AEP KOHLHOLTZ AMONT S2	24	utilisé
RIESPACH	04456X0017	AEP KOHLHOLTZ AVAL S1	15	utilisé
VIEUX-FERRETTE	04762X0001	AEP OUEST S1	147	abandonné
VIEUX-FERRETTE	04762X0002	AEP S2	12	utilisé
VIEUX-FERRETTE	04762X0061	PARC 16/3 SECT C HERRS (forage)	12	utilisé (également pour Ferrette)

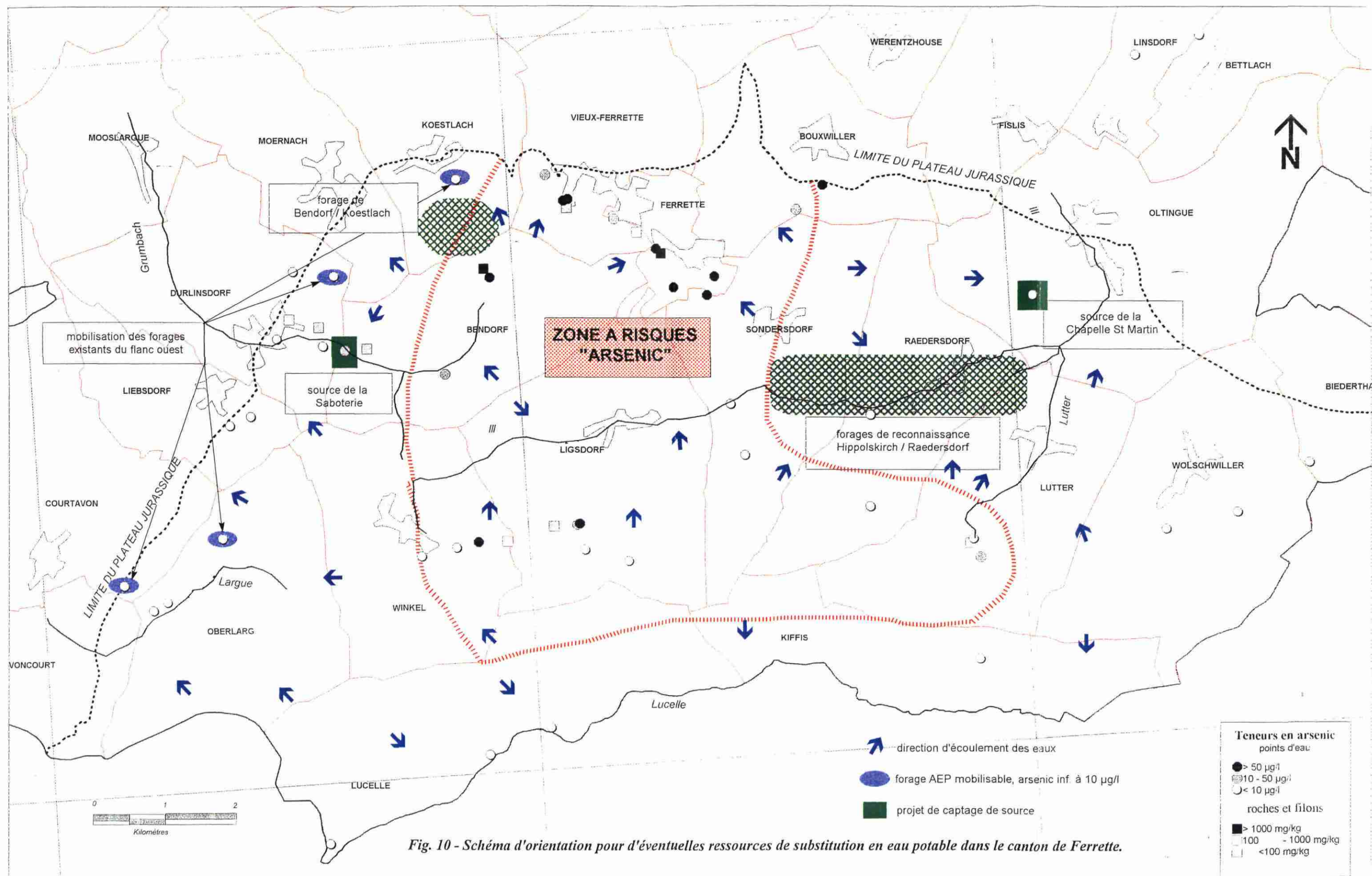
Tabl. 9 - Etat d'exploitation actuel des captages AEP qui indiquent des concentrations en arsenic dissous supérieures à 10 µg/l.

Dans les systèmes aquifères du plateau jurassique, la configuration hydrogéologique et les localisations des captages contaminés par l'arsenic impliquent la mise à l'écart de tout le secteur central pour la création d'un nouveau captage, particulièrement dans la formation du Jurassique inférieur à proximité de failles (voir planche 1, toute la zone s'étendant de Ferrette à Winkel). Eventuellement, des captages de sources dans les formations du Jurassique supérieur peuvent être envisagés mais ils seraient vraisemblablement à faible débit et vulnérables à des pollutions superficielles d'origine anthropique.

En périphérie à cette zone à risque, se situe un domaine à moindre risque de présence d'arsenic (fig. 10).

- A l'ouest vers l'exutoire de Durlinsdorf, la **source de la Saboterie**, connue par la commune de Bendorf, pourrait être captée. Mais il convient de signaler que sa teneur en arsenic est de 11,6 µg/l et qu'elle se situe dans le contexte des formations calcaires faillées montrant de l'arsenic dans les filons minéralisés (DURL2). Par ailleurs, au cours de l'année 1997, cette source a montré un faible débit d'étiage (3 l/s).
- Entre Bendorf et Koestlach, **un projet de forage** paraît très risqué : il allierait éventuellement des teneurs appréciables d'arsenic à un faible débit. L'emplacement envisagé est en dehors des failles et le forage traverserait le Bathonien et le Callovien.
- Les **forages existants** de Koestlach, Moernach, Durlinsdorf, Courtavon et Oberlarg alimentant toute la frange ouest du plateau pourraient globalement constituer une ressource mobilisable pour d'éventuels renforcements proches, s'il s'avérait que leur débit d'exploitation pouvait être augmenté, sans influence sur leurs concentrations en arsenic.
- A l'est de la zone à risques et dans l'axe de l'anticlinal, occupé par la vallée de l'Ill, deux mobilisations de ressources peuvent être envisagées :
 - à Oltingue, la **source de la Chapelle Saint-Martin**, qui avait été anciennement captée par la commune, pourrait offrir un débit d'environ 20 l/s, le taux d'arsenic étant de 2,8 µg/l. Historiquement, cette source aurait été abandonnée pour des raisons d'altimétrie de l'émergence et des distributions ;
 - **un forage entre Hippolskirch et Raedersdorf** (aval) pourrait être une ressource intéressante ; en effet, on se situe dans la vallée de l'Ill et il est fortement probant qu'un important sous-écoulement dans les calcaires (karst) accompagne l'écoulement de surface. Des sondages de reconnaissance jusqu'à 200 m de profondeur devraient être programmés. Il est possible de viser une ressource dans les calcaires du Jurassique supérieur étroitement liée au sous-écoulement de l'Ill. Par ailleurs, une ressource dans la Grande Oolithe (Bajocien, Jurassique inférieur) peut constituer un autre objectif de recherche.

Dans ces aquifères calcaires vulnérables et à circulation rapide, les eaux souterraines sont mal filtrées et il est nécessaire de traiter leur turbidité ainsi que leur bactériologie.



Conclusion

A partir des analyses chimiques et isotopiques des eaux contaminées, il apparaît que l'origine de l'arsenic est naturelle et que cet élément est essentiellement sous forme de As(V), forme moins toxique et plus facile à piéger lors de traitement par floculation avec des sels ferriques. Il a également été montré que les eaux possédant des concentrations élevées en arsenic appartiennent à la formation du Bathonien supérieur-Callovien. L'eau relativement profonde (environ 80 m), captée par le forage P, à Ferrette, est la plus exposée à la source de la contamination en arsenic. Cette contamination se propage à partir d'une eau du type de celle du forage P par le biais des failles et de processus de mélange avec des eaux plus superficielles. La zone la plus affectée par la contamination est celle de Ferrette (Ferrette, Bendorf, Vieux-Ferrette, Winkel, Ligsdorf, Bouxwiller), là où le réseau de failles en contact avec la formation du Bathonien supérieur-Callovien est relativement dense.

Le mécanisme de mise en solution de l'arsenic semble être l'altération par oxydation d'un minéral sulfuré secondaire, qui est très probablement de la pyrite. Cette pyrite associée à des minéraux tels que la barytine, la fluorite et l'apatite serait présente dans des filons minéralisés de remplissage, résultant d'anciennes circulations de fluides profonds. Des filons minéralisés de remplissage échantillonnés au cours de cette étude ont indiqué des teneurs en arsenic très importantes et leur minéralogie pourrait avoir été affectée par le même type de processus qui est, actuellement, responsable de la contamination en arsenic. Il serait intéressant de réaliser des études plus fines sur ces échantillons (analyse chimique des majeurs, détermination de la minéralogie par diffractométrie des rayons X, microscopie électronique à balayage) afin de mieux cerner les minéraux à l'origine de la contamination en arsenic.

L'hypothèse d'éventuelles venues d'eaux thermominérales locales pour expliquer les concentrations élevées d'arsenic peut être totalement écartée. A Sainte-Marie-aux-Mines, l'eau de la source Saint-Guillaume qui indique également des concentrations élevées en arsenic, est soumise à un processus semblable à celui qui a lieu dans la zone de Ferrette mais dans ce cas, il s'agit d'oxydation de minéraux sulfurés primaires tels que pyrite, arsénopyrite ou réalgar.

Les concentrations en arsenic étant élevées et variables dans le temps, l'élimination de cet élément suppose des traitements complexes et relativement coûteux, qui doivent aboutir à des rendements proches de 100 %. Par conséquent, il semble préférable de s'orienter vers la recherche de ressources de substitution en eau naturellement potable. La formation du Bathonien supérieur-Callovien ainsi que la zone faillée de Ferrette sont déconseillées.

Une source, dite de la Saboterie, constitue une possibilité de ressource de substitution en eau sur le territoire de Bendorf. Un débit d'étiage de 3 l/s et un traitement sanitaire allié à une teneur de 11,6 µg/l d'arsenic limitent toutefois l'intérêt de cette ressource. Un forage dans le secteur de Bendorf-Koestlach paraîtrait risqué.

Par contre, à Oltingue dans la partie est du canton de Ferrette, une source, dite de la Chapelle-Saint-Martin, anciennement captée, serait en mesure d'apporter de l'ordre de 20 l/s d'une eau issue du Jurassique supérieur. Dans cette même vallée de l'Ill, des forages de reconnaissance pourraient être entrepris, entre Hippolskirch et Raedersdorf, pour investiguer et par la suite, capter les eaux souterraines de la Grande Oolithe et par défaut, du Jurassique supérieur.

