

Document public

Etude sur l'origine du mercure dans les sources et le forage AEP de Vacqueville et Veney (54). Phase 2

Rapport final

BRGM/RP-66315-FR
décembre 2016



Etude sur l'origine du mercure dans les sources et le forage AEP de Vacqueville et Veney (54). Phase 2

Rapport final


BRGM/RP-66315-FR
décembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux Politiques publiques BRGM

Lions J., Mathurin F., Aubert N., L. Gourcy, R. Millot

Vérificateur :

Nom : L. Gourcy
Fonction : Corres. Scientifique
Date : 08/12/2016

Signature : 

Approbateur :

Nom : D. Midot
Fonction : Directeur régional
Date : 22/12/2016

Signature :



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

Mots-clés : Qualité des eaux, mercure, isotope, Meurthe-et-Moselle, Trias, aquifère

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

Lions J., Mathurin F., Aubert N., Gourcy L., Millot R. (2016) – Etude sur l'origine du mercure dans les sources et le forage AEP de Vacqueville et Veney (54). Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-66315-FR, 71 p., 28 ill., 19 tabl., 2 ann.

Synthèse

Une pollution des eaux souterraines au mercure a été mise en évidence en 2007 à Veney en Meurthe-et-Moselle (54). Cet élément a d'abord été détecté dans les eaux de deux captages d'alimentation en eau potable (AEP). Il s'agit des sources A et B, d'indices nationaux respectifs (anciens codes BSS) 02698X0026/HY (identifiant national de l'ouvrage BSS000USTU) et 02698X0025/HY (BSS000USTT) où des concentrations en mercure ont été mesurées respectivement jusqu'à 18 et 9 µg/L. La limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine¹ est fixée à 1µg/l pour cet élément.

Afin de pallier à ce problème, la commune de Vacqueville a fait implanter en 2011 un nouveau forage (02698X0052/F1) au sein duquel du mercure a été détecté dans les eaux dans des concentrations moindres qui à ce jour ont atteint 0,29 µg/L au maximum.

La pollution au mercure qui affecte les eaux des captages des communes de Vacqueville et de Veney en Meurthe-et-Moselle (54) a déjà fait l'objet de plusieurs études. La dernière étude de 2013 a permis de tirer les enseignements suivants :

- les résidus de munitions comme origine du mercure peuvent être écartés,
- les deux décharges sauvages présentes en amont des sources ne semblent pas être à l'origine de la pollution des 3 captages,
- localement, il n'apparaît pas de fond hydrochimique élevé en mercure ni d'anomalie dans le fond géochimique, mais sa présence dans les formations géologiques ou les sols à l'échelle régionale est à considérer.

L'objectif de cette étude est donc de préciser l'origine du mercure identifié au niveau des sources et du captage et notamment si l'origine est naturelle ou anthropique.

Pour ce faire une campagne de terrain a été réalisée en avril 2016 afin d'échantillonner les 3 points d'eau contaminée (sources C01 et C02 et le forage C03), complétés par une source amont non contaminée (E02). Sur ces eaux un ensemble d'analyses physico-chimiques, chimiques et isotopiques ont été réalisées afin de conduire une étude hydrogéochimique du système étudié.

La recherche d'une source anthropique de mercure n'a pas abouti lors des études précédentes par contre le flux de mercure quantifié sur les sources captées représente des quantités de mercure non négligeables (en moyenne 200 g/an).

Les données bibliographiques consultées ont permis d'identifier des éléments permettant de confirmer à l'échelle régionale une anomalie naturelle en mercure dans les sols sur la base des fonds géochimiques. Dans le cadre de prospections minières le BRGM a également démontré la présence localisée de cinabre dans les Vosges.

¹ Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine

Les résultats ont montré que l'ensemble des eaux échantillonnées s'inscrivent dans les gammes de concentrations et les faciès décrits dans le secteur. On ne note pas de propriétés particulières permettant de distinguer ces eaux, ce qui aurait pu être un indice d'un fonctionnement atypique ou hydrothermal conjointement à la contamination en mercure.

A une échelle plus fine, les sources C01 et C02, malgré leur proximité, présentent des différences. Les eaux du forage C03 se distinguent des deux sources traduisant un mélange avec des eaux d'une origine différente, probablement les eaux de la nappe du Trias à l'est de la faille de Veney. On note une influence plus marquée de la faille sur les eaux de la source C02 comparé à la source C01. Par contre, la faille ne semble pas drainer d'eaux thermales profondes.

