Document public

Rapport d'expertise :

Avis sur la présence de thallium dans les eaux souterraines de Basse-Normandie

BRGM/RP-63615-FR
Juillet 2014

Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations ❑ Appuis à la police de l'eau ☒

Date de réalisation de l'expertise : 1er semestre 2014

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Calvados (14) en Basse-Normandie

Auteurs BRGM : Alexandra Laurent, Benoit Vittecoq, Renaud Couëffé, Julie Lions, Bruno Tourlière.

Demandeur : ARS Basse-Normandie

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Approbateur :	Date : 16/07/2014	
Nom : Eric Gomez	Directeur inter-régional Centre-Ouest	
Vérificateur :	Date : 15/07/2014	
Nom : Laurence Gourcy – Experte géochimiste		

Mots-clés : Expertise – Appui à la police de l'eau – Thallium – Ressource en eau – Basse-Normandie

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

LAURENT A., VITTECOQ B., COUËFFÉ R., LIONS J., TOURLIÈRE B. (2014) – Avis sur la présence de thallium dans les eaux souterraines de Basse-Normandie. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-63615-FR. 27 p.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Contexte :

Date de la formulation de la demande d'expertise au BRGM : 22 janvier 2014

Demandeur : ARS Basse-Normandie

Nature de l'expertise : Avis sur l'origine du thallium dans les eaux souterraines et sur son extension géologique

Situation : Basse-Normandie

Nature de l'intervention du BRGM : examen du rapport de SAFEGE, de l'avis de l'ANSES et des données disponibles (ARS, AESN).

Faits constatés :

La délégation territoriale départementale du Calvados (DT 14) de l'Agence régionale de santé (ARS) de Basse-Normandie a mis en évidence, en octobre 2011, la présence de thallium aux captages d'Ouezy situés dans la vallée du Laizon, avec une concentration de 55 µg/L de thallium.

Suite à ce constat, l'ARS a élargi l'analyse du thallium dans le cadre du suivi du contrôle sanitaire sur 70 points d'eau destinée à la consommation humaine répartis dans le centre et l'ouest du Calvados. Sur les 70 points de prélèvement suivis par l'ARS entre mai 2012 et janvier 2014 (cf. Illustration 3), 25 points d'eau ont montré une concentration en thallium supérieure à la limite de quantification (0,1 µg/L). La concentration maximale analysée est de 4,3 µg/L de thallium dans les eaux souterraines prélevées à St-Pierre-sur-Dives (01468X0048/FE4-95) en mai 2013.

Quels sont les risques pour la population desservie ? Quelle serait la valeur limite de référence ? Pour répondre à ces questions, la DGS (Direction générale de la santé) a saisi en 2012 l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) d'une demande d'évaluation des risques liés à la présence de thallium dans les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH). L'avis de l'Anses (Anses, 2012) « constate l'absence de données représentatives de l'ensemble du territoire français en terme de concentrations en thallium dans les eaux et le manque de robustesse des données de toxicité chronique du thallium par ingestion. ». Pour l'Anses, « il s'agit donc d'un axe prioritaire d'acquisition de connaissances».

L'étude SAFEGE (Safege, 2013a, 2013b) écarte une pollution d'origine anthropique et conclut que la présence de thallium dans les eaux souterraines serait d'origine naturelle et que la source primaire de cet élément serait localisée dans les premiers dépôts surmontant la discordance varisque (accumulation préférentiellement du thallium dans les dépôts organiques anciens). SAFEGE émet également l'hypothèse d'une stratification du bathonien (et d'un gradient vertical croissant vers la base), les eaux venant de niveaux inférieurs aux caillasses de Fontaine-Henry contenant du thallium dans l'ensemble des échantillons prélevés dans les ouvrages situés sur le secteur étudié.

En 2014, l'Agence de l'eau Seine-Normandie, dans le cadre des campagnes de suivi de la qualité des eaux souterraines, dites « campagnes photographiques », a ajouté le thallium à la liste des paramètres suivis. Une première campagne de prélèvement a ainsi été réalisée en avril et la seconde est prévue à l'automne. Les résultats brutes de la première campagne de prélèvement des analyses du thallium ont été fournis au BRGM mi-juin 2014.

Avis du BRGM :

La présence de thallium dans les eaux souterraines ne concerne pas uniquement l'aquifère du Bajo-bathonien mais s'observe également dans les aquifères du Trias et dans une vingtaine de forages captant les aquifères de socle du massif armoricain (cf. Illustration 4). Les trois départements de la région sont ainsi concernés. **Les concentrations les plus élevées s'observent néanmoins principalement dans l'aquifère « multicouches » du Bajo-bathonien, dans le Calvados et l'Orne**.

Il est possible d'émettre plusieurs hypothèses sur l'origine du thallium présent dans les eaux souterraines de la région. Le thallium pourrait provenir soit (i) de l'aquifère lui-même, c'est-à-dire qu'il serait porté par des minéraux présents dans l'aquifère et qu'il serait mobilisé *in situ* via des processus physico-chimiques ; soit (ii) il est apporté par des fluides venant d'un aquifère ou aquitard voisin.

Le thallium étant préférentiellement associé aux sulfures, l'hypothèse la plus probable serait d'envisager une remobilisation de cet élément par oxydation des sulfures présents dans les aquifères (associés aux pyrites par exemple), oxydation amorcée par apport d'agents oxydants (nitrates, O_2 dissous…). Le relargage de thallium peut également se produire lors de la dissolution des oxy-hydroxydes de fer dans l'hypothèse où ces minéraux fixent le thallium en solution.

Ces processus (détaillés dans le chapitre 4) peuvent se produire dans les zones de transition nappes libres/nappes captives ou lors de la désaturation de niveaux aquifères riches en sulfures comme les zones de battements de nappes (nappe libre) ou lors du rabattement de la nappe par des forages d'exploitation. Ces processus-physico-chimiques sont donc à considérer comme « dynamiques » avec une cinétique dépendante des variations des conditions d'oxygénation.

Un contrôle renforcé pourrait être ciblé sur les secteurs susceptibles de présenter ce type de dynamique comme par exemple la zone de transition nappe libre / nappe captive du Bathonien au passage sous couverture des marnes calloviennes ou la zone de transition nappe libre / nappe captive du Bajocien sous le toit des marnes de Port-en-Bessin. Une attention particulière devrait également être portée aux modalités d'exploitation des forages les plus impactés et à l'adéquation entre les cycles de pompages et le contexte hydrogéologique des nappes associées.

Les données disponibles ne permettent pas d'identifier avec certitude l'origine primaire du thallium, même si l'hypothèse la plus probable serait le « socle briovérien ». La présence de thallium associé aux sulfures au sein des formations carbonatées pourrait expliquer la présence de thallium observé dans les forages quand les conditions d'oxydo-réduction permettent sa remobilisation. Les mécanismes ayant permis le « transfert » du thallium du socle vers les réservoirs carbonatés restent à définir (circulations post-paleozoïques de fluides minéralisés comme le laissent supposer la répartition des indices à barytine ?).

Recommandations :

Un ensemble de recommandations sont formulées dans le chapitre 5, afin de mieux cerner l'étendue de la présence de thallium dans les eaux souterraines, d'identifier avec d'avantage de précision les niveaux aquifères impactés, de préciser les mécanismes physico-chimiques en jeu et de mettre en évidence l'origine primaire du thallium.

Il serait ainsi notamment nécessaire de poursuivre (i) l'identification des niveaux aquifères captés et les conditions hydrodynamiques et hydrochimiques associées, (ii) l'interprétation des données des campagnes de prélèvement (notamment celles de l'AESN), (iii) d'effectuer des analyses multiéléments dans les ouvrages impactés et (iv) des prélèvements multi-niveaux dans quelques forages situés dans les différents aquifères impactés. Une attention particulière sera également à apporter aux conditions de prélèvement et de conditionnement des eaux (filtration et acidification sur site), les éléments traces étant très sensibles aux phénomènes d'adsorption / précipitation et aux problèmes de contamination de l'échantillon dans la chaîne analytique depuis le prélèvement jusqu'à l'analyse.

Enfin, la réalisation d'une campagne d'analyses dans les roches avec un échantillonnage représentatif de la variété des terrains potentiellement porteurs du thallium devrait permettre d'identifier la source primaire de thallium.

Sommaire

1. Contexte de l'avis 7

1.1. HISTORIQUE 7

1.2. ETUDE SAFEGE, 2013 8

1.3. DONNEES DISPONIBLES 10

2. Contexte géologique et hydrogéologique 13

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE 13

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE SIMPLIFIE 15

2.3. ANALYSE DES RESULTATS DE L'ETUDE SAFEGE 16

3. Analyse des données géochimiques 18

4. Hypothèses sur l'origine du thallium 21

4.1. PREAMBULE 21

4.2. HYPOTHESES 22

4.2.1 Mobilisation « *in-situ* » 22

4.2.2 Venues d'eaux riches en thallium 22

4.2.3 Extension géographique 22

4.2.4 « Source » du thallium 23

5. Recommandations et préconisations 24

6. Bibliographie 26

7. Annexe : Analyses quantifiées (Campagnes de prélèvement ARS, SAFEGE et Agence de l'Eau Seine Normandie) 27

Liste des illustrations

Illustration 1 : Tableau récapitulatif des analyses réalisées par SAFEGE (SAFEGE, 2013b) dans différents compartiments naturels 8

Illustration 2 : Récapitulatif des trois jeux de données des teneurs en thallium 10

Illustration 3 : Localisation des points de prélèvement et analyses du thallium par l'ARS et SAFEGE (Lq = 0,1 µg/L), fond de carte géologique au 1/1 000 000ème 11

Illustration 4 : Localisation des points de prélèvement et analyses du thallium par l'Agence de l'eau, fond de carte géologique au 1/1 000 000ème 12

Illustration 5 : Localisation des synclinaux paléozoïques reconnus en bordure et sous la couverture jurassique de la plaine de Caen-Argentan. Le synclinal de Ranville n'est connu que d'après les sondages de reconnaissance minière. 13

Illustration 6 : Les formations géologiques du Jurassique inférieur à supérieur formant la couverture sédimentaire, avec localisation des principaux aquifères (d'après Dugué et al., 1998). 14

Illustration 7 : Coupe géologique nord-sud au moment du dépôt des sédiments liasiques. Rôle des paléoreliefs générés par la discordance varisque sur l'épaisseur et les conditions de dépôt au Jurassique inférieur (source : http://www.etab.ac-caen.fr/discip/geologie/)..... 15

Illustration 8 : Teneurs en arsenic supérieures à 100 ppm mesurées dans les échantillons de l'inventaire minier 18

Illustration 9 : Teneurs en zinc supérieures à 100 ppm mesurées dans les échantillons de l'inventaire minier 19

Illustration 10 : Report des indices miniers. 20

1. Contexte de l'avis

1.1. HISTORIQUE

La délégation territoriale départementale du Calvados (DT 14) de l'Agence régionale de santé (ARS) de Basse-Normandie a mis en évidence en octobre 2011 la présence de thallium aux captages d'Ouezy situés dans la vallée du Laizon, avec une concentration de 55 µg/L de thallium.

Suite à ce constat, l'ARS a élargi l'analyse du thallium dans le cadre du suivi du contrôle sanitaire sur 70 points d'eau destinée à la consommation humaine répartis dans le centre et l'ouest du Calvados. Sur les 70 points de prélèvement suivis par l'ARS entre mai 2012 et janvier 2014 (Illustration 3), 25 points d'eau ont montré une concentration en thallium supérieure à la limite de quantification (0,1 µg/L). La concentration maximale analysée est de 4,3 µg/L de thallium dans les eaux souterraines prélevées à St-Pierre-sur-Dives (01468X0048/FE4-95) en mai 2013.

Quels sont les risques pour la population desservie ? Quelle est la valeur limite de référence ? Pour répondre à ces questions, la DGS (Direction générale de la santé) a saisi en 2012 l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) d'une demande d'évaluation des risques liés à la présence de thallium dans les eaux destinés à la consommation humaine (EDCH). L'avis de l'Anses (Anses, 2012) « constate l'absence de données représentatives de l'ensemble du territoire français en terme de concentrations en thallium dans les eaux et le manque de robustesse des données de toxicité chronique du thallium par ingestion». Pour l'Anses, « il s'agit donc d'un axe prioritaire d'acquisition de connaissances».

En 2013, le SPEP Sud Calvados a confié la réalisation d'une étude sur l'origine du thallium dans les eaux souterraines et les réseaux de distribution sur son territoire au bureau d'étude SAFEGE (associé avec le professeur J. CARRE de l'École des Hautes Études en Santé Publique - EHESP). Le secteur d'étude s'étendait de Moult à Falaise sur environ 350 km², comprenant la vallée du Laizon. L'étude SAFEGE écarte une pollution d'origine anthropique et conclut que la présence de thallium dans les eaux souterraines serait d'origine naturelle et que la source primaire de cet élément serait localisée dans les premiers dépôts surmontant la discordance varisque (accumulation préférentiellement du thallium dans les dépôts organiques anciens). SAFEGE émet également l'hypothèse d'une stratification du bathonien (et d'un gradient vertical croissant vers la base), les eaux venant de niveaux inférieurs aux caillasses de Fontaine-Henry contenant du thallium dans l'ensemble des échantillons prélevés dans les ouvrages situés sur le secteur étudié.