Bibliographie

- Cherry J.A., Shaikh A.U., Tallman D.E., Nicholson R.V. (1979) - Arsenic species as an indicator of redox conditions in groundwater. *In* W. Back and D.A. Stephenson (Guest Editors), Contemporary Hydrogeology - The George Burke Maxey Memorial volume. *J. Hydrol.*, 43, p. 373-392 (special issue).
- Criaud A., Fouillac C. (1989) - The distribution of arsenic (III) and arsenic (V) in geothermal waters : Examples from the Massif Central of France, the Island of Dominica in the Leeward Islands of the Caribbean, the Valles Caldera of New Mexico, U.S.A., and southwest Bulgaria. *Chem. Geol.*, 76, p. 259-269.
- Daessle M. (1991) - Recherche de l'origine de l'arsenic dans les eaux souterraines du Canton de Ferrette (68). Rapport BRGM R 33710 - ALS 4S 91.
- Dherbonez B., Nauleau F., Casteran P., Rouyet J. (1994) - Potabilisation d'une eau souterraine contenant de l'arsenic. Cas de Créon d'Armagnac. AGHTM "la remise à niveau des stations de traitement d'eau potable", l'Union.
- Dudermel-Le Cornec F. (1992) - Couplage de la technique d'injection en flux continu avec la spectrométrie d'émission atomique à plasma induit par haute fréquence (FIA/ICP AES). Application à la préconisation et à la spéciation d'éléments traces. Thèse de l'Université de Strasbourg, 188 p.
- Ficklin W.H. (1983) - Separation of arsenic (III) and arsenic (V) in ground waters by ion-exchange. *Talanta*, vol. 30, n° 5, p. 371-373.
- Krouse H.R. (1980) - Sulphur isotopes in our environment. *In* Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, vol. 1, Fritz P. and Fontes J.-Ch. Eds. Elsevier, p. 435-471.
- Michard G. (1989) - Equilibres chimiques dans les eaux naturelles. Editions Publisud, 357 p.
- Michelot J.L. (1988) - Hydrologie isotopique des circulations lentes en milieu cristallin fracturé : essai méthodologique. Thèse de l'Université de Paris-sud (Orsay), 164 p.
- Montiel A., Welté B., Colmont M. (1984) - Influence du coagulant lors de l'élimination des micropolluants minéraux par les traitements de clarification. *J. Français Hydrol.*, vol. 15, n°2, p. 119-129.

- Montiel A., Welté B. (1996) - Elimination de l'arsenic dans les eaux destinées à la consommation humaine. Communication présentée au séminaire spécialisé AIDE "Micropolluants d'origine naturelle - arsenic et autres composés", Vienne, 6 et 7 mai 1996, 19 p.
- Ohmoto H. (1986) - Stable isotope geochemistry of ore deposits. *In* Stable isotopes in high temperature geological processes, J.W. Valley, H.P. Taylor Jr. and J.R. O'Neil Editors, p. 491-556.
- Pearson Jr., F.J., Balderer W., Loosli H.H., Lehmann B.E., Matter A., Peters Tj., Schmassmann H., Gautschi A. (1991) - Applied isotope hydrogeology - A case study in northern Switzerland. NAGRA technical report 88-01, 439 p.
- Wagman D.D., Evans W.H., Parker V.B., Schumm R.H., Halow I., Bailey S.M., Churney K.L., Nuttall R.L. (1982) - The NBS tables of chemical thermodynamic properties, selected values for inorganic and c1 and c2 organic substances in SI units: *J. Phys. Chem. Ref. Data*, V. 11, supp. 2, 392 p.
- Wolery T.J. (1995) - EQ3NR, A computer program for geochemical aqueous speciation solubility. Calculations : Theoretical manual, User's guide and related documentation (version 7.2b). Lawrence Livermore National Laboratory, 246 p.

ANNEXE 1

Analyses chimiques des eaux du secteur d'étude tirées de la Banque des Données du Sous-Sol (BSS)

NUMERO DU POINT	DESIGNATION	DATE	PH Unites p	COND Micro S.	FE mg/l	MN mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	CL mg/l	CA mg/l	MG mg/l	NA mg/l	K mg/l	F microg/l	AL microg/l	AS microg/l
476 1	3/0 AEP COMMUNAL (NOUVELLE) OBERLARG	23/08/76	7.15	560.00	0.03	-	-	15.00	14.00	-	-	-	-	-	-	-
		27/05/80	7.80	486.62	0.03	0.00	129.00	21.70	9.00	112.00	3.40	2.80	1.17	-	-	-
476 1	4/0 AEP RESERVOIR OBERLARG	16/06/80	7.35	504.00	0.00	-	-	21.00	9.00	-	-	5.50	1.40	-	-	-
		25/03/81	7.51	468.00	0.02	0.00	132.00	25.00	8.00	101.60	10.10	5.50	1.60	170.00	60.00	-
		25/06/81	7.26	481.00	0.00	-	-	24.00	6.80	-	-	4.40	1.40	-	-	-
		25/03/82	7.30	508.00	0.04	0.00	127.00	25.00	6.20	108.40	6.00	4.70	1.80	250.00	30.00	-
		16/06/82	7.20	498.00	0.00	-	-	25.00	4.00	-	-	5.00	2.00	-	-	-
		24/03/83	7.43	488.00	0.02	0.00	124.00	28.00	5.20	107.20	6.20	5.50	3.70	450.00	40.00	-
		15/06/83	7.22	464.00	0.00	-	-	26.00	3.00	-	-	4.50	2.80	-	-	-
		13/03/84	7.30	484.00	0.01	-	117.00	16.00	2.00	105.00	5.30	4.50	1.70	300.00	110.00	-
		26/06/84	7.36	490.00	0.00	-	-	24.00	5.00	-	-	5.00	2.60	-	-	-
		20/03/85	7.29	501.00	0.01	0.00	122.00	25.00	8.00	106.40	7.20	5.00	1.00	-	-	-
		20/06/85	7.20	496.03	0.00	-	-	21.50	5.00	-	-	4.00	0.80	-	-	-
		31/07/86	7.30	480.77	0.02	-	-	24.90	9.00	-	-	3.85	1.00	-	-	-
		18/02/87	7.35	501.25	0.01	-	138.00	17.30	11.00	115.00	6.00	5.25	1.10	-	10.00	-
		15/06/87	7.25	505.05	0.01	-	-	21.20	10.00	-	-	4.00	1.05	-	-	-
		14/04/88	7.25	473.93	0.01	0.01	135.00	28.50	7.00	113.40	5.45	3.90	1.85	-	-	-
		20/04/89	7.40	470.59	0.01	0.01	111.00	26.20	7.00	107.40	5.30	4.70	1.25	-	-	-
476 1	5/0 NEUE MATTEN OBERLARG	25/08/76	7.18	500.00	0.03	-	-	17.00	5.00	-	-	-	-	-	-	-
		12/10/76	7.08	566.00	1.58	-	-	16.00	8.00	-	-	-	-	-	-	-
		06/03/78	-	567.21	0.05	-	-	19.00	14.00	-	-	-	-	-	-	-
476 1	6/0 AEP ROEGENBRUNNEN BENDORF	21/03/79	7.36	428.00	0.08	-	-	11.00	8.00	-	-	-	-	-	-	-
		03/03/80	7.22	468.00	0.07	-	132.00	11.00	10.00	112.00	2.40	5.30	1.60	70.00	-	-
		16/06/80	7.21	512.00	0.00	-	-	12.00	12.00	-	-	7.50	3.10	-	-	-
		25/03/81	7.54	480.00	0.14	-	134.00	14.00	14.60	108.80	6.20	8.00	2.20	170.00	80.00	-
		25/06/81	7.17	484.00	0.00	-	-	13.00	12.00	-	-	6.50	2.80	-	-	-
		25/03/82	7.21	524.00	0.12	-	137.00	13.00	11.80	112.80	4.10	6.00	2.20	290.00	113.00	-
		16/06/82	7.11	498.00	0.00	-	-	14.00	11.00	-	-	8.20	4.00	-	-	-
		24/03/83	7.25	484.00	0.12	0.00	122.00	13.00	8.80	112.00	1.90	6.00	2.80	70.00	80.00	-
		15/06/83	7.16	467.00	0.03	-	-	14.00	7.00	-	-	6.00	1.20	-	-	-
		13/04/88	7.85	529.10	0.02	0.01	284.00	9.00	19.00	97.20	2.10	10.00	2.30	-	-	2.00
		12/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
476 1	7/0 AEP GRUMBACH-GLOCKENBRUN BENDORF	21/03/79	7.29	464.00	0.08	-	-	8.00	12.00	-	-	-	-	-	-	-
		03/03/80	7.16	524.00	0.06	-	137.00	10.00	15.40	117.60	2.90	7.70	1.80	90.00	-	-
		16/06/80	7.24	487.00	0.00	-	-	13.00	16.00	-	-	8.50	4.60	-	-	-
		25/03/81	7.48	517.00	0.12	-	139.00	14.00	24.00	119.20	2.40	12.00	2.40	140.00	70.00	-
		25/06/81	7.11	536.00	0.08	-	-	11.00	22.00	-	-	10.00	2.40	-	-	-
		25/03/82	7.21	546.00	0.08	0.00	134.00	13.00	19.20	112.40	4.80	10.00	2.80	290.00	100.00	-
		16/06/82	7.04	583.00	0.01	-	-	16.00	10.00	-	-	17.70	6.80	-	-	-
		15/06/87	7.15	427.35	0.02	-	-	13.30	9.00	-	-	0.95	0.50	-	-	-