La chimie des eaux permet d'exclure une possible origine profonde des eaux captées à Veney telle que la présence de la faille aurait pu le suggérer. Il s'agit vraisemblablement d'eau de pluie qui lors des circulations entre en contact avec du mercure. La présence de la faille serait alors à considérer comme ayant un rôle sur la mise en contact de ces eaux avec le mercure localisé soit dans les formations géologiques à l'ouest de la faille de Veney, soit dans le réseau de failles. La faille de Veney est une faille majeure dont l'âge n'est pas défini, mais son ampleur laisse supposer une histoire complexe.

Les signatures isotopiques du mercure semblent montrer qu'il s'agirait de mercure d'origine profonde avec une signature potentiellement assimilable au minerai de cinabre. Aujourd'hui, les eaux modernes circulent dans ce système et percolent en contact avec ces potentielles minéralisations ce qui contribueraient localement à la contamination des eaux en mercure.

Une source naturelle de mercure est envisageable en raison du contexte géologique. En lien avec la faille de Veney d'importance majeure à l'échelle géologique et la présence d'intrusion de roche éruptive et de roches volcano-sédimentaires à proximité de Veney (Raon-l'Etape à 6 km), une source de mercure et sa migration est possible. La ou les formations hôtes ainsi que les mécanismes géologiques et les éléments ayant conduits à sa mise en place restent à définir.

Suite à ces résultats, des investigations seraient à conduire à deux échelles :

- à l'échelle « semi-régionale », sur une zone englobant Veney et Raon-l'Etape ((soit 10 à 15 km de rayon environ), il serait nécessaire de compiler les données géologiques, géologiques et géochimiques des sols avec des compléments d'échantillonnage (sol, sédiment, roche) le cas échéant et d'analyser le mercure dans les eaux souterraines et les sources sur un maximum de points d'eau, avec des méthodes analytiques présentant des seuils de quantification aussi bas que possible (1 à 15 ng/l). Cela permettrait d'obtenir une cartographie des concentrations en mercure qui permettrait d'une part de réaliser une première évaluation du risque sanitaire (est-il limité au secteur de Veney ?) et d'autre part de donner des indications sur l'origine du mercure (en mettant en évidence une éventuelle liaison avec le volcanisme permien par exemple) ;
- à l'échelle locale, une cartographie plus détaillée, combinée avec un complément d'échantillonnage visant à prélever des sols plus en profondeur (10 à 100 cm) que lors de la phase 1 (5 à 10 cm) devrait permettre de mieux caractériser les roches sous-jacentes. Si des indications sur la présence de mercure sont confirmées, il pourra être envisagé de réaliser des sondages pour caractériser le substratum, à savoir le Trias et/ou le Permien sous-jacents et préciser l'origine du mercure.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte géologique et hydrogéologique	11
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE	11
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	17
2.2.1. Nappe des grès du Trias inférieur	17
2.2.2. Autres nappes et résurgences	20
2.2.3. Réseau de failles majeurs et faille de Veney.....	20
2.2.4. Répartition des eaux	20
2.2.5. Occupation du sol dans le secteur d'étude.....	22
2.3. CONTEXTE REGIONAL ET FOND GEOCHIMIQUE	23
2.3.1. BD-ETM.....	23
2.3.2. ASPITET.....	24
2.3.3. GEMAS.....	24
2.3.4. Inventaire géochimique du BRGM	26
2.3.5. Gites, gisements et indices	27
2.3.6. Indices de la présence naturelle de mercure dans la bibliographie	28
2.4. SYNTHESE DU CONTEXTE REGIONAL	29
2.5. RAPPELS SUR LES CONCLUSIONS DES TRAVAUX ANTERIEURS.....	29
2.5.1. Bureaux d'études et hydrogéologue agréé (2007-2008)	29
2.5.2. Etude BRGM Phase 1 (2014)	30
3. Programme d'investigation et résultats d'analyses.....	33
3.1. PROGRAMME D'INVESTIGATION	33
3.1.1. Choix des points de prélèvements	33
3.1.2. Réalisation de la campagne.....	34
3.2. PRELEVEMENTS ET ANALYSES.....	36
3.2.1. Acquisition des données de terrain	36
3.2.2. Prélèvement et conditionnement.....	36
3.3. RESULTATS ANALYTIQUES	37
4. Interprétation des données.....	39
4.1. FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE.....	39
4.1.1. Diagramme de Piper	39
4.1.2. Faciès hydrochimique des eaux régionales	40