En 2014, l'Agence de l'eau Seine-Normandie, dans le cadre de ses campagnes de suivi de la qualité des eaux souterraines (réseaux de contrôle de surveillance et opérationnel), a ajouté le thallium à la liste des paramètres suivis. Une première campagne de prélèvement a ainsi été réalisée en avril et la seconde est prévue à l'automne. Les résultats brutes de la première campagne de prélèvement des analyses du thallium ont été fournis au BRGM mi-juin 2014.

Le thallium est un paramètre peu recherché dans les eaux souterraines et peu d'analyses sont disponibles dans ADES (http://www.ades.eaufrance.fr/). Un export a été fait début juin 2014 sur l'ensemble du territoire français. Sur 8568 analyses du thallium dans les eaux souterraines disponibles, 7711 sont qualifiées de correctes et sont exprimées en µg/L. La limite de quantification de 98 % des analyses correctes est de 0,1 µg/L. 1253 points ont été prélevés, 97% d'entre eux se situent dans le bassin Rhin-Meuse. Seulement 5 analyses sont disponibles en Basse-Normandie, réalisées dans la Manche et dans le Calvados (Données SISE-Eaux).

Parmi les 7711 analyses correctes, pour lesquelles les dates de prélèvements des échantillons s'étalent entre 1999 et 2013, seulement 109 analyses ont été quantifiées. Les concentrations varient entre 0,1 et 20 µg/L. La concentration médiane du jeu de données est de 0,3 µg/L. Le point de prélèvement, dans lequel une concentration maximale de 20 µg/L de thallium a été analysée, se situe en Eure-et-Loir. Il a été investigué dans le cadre d'une pollution anthropique.

La toxicité chronique du thallium est mal établie. Les données existantes sur le thallium sont lacunaires et il est difficile de conclure sur les risques sanitaires liés à la présence de thallium dans les eaux ainsi que sur une valeur limite de référence (Anses, 2012). L'agence de protection environnement des Etats-Unis (US EPA, http://water.epa.gov/drink/contaminants/) a défini un standard pour la consommation d'eau potable à 2 µg/L.

De la même façon, l'estimation des fonds géochimiques en thallium dans les eaux souterraines en France et particulièrement dans le Calvados est complexe puisque peu de données sont disponibles. D'après la synthèse bibliographique de SAFEGE, 2013b, les quelques valeurs de teneur en thallium dans les eaux souterraines varient entre 0,001 et 2 µg/L.

D'après l'atlas géochimique européen (FOREGS Geochemical atlas), le fond géochimique européen contiendrait en moyenne 0,009 µg/L de thallium dans les eaux de surface, avec un maximum de 0,22 µg/L et une médiane de 0,005 µg/L (807 échantillons). L'étude européenne sur les eaux souterraines embouteillées (Reimann and Birke, 2010) donne des concentrations maximales de 2,14 µg/L et une médiane de 0,004 µg/L (264 échantillons).

1.2. ETUDE SAFEGE, 2013

Suite à la mise en évidence de la présence de thallium dans les eaux souterraines du Calvados, le SPEP Sud Calvados a confié une étude au bureau d'études SAFEGE. Les objectifs listés dans le rapport SAFEGE, 2013a sont :

- Déterminer l'origine du thallium
- Délimiter la zone d'impact
- Caractériser le rôle de la dénitrification naturelle
- Comprendre et prévoir l'évolution des stocks
- Définir les modalités de gestion et/ou les plans d'actions

SAFEGE a conduit l'étude en deux phases, la première consista à synthétiser les données existantes sur le thallium et la seconde permit d'acquérir des données dans différents compartiments du milieu naturel et de proposer une hypothèse quant à l'origine du thallium.

L'Illustration 1 synthétise les prélèvements et analyses de thallium effectués par SAFEGE.

Compartiments	Sols	Roches	Eaux souterraines	Eaux de surface	Sédiments
Nb de sites de prélèvement	17	4	23	10	10
Nb d'éch. analysés	41	12	25	10	10
Nb d'éch. quantifiés	23	9	16	0	5
Profondeur min des éch. (en m)	0,5	Carrière	Source		
Profondeur max des éch. (en m)	1,5	Carrière	94,5		
Unité	mg/kg MS	mg/kg MS	µg/L	µg/L	mg/kg MS
LQ	0,4	A définir	0,1	0,2	0,4
Concentration max	0,828	16,5	4,7	-	0,49
Concentration médiane	0,418	0,87	0,16	-	0,4

Illustration 1 : Tableau récapitulatif des analyses réalisées par SAFEGE (SAFEGE, 2013b) dans différents compartiments naturels

Parmi les échantillons d'eaux souterraines, 3 échantillons ont été réalisés dans le même forage à des profondeurs différentes (30, 40 et 50 m), à l'aide d'un échantillonneur à messager.

Les échantillons de roche ont quant à eux été prélevés au niveau :

- de la discordance varisque (8 échantillons dans les carrières de Perrières, Sassy et Villedieu-lès-Bailleul http://www.etab.ac-caen.fr/discip/geologie/),
- des calcaires du Bajocien (1 échantillon),
- des minerais de fer (3 échantillons).

Parmi les 12 échantillons de roche analysés, 1 échantillon (carrière de Perrière) a été analysé selon deux méthodes différentes, les teneurs s'élèvent à 16,5 et 11,6 mg/kg MS. SAFEGE émet deux hypothèses sur cette différence de concentration : soit elle correspond à l'incertitude de la mesure, soit à la variation de matière organique au sein du même échantillon. Aucune analyse de matière organique n'est cependant présentée dans l'étude.

Les méthodes analytiques des différents échantillons ne sont pas présentées. L'incertitude des mesures liée au prélèvement, l'échantillonnage et à l'analyse n'est pas présentée.

Sur la source du thallium :

La source du thallium ne serait pas d'origine anthropique : absence de stratification des teneurs dans les sols (écartant l'hypothèse de retombées atmosphériques), absence de teneurs anormales dans les résidus de minerai des principales mines de la zone d'étude et inexistence de processus industriels susceptibles de concentrer et d'émettre du thallium.

L'origine naturelle du thallium est privilégiée. La source primaire de cet élément serait localisée dans les premiers dépôts surmontant la discordance varisque, au contact entre les terrains paléozoïques et les calcaires aquifères du Jurassique moyen. L'analyse d'un échantillon de roche prélevé dans la carrière de Perrières révèle des concentrations importantes en thallium au sein de minces horizons organiques recouvrant immédiatement la discordance varisque séparant ici le faciès d'écueil du Jurassique moyen et les Grès armoricains.

Observations et hypothèse sur la présence de thallium dans les eaux souterraines :

Le thallium semble se concentrer majoritairement à la base de l'aquifère bathonien dans le niveau géologique « infra Fontaine-Henry ». Un gradient de concentration vertical (croissant du haut vers le bas) est présenté dans un des piézomètres ayant fait l'objet de prélèvements pour analyse. SAFEGE conclut à une stratification du thallium dans les eaux du Bathonien, renforçant ainsi l'hypothèse d'une source à la base de la série carbonatée jurassique.

1.3. DONNEES DISPONIBLES

Trois bases de données, issus des campagnes de prélèvement dans les eaux souterraines réalisées par l'ARS, SAFEGE et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (Illustration 2), ont été mises à la disposition du BRGM.

L'avis s'est également basé sur les données utilisées lors de l'étude réalisées en 2013 par le BRGM pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie[1] portant sur le fond géochimique. Les données de surveillance validées de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie sur la période 1997-2010 ont été utilisées pour cette étude. Les résultats de cette étude permettent de conclure sur la délimitation de secteurs avec des concentrations naturellement élevées en fer, sulfates et chlorures (Plaine de Dives), fluor (sous couverture) et localement arsenic (terrain Paléozoïque). En effet, du minerai de fer a été historiquement exploité dans les formations du Jurassique ou du Crétacé inférieure. Ces aquifères sont également recouverts localement par des argiles qui peuvent contenir du gypse et du fluor.

Enfin, afin de rechercher l'origine du thallium des eaux souterraines, d'autres bases de données ont été utilisées. Les données de l'inventaire minier (http://sigminesfrance.brgm.fr/) ont ainsi été utilisées afin de pouvoir comparer les concentrations en thallium mesurées dans les eaux avec des informations sur la géochimie des roches.

Les points de prélèvement et les résultats d'analyses sont présentés dans les Illustration 3 et Illustration 4. Les teneurs en thallium sont présentées en Annexe.

Organisme	**ARS Basse-Normandie**	**SAFEGE**	**AESN**
Points de prélèvement	57	23 *(dont 5 sans codes BSS)*	97
Dates de prélèvement	05/2012 - 01/2014	03/2013	04/2014 - 05/2014
Nb d'analyses totales	302	25	97
Nb d'analyses quantifiées	223	16	57
% d'analyses quantifiées	73, 8	64,0	58,8
LQ (µg/L)	0,1	0,1	0.01
C_{max} (µg/L)	4,3	4,7	1,1
$C_{médiane\ des\ analyses\ quantifiées}$ (µg/L)	0,32	0,38	0,05
Zone d'investigation	Ouest Calvados	Vallée du Laizon	Basse-Normandie

Illustration 2 : Récapitulatif des trois jeux de données des teneurs en thallium

Les laboratoires commandités par l'ARS et l'AESN semblent avoir utilisé la même méthode analytique, mais annoncent une limite de quantification différente. Les mesures transmises par l'ARS Basse-Normandie ont été réalisées par ICP-MS, suivant la norme NF EN ISO 17294-2 avec une limite de quantification de 0,1 µg/L (Anses, 2012). Les mesures transmises par l'AESN ont été réalisées par ICP-MS, suivant la norme NF EN ISO 17294-2/T90-164 avec une limite de quantification de 0,01 µg/L.

[1] *Etude préliminaire sur l'origine des éléments de fortes concentrations et définition de valeurs seuils provisoires dans le bassin Seine-Normandie: Phase 1 (rapport en cours de validation).*

Parmi les 38 points de prélèvement localisés pour lesquels la présence de thallium a été mise en évidence lors des campagnes de l'ARS et de SAFEGE (Illustration 3) :

- 4 points captent les eaux souterraines des formations du Trias et atteignent le socle entre 20 et 40 m de profondeur. Ces points se situent au nord et à l'ouest du Calvados en bordure des formations du Jurassique,
- 24 points captent les eaux du Bathonien,
- 1 point capte les eaux du Bajocien supérieure sous-jacent aux marnes de Port-en-Bessin,
- la coupe géologique et technique est absente de la BSS pour 9 points, ce qui ne permet pas d'identifier la formation captée.

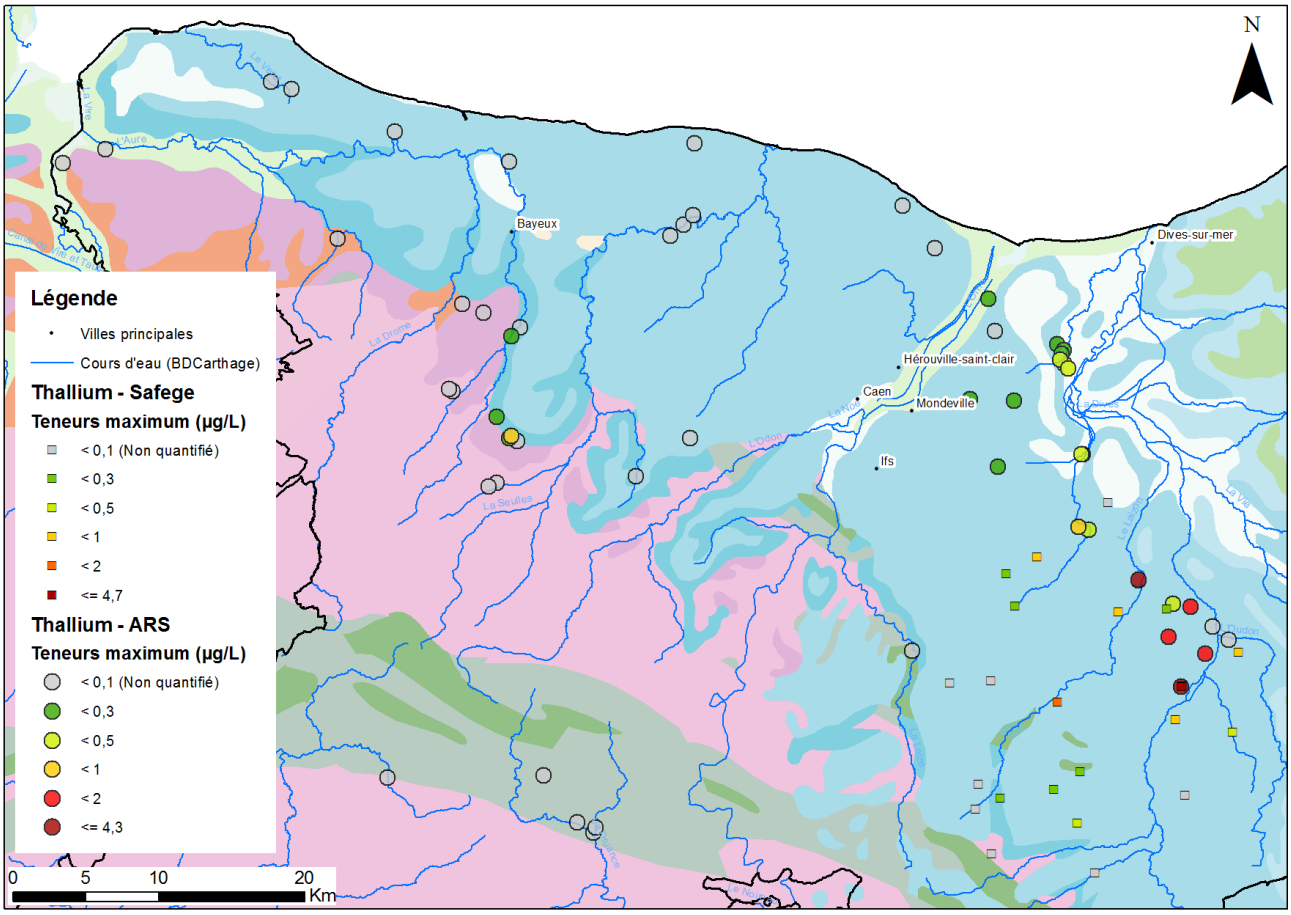

Illustration 3 : Localisation des points de prélèvement et analyses du thallium par l'ARS et SAFEGE (Lq = 0,1 µg/L), fond de carte géologique au 1/1 000 000ème