NUMERO	PH	COND	FE	MN	HCO3	SO4	CL	CA	MG	NA	K	P	AL	AS
DU POINT	DESIGNATION	DATE	Unites p	Micro S	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 1	8/0 'AEP SUD DE PFIRTWEIER 'DURLINSDOFF	12/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1	11/0 'AEP BUEGERWALD 'KOESTLACH	03/03/80	7.21	446.00	0.00	-	307.00	16.00	2.00	104.80	3.80	2.00	0.50	130.00
		16/06/80	7.19	470.00	0.00	-	-	14.00	4.00	-	-	1.50	0.50	-
		25/03/81	7.20	430.00	0.04	0.00	305.00	19.00	3.20	98.40	8.60	1.70	0.60	80.00
		25/06/81	7.21	449.00	0.00	-	-	18.00	8.00	-	-	1.70	0.60	-
		25/03/82	7.25	475.00	0.08	0.00	310.00	18.00	3.60	104.00	5.00	2.00	0.60	130.00
		16/06/82	7.19	465.00	0.00	-	-	19.00	2.50	-	-	2.00	1.00	-
		24/03/83	7.30	452.00	0.02	-	297.00	20.00	3.40	104.80	3.60	2.00	1.00	800.00
		15/06/83	7.23	428.00	0.01	-	-	21.00	2.00	-	-	2.50	1.60	-
		13/03/84	7.16	461.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180.00
		26/06/84	7.36	465.00	0.00	-	-	17.00	4.00	-	-	2.00	1.30	-
		20/03/85	7.34	452.49	0.01	0.00	310.00	19.00	3.00	108.00	4.30	1.50	0.40	90.00
		20/06/85	7.17	467.07	0.00	-	-	17.00	2.00	-	-	2.00	0.60	-
		23/09/86	7.20	469.48	0.01	-	-	17.30	3.00	-	-	1.60	0.40	-
		17/02/87	7.25	475.06	0.01	0.01	317.00	12.80	4.00	105.40	4.25	1.50	0.50	-
		22/07/87	7.20	468.38	0.17	-	-	19.60	4.00	-	-	1.40	0.60	-
		13/04/88	7.35	454.55	0.02	0.01	287.00	22.50	6.00	100.60	3.80	1.65	0.75	-
		25/04/89	7.15	458.72	0.02	0.01	274.00	18.70	2.00	92.40	3.60	1.50	0.55	-
476 1	17/0 'AEP DE L'ILL 'WINKEL	14/04/69	6.76	453.10	0.00	-	-	7.00	3.60	-	-	-	-	-
		18/10/71	-	394.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		04/06/73	7.26	398.09	0.00	-	-	12.80	3.80	-	-	-	-	-
		17/07/73	7.06	445.04	0.00	-	-	8.00	3.00	-	-	-	-	-
		15/03/77	7.75	434.78	0.00	-	-	15.00	3.00	-	-	-	-	-
		12/07/78	7.25	668.90	0.00	-	-	14.50	3.00	-	-	-	-	-
		23/06/80	7.25	438.00	0.00	-	-	11.00	30.00	-	-	1.00	0.50	-
		13/04/81	7.59	449.00	0.01	0.00	297.00	15.00	4.20	100.00	3.40	2.20	1.50	90.00
		01/07/81	7.25	449.00	0.02	-	-	15.00	6.00	-	-	1.50	1.00	-
		14/04/82	7.51	458.00	0.01	0.00	306.00	13.00	4.60	108.00	1.90	1.20	0.90	160.00
		07/07/82	7.20	454.00	0.01	-	-	12.00	3.00	-	-	1.20	0.90	-
		11/04/83	7.32	429.00	0.01	0.00	290.00	19.00	3.20	101.60	2.90	1.00	0.80	60.00
		21/06/83	7.24	465.00	0.01	-	-	18.00	2.00	-	-	2.00	1.70	-
		20/04/89	7.45	409.84	0.04	0.01	287.00	16.00	2.00	98.30	1.60	1.00	0.50	-
		19/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1	18/0 'SCHLATTER 'WINKEL	13/11/52	6.95	-	0.06	0.00	295.90	12.60	1.80	142.80	4.30	-	-	-
		18/10/71	-	402.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		04/06/73	7.20	398.00	0.00	-	-	12.00	7.80	-	-	-	-	-
		17/07/73	6.98	434.00	0.00	-	-	13.00	5.40	-	-	-	-	-
		15/03/78	7.70	44.00	0.00	-	-	14.00	10.00	-	-	-	-	-
		12/07/78	7.21	662.25	0.00	-	-	14.00	7.00	-	-	-	-	-
		23/06/80	7.23	443.00	0.02	-	-	12.00	6.00	-	-	3.00	2.40	-
		01/07/81	7.20	441.00	0.02	-	-	15.00	6.00	-	-	3.00	1.60	-
		11/04/83	7.28	436.00	0.01	0.00	305.00	16.00	4.80	100.80	2.90	2.70	3.80	100.00

NUMERO	DESIGNATION	DATE	PH	COND	FE	MR	HCO3	SO4	CL	CA	MG	NA	K	F	AL	AS
DU POINT			Unités p	Micro S.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 1 18/0	'SCHLATTER 'WINKEL	21/06/83	7.27	430.00	0.01	-	-	15.00	2.00	-	-	3.00	3.00	-	-	-
476 1 19/0	'BIRGMATTEN 'WINKEL	17/07/73	7.26	459.00	0.00	-	-	24.00	3.40	-	-	-	-	-	-	-
		15/03/78	7.80	451.06	0.13	-	-	21.00	7.00	-	-	-	-	-	-	-
		12/07/78	7.31	668.90	0.00	-	-	23.00	6.50	-	-	-	-	-	-	-
		11/04/83	7.31	418.00	0.30	0.00	293.00	17.00	2.00	100.00	2.40	1.00	1.20	100.00	240.00	-
		21/06/83	7.27	447.00	0.05	-	-	18.00	2.00	-	-	2.00	2.10	-	-	-
		31/07/86	7.50	448.43	0.01	-	-	15.80	6.00	-	-	1.20	0.50	-	-	-
476 1 29/0	'AEP TALMATTE AMONT OUEST S3 'LIEBSDORF	16/06/80	7.44	481.00	0.20	-	-	15.00	5.50	-	-	-	-	-	-	-
476 1 30/0	'AEP TALMATTE AMONT OUEST S2 'LIEBSDORF	16/06/80	7.30	457.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
476 1 31/0	'AEP TALMATTE AMONT EST S1 'LIEBSDORF	16/06/80	7.24	437.00	0.00	-	-	15.00	3.00	-	-	1.70	0.80	-	-	-
476 1 35/0	'SOURCE DE LA LARGUE 'OBERLARG	27/10/60	6.90	409.84	0.01	0.00	-	6.80	2.50	120.80	0.70	1.50	1.00	-	-	-
476 1 36/0	'AEP SCHMELZBRUNNEN 'LUCELLE	15/03/78	7.60	44.00	0.00	-	-	4.00	2.00	-	-	-	-	-	-	-
		21/03/79	7.31	403.00	0.00	-	-	3.00	1.50	-	-	-	-	-	-	-
		18/06/80	7.17	458.00	0.00	-	-	5.00	2.50	-	-	1.30	0.80	-	-	-
		30/03/81	7.20	465.00	0.02	0.00	318.00	8.00	26.00	108.00	2.00	1.20	0.70	90.00	150.00	-
		29/06/81	7.32	466.00	0.00	-	-	10.00	7.00	-	-	2.00	0.40	-	-	-
		16/03/82	7.26	465.00	0.01	0.00	320.00	5.00	2.80	104.80	3.40	1.50	1.00	170.00	175.00	-
		21/06/82	7.17	457.00	0.00	-	-	6.00	2.00	-	-	1.50	1.60	-	-	-
		28/02/83	7.45	438.00	0.12	-	317.00	18.00	3.00	104.80	2.40	12.00	4.00	70.00	190.00	-
		27/03/84	7.38	395.00	0.05	0.00	297.00	4.00	4.00	100.80	2.60	1.00	1.20	60.00	65.00	-
		18/06/84	7.22	453.00	0.01	-	-	4.00	2.50	-	-	1.70	1.70	-	-	-
		13/06/85	0.71	462.11	0.00	-	-	6.00	3.50	-	-	2.00	0.80	-	-	-
		12/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1 42/0	'FONTAINE RUE PRINCIPALE 'BENDORF	25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1 43/0	'ANCIEN CAPTAGE COMMUNAL 'BENDORF	25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1 44/0	'AEP NIEDERLARG (ANCIEN) 'NIEDERLARG	10/08/73	6.34	173.01	0.00	-	-	2.50	7.20	-	-	-	-	-	-	-
		19/09/73	6.31	148.02	0.00	-	-	3.00	6.20	-	-	-	-	-	-	-
		03/04/74	6.66	162.10	0.00	-	-	TRACES	0.60	-	-	-	-	-	-	-
		15/07/74	-	-	0.00	-	-	TRACES	-	-	-	-	-	-	-	-
		28/01/75	6.61	170.01	0.36	-	-	1.90	7.50	-	-	-	-	-	-	-

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO	DESIGNATION	DATE	PH	COND	FE	MN	HCO3	SO4	CL	CA	Mg	NA	K	P	AL	AS
DU POINT			Unites p	Micro S.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 1	44/0 'AEP NIEDERLARG (ANCIEN)															
	'NIEDERLARG	17/06/75	6.60	167.00	0.00	-	-	2.20	7.90	-	-	-	-	-	-	-
476 1	50/0 'SUD WINKEL															
	'WINKEL	13/06/85	7.05	477.10	0.00	-	-	12.00	3.50	-	-	1.80	0.60	-	-	-
476 1	70/0 'AEP BREITENFELD															
	'BENDORF	19/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	290.00
		05/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	245.00
		20/01/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	260.00
		23/03/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350.00
		18/05/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350.00
		16/06/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	400.00
		26/08/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310.00
		24/11/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	330.00
		22/03/93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	295.00
		06/07/93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200.00
		07/12/93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500.00
		14/02/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65.00
		12/04/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	375.00
		21/06/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350.00
		02/08/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	430.00
		19/12/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450.00
		24/01/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	815.00
		20/06/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	800.00
		16/10/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1250.00
		05/12/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	560.00
		13/02/96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	430.00
		24/04/96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	620.00
		02/07/96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	455.00
476 1	79/0 'AEP BUEGERWALD															
	'KOESTLACH	19/04/90	7.12	539.08	0.03	0.05	378.20	25.00	3.00	108.80	15.40	5.50	4.10	110.00	5.00	2.00
		10/10/90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.00
		10/10/90	7.23	549.15	0.24	0.06	368.40	37.00	2.50	108.00	17.70	4.70	3.60	140.00	1.00	5.00
		12/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1	80/0 'AEP WINKEL															
	'WINKEL	26/02/91	7.28	428.00	0.02	0.00	292.80	13.00	3.00	100.00	2.90	2.50	1.00	100.00	11.00	4.00
476 1	81/0 'AEP RITT															
	'LIEBSDORF	15/03/90	7.30	508.91	0.01	0.01	354.00	21.00	8.00	112.40	7.00	1.50	2.20	-	-	-
		22/03/90	7.35	512.82	0.02	0.00	-	27.50	5.33	114.00	9.60	1.55	1.85	-	14.00	-
		04/04/91	7.40	593.47	0.20	-	-	-	5.00	-	-	-	-	-	-	-
476 1	82/0 'AEP RITT															
	'LIEBSDORF	23/10/90	7.28	547.65	0.02	0.00	-	15.00	12.40	132.00	6.00	3.20	2.95	-	5.00	-
		09/11/90	7.15	492.61	0.01	0.01	421.00	15.00	16.00	155.00	0.35	1.50	2.70	-	-	-
		04/04/91	7.10	671.14	0.20	-	-	-	11.00	-	-	-	-	-	-	-