4.1.3. Faciès hydrochimique des eaux de Veney et Vacqueville (phase 2).....	44
4.1.4. Isotopes de la molécule de l'eau.....	45
4.1.5. Datation de l'eau	46
4.1.6. Isotopes du strontium et du bore	47
4.1.7. Conclusion sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur étudié.....	48
4.2. CONCENTRATIONS EN MERCURE	49
4.2.1. Rappels sur le mercure	49
4.2.2. Concentrations en mercure dans les eaux échantillonnées	50
4.2.3. Masse annuelle de mercure présent dans les eaux de captage	51
4.2.4. Corrélations entre le mercure et les autres espèces dissoutes	52
4.3. APPROCHE THERMODYNAMIQUE.....	53
4.3.1. Calculs des indices de saturation	53
4.3.2. Calcul de spéciation	57
4.4. APPROCHE ISOTOPIQUE	58
4.4.1. Etat de l'art	58
4.4.2. Résultats	60
4.5. CONCLUSIONS	63
5. Conclusions sur l'origine du mercure et recommandations	65
6. Bibliographie.....	69

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des captages AEP.	10
Illustration 2 : Log stratigraphique synthétique des grès du Trias inférieur en Lorraine (BRGM - Cartannaz et al., 2010)	12
Illustration 3 : Carte géologique harmonisée de la zone d'étude	15
Illustration 4 : Écoulement de la nappe des GTI (modélisation 2010, Nguyen-Thé et al. 2010).....	18
Illustration 5 : Esquisse piézométrique de la nappe des GTI en automne 2013 (Nguyen-Thé et al., 2014).	19
Illustration 6 : Altitude des sources situées à proximité de Veney (source : BSS, BRGM).....	19
Illustration 7 : Coupe schématique sud-ouest / nord-est d'après ANTEA.	21
Illustration 8 : Usage des sols dans le secteur d'étude selon Corine Land Cover 2014	22
Illustration 9 : Carte géochimique des concentrations en mercure dans les sols agricoles européens (Ottesen et al., 2013).	25
Illustration 10 : Teneurs en arsenic (inventaire géochimique du BRGM / SIG-MINES).....	26
Illustration 11 : Localisation et fiche du gisement de Raon l'Etape (SIG-MINES).....	27
Illustration 12 : Localisation de Bourg-Bruche où un indice de cinabre a été découvert	28

Illustration 13 : Points d'eau prélevés et mercure quantifié dans les eaux souterraines (Nguyen-Thé et al., 2014).	30
Illustration 14 : Localisation des points de prélèvements sur carte IGN	34
Illustration 15 : Photos des prélèvements réalisés le 26/04/2016 par le BRGM	35
Illustration 16 : Chaîne analytique utilisant un générateur de vapeur à froid et à amalgamation (CVG-DGA) couplé au spectromètre de masse MC-ICP-MS.	37
Illustration 17 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées dans le cadre de la présente étude.	39
Illustration 18 : Diagramme de Piper des eaux à l'échelle régionale.	40
Illustration 19 : Concentrations en éléments majeurs (mg/l) dans les eaux souterraines.....	43
Illustration 20 : Droite des eaux météoriques et eaux de Veney pour les isotopes stables de l'eau (données du Trias et de la pluie d'après Celle-Jeanton et al. 2009).	45
Illustration 21 : Concentrations en bore et en lithium dans les eaux de Veney (2016), l'eau de pluie (Millot et al. 2010) et la nappe des grès du Trias (Celle-Jeanton et al. 2009).....	47
Illustration 22 : Chronique des concentrations en mercure dans les eaux (données ADES) et concentrations acquises durant la présente étude (Phase 2) et la phase 1 (Nguyen-Thé et al., 2014).....	51
Illustration 23 : Concentration en Hg en fonction des concentrations en chlorure, sodium, nitrates et bore dans les eaux.....	52
Illustration 24 : Diagramme de stabilité du Hg en fonction du Eh et du pH de la solution.	58
Illustration 25 : Abondances isotopiques du mercure.	59
Illustration 26 : Diagramme tri-isotopique $\delta^{200}\text{Hg} = f(\delta^{202}\text{Hg})$	60
Illustration 27 : Compositions isotopiques du mercure ($\delta^{202}\text{Hg}$, ‰) reportées en fonction de l'inverse de la concentration en mercure (ng/L) dans l'eau.	61
Illustration 28 : Schéma général du fractionnement isotopique observé expérimentalement (Δ^{199} vs. δ^{202}).	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Derniers niveaux géologiques rencontrés dans les sondages profonds à proximité de Veney	17
Tableau 2 : BDETM – campagne 2008-2010 - résultats pour le mercure et le plomb (en mg/kg MS) ...	23
Tableau 3 : ASPITET – gammes de concentrations (en mg/kg MS)	24
Tableau 4 : Points de prélèvements retenus pour la phase 2	33
Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques au cours de la phase 2	36
Tableau 6 : Concentrations en éléments majeurs des eaux échantillonnées au cours de la phase 2 ...	37
Tableau 7 : Concentrations en éléments traces des eaux échantillonnées au cours de la phase 2	37
Tableau 8 : Concentrations en éléments traces des eaux échantillonnées au cours de la phase 2	37
Tableau 9 : Balances ioniques des eaux échantillonnées au cours de la phase 2	38
Tableau 10 : Concentrations en CFC et SF ₆ dans l'eau et l'air (pptv) et estimation des âges apparents selon différents modèles de circulation (exponentiel, piston et mélange binaire).....	46