Les résultats brutes de la campagne de prélèvement organisée par l'AESN en avril 2014 sont présentés dans l'Illustration 4. Afin de pouvoir réaliser une analyse détaillée de ces résultats, il serait nécessaire d'identifier pour chacun des 97 points de prélèvement de l'AESN, les formations géologiques traversées, le ou les aquifères captés et leurs conditions hydrodynamiques et hydrochimiques, afin de pouvoir corréler les niveaux captés et la présence de thallium à l'échelle régionale.

La localisation des points des différentes campagnes permet de faire ressortir les informations suivantes :

- la majorité des forages situés au droit du bajo-bathonien révèlent une présence de thallium dans les eaux captés, l'extension de la présence de thallium allant bien au-delà du secteur étudié par SAFEGE et concerne aussi bien l'amont (dans l'Orne) que l'aval (entre Caen et Bayeux),
- des eaux prélevées dans quatre forages situés au droit des aquifères du Trias (au sud de Bayeux) contiennent également du thallium, les concentrations sont comprises entre 0,1 et 0,5 µg/L,
- enfin, des concentrations comprises entre 0,01 et 0,1 µg/l ont été mesurées dans une vingtaine de forages réalisés dans les aquifères de socle du massif armoricain (essentiellement briovérien, cambrien et ordovicien) et une concentration en thallium de 0,2 µg/L a été mesurée dans un ouvrage situé au nord-ouest de Condé-sur-Noireau en bordure du synclinal de la zone Bocaine,
- aucun des forages prélevés situés au droit des aquifères de l'Oxfordien et du Cénomanien ne présente du thallium.

La présence de thallium semble donc se révéler principalement dans l'aquifère du Bajo-Bathonien, dans lequel les concentrations les plus élevées sont rencontrées, mais aussi les aquifères du Trias et les aquifères de socle du massif armoricain, avec des concentrations plus faibles.

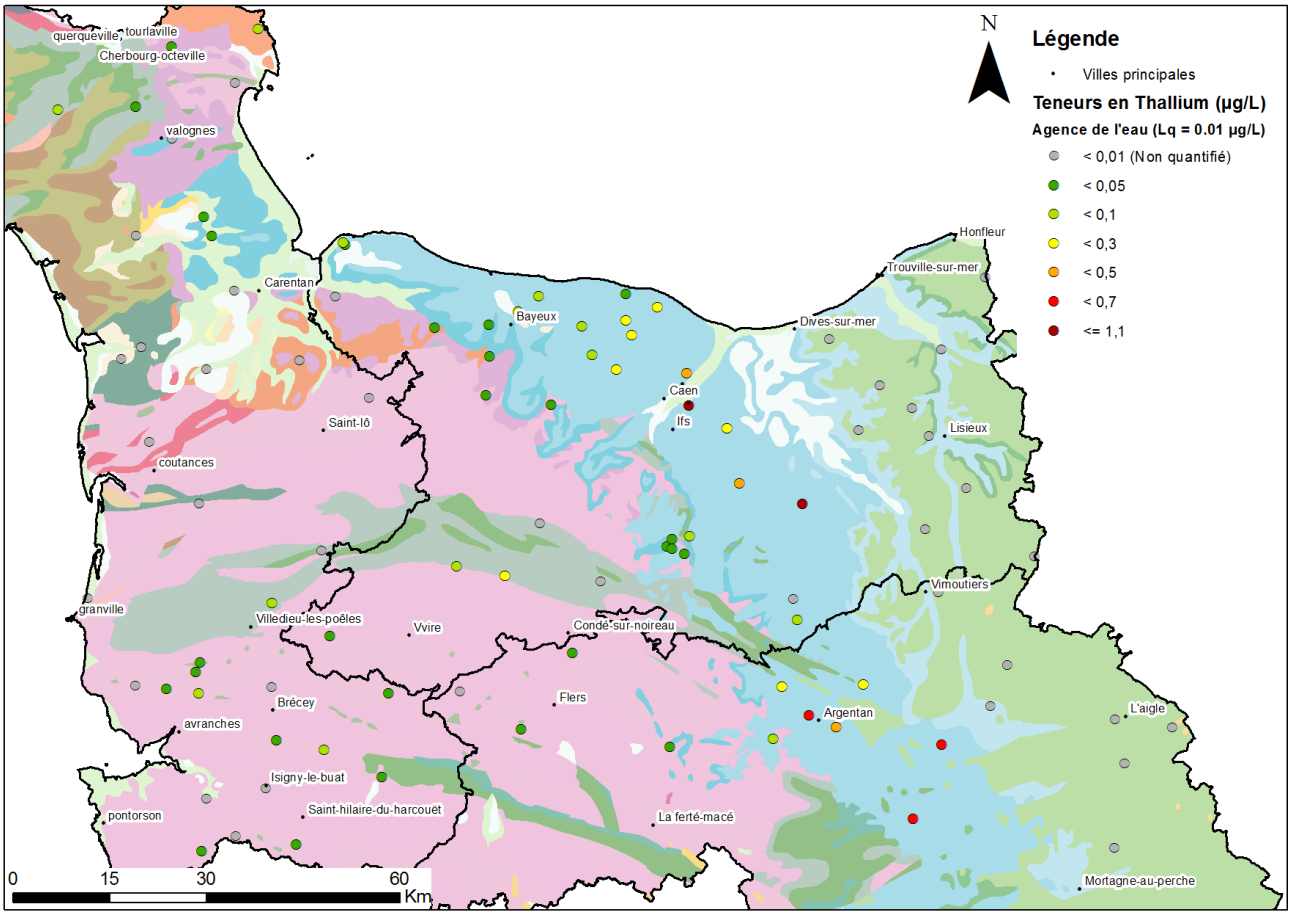

Illustration 4 : Localisation des points de prélèvement et analyses (données brutes) du thallium par l'Agence de l'eau, fond de carte géologique au 1/1 000 000ème

2. Contexte géologique et hydrogéologique

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone étudiée par SAFEGE est située à proximité du contact séparant deux domaines géologiques bien distincts : le Massif armoricain et ses terrains anciens plissés à l'ouest ; le Bassin parisien et ses terrains plus jeunes, peu déformés à l'est.

Dans cette zone, les terrains du Massif armoricain sont affectés par une série de structures plicatives subparallèles d'axe N110-N120, avec depuis le Sud vers le Nord : le synclinal de la zone Bocaine, le synclinal d'Urville, le synclinal de May-sur-Orne et le synclinal de Ranville (invisible à l'affleurement) (Illustration 5).

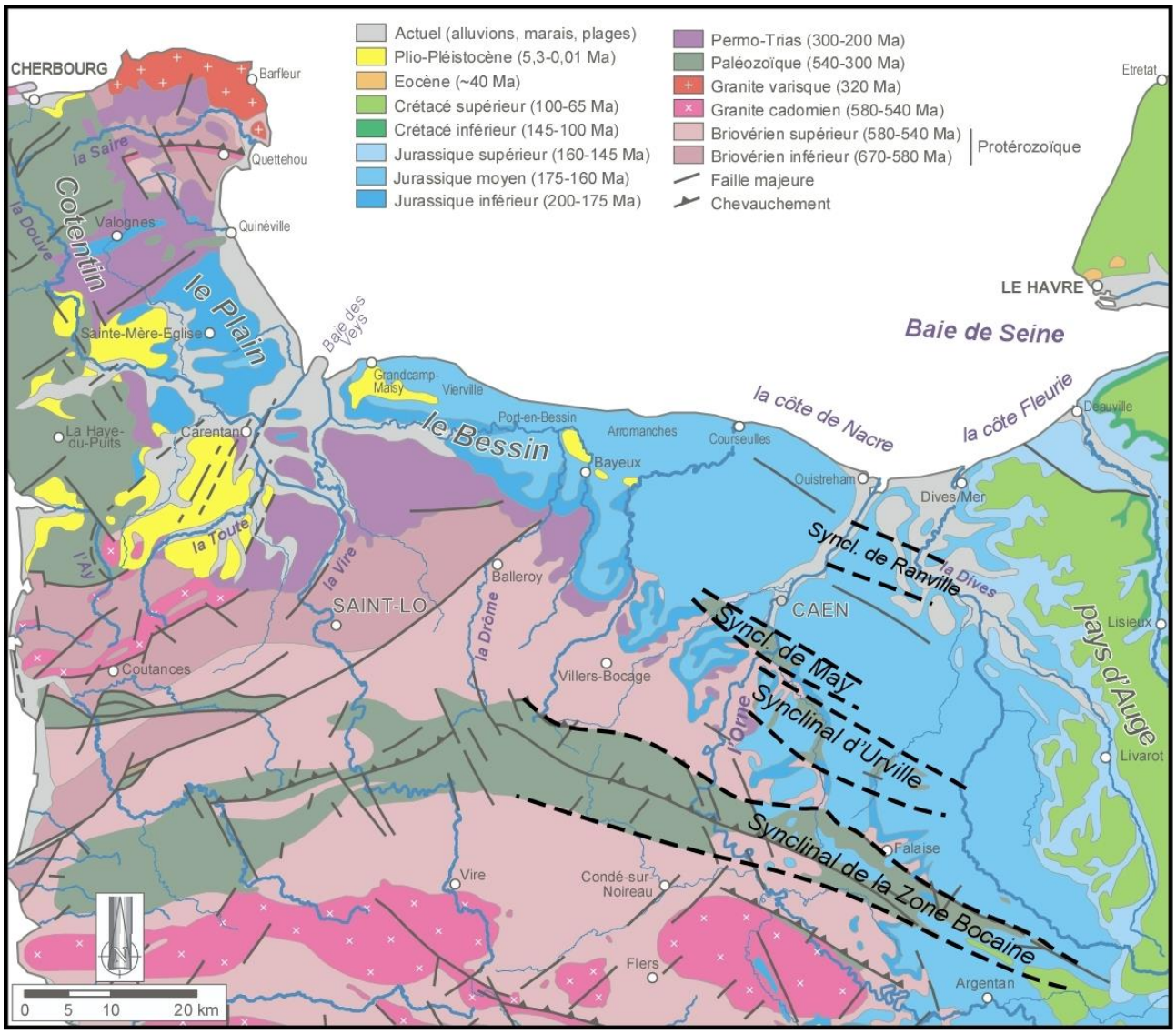

Illustration 5 : Localisation des synclinaux paléozoïques reconnus en bordure et sous la couverture jurassique de la plaine de Caen-Argentan. Le synclinal de Ranville n'est connu que d'après les sondages de reconnaissance minière.

Ces structures sont dessinées au sein de terrains paléozoïques formés d'une puissante succession de grès, d'argilites (sous forme de « schistes ») et localement de calcaires, d'âge cambrien à silurien. Les synclinaux paléozoïques sont « enchâssés » dans des terrains plus anciens (protérozoïques), très déformés, rattachés au Briovérien.

Connus à l'affleurement en bordure du massif armoricain, les terrains briovériens tout comme les terrains paléozoïques préservés au sein des synclinaux précédemment décrits se prolongent vers l'est sous la couverture jurassique de la plaine de Caen, qui appartient à la bordure occidentale du bassin parisien. Cette couverture est constituée d'une alternance de calcaires et de marnes du Jurassique inférieur et moyen (Illustration 6). De part et d'autre des synclinaux paléozoïques, des dépôts argilo-gréseux du Trias s'intercalent entre les terrains silicoclastiques du Massif Armoricain et les terrains carbonatés jurassiques du Bassin parisien. A l'est de la plaine de Caen (et plus au sud de celle d'Argentan), les premiers reliefs de la cuesta du pays d'Auge entaillent la puissante série callovo-oxfordienne à dominante argilo-marneuse. Cette couverture imperméable confère à l'aquifère bajo-bathonien son comportement captif.