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO	DESIGNATION	DATE	PH	COND	FE	MN	HCO3	SO4	CL	CA	Mg	NA	K	F	AL	AS
DU POINT			Unites p	Micro S.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 1	82/0 'AEP RITT															
	'LIEBSDORF															
		12/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 1	83/0 'AEP LD OBERE MATTEN															
	'DURLINS DORF															
		27/03/90	7.65	386.10	0.01	0.01	247.00	21.00	3.00	79.60	8.50	1.40	0.75	-	-	-
		11/06/91	7.48	392.00	0.06	0.01	246.40	23.30	2.60	84.40	6.20	1.40	0.70	120.00	1.00	0.00
476 2	1/0 'AEP OUEST S1															
	'VIEUX-FERRETTE															
		29/09/80	7.15	438.60	0.01	-	-	11.80	4.00	-	-	15.00	0.80	-	-	-
		02/06/81	7.25	423.73	0.04	0.01	287.00	17.00	3.00	95.40	3.50	1.65	0.65	-	-	-
		25/07/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110.00
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170.00
476 2	2/0 'AEP S2															
	'VIEUX-FERRETTE															
		02/06/81	7.85	326.26	0.01	0.01	195.20	11.10	2.00	77.60	1.20	0.95	0.10	-	-	-
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
476 2	3/0 'LE ROOSBERG															
	'BENDORF															
476 2	5/0 'AEP DU LAVOIR															
	'FERRETTE															
		12/12/78	7.49	510.00	0.07	0.00	293.00	38.00	26.00	104.80	6.20	17.00	2.00	60.00	-	-
		03/12/79	7.42	495.00	0.01	-	-	23.00	8.00	-	-	-	-	-	-	-
		16/03/80	7.32	498.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		19/03/80	7.50	497.00	0.03	0.00	324.00	26.00	11.80	108.00	6.70	7.70	1.30	380.00	-	-
		23/06/80	7.22	510.00	0.00	-	-	23.00	12.50	-	-	9.00	2.10	-	-	-
		13/04/81	7.56	522.00	0.00	-	-	30.00	13.00	-	-	9.50	2.60	-	-	-
		01/07/81	7.08	505.00	0.00	-	-	27.00	21.00	-	-	13.00	2.20	-	-	-
		02/07/81	7.27	508.00	0.00	-	-	28.00	21.00	-	-	13.00	2.10	-	-	-
		14/04/82	7.36	517.00	0.03	-	324.00	13.00	324.50	112.00	4.30	9.00	2.30	250.00	58.00	-
		15/04/82	7.29	517.00	0.04	-	322.00	24.00	13.20	112.00	4.30	9.00	2.30	250.00	65.00	-
		07/07/82	7.37	508.00	0.03	-	-	24.00	12.00	-	-	10.50	3.20	-	-	-
		11/04/83	7.35	491.00	0.10	0.00	327.00	28.00	9.00	110.40	4.80	7.00	3.30	270.00	75.00	-
		12/04/83	7.47	486.00	0.18	0.00	315.00	25.00	11.60	107.20	4.30	9.50	2.70	210.00	135.00	-
		26/03/85	7.48	550.05	0.05	0.00	315.00	28.00	27.00	112.00	5.00	17.50	1.40	280.00	109.00	-
		03/07/85	7.34	510.99	0.02	-	-	23.50	11.00	-	-	11.00	1.70	-	-	-
		27/01/87	7.35	516.80	0.01	0.01	314.00	30.60	14.00	104.40	6.10	9.20	1.50	390.00	10.00	-
		27/01/88	7.40	547.95	0.01	0.01	312.00	26.50	20.00	41.00	48.00	12.80	1.40	-	-	-
		14/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	520.00
		22/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	650.00
		19/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450.00
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125.00
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450.00
		14/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360.00
		15/11/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170.00
		27/11/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	640.00
		20/01/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	300.00
		14/04/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.00
		18/05/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350.00
		16/06/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	550.00

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO DU POINT	DESIGNATION	DATE	PH Unites p	COND Micro S.	FE mg/l	MN mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	CL mg/l	CA mg/l	Mg mg/l	NA mg/l	K mg/l	F microg/l	AL microg/l	AS microg/l
476 2	5/0 'AEP DU LAVOIR 'FERRETTE															
		07/07/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	465.00
		26/08/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	450.00
		22/03/93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	345.00
		17/01/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65.00
		12/04/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	315.00
476 2	9/0 'AEP COMMUNALE 'BOUXWILLER															
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 2	14/0 'AEP VORDERE BIRGMATT 'LIGSDORF															
		11/04/83	7.48	379.00	0.01	0.00	237.00	23.00	3.00	86.80	3.10	0.80	0.90	110.00	15.00	-
		19/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.00
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40.00
476 2	15/0 'AEP HINTERE BIRGMATT 'LIGSDORF															
		11/04/83	7.65	339.00	0.01	-	205.00	21.00	2.60	76.00	2.90	1.00	1.30	60.00	15.00	-
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 2	16/0 'AEP COL DES NEUREICH EST 'LIGSDORF															
		11/04/83	7.52	416.00	0.00	0.00	251.00	37.00	3.00	93.60	5.30	1.00	1.40	60.00	20.00	-
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 2	17/0 'AEP COL NEUNICH 'LIGSDORF															
		23/06/80	7.59	434.00	0.00	-	-	28.00	3.00	-	-	1.20	1.00	-	-	-
		11/04/83	7.68	328.00	0.02	0.00	202.00	21.00	2.60	74.40	2.40	1.00	1.20	40.00	30.00	-
476 2	18/0 'AEP BIRGMATT AMONT EST S1 'LIGSDORF															
		11/04/83	7.60	322.00	0.01	0.00	195.00	23.00	2.40	73.60	2.20	1.00	1.10	50.00	17.00	-
476 2	19/0 'AEP BIRGMATT AMONT OUEST S2 'LIGSDORF															
		11/04/83	7.35	400.00	0.00	0.00	261.00	23.00	3.00	95.20	1.40	1.00	3.40	50.00	20.00	-
476 2	26/0 'AEP SOORMATT MILIEU S2 'RAEDERSDORF															
476 2	28/0 'AEP KALMIS 'LUTTER															
		04/06/73	7.32	434.78	0.10	-	-	24.00	5.40	-	-	-	-	-	-	-
		03/04/74	7.45	458.09	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		21/11/74	7.30	438.02	0.00	-	-	24.00	4.30	-	-	-	-	-	-	-
		21/01/75	7.40	431.03	0.00	-	-	24.00	7.20	-	-	-	-	-	-	-
		10/06/75	7.42	454.96	0.00	-	-	25.40	5.50	-	-	-	-	-	-	-
		04/02/76	7.69	484.03	0.06	-	-	31.50	6.00	-	-	-	-	-	-	-
		14/05/76	7.40	446.43	0.19	-	-	32.00	7.00	-	-	-	-	-	-	-
		15/02/77	7.20	442.48	0.00	-	-	28.50	12.00	-	-	-	-	-	-	-
		13/06/77	7.30	458.72	0.07	-	-	16.40	8.00	-	-	-	-	-	-	-
		06/03/78	7.35	472.81	0.02	-	-	28.60	12.00	-	-	-	-	-	-	-
		23/09/86	7.35	459.77	0.17	-	-	30.20	9.00	-	-	4.40	0.90	-	-	-
		12/03/87	7.35	479.62	0.06	0.01	268.00	25.50	9.00	108.20	3.80	4.35	1.20	-	10.00	-
		30/07/87	7.15	490.20	0.05	-	-	31.90	10.00	-	-	5.70	1.60	-	-	-

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO DU POINT	DESIGNATION	DATE	PH Unités p	COND Micro S.	FE mg/l	MN mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	CL mg/l	CA mg/l	MG mg/l	NA mg/l	K mg/l	F microg/l	AL microg/l	AS microg/l
476 2	28/0 'AEP KALMIS 'LUTTER	19/04/89	7.40	445.43	0.63	0.01	283.00	28.00	8.00	103.50	3.80	3.70	1.05	-	-	-
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.00
476 2	29/0 'AEP PIED GELSBERG 'SONDERSDORF	02/04/74	7.46	412.03	0.00	-	-	14.30	3.80	-	-	-	-	-	-	-
		21/01/75	7.49	381.10	0.00	-	-	15.00	3.00	-	-	-	-	-	-	-
		10/06/75	7.51	424.99	0.00	-	-	16.00	2.70	-	-	-	-	-	-	-
		04/01/76	7.68	436.11	0.03	-	-	17.00	2.80	-	-	-	-	-	-	-
		05/05/76	7.53	486.38	0.09	-	-	21.00	3.00	-	-	-	-	-	-	-
		15/02/77	7.40	393.70	0.00	-	-	20.60	8.00	-	-	-	-	-	-	-
		13/06/77	7.50	421.94	0.05	-	-	13.00	4.00	-	-	-	-	-	-	-
		06/03/78	7.40	420.17	0.04	-	-	16.30	6.00	-	-	-	-	-	-	-
		28/08/78	7.45	480.77	0.07	-	-	12.60	6.00	-	-	-	-	-	-	-
		04/06/81	7.90	393.00	0.03	-	290.00	22.00	3.00	101.00	2.40	1.00	0.40	-	-	-
		17/03/87	7.40	412.37	0.01	0.01	283.00	18.40	3.00	97.80	2.55	1.10	0.50	-	10.00	-
		30/07/87	7.40	439.56	0.01	-	-	14.10	3.00	-	-	1.10	0.40	-	-	-
		19/04/89	7.50	409.84	0.09	0.02	284.00	15.00	3.00	102.50	2.00	1.05	0.55	-	-	-
476 2	31/0 'AEP AUF DER WEIDE 'KIFFIS	09/08/71	7.30	390.00	0.00	-	-	1.00	2.00	-	-	-	-	-	-	-
		30/03/81	7.35	525.00	0.03	0.00	345.00	8.00	6.00	122.40	1.00	2.00	0.40	70.00	150.00	-
		29/06/81	7.42	514.00	0.00	-	-	7.00	7.00	-	-	2.50	0.60	-	-	-
476 2	32/0 'AEP AUF DER WEIDE 'KIFFIS	09/08/71	7.40	458.00	0.00	-	-	1.00	2.50	-	-	-	-	-	-	-
		30/03/81	7.35	525.00	0.03	0.00	345.00	8.00	6.00	122.40	1.00	2.00	0.40	70.00	150.00	-
		29/06/81	7.42	514.00	0.00	-	-	7.00	7.00	-	-	2.50	0.60	-	-	-
476 2	34/0 'AEP HINTERE BIRGMATT OUEST 'LIGSDORF	25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 2	40/0 'FONTAINE RUE DE LA MONTAGNE 'VIEUX-FERRETTE	25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	170.00
476 2	47/0 'FONTAINE 'LIGSDORF	25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.00
476 2	50/0 'AEP STATION DE POMPAGE 'LUCELLE	15/03/78	7.60	45.00	0.00	-	-	12.00	4.00	-	-	-	-	-	-	-
		21/03/79	7.28	415.00	0.00	-	-	11.00	3.00	-	-	-	-	-	-	-
		18/06/80	7.14	120.00	0.00	-	-	11.00	2.80	-	-	1.50	0.40	-	-	-
		30/03/81	7.20	485.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60.00	140.00	-
		29/06/81	7.26	447.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		16/03/82	7.24	481.00	0.02	0.00	312.00	10.00	4.00	111.60	1.20	1.50	0.40	200.00	150.00	-
		21/06/82	7.14	480.00	0.01	-	-	13.00	3.50	-	-	1.80	1.60	-	-	-
		28/02/83	7.27	455.00	0.04	0.00	317.00	15.00	3.00	112.00	1.00	1.70	0.80	70.00	130.00	-
		28/05/83	7.18	439.00	0.26	-	-	20.00	6.00	-	-	12.70	2.20	-	-	-
		27/03/84	7.32	408.00	0.02	0.00	302.00	10.00	4.00	104.00	2.40	1.50	0.60	60.00	60.00	-