Tableau 11 : Isotopes du strontium et du bore	47
Tableau 12 : Estimation de la masse annuelle de mercure émergeant dans les eaux de captages en fonction du débit moyen et des concentrations en Hg.	51
Tableau 13 : Valeurs de pH, pE et température utilisées dans la modélisation.....	53
Tableau 14 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis des minéraux silicatés composant l'aquifère des GTI.....	54
Tableau 15 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis des minéraux identifiés au sein de l'aquifère des GTI.	54
Tableau 16 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de possibles minéraux secondaires manganésiens, d'oxydes d'aluminium et de la kaolinite (Mn non analysé lors de la phase 1).	55
Tableau 17 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de possibles minéraux ferreux et ferriques secondaires (Fe non analysé lors de la phase 1 et < LQ en CO ₃).....	55
Tableau 18 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis du mercure élémentaire (Hg ⁰) et des phases minérales mercurées.....	56
Tableau 19 : Résultats des analyses isotopiques (‰).	60

Liste des annexes

Annexe 1 : Légende de la carte géologique harmonisée	73
Annexe 2 : Fiches BSS des points prélevés.....	77

1. Introduction

Une pollution des eaux souterraines au mercure a été mise en évidence en 2007 à Veney en Meurthe-et-Moselle (54). Cet élément a d'abord été détecté dans les eaux de deux captages d'alimentation en eau potable (AEP). Il s'agit des sources A et B, d'indices nationaux respectifs (code BSS) 02698X0026/HY et 02698X0025/HY (illustration 1), où des concentrations en mercure ont été mesurées respectivement jusqu'à 18 et 9 µg/L (la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine² est fixée à 1 µg/l).

Afin de pallier à ce problème, la commune de Vacqueville a fait implanter en 2011 un nouveau forage (02698X0052/F1). Malheureusement, du mercure a également été détecté dans les eaux du forage mais dans des concentrations moindres qui à ce jour ont atteint 0,29 µg/L au maximum.

L'objectif de la présente l'étude est d'investiguer l'origine du mercure identifié au niveau des sources et du captage et notamment de déterminer si l'origine est naturelle ou anthropique en se basant sur l'analyse fine des 3 points d'eau contaminée, complétée par un point d'eau non contaminée.

Pour cela une approche hydrochimique et isotopique est retenue afin de discriminer si les eaux du secteur de Veney se distinguent par leurs caractéristiques chimiques et isotopiques. Les données provenant des captages et des aquifères locaux notamment la nappe des grès du Trias inférieur (GTI) publiées dans la littérature (Celle-Jeanton et al. 2009) et bancarisées dans ADES permettent de compléter nos connaissances sur le fonctionnement hydrochimique du système.

² Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine

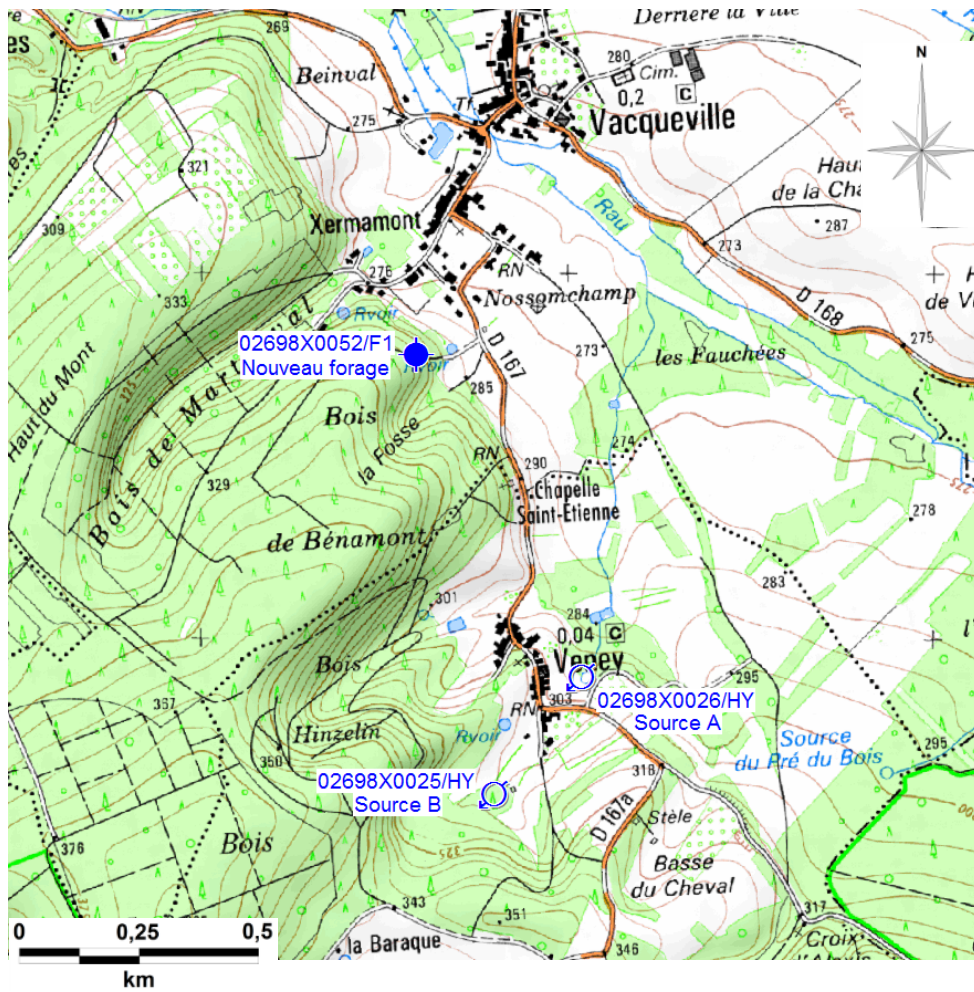


Illustration 1 : Localisation des captages AEP.

2. Contexte géologique et hydrogéologique

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Dans ce secteur de Lorraine, les formations géologiques comprennent, par âge croissant (Illustration 3):

- le calcaire du Muschelkalk : Calcaire à entroques (8 à 9 m), les couches à cératites (40 à 50 m), le calcaire à térébratules (4 à 8 m) ;
- les grès à *Voltzia* : grès feldspathiques et micacés à grain fins avec une épaisseur atteignant jusqu'à 20 m et qui contiennent souvent de la pyrite ;
- les couches intermédiaires : alternance de grès feldspathiques grossiers (localement appelé conglomérats principaux), bancs d'argiles vertes ou rouges et dolomites compactes ;
- les grès Vosgiens : grès roses (300-400 m d'épaisseur), localement feldspathiques, avec des ciments ferreux et un faciès de conglomérat dans sa partie supérieure ;
- les grès d'Annweiler : grès feldspathiques et quartzites à grains fins rouge ou rouge-gris avec une épaisseur maximum de 60 m d'épaisseur qui contiennent souvent des nodules dolomitiques et des précipités de manganèse ;
- les dépôts du Permien : ces dépôts sont caractérisés surtout par des dépôts détritiques et d'importantes venues volcaniques acides (rhyolites, rhyolites ignimbritiques) et basiques (andésites et basaltes) dont la répartition semble assez capricieuse ; ce volcanisme est cependant cantonné dans la portion de socle appartenant aux Vosges cristallines du nord.

Dans la zone de Veney et de Vacqueville, la géologie est composée de deux formations principales des grès du Trias inférieur, aussi noté GTI séparées par une faille géologique (la faille de Veney) orientée nord-ouest/sud-est. La faille de Veney a impacté les formations géologiques de la façon suivante :

- **à l'ouest** de la faille de Veney : le Horst de Baccarat constitué des grès à *Voltzia*, couches intermédiaires du Buntsandstein supérieur, le conglomérat principal du Buntsandstein moyen et les grès vosgiens ;
- **à l'est** de la faille de Veney : les formations superficielles composées de limons et de colluvions, qui recouvrent des formations géologiques du Muschelkalk moyen indifférencié (marnes et carbonates) voire du Muschelkalk supérieur (calcaires) puis les couches intermédiaires du Buntsandstein supérieur, et le conglomérat principal du Buntsandstein moyen, qui appartiennent à la série des grès du Trias inférieur.