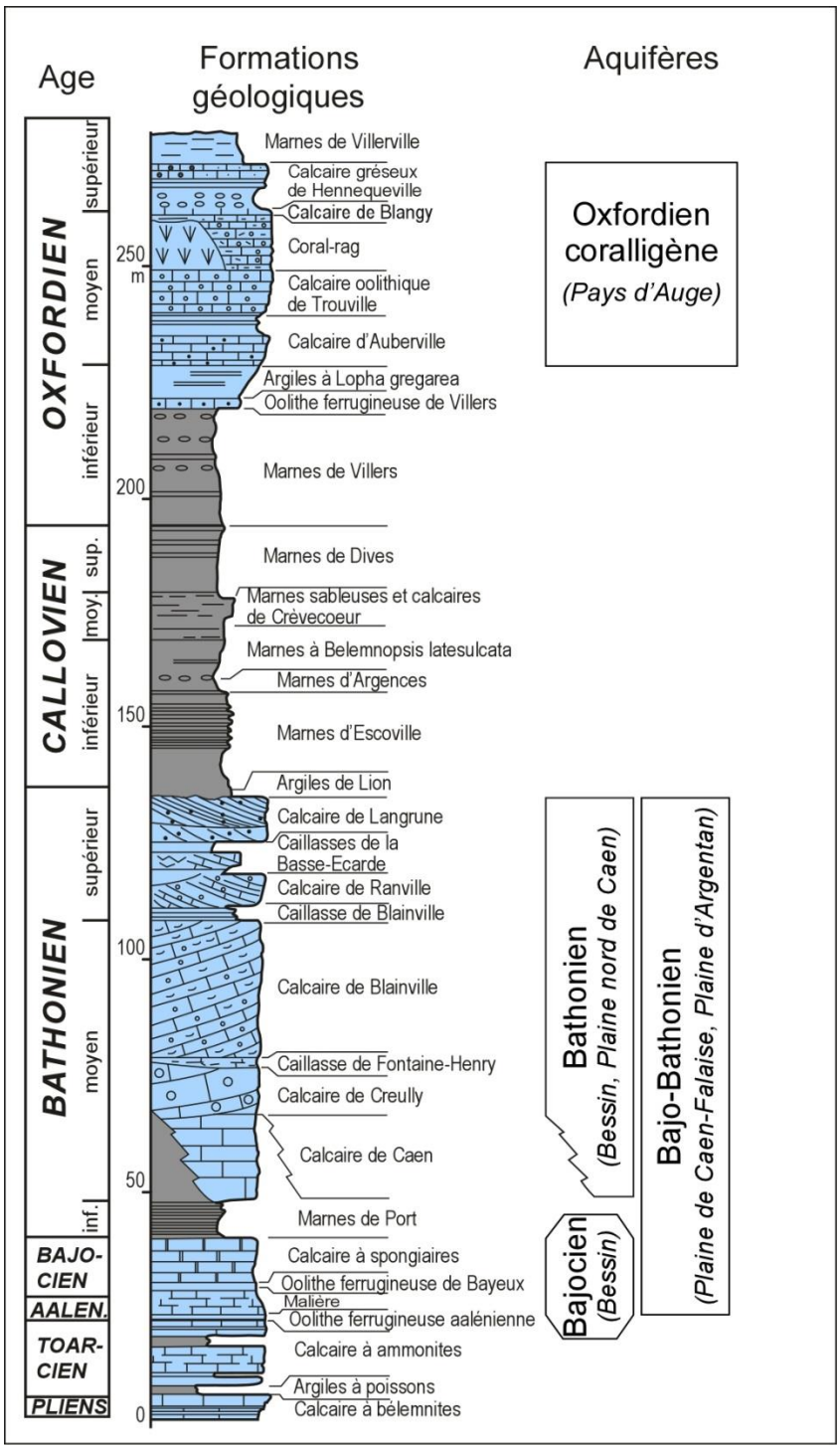

Illustration 6 : Les formations géologiques du Jurassique inférieur à supérieur formant la couverture sédimentaire, avec localisation des principaux aquifères (d'après Dugué et al., 1998).

Représentant une lacune de dépôt de près de 100 Ma, le contact entre les terrains paléozoïques plissés du Massif armoricain et les terrains carbonatés subtabulaires du Bassin parisien est une surface de discordance dont il est largement fait mention dans l'étude de SAFEGE. A noter que cette discordance - dite « discordance varisque » - existe au-delà des synclinaux paléozoïques (Illustration 7) puisque c'est aussi elle qui sépare les terrains briovériens fortement déformés des calcaires du Jurassique inférieur dans la carrière de la Roche Blain à Fresney-le-Puceux, au sud de Caen.

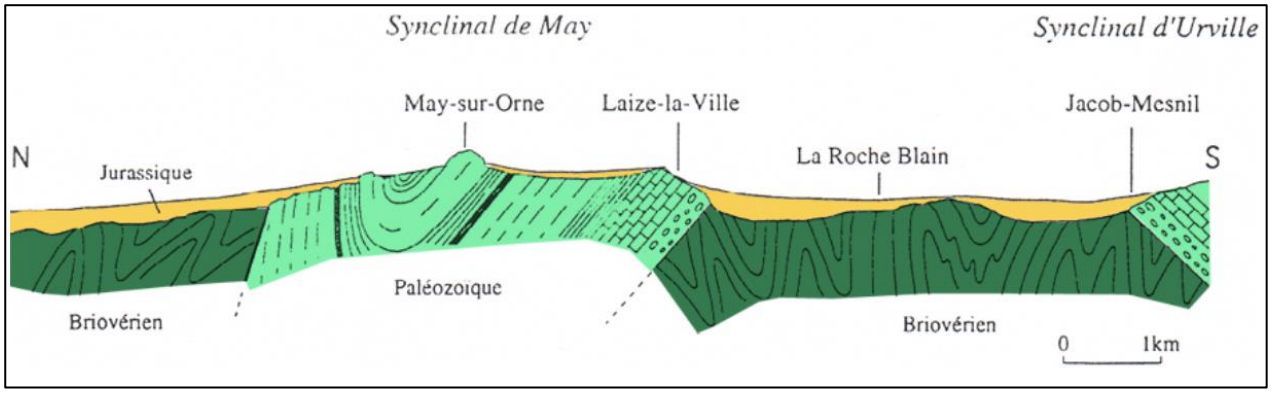

Illustration 7 : Coupe géologique nord-sud au moment du dépôt des sédiments liasiques. Rôle des paléoreliefs générés par la discordance varisque sur l'épaisseur et les conditions de dépôt au Jurassique inférieur (source : http://www.etab.ac-caen.fr/discip/geologie/).

En dehors des affleurements, on ne connaît que peu de choses des structures cassantes (failles) affectant le substratum paléozoïque. Des failles d'orientation N110, probablement à pendage nord, ont été mises en évidence dans la partie sous couverture du synclinal lors des prospections minières (Doré, 1969). Elles pourraient correspondre à des failles inverses en relation avec la formation du synclinal, par comparaison avec la structuration de la bordure nord de la zone bocaine. Le grès armoricain montre dans la partie orientale du synclinal d'Urville, sur le flanc nord, des failles normales orientées N130.

Les accidents affectant les terrains jurassiques de couverture sont peu nombreux dans la plaine de Caen et de faible rejet vertical (décamétrique). D'assez nombreuses fractures, bien visibles en photographies aériennes dans la campagne de Caen–Falaise, ont des directions dominantes généralement comprises entre N70°E et N110°E, directions proches de l'axe des structures paléozoïques. Les failles affectant la couverture jurassique et pouvant donc favoriser le cheminement du thallium en solution, résultent ainsi probablement de la réactivation de structures varisques.

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE SIMPLIFIE

L'aquifère du Bathonien est un aquifère « multicouches » constitué de bancs de calcaires entrecoupés de caillasses (Illustration 6), a priori moins perméables, pouvant ponctuellement cloisonner la nappe. Les calcaires renferment une nappe libre qui devient captive sous les argiles calloviennes à l'est. Le mur de l'aquifère est constitué des marnes de Port-en-Bessin. Vers l'est, en raison du passage latéral des marnes de Port-en-Bessin à la pierre de Caen, les calcaires bathoniens sont en continuité hydraulique avec les calcaires bajociens sous-jacents.

L'aquifère du Bajocien, situé dans la formation de base Aalénien-Bajocien, est un aquifère développé dans la fissuration des calcaires avec une karstification plus importante sous les vallées. Cet aquifère est libre dans la région de Bayeux et au sud-ouest de Caen dans la vallée de l'Orne. Ailleurs il est captif sous le toit des marnes de Port-en-Bessin. (Arnaud et al., 2007, Aquifères & Eaux souterraines, 2006).

2.3. ANALYSE DES RESULTATS DE L'ETUDE SAFEGE

Du point de vue géologique, l'étude SAFEGE conduit à conclure que le thallium présent dans les eaux serait d'origine naturelle et que la source primaire de cet élément serait localisée dans les premiers dépôts surmontant la discordance varisque.

Préalablement à la discussion des résultats obtenus et des hypothèses proposées, la terminologie utilisée par SAFEGE et en particulier l'utilisation du terme « discordance varisque » est ambiguë pour cerner spatialement la configuration propice à la présence de thallium primaire. La raison est simple : la discordance varisque est présente partout sous les terrains carbonatés, bien que cette interface mette en contact des formations géologiques variées.

La discordance varisque est la surface irrégulière limitant les terrains mésozoïques non déformés du Bassin parisien (Trias, Jurassique inférieur ou moyen suivant les secteurs), des terrains déformés paléozoïques ou protérozoïques du Massif armoricain. Ainsi, elle ne saurait être définie qu'au niveau des synclinaux paléozoïques connus à l'affleurement ou sous couverture dans la zone d'étude, c'est-à-dire uniquement par le contact stratigraphique anormal entre terrains paléozoïques et terrains jurassiques. Cette discontinuité concerne tout autant les secteurs où les dépôts triasiques recouvrent anormalement les terrains briovériens.

Concernant les résultats obtenus et les hypothèses proposées par SAFEGE, il convient de noter :

- que l'hypothèse forte d'une source du thallium dans la discordance varisque repose sur l'analyse de seulement 7 échantillons de roche prélevés au niveau de cette discontinuité dans les carrières de Perrières et de Villedieu-les-Bailleuls.

Au-delà du faible nombre d'échantillons de roche analysés, les prélèvements effectués ne peuvent être considérés comme représentatifs de la variété des configurations stratigraphiques au niveau de la discordance varisque. Ils correspondent tous à des prélèvements à l'interface entre le grès armoricain et les faciès calcaires d'écueil bajo-bathoniens et aucune mesure n'est disponible au contact entre les terrains jurassiques et d'autres termes des séries paléozoïques ou protérozoïques.

L'hypothèse d'une source du thallium dans la discordance varisque nécessite d'être validée dans d'autres configurations, notamment par l'analyse de roches dans les secteurs où les calcaires jurassiques bajo-bathoniens reposent sur les calcaires cambriens connus pour disposer de minéralisations en barytine (Vieux-la-Romaine, géosite de Laize-la-Ville) ou encore au droit de terrains réducteurs potentiellement riches en sulfures comme les terrains briovériens, les schistes ordoviciens ou les ampélites siluriennes.

- que les échantillons prélevés ayant livrés des teneurs significatives de thallium correspondent tous à des échantillons de roches meubles, friables, de granulométrie fine, à teinte d'altération (ocre-rouge, ocre-jaune, jaune, rougeâtre), interprétées soit comme des horizons enrichis en matière organique, soit comme des paléosols.

Premier constat : les photos et commentaires donnés dans le rapport SAFEGE (exemple de l'échantillon P2 de type « fines « ocre-jaune » déposées sur gros blocs » qui pourraient correspondre à des matériaux colluvionnés ; Tableau p.27) peuvent amener à douter sur le caractère « en place » (in situ) des échantillons collectés et plus que des échantillons de la base de la série jurassique, il pourrait s'agir de matériaux mobilisant des formations superficielles.

Concernant l'interprétation de ces roches friables à granulométrie fine comme horizons organiques ou comme paléosols, de tels dépôts n'ont jamais jusqu'alors été décrits au niveau de la discordance varisque, malgré de nombreuses études sur l'objet « discordance » ou sur les carrières ayant fait l'objet de prélèvements (Bigot, 1927 ; Bigot, 1934 ; Rioult, 1985 ; Rioult et al., 1992 ; Dugué et al., 1998 ; Gigot et al., 1999 ; Deroin et al., 1999 ; Inventaire du patrimoine géologique bas-normand). Par ailleurs, cette interprétation va à l'encontre de la dynamique sédimentaire ayant régné lors du dépôt des calcaires jurassiques au droit des écueils paléozoïques.