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO	DESIGNATION	DATE	PH	COND	FE	MN	HCO3	SO4	CL	CA	MG	NA	K	F	AL	AS
DU POINT			Unités p	Micro S.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 2	53/0 'SGE S1 LISIERE BOIS BOUXWILLER															
	'BOUXWILLER															
		29/06/89	7.22	461.89	0.70	0.02	316.00	24.50	3.00	115.60	4.10	2.00	0.70	60.00	2240.00	-
476 2	54/0 'SGE S2 LISIERE BOIS BOUXWILLER															
	'BOUXWILLER															
		23/06/89	7.18	495.05	0.20	0.02	346.50	13.00	2.50	112.00	6.70	2.00	1.40	120.00	1.00	-
		04/04/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.00
		11/06/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.00
		22/09/92	7.20	540.00	3.14	0.03	373.30	9.40	4.10	125.20	5.80	1.40	1.10	140.00	1.00	64.00
476 2	60/0 'AEP KALMIS LD PLATTENWALD															
	'LUTTER															
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.00
476 2	61/0 'PARC 16/3 SECT C KERRSCHAFSWALD															
	'VIEUX-FERRETTE															
		25/07/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.00
		30/07/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.00
		13/08/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.00
		25/09/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00
476 2	62/0 'RITTY															
	'RAEDERSDORF															
		09/01/90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.00
		03/10/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
476 3	6/0 'AEP LANGHATT															
	'WOLSCHWILLER															
		15/06/72	7.10	487.00	0.00	-	-	34.00	3.50	-	-	-	-	-	-	-
		03/08/78	7.00	50.00	0.00	-	-	2.00	6.00	-	-	-	-	-	-	-
		30/03/81	7.10	568.00	0.12	0.00	376.00	42.00	3.40	127.40	6.00	1.50	1.50	80.00	150.00	-
		29/06/81	7.24	561.00	0.00	-	-	41.00	6.00	-	-	2.00	1.80	-	-	-
		16/03/82	7.23	574.00	0.03	0.00	357.00	40.00	3.20	126.40	7.20	1.50	2.20	230.00	150.00	-
		21/06/82	7.14	560.00	0.05	-	-	40.00	4.00	-	-	1.50	2.40	-	-	-
		28/02/83	7.18	514.00	0.11	0.00	349.00	34.00	3.00	120.00	5.50	2.20	4.00	170.00	210.00	-
		25/05/83	7.12	490.00	0.16	-	-	26.00	2.50	-	-	1.50	2.40	-	-	-
476 3	8/0 'AEP NORD EST															
	'LINSDDORF															
		02/04/81	7.44	469.00	0.08	0.00	344.00	7.00	3.60	88.80	14.90	5.00	1.40	-	-	-
		31/03/82	7.31	461.00	0.07	-	334.00	3.00	4.40	85.60	14.90	5.30	0.60	170.00	60.00	-
		28/06/82	7.24	478.00	0.00	-	-	3.00	1.00	-	-	4.50	0.50	-	-	-
		30/03/83	7.30	419.00	0.01	0.00	312.00	4.00	3.60	80.80	14.90	5.00	1.20	120.00	20.00	-
		27/01/88	7.35	468.38	0.01	0.01	338.00	2.00	6.00	91.80	13.50	4.25	0.50	-	-	-
476 3	9/0 'AEP NORD OUEST BRUNNSTUB S1															
	'LINSDDORF															
		30/03/83	7.34	484.00	0.03	0.00	368.00	8.00	4.40	97.60	16.30	5.50	2.60	180.00	20.00	-
476 3	10/0 'AEP COMMUNALE															
	'BETTLACH															
		30/03/83	6.42	284.00	0.04	-	112.00	8.00	27.20	48.00	4.80	9.20	1.20	70.00	50.00	-
		26/03/84	6.48	255.00	0.06	0.00	88.00	5.00	28.00	42.40	4.30	9.00	2.60	120.00	55.00	-
		06/03/85	6.46	256.02	0.12	0.00	85.40	5.50	25.00	37.20	5.50	9.00	0.60	80.00	260.00	-
		25/06/85	6.39	268.02	0.03	-	-	4.00	22.00	-	-	8.00	0.80	-	-	-
		13/01/87	6.40	322.58	0.01	0.01	125.00	5.90	28.00	53.00	5.30	91.00	0.50	-	-	-

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

NUMERO	DESIGNATION	DATE	PH	COND	FE	HN	HCO3	SO4	CL	CA	MG	NA	K	F	AL	AS
DU POINT			Unités p	Micro S.	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	microg/l	microg/l	microg/l
476 3	10/0 'AEP COMMUNALE															
	'BETTLACH															
		27/01/88	6.60	340.14	0.01	0.01	128.00	5.00	33.00	57.80	5.00	8.75	0.50	-	-	-
		18/04/89	6.50	287.36	0.19	0.03	91.00	5.60	34.00	47.50	4.80	7.90	0.65	-	-	-
476 3	11/0 'AEP ROSENBRUNNEN OUEST S2															
	'WOLSCHWILLER															
476 3	12/0 'AEP ROSENBRUNNEN SUD S1															
	'WOLSCHWILLER															
476 3	13/0 'AEP STOECKENMATTEN W AMT															
	'BIEDERTHAL															
		10/03/80	7.46	449.00	0.02	0.00	107.00	15.00	5.00	94.40	8.20	2.00	0.30	70.00	-	-
		18/06/80	7.42	452.00	0.00	-	-	14.00	5.50	-	-	2.00	1.30	-	-	-
		01/09/80	7.40	493.00	0.00	-	-	26.00	11.00	-	-	5.00	1.00	-	-	-
		21/06/82	7.46	459.00	0.01	-	-	15.00	5.00	-	-	2.00	0.80	-	-	-
		28/02/83	7.67	431.00	0.04	0.00	285.00	21.00	4.40	104.00	0.50	2.30	1.20	70.00	105.00	-
		25/05/83	7.25	438.00	0.05	0.00	-	18.00	4.00	-	-	2.50	1.60	-	-	-
476 3	14/0 'AEP STOECKENMATTEN E.AVAL															
	'BIEDERTHAL															
		10/03/80	7.46	449.00	0.02	0.00	107.00	15.00	5.00	94.40	8.20	2.00	0.30	70.00	-	-
		18/06/80	7.42	452.00	0.00	-	-	14.00	5.50	-	-	2.00	1.30	-	-	-
		01/09/80	7.40	493.00	0.00	-	-	26.00	11.00	-	-	5.00	1.00	-	-	-
		21/06/82	7.43	448.00	0.00	-	-	15.00	5.00	-	-	2.00	0.80	-	-	-
		28/02/83	7.68	455.00	0.06	0.00	305.00	18.00	4.40	107.20	1.90	2.20	1.00	60.00	105.00	-
		25/05/83	7.40	462.00	0.01	-	-	18.00	4.00	-	-	2.50	1.20	-	-	-
476 3	15/0 'AEP TOTACKER															
	'BIEDERTHAL															
		10/03/80	7.42	487.00	0.01	0.00	306.00	21.00	14.00	110.40	2.20	5.00	0.80	70.00	-	-
		18/06/80	7.47	480.00	0.00	-	-	18.00	14.00	-	-	5.60	1.20	-	-	-
		01/09/80	7.40	456.00	0.00	-	-	19.00	4.00	-	-	1.50	0.60	-	-	-
		30/03/81	7.35	495.00	0.05	0.00	295.00	24.00	15.40	110.40	1.40	6.00	1.00	50.00	140.00	-
		29/06/81	7.40	462.00	0.00	-	-	24.00	15.00	-	-	5.70	1.10	-	-	-
		21/06/82	7.50	484.00	0.01	-	-	24.00	14.50	-	-	4.00	1.80	-	-	-
		28/02/83	7.43	462.00	0.41	0.00	299.00	27.00	10.00	107.20	1.40	15.00	3.00	70.00	120.00	-
476 3	19/0 'AEP SCHOPFMATTEN-OBERFELD S2															
	'WOLSCHWILLER															
		29/06/83	7.16	488.00	0.00	-	-	21.00	2.00	-	-	3.00	1.80	-	-	-
		10/11/86	7.25	464.04	0.01	-	-	20.00	4.00	-	-	-	-	-	-	-
476 3	20/0 'AEP OBERFELD															
	'WOLSCHWILLER															
		29/06/83	7.45	398.09	0.01	-	-	21.00	1.00	-	-	3.00	0.90	-	-	-
476 3	20/1 'AEP OBERFELD															
	'WOLSCHWILLER															
		29/06/83	7.48	396.04	0.00	-	-	21.00	2.00	-	-	3.00	0.80	-	-	-
476 3	25/0 'AEP CHAPELLE ST MARTIN															
	'OLTINGUE															
		12/06/85	7.30	537.63	0.05	0.00	360.00	18.90	6.00	126.20	0.85	2.15	0.45	-	-	-
		11/07/91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00

ANNEXE 2

Identification minéralogique de l'échantillon poudreux référéncé BEND par diffractométrie des rayons X

(extrait de la note SMN/PEA/CMI/NT/97/631/FP/bm)



**MINERALOGIE DETERMINATIVE PAR
DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X**

Appareillage : SIEMENS D 5000 automatisé

Conditions expérimentales :

- Balayage de 4 à $84^{\circ} 2 \theta$
- Vitesse de balayage de $0,02^{\circ} 2 \theta$ /seconde,
- échantillon tournant

Traitement des spectres : Logiciel Diffrac AT

RESULTATS

Echantillon BEND

L'échantillon est composé essentiellement par de la calcite et du quartz en infratrace ($\leq 1 \%$).

Aucune autre phase cristallisée, en particulier avec de l'As dans sa structure, n'est mise en évidence même à l'état d'infratrace .