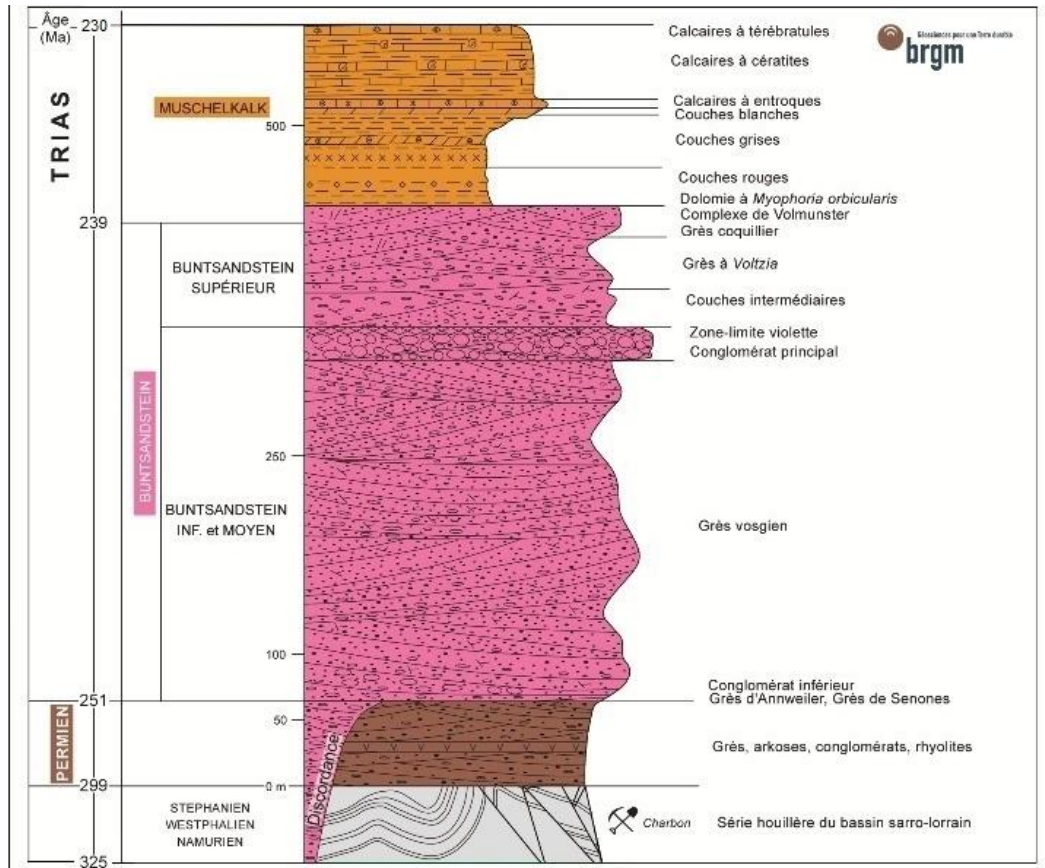


Illustration 2 : Log stratigraphique synthétique des grès du Trias inférieur en Lorraine (BRGM - Cartannaz et al., 2010)

L'illustration 3 présente la carte géologique harmonisée dans la zone d'études (la légende des différentes formations est fournie en Annexe 1).

Concernant les formations situées le long de la faille de Veney, de part et d'autre de la zone de Veney et de Vacqueville :

- **au nord-ouest**, la faille de Veney s'arrête dans les séries du Buntsandstein environ 3 km au nord du captage C3. Une origine du mercure dans ce secteur est peu probable du fait de l'absence de minéralogie propice à l'apparition de mercure ;
- **au sud-est**, la faille de Veney passe au nord de Raon-l'Etape à environ 6 km au sud-est du captage C2. Des formations volcaniques présentent à Raon-l'Etape (Allard, 1964) sont potentiellement en contact avec la faille de Veney, notamment les formations suivantes :
 - un massif de granite qui affleure sur les bords de la Meurthe jusqu'à Etival. Granite leucocrate avec quelques rares lamelles de biotite ;
 - une zone de roches métamorphiques composées de schistes micacées compacts et dont les minéraux sont souvent altérés en chlorite ou séricite. Présence de schistes micacés et de grès feldspathiques. Cornéennes feldspathiques roses et cornéennes amphiboliques vertes ;

- carrières de « Trapp » : La grande carrière de Raon-l'Étape exploite le « trapp », une formation représentative du volcanisme calco-alkalin d'âge dévonien à carbonifère inférieur des Vosges septentrionales. Grâce à ses propriétés mécaniques exceptionnelles, la roche, concassée sur place, est utilisée comme ballasts ou dans les enrobés bitumineux. On y retrouve de l'andésite labradorique avec phénocristaux de feldspath. Pâte riche en fibre d'amphiboles qui semble imprégnée de lamelles de biotites chloritisées. On y trouve également des cristaux d'augite, remplacés par de l'amphibole, des minéraux accessoires ainsi que de la biotite.