Après son plissement lors de l'orogenèse hercynienne, la formation des grès armoricains n'a subi qu'une érosion relativement faible par rapport aux autres dépôts gréso-argileux paléozoïques bien plus tendres. Cette érosion différentielle a conduit à la formation d'une paléotopographie très irrégulière (Illustration 7), d'abord remblayée localement par les terrains argilo-gréseux triasiques, puis inondée de façon diachrone lors de la transgression jurassique. Lors du dépôt des calcaires bajo-bathoniens, les grès armoricains ont de ce fait localement formé des paléoreliefs (écueils) où les conditions de dépôt étaient bien différentes de celles rencontrées au droit des faciès plus tendres du Paléozoïque (schistes cambriens ou ordoviciens, ampélites siluriennes) et du Briovérien.

Régionalement, aucun affleurement n'est connu pour révéler des faciès à matière organique au contact entre le Paléozoïque et les faciès d'écueil du Jurassique ou juste au-dessus dans les premiers dépôts jurassiques. Sur les principaux affleurements répertoriés (Soumont-Saint-Quentin, Perrières, Villedieu-les-Bailleurs, May-sur-Orne, Laize-la-Ville), la discordance varisque est toujours recouverte par des faciès calcaires bioclastiques souvent sableux, typique d'environnements à dynamique sédimentaire significative (milieu agité), ambiance de dépôt qui cadre mal avec la possibilité de préserver des sédiments fins (argileux) contenant de la matière organique. De la même manière, la présence d'un paléosol préservé entre les grès armoricains et les dépôts calcaires bioclastiques dans la carrière de Villedieu-les-Bailleuls reste surprenante.

En revanche, des niveaux altérés friables et minéralisés (ferrugineux) sont fréquemment observés au sommet des Grès armoricains mais il s'agit de faciès résultant de la circulation de fluides au contact socle-couverture. Ils ne peuvent donc être interprétés ni comme un paléosol ni comme un dépôt sédimentaire post-paléozoïque (triasique ou jurassique).

Sur la présence de thallium dans les eaux souterraines, SAFEGE propose, sur la base d'une analyse complète et convaincante des données de forage, que le thallium se concentre majoritairement à la base de l'aquifère bathonien dans le niveau géologique « infra Fontaine-Henry ».

SAFEGE dissocie en deux parties l'aquifère des calcaires du bathonien, l'une sus-jacente aux caillasses de Fontaine-Henry et l'autre sous-jacente aux caillasses de Fontaine-Henry. Or les caillasses de Fontaine-Henry forment une couche peu épaisse (généralement de l'ordre du mètre), localement fissurées et fracturées, avec d'importantes variations latérales de faciès. Il est ainsi délicat de les considérer comme un horizon imperméable continu. Le rôle hydrogéologique de ces caillasses est ainsi délicat à déterminer, faute de données disponibles pour caractériser avec précision leurs paramètres hydrodynamiques.

La stratification du thallium dans les eaux du Bathonien proposée par SAFEGE renforce l'hypothèse d'une source à la base de la série carbonatée jurassique et conforte l'hypothèse de « la discordance varisque ». Néanmoins, il est à noter que, dans le cas des prélèvements multi-niveaux, l'échantillonneur à messager utilisé risque de favoriser le mélange des eaux, le niveau ainsi prélevé pourrait ne pas être représentatif du niveau aquifère correspondant. Ainsi, l'hypothèse d'un gradient de concentration vertical, croissant du haut vers le bas, en thallium dans les eaux du Bathonien, nécessiterait d'être confirmé par un autre protocole de prélèvement (*cf*. chapitre 5).

Les résultats d'analyses complémentaires fournis par l'ARS et l'AESN montrent que le « panel » des terrains géologiques concernés ne se limite pas au bathonien et à la discordance varisque, mais semblent également s'étendre au bajocien, ainsi qu'aux terrains argilo-gréseux triasiques de la bordure sud du Bessin, ainsi qu'aux formations du massif armoricain (protérozoïque et paléozoïques) avec des valeurs maximales en thallium plus faibles mais significatives.

3. Analyse des données géochimiques

Une analyse succincte de la base des données géochimiques, SIG Mines France (http://sigminesfrance.brgm.fr/) a été réalisée afin de rechercher des corrélations avec les concentrations en thallium mesurées dans les eaux souterraines.

Les zones de socle ante-mésozoïque situées à l'ouest de la plaine de Caen ont été échantillonnées en "stream sediment" par la SNEAP dans le cadre de l'inventaire minier. Ces échantillons ont été analysés pour la recherche d'éléments métalliques. Le thallium d'origine naturelle est principalement associé aux sulfures (Imbert, 2007 et Anses, 2012). Ainsi, ces analyses peuvent être utilisées pour mettre en évidence des zones pouvant être une source de sulfures porteurs originels du thallium.

L'arsenic est généralement porté par le mispickel, un arsenio-sulfure de fer. Le report des teneurs en arsenic supérieures à 100 ppm (Illustration 8) montre des zones de fortes concentrations en arsenic (et donc potentiellement en sulfures et thallium) localisées dans les formations briovériennes mais absentes des synclinaux paléozoïques.

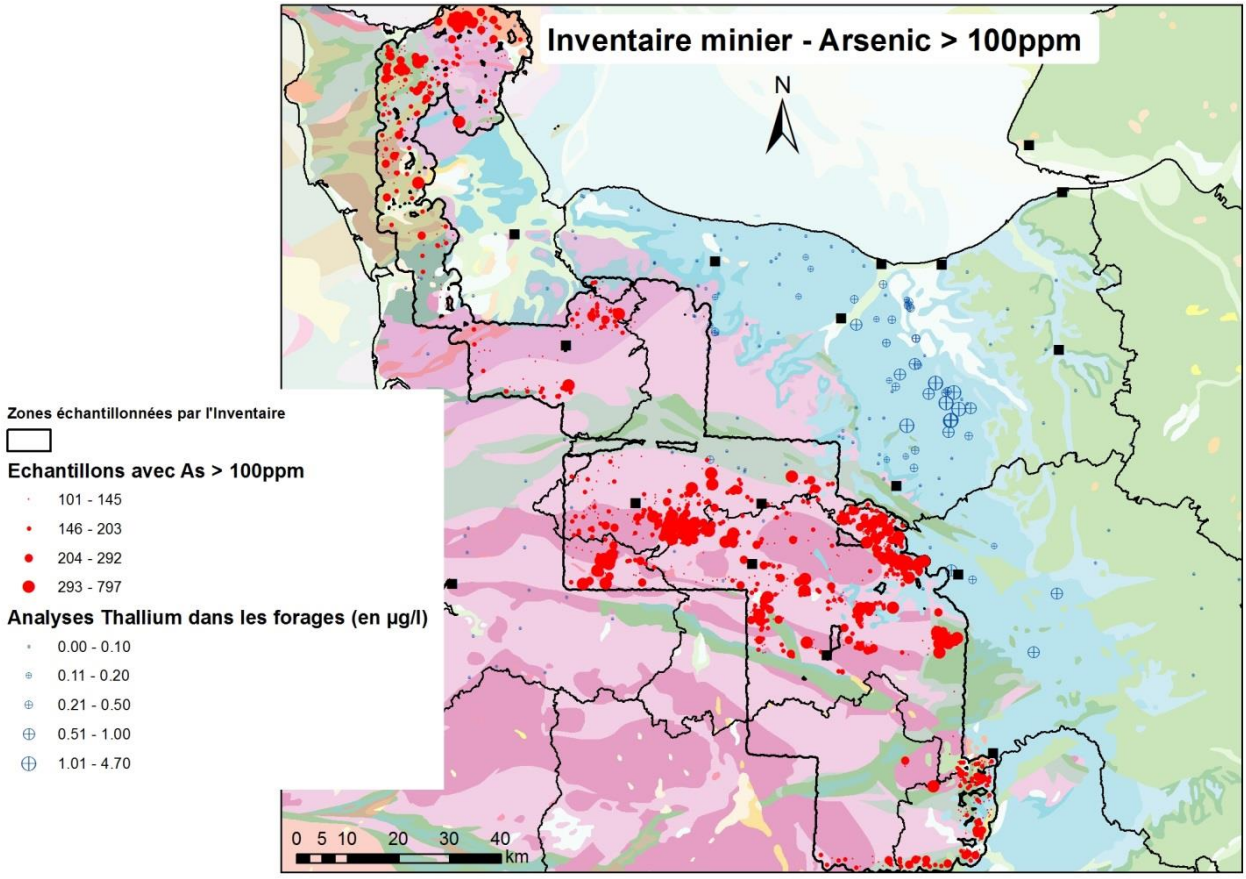

Illustration 8 : Teneurs en arsenic supérieures à 100 ppm mesurées dans les échantillons de l'inventaire minier

Les teneurs en zinc (essentiellement porté par la blende, un sulfure de zinc) sont plus largement réparties (Illustration 9) mais restent essentiellement cantonnées dans le bâti briovérien malgré quelques points localisés dans les synclinaux paléozoïques. Ces deux cartes montrent ainsi que le socle briovérien est une source de sulfures.

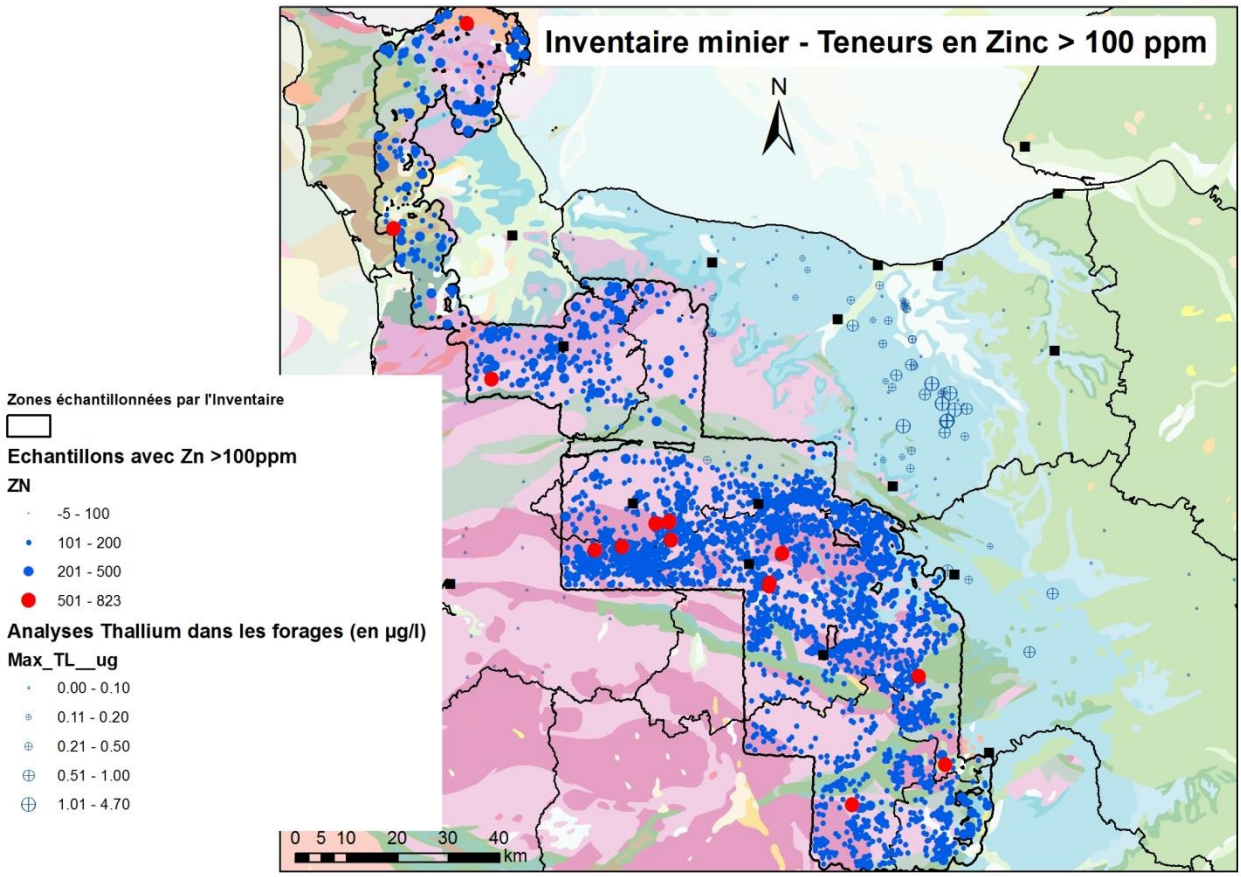

Illustration 9 : Teneurs en zinc supérieures à 100 ppm mesurées dans les échantillons de l'inventaire minier

L'ensemble des indices miniers répertoriés sur le secteur ont été reportés sur l'Illustration 10.