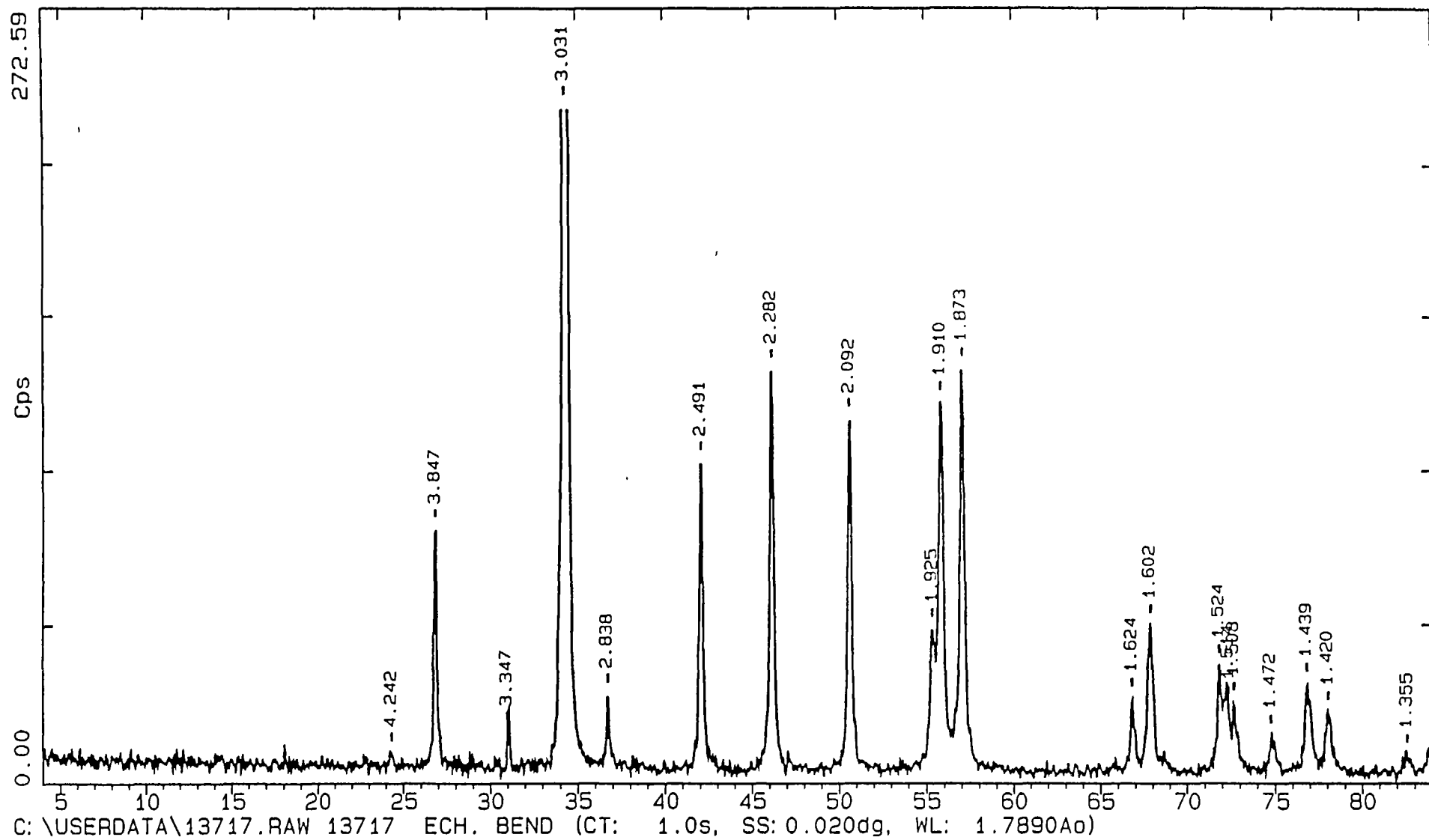


ANNEXE

- le spectre brut, avec les valeurs (en Å) relatives à chaque pic (en fonction zoom).
- la liste complète des valeurs (d en Å et I en coups et sur base 100),
- le spectre interprété avec les références J.C.P.D.S. en couleur.

2-Theta - Scale

B R G M 19-Jun-1997 08:56



Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

DIFFRAC / AT -- PRINTDIF V1.0 *** 19-Jun-1997 08:56:20

Dump of file: C:\USERDATA\13717.DIF (19-Jun-1997 08:56:08)

Sample name : 13717 ECH. BEND (18-Jun-1997 20:42:08)

D5MEAS - Program:DEFAULT.DQL

Wavelength 1: 1.78897

Wavelength 2: 1.79285

Range # 1

Raw data measured from 2 theta = 4.000 to 84.000

Step size : 0.020 Time/step : 1.0

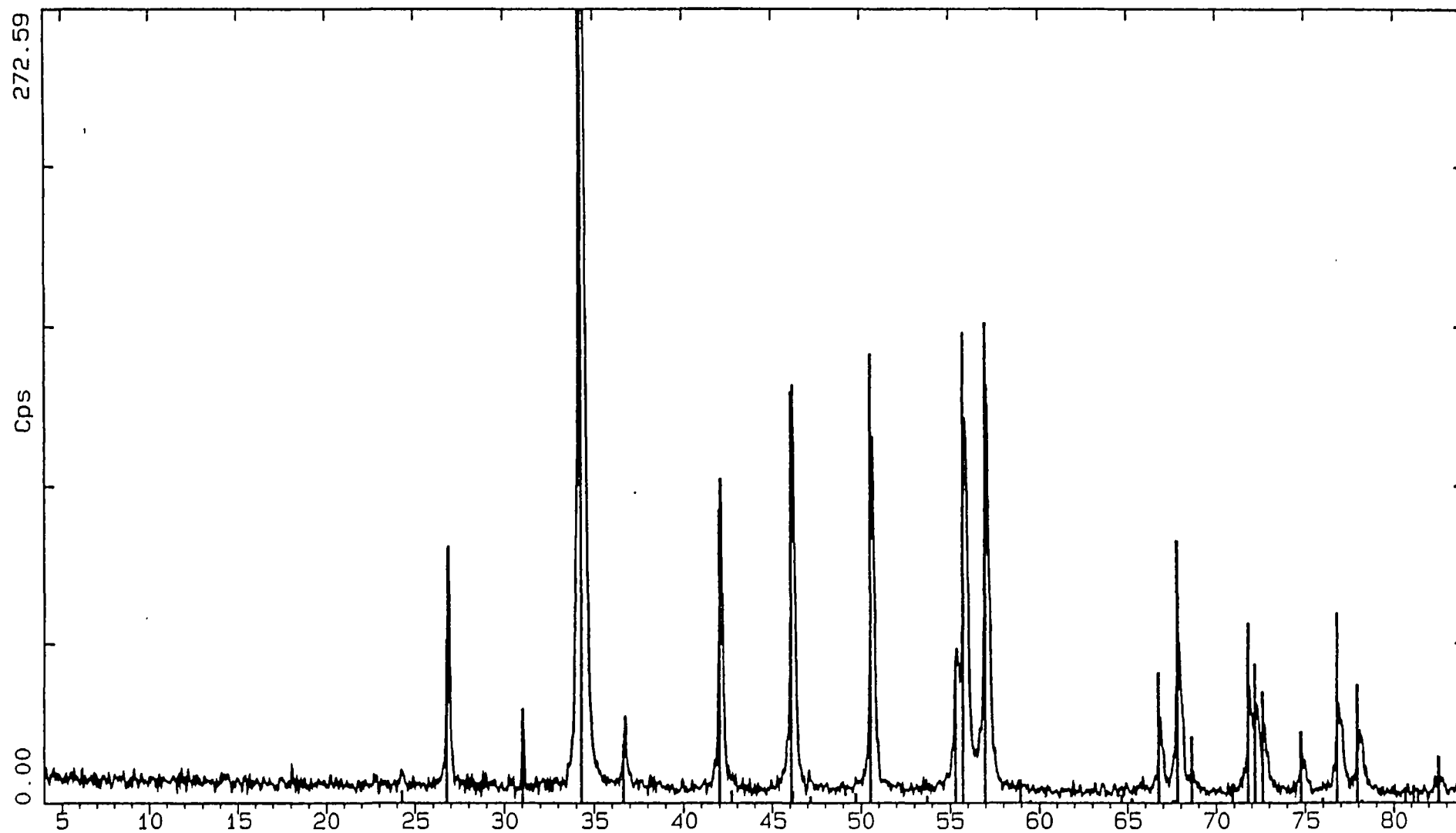
Peak width: 0.170 Threshold : 1.0

-N-	2 theta	---d---	---Cps---	---%---
1	24.345	4.2421	9.85	0.64
2	26.889	3.8471	87.73	5.71
3	31.002	3.3470	17.06	1.11
4	34.333	3.0306	1537.65	100.00
5	36.748	2.8377	29.69	1.93
6	42.091	2.4909	111.49	7.25
7	46.161	2.2817	143.86	9.36
8	50.638	2.0916	126.35	8.22
9	55.388	1.9247	52.30	3.40
10	55.846	1.9101	132.21	8.60
11	57.063	1.8727	144.20	9.38
12	66.854	1.6238	28.09	1.83
13	67.907	1.6015	53.72	3.49
14	71.903	1.5236	39.76	2.59
15	72.446	1.5137	25.44	1.65
16	72.746	1.5083	26.75	1.74
17	74.832	1.4722	15.70	1.02
18	76.892	1.4386	33.21	2.16
19	78.097	1.4199	23.58	1.53
20	82.619	1.3550	8.92	0.58

2-Theta - Scale

B R G M 19-Jun-1997 08:56

Rapport BRGM R 39799



C:\USERDATA\13717.RAW 13717 ECH. BEND (CT: 1.0s, SS: 0.020dg, WL: 1.7890Ao)
5-0586 * CaCO3 Calcite, syn (WL: 1.7890Ao)
46-1045 * SiO2 Quartz, syn (WL: 1.7890Ao)

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

ANNEXE 3

Identification minéralogique d'un échantillon de pesticide inconnu par diffractométrie des rayons X

(extrait de la note SMN/PEA/CMI/NT/97/556/FP)



MINERALOGIE DETERMINATIVE PAR DIFFRACTOMETRIE DES RAYONS X

Appareillage : SIEMENS D 5000 automatisé

Conditions expérimentales :

- Balayage de 4 à 84 ° 2 θ ,
- Vitesse de balayage de 0,02° 2 θ /seconde,
- Echantillon tournant .

Traitement des spectres : Logiciel Diffrac AT

RESULTATS

Echantillon blanc contenant de l'arsenic :

Plusieurs phases minérales cristallisées sont mises en évidence :

- Un arséniate de calcium hydroxydé de formule : $\text{Ca}_5 (\text{AsO}_4)_3 (\text{OH})$ artificiel ou naturel ¹
- Un second arséniate de calcium de formule : $\text{Ca}_5 \text{F} (\text{AsO}_4)_3$ artificiel en pourcentage moins important
- De la calcite (CaCO_3) en faible proportion
- De la heulandite (probable) très faible (c'est une zéolite de formule : $\text{Ca}_{1,23} (\text{Al}_2 \text{Si}_7) \text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

Une analyse chimique quantitative de l'arsenic, du calcium, du CO_2 et éventuellement des autres éléments présents permettrait d'avoir une évaluation des proportions d'arséniate dans cet échantillon.