La notice de la carte géologique de Saint-Dié (carte géologique n°306) décrit les roches éruptives, le « Trapp » ainsi que le massif granitique de la façon suivante :

« Les roches éruptives banales, formant un abondant cortège de sills et filons intrusifs dans les formations précédentes. Elles comprennent :

- *des roches basiques ($\delta\Sigma^b_d$), dolérites à augite, diabases à ouralite, etc ;*
- *des roches intermédiaires : microdiorites quartziques ;*
- *des roches acides ($\mu\gamma_P$) : microgranites et rhyolites.*

Le trapp de Raon-l'Étape ($r\beta$) représente vraisemblablement une puissante coulée de labradorite avec tufs associés, s'insérant dans une série de schistes, arkoses fines (dR), l'ensemble ayant une position incertaine par rapport au massif de Moyenmoutier. Le trapp de Raon-l'Étape est activement exploité en carrière pour le ballast.

Signalons enfin que ces roches ont subi un métamorphisme thermique lors de la mise en place des granites hercyniens qui les bordent au Sud (granites de Raon-l'Étape, de Senones, divers granites du Champ-du-Feu), se traduisant au microscope par le développement de petits minéraux néoformés.

Les granites de Raon-l'Étape et des Brûlées sont des granites hercyniens tardifs. Le granite de Raon-l'Étape affleure mal et seulement à la faveur des vallées de la Meurthe et du Rabodeau. Au Nord il butte contre le Dévonien ; ailleurs il disparaît sous la couverture permo-triasique.

L'intérêt de ces granites est petit du point de vue de leur extension. Mais il convient de souligner que leur intrusion a précédé de peu les dépôts permien et les intercalations de tufs rhyolitiques que l'on y rencontre à la base du Saxonien. Ils représenteraient comme le granite du Kagenfels des massifs hypo-volcaniques tardihercyniens annonciateurs du volcanisme acide. »

Le tableau suivant présente le descriptif des forages profonds (> 100m) recensés dans la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) et localisés dans un rayon de 10 km autour de Veney. Il apparaît qu'aucun de ces forages profonds de 100 à 340 m n'atteint le plancher des grès du trias inférieur. La profondeur du Permien au droit de la zone d'étude n'a donc pu être précisée sur la base des données issues de la BSS.