Sur cette carte, plusieurs faits sont notables:

- la présence d'indices polymétalliques à Pb-Zn, à Ag et à As confirme le potentiel des formations briovériennes à porter des sulfures,
- les indices de fer sont plus nombreux dans les synclinaux paléozoïques avec une grande diversité de présentation (stratiforme, résiduel, amas…),
- la répartition des indices à barytine (sulfates de baryum) dans ou à proximité de la couverture jurassique est intéressante car elle montre l'influence de circulations post-paleozoïques avec des fluides sulfatés probablement issus de la décomposition des sulfures ce qui permettrait la remobilisation de thallium dans le réservoir carbonaté.

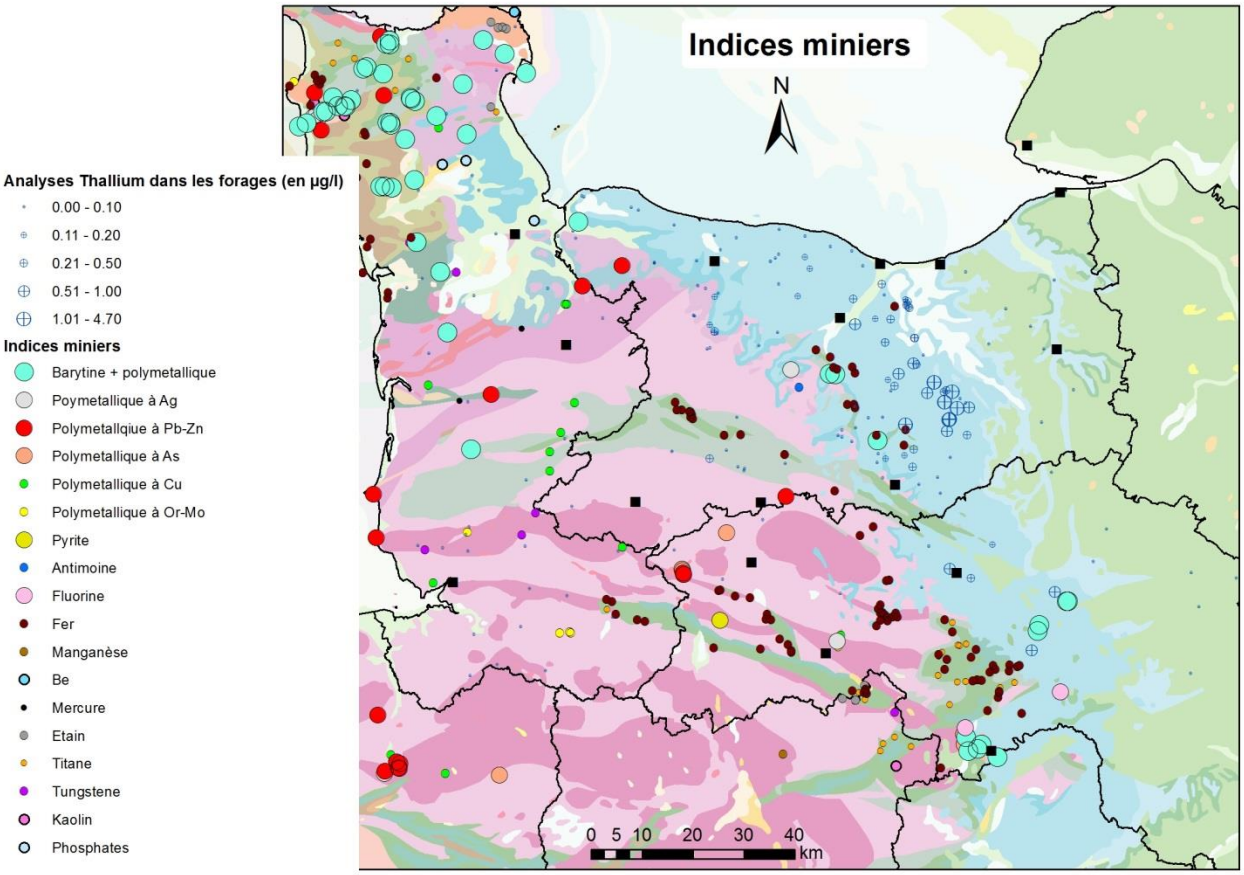

Illustration 10 : Report des indices miniers.

L'ensemble de ces observations irait donc dans le sens d'une origine "socle briovérien" des sulfures qui seraient la source du thallium observé dans les forages, quand les conditions d'oxydo-réduction permettent sa remobilisation. Les indices de barytine dans le mésozoïque (Trias, Jurassique) seraient un indice supplémentaire d'une remobilisation postérieure de fluides issus de la décomposition des sulfures des formations de socle.

4. Hypothèses sur l'origine du thallium

4.1. PREAMBULE

Dans les aquifères, la chimie des eaux dépend des processus d'interactions entre les eaux et les roches. Ces processus incluent les réactions de précipitation/dissolution et de sorption (complexation et échange d'ions). Ces processus contrôlent également le comportement et le devenir de polluants d'origine naturelle ou anthropique dans la nappe tout au long de leur transfert depuis la source.

Bien que les équilibres biogéochimiques contrôlent la mobilité des éléments dissous dans la nappe, ils peuvent être perturbés. En effet, des modifications des conditions physico-chimiques comme les conditions acido-basiques du milieu (pH), le potentiel d'oxydo-réduction (Eh ou redox) et la composition de l'eau peuvent modifier ces équilibres et entrainer une remobilisation d'éléments potentiellement présents et mobilisables au sein de l'aquifère.

La nature et la composition de l'aquifère (minéralogie, composition chimique, teneurs en matière organique ou en argiles, microflore bactérienne) vont également jouer un rôle sur la mobilité des éléments et ainsi selon les conditions favoriser le piégeage ou à l'inverse le relargage d'éléments en solution.

Ainsi, même si l'origine d'un polluant est naturelle, sa concentration peut être fortement impactée par les activités anthropiques. Ainsi, différents cas ont été rapportés où les interactions naturelles entre les eaux souterraines et la roche aquifère ont été modifiées du fait de pollutions induites par l'Homme ou par des modifications des conditions hydrodynamiques (exploitation des nappes) entrainant par exemple le relargage d'éléments traces.

Le thallium d'origine naturelle est principalement associé aux sulfures (pyrite, galène, sphalérite, chalcopyrite). Son comportement dans les eaux est donc à envisager en fonction de la stabilité des sulfures. Les zones à l'interface entre les environnements oxydants et réducteurs sont appelées front redox. C'est dans ces zones que l'on peut rencontrer de plus fortes concentrations en éléments traces comme l'uranium, le sélénium, l'arsenic qui sont des éléments contrôlés par les conditions redox.

Dans les eaux souterraines, les sulfures peuvent être notamment déstabilisés (i.e. oxydés) par des arrivées d'eau contenant de l'oxygène (oxygène dissous) ou des agents oxydants (par exemple sous forme de nitrates, phénomène appelé dénitrification naturelle). Ceci a comme conséquence la libération des éléments traces associés aux sulfures dont le thallium.

Néanmoins, les éléments traces libérés suite à la déstabilisation des sulfures peuvent être rapidement immobilisés en raison de leur piégeage par les phases solides, comme les oxydes de fer et de manganèse qui précipitent suite aux réactions d'oxydation ou bien sur les argiles et la matière organique qui disposent de sites de surface capable de fixer les éléments en solution (mécanismes d'adsorption). Lorsque la nappe est libre, des remobilisations secondaires peuvent avoir lieu dans la zone de battement de la nappe avec l'alternance de conditions oxiques/anoxiques qui peuvent à leur tour réduire les oxydes de fer et manganèse et ainsi relarguer les éléments piégés lors de la phase d'oxydation.

Dans les aquifères soumis au rabattement de la nappe dans les zones de pompage, il est possible d'observer l'alternance de conditions d'oxydo-réduction qui vont favoriser la mobilisation des éléments traces associés aux sulfures en conditions réductrices ou aux oxy-hydroxydes en conditions oxydantes. Dans ces contextes sensibles, il est donc recommandé d'assurer une bonne gestion du niveau piézométrique (et donc de l'exploitation des forages) afin d'éviter le battement de la nappe ou la désaturation de l'aquifère pour éviter toute remobilisation des éléments traces liés à l'alternance des conditions d'oxydation et de réduction.

4.2. HYPOTHESES

L'étude de SAFEGE propose une hypothèse quant à l'origine du thallium dans les eaux souterraines à partir de prélèvements réalisés sur une zone située au sud de Caen. Grâce aux analyses complémentaires réalisées par l'ARS et l'AESN il est possible de proposer plusieurs hypothèses permettant d'expliquer la présence de thallium dans les eaux souterraines.

L'origine du thallium peut venir soit (i) de l'aquifère lui-même, c'est-à-dire qu'il est porté par les minéraux présents dans l'aquifère et qu'il est mobilisé *in situ*, soit (ii) il est apporté par des fluides venant d'un aquifère ou d'un aquitard voisin (par drainance verticale, par des failles…).

4.2.1 Mobilisation « *in-situ* »

Plusieurs processus physico-chimiques peuvent permettre le relargage de thallium :

a. En partant de l'hypothèse que le thallium est préférentiellement associé aux sulfures dans les aquifères, il est logique d'envisager une remobilisation de cet élément suite à l'oxydation de sulfures. Cette oxydation peut être amorcée par plusieurs réactions : (i) l'oxydation des sulfures par les nitrates (cf. dénitrification naturelle mise en évidences à Saint Pierre sur Dives (Le Bideau, 2012), (ii) l'oxydation des sulfures par l'oxygène dissous dans les eaux.

b. A l'inverse, dans des conditions oxydantes (notamment dans les eaux bien oxygénées), les éléments traces sont associés aux oxy-hydroxydes de fer et de manganèse qui sont les phases stables pour le fer et le manganèse. Dans ces conditions, c'est la réduction de ces phases porteuses qui peut conduire au relargage des éléments traces associés et potentiellement le thallium.

c. Dans les zones de front redox, l'oxydation des sulfures conduit à la libération du fer composant la pyrite et les éléments traces associés. Le fer ainsi libéré va ensuite précipiter sous forme d'oxy-hydroxydes de fer qui vont pouvoir repiéger les éléments traces libérés (et potentiellement le thallium). Dans cette zone du front redox, les concentrations en éléments traces et en fer dans les eaux sont potentiellement élevées. Ces fronts redox peuvent être localisés (i) dans la zone de transition de l'aquifère libre/captif où un front redox se met en place naturellement à l'interface entre les eaux oxygénées de la partie libre et les eaux pas ou peu oxygénées dans la partie captive ou (ii) dans les zones de battement de la nappe si l'aquifère est mal oxygéné ou (iii) dans des zones captives de l'aquifère dénoyées suite à la surexploitation de l'aquifère.

Une attention particulière devrait donc être portée aux modalités d'exploitation des forages présentant des concentrations importantes en thallium et à l'adéquation entre les cycles de pompages et les conditions des nappes associées.

4.2.2 Venues d'eaux riches en thallium

Une autre hypothèse, éventuellement complémentaire, serait l'arrivée d'eau minéralisée à la base de l'aquifère. Ces eaux issues du socle pourraient être riches en thallium du fait de la présence de minéralisations (Pb, Zn, sulfures,…) auxquelles pourraient être associés le thallium.

Une dernière hypothèse, a priori moins probable, et ne concernant que les forages captant le bajocien-bathonien, serait l'arrivée d'eau riche en thallium provenant de l'aquitard (le callovo-oxfordien).

4.2.3 Extension géographique

Comme évoqué précédemment, **les teneurs les plus fortes sont mesurées dans les calcaires bajo-bathoniens dans des secteurs de la plaine de Caen où sont reconnus des synclinaux paléozoïques sous la couverture jurassique, ainsi que le long d'une bande globalement nord-sud localisée au pied de la cuesta du Pays d'Auge.**

Compte-tenu des processus physico-chimiques évoqués dans le chapitre 4.2.1, les conditions hydrodynamiques pourraient être les suivantes :

- les zones de transition de la nappe libre/nappe captive du Bathonien au passage sous couverture des marnes calloviennes. Un front redox peut se mettre en place entre les eaux oxygénées de la partie libre et les eaux peu ou pas oxygénées de la partie captive. Un front redox pourrait également se situer au passage de la nappe libre du Bajocien à la nappe captive du Bajocien sous le toit des marnes de Port-en-Bessin,
- les zones captives dénoyées, dû à une surexploitation de la nappe,
- les zones de battement de la nappe (nappe libre) à condition que celle-ci soit au même niveau que des horizons riches en sulfures dont l'oxydation entrainerai une libération de thallium.

4.2.4 « Source » du thallium

Les données disponibles ne permettent pas d'identifier avec certitude l'origine primaire du thallium. Plusieurs hypothèses sont en effet possibles, et peuvent être complémentaires en fonction de l'aquifère considéré et de ses conditions hydrodynamiques et hydrochimiques.

La présence de niveaux à matières organiques enrichis au-dessus de la discordance varisque doit être vérifiée, sachant que cette source ne permettra pas a priori d'expliquer la présence de thallium pour tous les points concernés.