¹ Un minéral de cette composition existe sous le nom : Johnbaumite

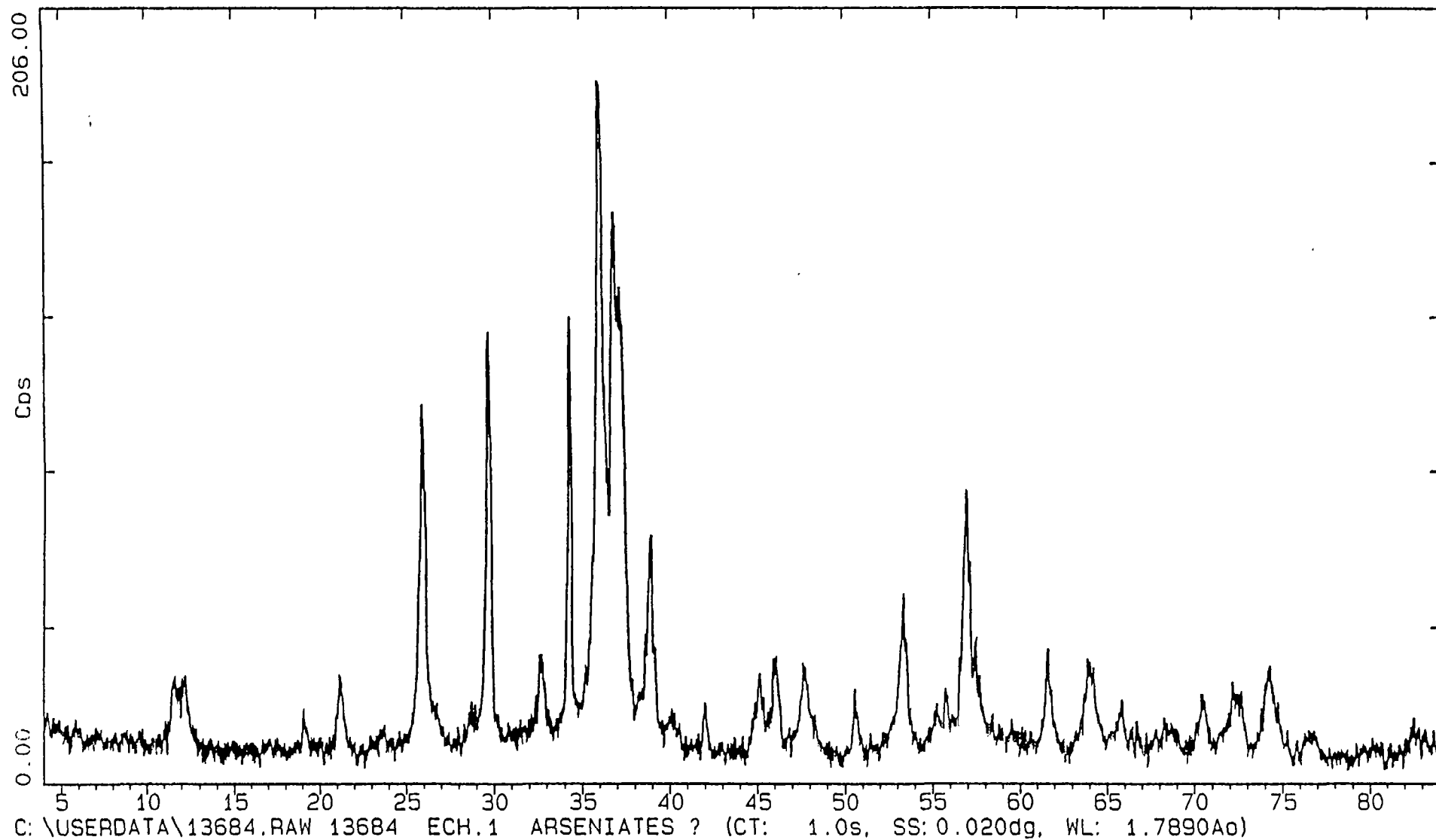


A N N E X E

- Le spectre interprété avec les références J.C.P.D.S.
- Le spectre brut
- La liste des valeurs (d en Å et I en coups et sur base 100)
- Le spectre avec les distances inter réticulaires (en Å) relatives à chaque pic

2-Theta - Scale

B R G M 30-May-1997 09: 39



Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

DIFFRAC / AT -- PRINTDIF V1.0 *** 30-May-1997 09:39:26

Dump of file: C:\USERDATA\13684.DIF (30-May-1997 09:39:12)
Sample name : 13684 ECH.1 ARSENIATES ? (29-May-1997 18:30:32)
D5MEAS - Program:DEFAULT.DQL

Wavelength 1: 1.78897

Wavelength 2: 1.79285

Range # 1

Raw data measured from 2 theta = 4.000 to 84.000

Step size : 0.020 Time/step : 1.0

Peak width: 0.170 Threshold : 1.0

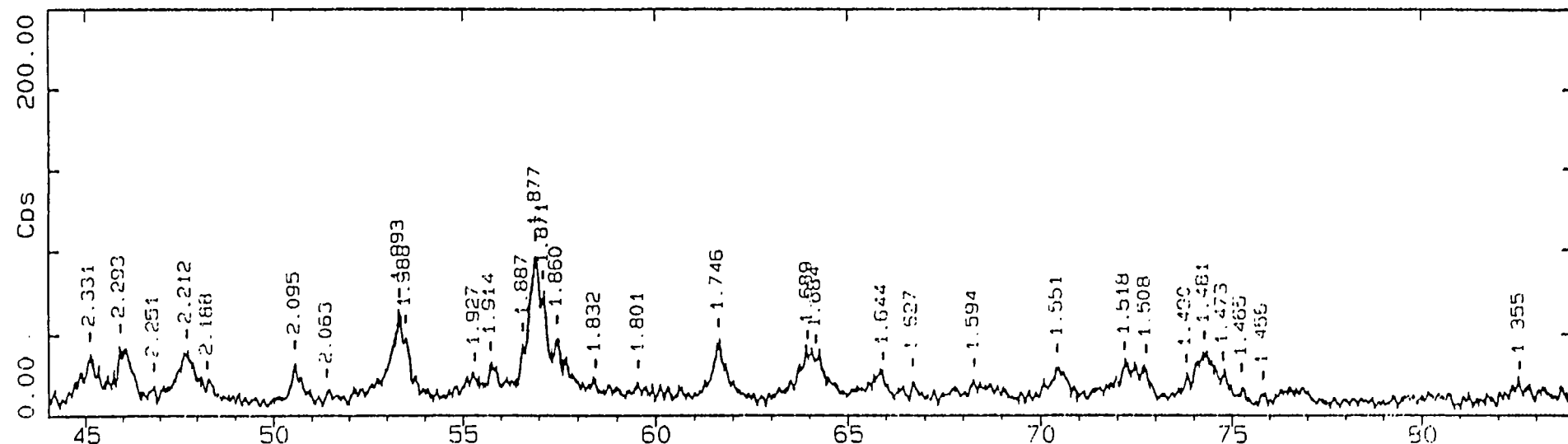
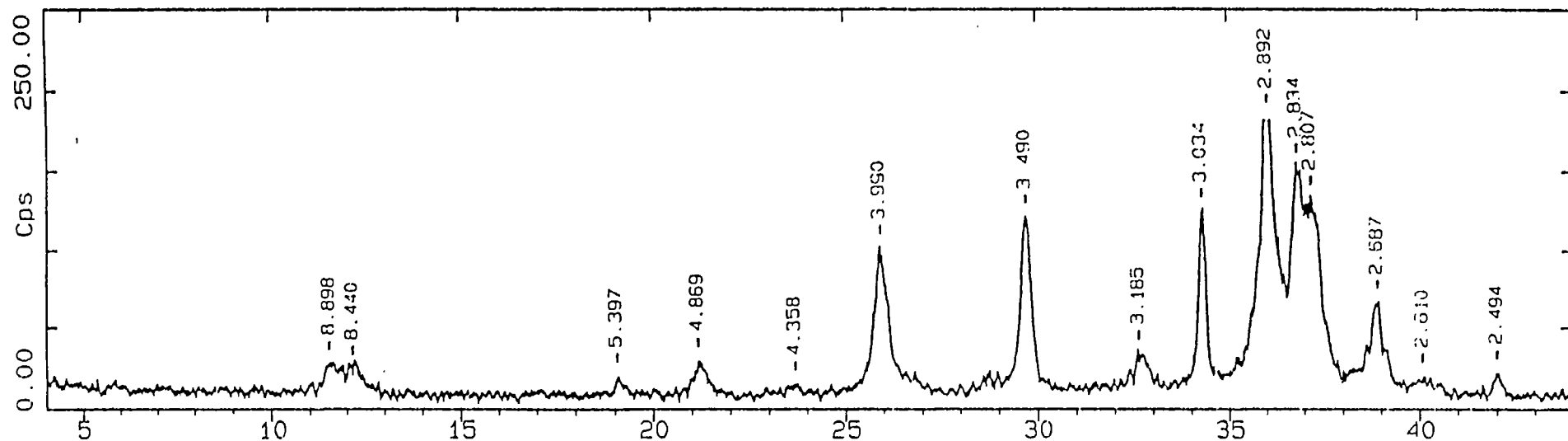
N	2 theta	---d---	---Cps---	---%---
1	11.539	8.8978	26.26	14.17
2	12.168	8.4399	23.00	12.40
3	19.079	5.3975	18.57	10.01
4	21.173	4.8688	28.09	15.15
5	23.686	4.3585	13.26	7.15
6	25.911	3.9897	100.23	54.06
7	29.704	3.4897	119.41	64.41
8	32.621	3.1850	32.60	17.59
9	34.290	3.0343	123.61	66.67
10	36.037	2.8917	185.39	100.00
11	36.797	2.8340	151.78	81.87
12	37.159	2.8074	131.61	70.99
13	38.894	2.6867	65.23	35.18
14	40.091	2.6096	18.52	9.99
15	42.027	2.4944	20.74	11.19
16	45.121	2.3314	29.22	15.76
17	45.931	2.2925	33.11	17.86
18	46.828	2.2510	13.97	7.54
19	47.700	2.2122	30.41	16.40
20	48.258	2.1881	15.10	8.14
21	50.554	2.0948	25.08	13.53
22	51.400	2.0627	10.77	5.81
23	53.333	1.9931	49.98	26.96
24	53.494	1.9875	37.61	20.28
25	55.309	1.9272	18.80	10.14
26	55.728	1.9139	24.16	13.03
27	56.593	1.8870	33.42	18.03
28	56.933	1.8766	76.57	41.30
29	57.121	1.8710	58.58	31.60
30	57.476	1.8604	37.41	20.18
31	58.450	1.8321	15.57	8.40
32	59.567	1.8008	15.48	8.35
33	61.633	1.7461	35.44	19.12
34	63.965	1.6888	29.55	15.94
35	64.175	1.6839	27.46	14.81
36	65.920	1.6441	19.01	10.26
37	66.688	1.6273	16.26	8.77
38	68.293	1.5936	16.00	8.63
39	70.457	1.5507	22.96	12.39
40	72.202	1.5181	23.89	12.88
41	72.761	1.5080	22.61	12.20
42	73.808	1.4896	18.04	9.73

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

43	74.297	1.4812	29.46	15.89
44	74.785	1.4730	19.33	10.43
45	75.274	1.4648	13.38	7.22
46	75.832	1.4556	9.77	5.27
47	82.604	1.3552	14.51	7.82

2-Theta - Scale

B R G M 30-May-1997 09: 40



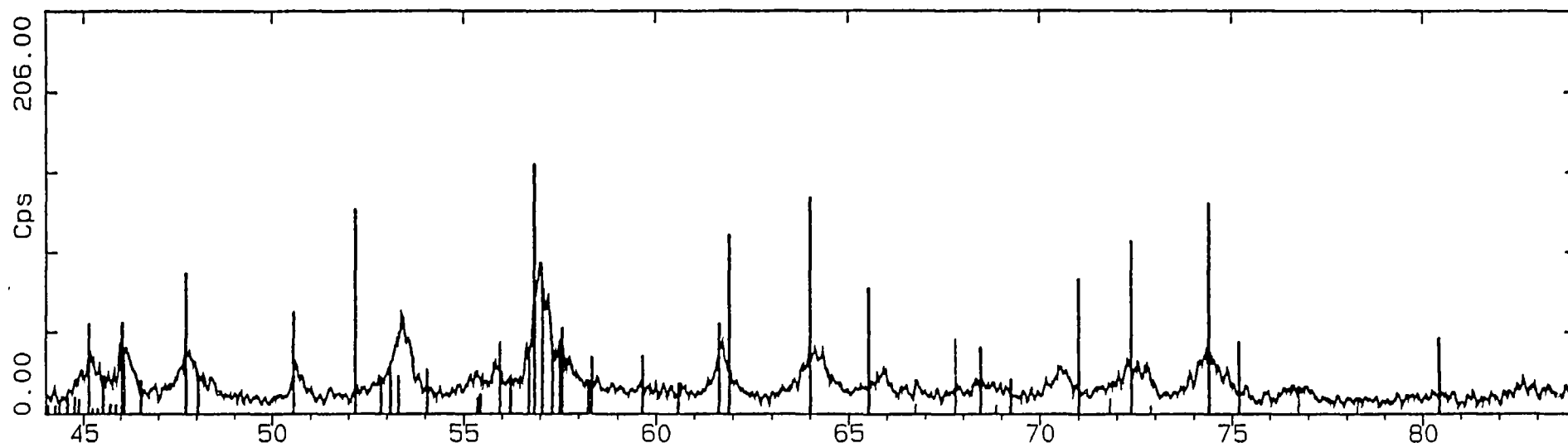
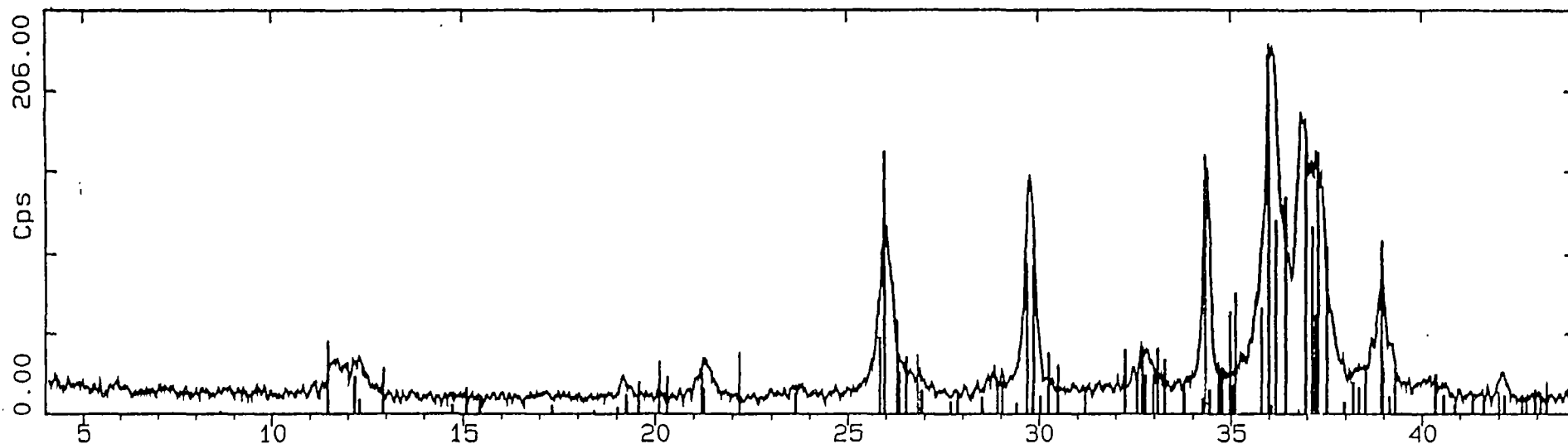
C:\USERDATA\13684.RAW 13684 ECH.1 ARSENIATES ? (CT: 1.0s, SS: 0.020dg, WL: 1.7890Ao)

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

2-Theta - Scale

B R G M 30-May-1997 10:05

Rapport BRGM R 39799



C:\USERDATA\13684.RAW 13684 ECH.1 ARSENIATES ? (CT: 1.0s, SS: 0.020dg, WL: 1.7890Ao, DX: +.067)
 33-0265 Ca₅(AsO₄)₃(OH) Johnbaumite (WL: 1.7890Ao)
 23-0112 Ca₅F(AsO₄)₃ Calcium Fluoride Arsenate (WL: 1.7890Ao)
 24-0027 D CaCO₃ Calcite (WL: 1.7890Ao)
 25-0144 D Ca_{1.23}(Al₂Si₇)O₁₈.6H₂O Heulandite (WL: 1.7890Ao)

Caractérisation des aquifères contaminés par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

Situation des prélèvements sur fond de la carte géologique de Ferrette

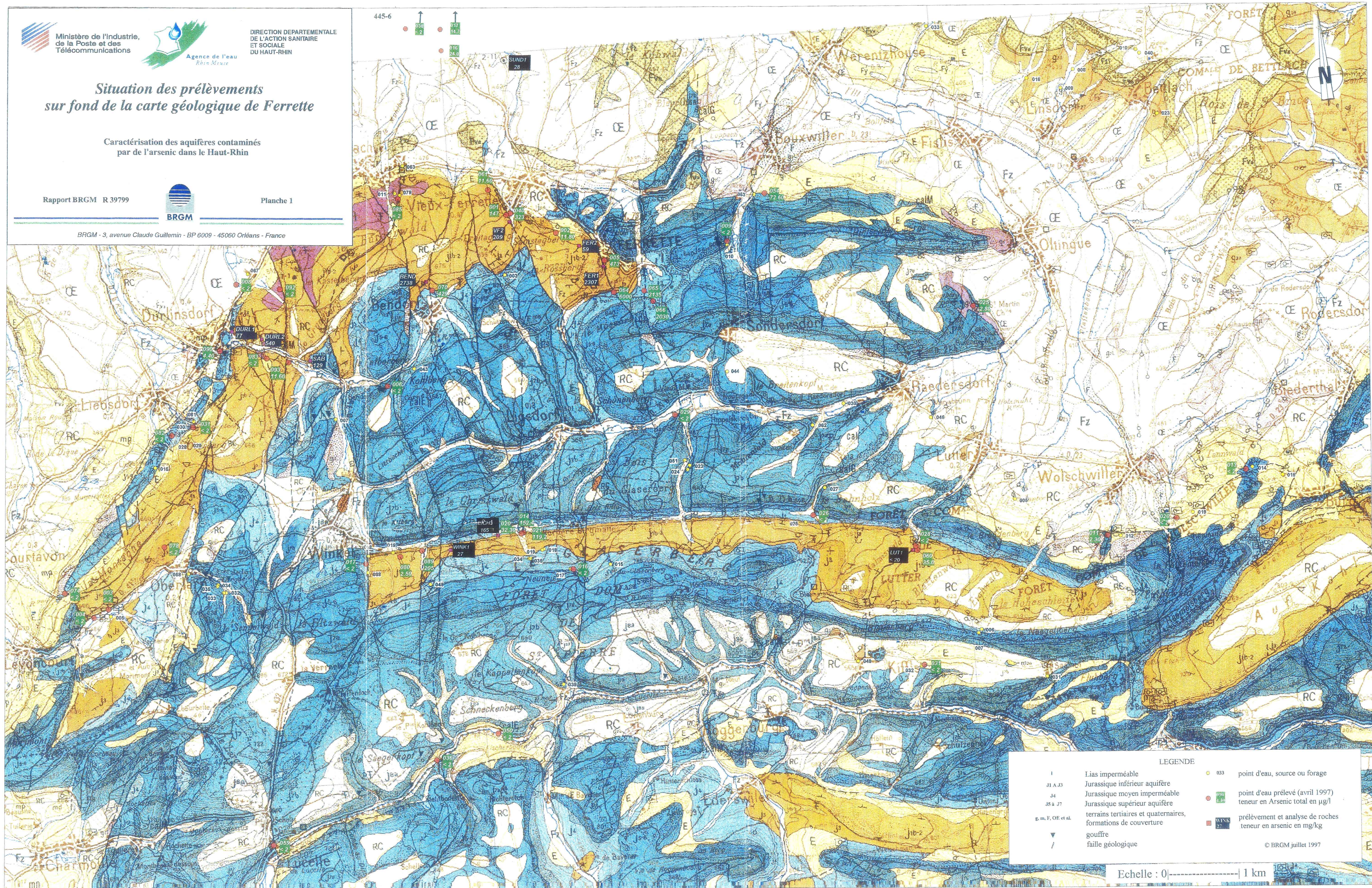
Caractérisation des aquifères contaminés
par de l'arsenic dans le Haut-Rhin

Rapport BRGM R 39799



Planche 1

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 6009 - 45060 Orléans - France



1

J1 A, J3

J4

J5 A, J7

g, m, F, OE et al.

▼

/

Lias imperméable

Jurassique inférieur aquifère

Jurassique moyen imperméable

Jurassique supérieur aquifère

terrains tertiaires et quaternaires, formations de couverture

gouffre

faille géologique

033

point d'eau, source ou forage

point d'eau prélevé (avril 1997)

teneur en Arsenic total en µg/l

prélèvement et analyse de roches

teneur en arsenic en mg/kg

LEGENDE

© BRGM juillet 1997

Echelle : 0-----1 km