Des reconnaissances complémentaires seraient à considérer pour identifier la source du thallium. Le chapitre suivant récapitule ainsi quelques pistes permettant d'acquérir des données complémentaires.

5. Recommandations et préconisations

Le BRGM propose de continuer les prélèvements d'eau dans les forages captant l'aquifère du Bajo-Bathonien dans le Calvados et dans l'Orne, un contrôle renforcé pouvant également être ciblé dans les secteurs décrits dans le paragraphe 4.2.3. Des analyses complémentaires sont néanmoins à envisager également dans l'aquifère du Trias et dans les forages captant le socle, les données disponibles montrant en effet que du thallium peut être détecté localement à des concentrations respectivement comprises entre 0,01 et 0,5 µg/L pour le trias et 0.01 et 0.3 µg/L pour le socle.

Afin de préciser l'étendue de la présence de thallium dans les eaux souterraines, d'identifier les niveaux aquifères impactés et les mécanismes physico-chimiques en jeu, le BRGM recommande de :

- Identifier, pour chacun des 166 points de prélèvement (et notamment les 97 de l'AESN), les formations géologiques traversées, le ou les aquifères captés et leurs conditions hydrodynamiques et hydrochimiques. L'objectif serait de corréler les niveaux captés et la présence de thallium à l'échelle régionale.

- Effectuer une analyse statistique (analyse corrélatoire, ACP, …) puis une interprétation hydrochimique des données de l'AESN, afin de mettre en évidence d'éventuelles relations entre le thallium et d'autres paramètres, tels que les sulfates, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, MO. Un intérêt particulier pourrait être porté aux phytosanitaires et aux contaminants organiques afin d'avoir une indication sur la vulnérabilité de l'ouvrage et d'éventuelles pollutions des eaux par des pollutions diffuses ou ponctuelles.

- Analyser les modalités de gestion des forages et les cycles de pompages afin d'identifier les secteurs dans lesquels l'exploitation des forages pourrait engendrer une alternance des conditions oxydantes et réductrices favorisant la dissolution des éléments traces libérés suite à l'oxydation des sulfures.

- Effectuer des prélèvements multi-niveaux, pour l'analyse du thallium et des éléments majeurs, idéalement en utilisant un dispositif d'échantillonnage sélectif multi-niveaux par triple pompes SPT. Une diagraphie micromoulinet devra être réalisée au préalable afin d'identifier avec précision la profondeur des différentes venues d'eau. La datation de l'eau des différents niveaux captés permettrait également de mieux cerner leurs origines ainsi que la cinétique des processus suspectés.

- Effectuer des analyses multiéléments traces dans les ouvrages révélant une présence de thallium (As, Ni, Cu, Zn et Pb), afin d'évaluer le comportement des accompagnants potentiels du thallium et pouvoir à terme tracer le thallium de façon indirecte en mesurant des éléments analysés régulièrement dans le cadre des suivis réglementaires.

- Réaliser des analyses dans les forages captant le Bathonien sous couverture Callovienne. En effet, près de St-Pierre-sur-Dives, juste dans le versant de la cuesta augeronne, au moins deux forages (01468X0073 ; 01468X0069) analysés dans cette configuration, montrent une présence de thallium et captent très probablement le Bathonien captif sous quelques mètres de marnes calloviennes. A priori l'aquifère bathonien semble moins impacté avec son plongement vers l'est dans la cuesta augeronne mais peu de forages atteignent le Bathonien (ils captent souvent l'Oxfordien coralligène) et il semble nécessaire de poursuivre les investigations sur cet aquifère en contexte réducteur.

- Dans un second temps, afin de préciser les mécanismes qui auront pu être proposés l'analyse des signatures isotopiques sur les eaux pourra être une aide pour discriminer ou quantifier les mécanismes d'oxydation des sulfures, notamment la signature isotopique S et O des sulfates (($\delta^{34}S(SO_4)$, $\delta^{18}O(SO_4)$) ou de la molécule d'eau ($\delta^{2}H(H_2O)$, ($\delta^{18}O(H_2O)$) pour discriminer l'origine de l'eau dans l'hypothèse de venue d'eau minéralisée en thallium. Enfin la modélisation géochimique pourrait permettre d'évaluer les contrôles chimiques et les variabilités de concentration des éléments chimiques en jeu dans la mobilisation du thallium dans les eaux souterraines. Il sera probablement nécessaire de mettre à jour la base de données permettant d'effectuer les calculs de spéciation.

Il est important de souligner que les éléments traces sont sensibles aux problèmes de contamination dans la chaîne analytique depuis le prélèvement jusqu'à l'analyse. Les voies de contaminations des échantillons peuvent être nombreuses, telles que les contaminations par le matériel de prélèvement (filtres, seringues,…), lors du flaconnage (Aquaref, 2011). Les éléments traces sont également très sensibles aux phénomènes d'adsorption et aux phénomènes de précipitation lors de l'échantillonnage et du conditionnement. Les étapes de filtration des échantillons sur le terrain ainsi que l'ajout de conservateurs après filtration sont vivement recommandés. L'agent de conservation à ajouter pour les métaux (hors mercure) est l'acide nitrique (HNO_3) à 0,5 %. Le cas échéant, les prélèvements sont difficilement représentatifs et il sera délicat de pouvoir identifier les processus en jeu. De plus, le thallium pouvant être sous forme colloïdale, les résultats analytiques peuvent différer en fonction de la réalisation de l'étape de filtration ou non. C'est pourquoi, il est nécessaire d'obtenir une traçabilité documentaire des opérations d'échantillonnage, afin de pouvoir comparer des résultats échantillonnés de la même façon.

Afin de mettre en évidence la source de thallium, le BRGM préconise :

- De réaliser l'analyse du thallium dans des roches par un échantillonnage représentatif de la variété des terrains potentiellement porteurs de cet élément (Bajocien, Bathonien, Trias et socle) :
    - au sein même des aquifères du Bathonien et du Trias (complété par éventuellement d'échantillons provenant de l'Aalénien-Bajocien), afin de tester l'hypothèse d'une origine matricielle du thallium. Pour le Trias, l'idée serait de prélever dans les deux principaux faciès connus à l'affleurement (argiles et chenaux gréso-conglomératiques). Pour le Bathonien, il serait intéressant de prélever dans les niveaux de caillasses du Bathonien (en ciblant particulièrement les niveaux les plus pyriteux, comme par exemple les niveaux à oolithe ferrugineuse) et dans les formations calcaires sous-jacentes à la caillasse de Fontaine-Henry (Calcaire de Creully, Calcaire de Caen).
-
    - Au sein des formations surmontant l'aquifère bathonien afin de tester l'hypothèse d'une origine proximale du thallium et d'un échange par contact stratigraphique : Marnes de Port-en-Bessin (Bathonien inférieur, équivalent latéral des Calcaires de Caen dans la plaine de Caen-Falaise) et marnes calloviennes (faciès du Cornbach, Argiles de Lion, Marnes d'Escoville et d'Argences) à caractère réducteur évident.
    - Au niveau de la discordance varisque[2], mais dans des secteurs ne montrant pas uniquement à l'affleurement un contact entre grès armoricain et calcaire Bajo-Bathonien (*cf*. chapitre 2.3).

La mise en évidence de la présence en concentration élevée de thallium dans un de ces échantillons permettrait de confirmer l'hypothèse de la présence de thallium dans le réservoir aquifère.

Afin d'identifier une source primaire d'origine « socle briovérien », le BRGM recommande d'effectuer des analyses dans des échantillons de roche et de caractériser les minéralisations susceptibles de contenir du thallium. Une attention particulière devra être apportée aux niveaux les plus réducteurs, à savoir ceux riches en sulfures et/ou en matières organiques, comme les argilites et schistes argileux du Briovérien et les ampélites siluriennes.

---

[2] Le Calvados possède plusieurs affleurements exceptionnels exposant la discordance varisque, où les terrains mis en contact sont différents de ceux exposés dans les carrières étudiés par SAFEGE. On citera notamment le secteur de Laize-la-Ville / Fresney-le-Puceux où les calcaires du Lias (Pliensbachien) reposent en discordance sur les calcaires du Cambrien à minéralisation de barytine (site Géopark du Conseil général du Calvados) ou sur les schistes briovériens (carrière de la Roche Blain). On peut citer aussi le secteur de Vieux-la-Romaine (Lias sur Calcaire cambrien de Laize) ou encore le secteur de Potigny - Bons-Tassily. Un échantillonnage fin de part et d'autre de la surface de discordance est préconisé afin de vérifier la présence de thallium dans les roches et de préciser au mieux l'origine exacte des concentrations maximales (sommet des terrains paléozoïques ou base des terrains jurassiques ?).

6. Bibliographie

Anses, 2012 – Avis relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de thallium dans les eaux destinés à la consommation humaine. Saisine 2012-SA-0100. Anses : Maisons-Alfort, 28p.

Aquaref, 2011 – Guide des prescriptions techniques pour la surveillance physico-chimiques des milieux aquatiques. Opérations d'échantillonnage en eau souterraine. [En ligne] Version 2011. 22p. Disponible sur http://www.aquaref.fr/domaine/chimie/guide-des-prescriptions-techniques-aquaref-version-juin-2011 (Consulté le 30/06/2011).

Aquifères & eaux souterraines en France - Tome1. Orléans : brgméditions, 2006, p241 à 248.

Arnaud L., Mardhel V., Coueffë R., Tourlière B., 2007 – Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet cartographique. Rapport BRGM/RP-55670-FR, 150p.

Bideau L., 2012 – Caractérisation du fonctionnement des aquifères, Exemples de phénomènes de dénitrification naturelle dans les aquifères sédimentaires. Géologues n°159. 5p.

Bigot A., 1927 - Géologie de la région de Falaise et de la Brèche-au-Diable. Bull. Soc. linn. Normandie sér. 7, t. 10, p. 92-106.

Bigot A., 1934 - Les récifs bathoniens de Normandie, Bull. Soc. géol.France, sér. 5, t. 4, p. 697-736.

Dugué O., Fily G., Rioult M., 1998 - Le Jurassique des Côtes du Calvados. Biostratigraphie, sédimentologie, paléoécologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle. Bulletin trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre, Tome 85, Fascicule 2, 132 p.

FOREGS – Geochemical Atlas of Europe. [En ligne]. EuroGeoSurveys. Disponible sur http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/index.php (Consulté le 30/06/2014).

Imbert H., 2007 – Risques sanitaires encourus par une population vivant au voisinage d'une unité de fonderie de zinc et liés à la présence de thallium et d'antimoine. Mémoire de fin d'études, Ecole nationale de la santé publique : Rennes.

Inchem (International Program on Chemical Safety), 1996 - Environmental Health Criteria 182 : Thallium. Genève : World Health Organization. Disponible sur http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc182.htm (Consulté le 03/06/2014).

Inventaire minier, SIG Mines France – Ressources minérales et environnement.[En ligne]. BRGM : Orléans. Disponible sur http://sigminesfrance.brgm.fr/ (Consulté le 03/07/2014).

Reimann C., Birke M. (2010) - Geochemistry of European Bottled Water. Borntraeger Sciences Publishers, 268p.

Rioult M., 1985 - Écueils paléozoïques armoricains dans les mers jurassiques sur la bordure occidentale du Bassin parisien. Sédimentation et peuplement d'écueils. Com. Trav. Hist. & Scientif, Poitiers, Bull. Section des Sciences, IX, p. 177-183.

Rioult M., Dugué O., Fily G., Juignet P., 1992 - Regards nouveaux sur le Jurassique normand. Bull. inf. géol. bass. Paris, vol. 29, n° 3, p. 7-44.

SAFEGE, 2013a – Etude de l'origine du thallium dans les eaux souterraines et les réseaux – Phase 1 : Compilation documentaire. Rapport d'étude. SAFEGE : Louvigny. Maitrise d'ouvrage, Syndicat de Production d'Eau Potable du sud Calvados. 91p.

SAFEGE, 2013b – Etude de l'origine du thallium dans les eaux souterraines et les réseaux – Phase 2 : Campagnes de mesures. Rapport d'étude. SAFEGE : Louvigny. Maitrise d'ouvrage, Syndicat de Production d'Eau Potable du sud Calvados. 63p.

US EPA – Drinking water contaminants. [En ligne]. Disponible sur http://water.epa.gov/drink/contaminants/ (Consulté le 01/07/2014)

7. Annexe : Analyses quantifiées (Campagnes de prélèvement ARS, SAFEGE et Agence de l'Eau Seine Normandie)

Code BSS	Nom Ouvrage BSS	X (m) Lambert 93	Y (m) Lambert 93	LQ (µg/L)	$[Tl]_{moy}$ (µg/L)	$[Tl]_{max}$ (µg/L)	Code Remarque	Date Conc. max	Nb de mesures	Organisme
01468X0048/FE4-95	LE CHEMIN VERT	476445	6883687	0.10		4.7	1	29/03/2013	1	SAFEGE
01468X0048/FE4-95	LE CHEMIN VERT	476445	6883687	0.10	3.67	4.3	1	15/05/2013	26	ARS
01463X0130/F1	OUEZY F1	473517	6890972	0.10	1.12	3	1	27/11/2013	35	ARS
01463X0131/F2	OUEZY F2	473511	6890998	0.10	1.11	2.7	1	11/02/2013	39	ARS
01468X0041/F4	LE CHEMIN VERT	476506	6883707	0.10		2.4	1	29/03/2013	1	SAFEGE
01468X0047/FE5-94	LE BAS GUERET	478100	6885926	0.10	1.21	1.3	1	23/10/2013	27	ARS
01467X0041/P	PUITS SITUE RUE DE FALAISE, D. 91	467967	6882616	0.10		1.1	1	25/03/2013	1	SAFEGE
01468X0046/FE3-94	LE CHAMIN CHAUSSE	475572	6887063	0.01		1.1	1	16/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01468X0046/FE3-94	LE CHAMIN CHAUSSE	475572	6887063	0.10	0.92	1.1	1	30/07/2013	25	ARS
01464X0040/FE8	PLAINVILLE	477120	6889159	0.10	0.87	1.1	1	18/06/2012	27	ARS
01205X0135/C1	STATION DE POMPAGE, AEP SYNDICAT DE MONDEVILLE	457997	6902278	0.01		0.79	1	16/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01463X0113/P	PUITS D. 40	472135	6888808	0.10		0.71	1	27/03/2013	1	SAFEGE
01463X0142/F2B	INGOUVILLE	469433	6894630	0.10		0.7	1	31/05/2012	1	ARS
01468X0044/F1	MORIERES	476030	6881410	0.10		0.64	1	29/03/2013	1	SAFEGE
02133X0012/F-AEP9	LA FRESTINIERE	497202	6849817	0.01		0.63	1	29/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02137X0011/S1	LA LUZERNE SEVILLY	492686	6838376	0.01		0.59	1	29/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02124X0010/F1	FORAGE D'EXPLOITATION NO 1 - ZONE NORD	476582	6854386	0.01		0.56	1	18/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	0.10		0.53	1	28/03/2013	1	SAFEGE
01468X0069/F	HAMEAU DE GLATIGNY	480346	6886039	0.10		0.51	1	29/03/2013	1	SAFEGE
01195X0211/F2-2	MAISON BLEUE	430488	6900882	0.10		0.5	1	15/11/2012	1	ARS
01207X0091/S1	LIEU-DIT LA RAMEE -D37 A, ENTRE LA RAMEE ET LES PONTS	469728	6899589	0.10		0.49	1	29/05/2012	1	ARS
01207X0098/F9	CR DIT ALLEE DES FAUCAGES	468719	6905509	0.10		0.47	1	03/12/2012	1	ARS
01462X0132/C1	LA FLATIERE AEP SYNDICAT SAINT-SYLVAIN	465780	6890236	0.01		0.45	1	22/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01205X0109/F6	CHEMIN RURAL DE BIEVILLE, HAMEAU DE BEAUREGARD	457704	6907305	0.01		0.42	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01468X0073/F	LIEURY	479991	6880569	0.10		0.42	1	27/03/2013	1	SAFEGE
02131X0017/F1	N.W FERME DU BOUT DE BAS	480769	6852587	0.01		0.4	1	18/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01763X0024/F3	MONTS D'ERAINES - AERODROME	469325	6874338	0.10		0.35	1	26/03/2013	1	SAFEGE
01464X0028/FE1-94	LES CANGELIQUES	475900	6889328	0.10	0.22	0.35	1	30/07/2013	27	ARS
01207X0077/FC7	AEP SIVOM RIVE DROITE ORNE	468474	6905792	0.10		0.33	1	03/12/2012	1	ARS
01207X0093/F3	STATION POMPAGE LA RAMEE - D37-A	469618	6899601	0.10		0.32	1	29/05/2012	1	ARS
01463X0141/F1	LE PUNAY - INGOUVILLE	470121	6894442	0.10		0.31	1	31/05/2012	1	ARS
01207X0095/F8	HAMEAU DE RONCHEVILLE ENTRE F5 ET F7	468152	6906087	0.10		0.3	1	03/12/2012	1	ARS
01206X0206/F2	STATION POMPAGE - CHATEAU D'EAU	464973	6903288	0.10		0.29	1	09/01/2013	1	ARS
01206X0146/FB1	LIEUDIT LE CLOS MORANT, FB1 AEP SYNDICAT CAGNY-FRENOUVILLE	463901	6898771	0.01		0.27	1	20/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01207X0012/FC4	AEP SIVOM RIVE DROITE ORNE	468387	6906727	0.10		0.27	1	03/12/2012	1	ARS
01464X0018/S1	LES CANGELIQUES CH SUR D252 ROUTE DE PERCY	475452	6888995	0.10		0.26	1	28/03/2013	1	SAFEGE
01206X0146/FB1	LIEUDIT LE CLOS MORANT, FB1 AEP SYNDICAT CAGNY-FRENOUVILLE	463901	6898771	0.10		0.22	1	19/07/2012	1	ARS
01763X0003/C1	LA RIVIERE	469534	6877814	0.10		0.22	1	26/03/2013	1	SAFEGE
01751X0015/F2	ENCEINTE DU CAPTAGE LE HEQUET	429493	6875934	0.01		0.21	1	23/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01202X0095/F	LA HAUTE ECARDE	463242	6910244	0.10		0.21	1	03/12/2012	1	ARS
01195X0214/FE1	VILLAGE DE JUAYE	430509	6907705	0.10		0.19	1	27/12/2012	1	ARS
01462X0080/P	PUITS SITUE RUE DE L'ECOLE	464427	6891386	0.10		0.19	1	28/03/2013	1	SAFEGE
01775X0012/C1	FONTAINE D'AUBRY	484984	6859167	0.01		0.19	1	15/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01207X0061/FC5	AEP SIVOM RIVE DROITE ORNE	468255	6906482	0.10		0.18	1	03/12/2012	1	ARS
01206X0212/F3	LE MONT, CHATEAU D'EAU, STATION DE POMPAGE	461964	6903366	0.10		0.17	1	20/12/2012	1	ARS
#N/A	#N/A			0.10		0.16	1	27/03/2013	1	SAFEGE
01193X0170/FA6	LE MARAIS STATION DE POMPAGE AEP VILLE DE CAEN	448203	6915512	0.01		0.15	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
#N/A	#N/A	467704	6876644	0.10		0.15	1	28/03/2013	1	SAFEGE
01194X0142/F5	LE MOULIN	449122	6913252	0.01		0.13	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01762X0036/C1	FONTAINE DES FONDENIS	464042	6876012	0.10		0.12	1	27/03/2013	1	SAFEGE
01206X0154/FC6	HAMEAU DE LA PETITES BRUYERE, AEP SIVOM RIVE DROITE DE L'ORNE	467969	6907152	0.10		0.12	1	03/12/2012	1	ARS
01195X0212/F2	BEYROLLES	429487	6902179	0.10		0.11	1	15/11/2012	1	ARS
01195X0203/FDIBIS	ENTRE LA POTERIE ET LA MAISON BLEUE	430340	6900700	0.10		0.11	1	15/11/2012	1	ARS
01197X0124/FE1	LE VAUCULEY	446800	6907871	0.01		0.11	1	23/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01194X0157/F2	DELLE DU MONT F2	453099	6917543	0.01		0.1	1	16/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01462X0119/C1	LE BEQUET	465022	6889197	0.10		0.1	1	25/03/2013	1	SAFEGE
01767X0014/C1	SOURCE DU BOIS DE COMMEAUX CAPTEE PAR PUITS	472443	6858815	0.01		0.1	1	30/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01733X0003/C2	PRE DES DOUITS NORD	393420	6871757	0.01		0.09	1	15/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00955X0050/F1	LE HOUX	404365	6927461	0.01		0.09	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)

Code BSS	Nom Ouvrage BSS	X (m) Lambert 93	Y (m) Lambert 93	LQ (µg/L)	$[Tl]_{moy}$ (µg/L)	$[Tl]_{max}$ (µg/L)	Code Remarque	Date Conc. max	Nb de mesures	Organisme
01192X0213/F11	AEP BAYEUX - F1. ST-GABRIEL CD35 ROUTE DE BAYEUX	441390	6914608	0.01		0.09	1	23/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00726X0004/FE1	HAMEAU ES JEANNE	360288	6948112	0.01		0.08	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01744X0010/F1	LE PONT D'ELOY STATION DE POMPAGE	422011	6877415	0.01		0.08	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01465X0087/PS3	FONTAINE DES ROCHERS AEP CAEN SYND BRETTEVILLE SUR LAIZE RESEAU ST GERMAIN	458086	6882054	0.01		0.08	1	22/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02105X0012/C1-C2	LES MONTS - LAPTAGES AEP	401409	6849107	0.01		0.06	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02123X0018/S6-DDA	STATION DE POMPAGE	471028	6850765	0.01		0.06	1	18/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02092X0004/S1	LE BOUILLON OU DE LA MARCHE	382008	6857859	0.01		0.05	1	17/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00732X0014/F10	REGION DU VAL DE SAIRE, SUD-OUEST VILLAGE DE NEHOU	391226	6960579	0.01		0.05	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01191X0251/111111	F. D'EXPLOITATION -RN 814 E -AEP BAYEUX F1	431586	6916870	0.01		0.05	1	23/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01191X0239/F	LA ROSIERE PLANET	434725	6919235	0.01		0.05	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01193X0187/F2	EGLISE DE GUERVILLE, CR 4 DE SECQUEVILLE A CULLY	443028	6910198	0.01		0.05	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01764X0013/C1	AEP SYNDICAT DE FALAISE SUD-EST HAMEAU DE JAPIGNY	474751	6869123	0.01		0.05	1	22/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00724X0018/F1	LA VALLEE	377883	6957829	0.01		0.04	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02092X0006/C1	LE PONT DE LA BRAIZE	381569	6861101	0.01		0.04	1	17/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01736X0025/NP1	NOIRPALU - LE FRESNE	382253	6862636	0.01		0.04	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00955X0007/C1	CAPTAGE DE LA LIVURES AEP SYND	404764	6927210	0.01		0.04	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02102X0024/S6	STATION DE POMPAGE	411454	6857820	0.01		0.04	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01465X0140/CR16	AEP VILLE DE CAEN SOURCES DE MOULINES RESEAU DE FONTAINE HALBOUT	455403	6881621	0.01		0.04	1	15/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01465X0066/C1	LES HOULLES AEP SYNDICAT DE CESNY BOIS HALBOUT	457334	6879356	0.01		0.04	1	22/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00728X0030/C1	CHATEAU FREMOND CAPTAGE AEP	372272	6948539	0.01		0.03	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01745X0026/C1	AEP SIVOM DE ST-SEVER, LA HAMERIE ANCIEN COMMUNAL	402405	6866617	0.01		0.03	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02106X0018/C2	PRE CREUX	410426	6844851	0.01		0.03	1	17/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02111X0017/C1	LE PONT HERBOUT	431974	6852289	0.01		0.03	1	18/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01196X0042/C4	SAINTE GERMAINE N4	436663	6902400	0.01		0.03	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01465X0092/CR3	AEP VILLE DE CAEN SOURCES DE MOULINES RESEAU ACQUEVILLE	454621	6880525	0.01		0.03	1	15/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02091X0002/S2	LA LOUVETIERE	377069	6858522	0.01		0.02	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00945X0013/P1	LIEU-DIT CAUQUIGNY D-15 AEP-SYNDICAT SAINTE-MERE-L'EGLISE	382881	6931473	0.01		0.02	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00946X0035/F3	USINE SOPAD	384140	6928530	0.01		0.02	1	14/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02098X0021/C1	LA HAMELINIERE - CAPTAGE AEP	394080	6850513	0.01		0.02	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01183X0075/F1	LES GOSSELINES	418574	6914329	0.01		0.02	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01188X0018/F2	STATION DE POMPAGE DU BEAUCHENE	426506	6903933	0.01		0.02	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01184X0027/C1	CAPTAGE DE BARBEVILLE	426950	6914761	0.01		0.02	1	25/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01465X0093/P27	AEP VILLE DE CAEN SOURCES DE MOULINES RESEAU DE TOURNEBU	455358	6880143	0.01		0.02	1	15/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02472X0025/C1	CAPTAGE LA PETITE BOUSSARDIERE - LES BOUSSARDIERES	382476	6833430	0.01		0.01	1	17/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02474X0010/C1	LA COURTINIERE AMONT STATION	397196	6834370	0.01		0.01	1	16/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01184X0051/F2	LE RIBEL	427152	6909891	0.01		0.01	1	16/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
01756X0011/F2	L'ETRE	439901	6864031	0.01		0.01	1	15/05/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
00967X0058/F2	AEP COMMUNALE	448193	6919539	0.01		0.01	1	24/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)
02121X0020/F1	LAITERIE GILLOT	455082	6849575	0.01		0.01	1	29/04/2014	1	Agence de l'eau (Données brutes)

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. 02 38 64 34 34

Direction Régionale Basse-Normandie
4, avenue de Cambridge
14200 Hérouville-Saint-Clair – France
Tél. : 02 31 06 66 40