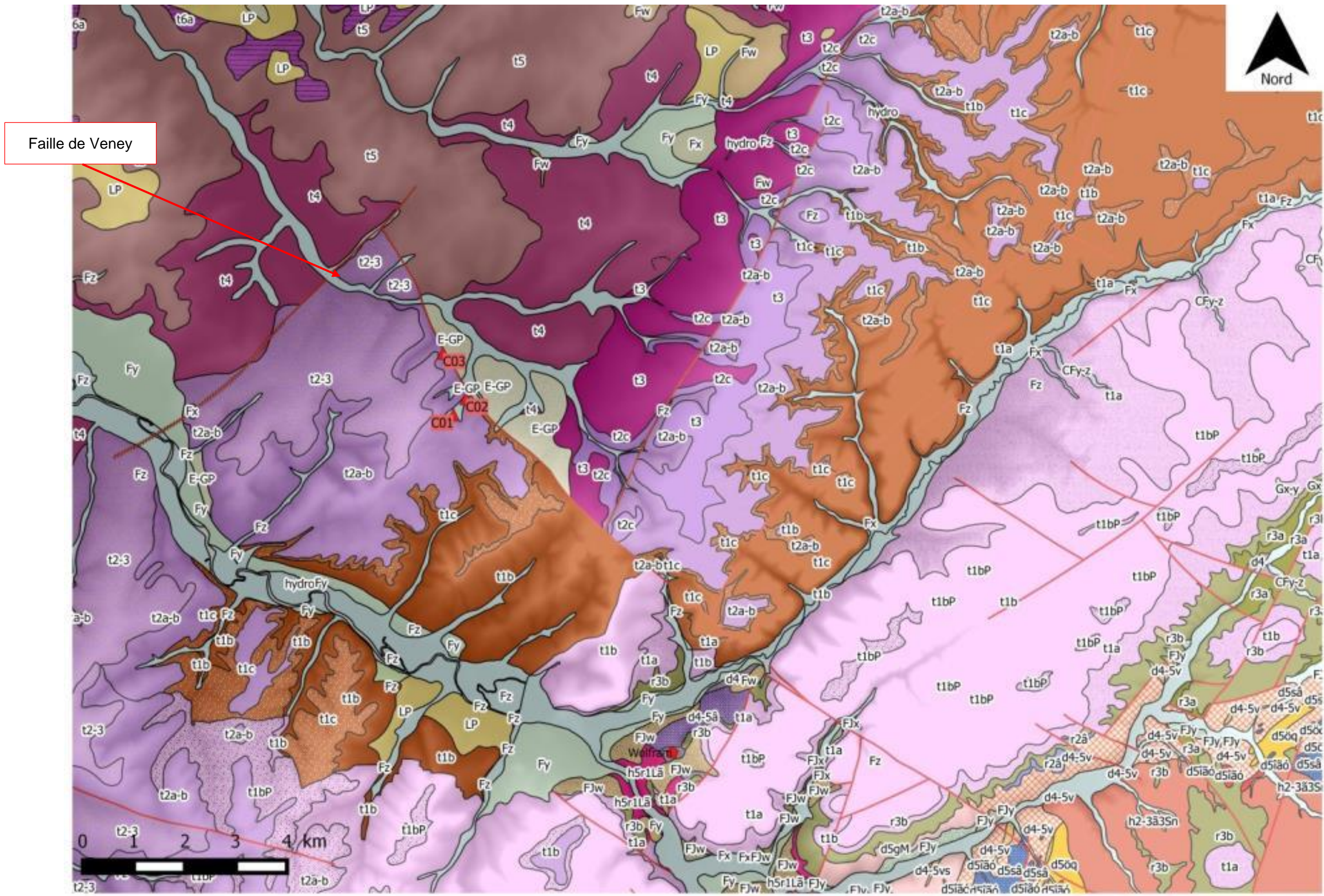


Illustration 3 : Carte géologique harmonisée de la zone d'étude

Indice	X L2e	Y L2e	Z sol	Profondeur	Dernier niveau géologique rencontré	
					stratigraphie	lithologie
02693X0002	924353,9	2399765,8	332	340,07	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	GRES VOSGIEN
02697X0007	922440	2397180	280,07	282	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	GRES ROSE , ARGILE
02697X0035	924794,9	2395925,9	279	225	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	GRÈS VOSGIEN
02697X0030	924891,4	2390366,9	357	187	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	PERTE
02697X0003	921702	2395068	276,75	135	BUNTSANDSTEIN	INCONNU
02706X0089	939726,8	2395474,7	427,44	122	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien
02705X0102	939030,4	2393810	387,78	117,52	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien
02705X0097	939374,7	2393887,1	446,03	111,68	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien
02705X0068	937521,8	2393718,8	425,27	110		
02698X0001	927916	2395988	292,37	102,65	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	INCONNU (GRES VOSGIEN)
02705X0114	938426,9	2395254,9	400	102	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	GRÈS À GRAIN FIN À MOYEN, CONTENANT QUELQUES GRAVIERS ROULÉS ET QUELQUES RARES GALETS DE QUARTZ
02705X0092	939286,6	2393871,4	430,79	101,13	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien
02705X0091	939194,6	2393863,6	421,73	100,6	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien
02705X0090	939323,5	2393828,3	412,56	100,1	BUNTSANDSTEIN-MOYEN	Grès vosgien

Tableau 1 : Derniers niveaux géologiques rencontrés dans les sondages profonds à proximité de Veney

2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Nappe des grès du Trias inférieur

Le principal aquifère de ce secteur est la nappe située dans les grès du Trias inférieur. Le réservoir des grès du Trias inférieur (GTI) en Lorraine et dans les Vosges du nord est constitué de grès plus ou moins fins, avec quelques passées argileuses dans sa partie supérieure, des passées conglomératiques en son centre et à sa base, et des lentilles d'argile dans sa partie inférieure.

Le sens d'écoulement régional de la nappe des GTI est orienté **vers le nord-ouest** selon la carte piézométrique réalisée par le BRGM en 2010 (Illustration 4, Nguyen-Thé et al. 2010). Cette carte régionale est cohérente avec le relevé piézométrique et la carte (Illustration 5) réalisée en 2013 par Nguyen-Thé et al. (2014).

Dans cette partie de la nappe des GTI, l'aquifère est à dominante libre. Ainsi, une recharge par percolation des eaux pluviales se produit dans le secteur de Veney. Cette recharge peut se traduire par une modification du toit de la nappe des GTI sous les reliefs :

- création de dômes correspondant à la recharge de la nappe, et dont le niveau piézométrique peut être supérieur à celui modélisé pour la nappe régionale ;
- création de nappes perchées limitées par des bancs argileux d'importance variable. Ces nappes perchées peuvent avoir des exutoires (sources) situés à des hauteurs supérieures à celle estimée de la nappe des GTI.

Ainsi, si entre Veney et Baccarat la côte estimée de la nappe des GTI (modélisation BRGM 2010) est comprise entre 270 et 280 m NGF, des sources sont recensées à des altitudes allant jusqu'à 344 m NGF (source E02).

L'illustration 6 présente les sources recensées à proximité des captages de Veney, ainsi que leurs altitudes. Les captages entourés en jaune ont des altitudes supérieures à 310 m NGF, et ceux entourés en rouge des altitudes supérieures à 330 m NGF.

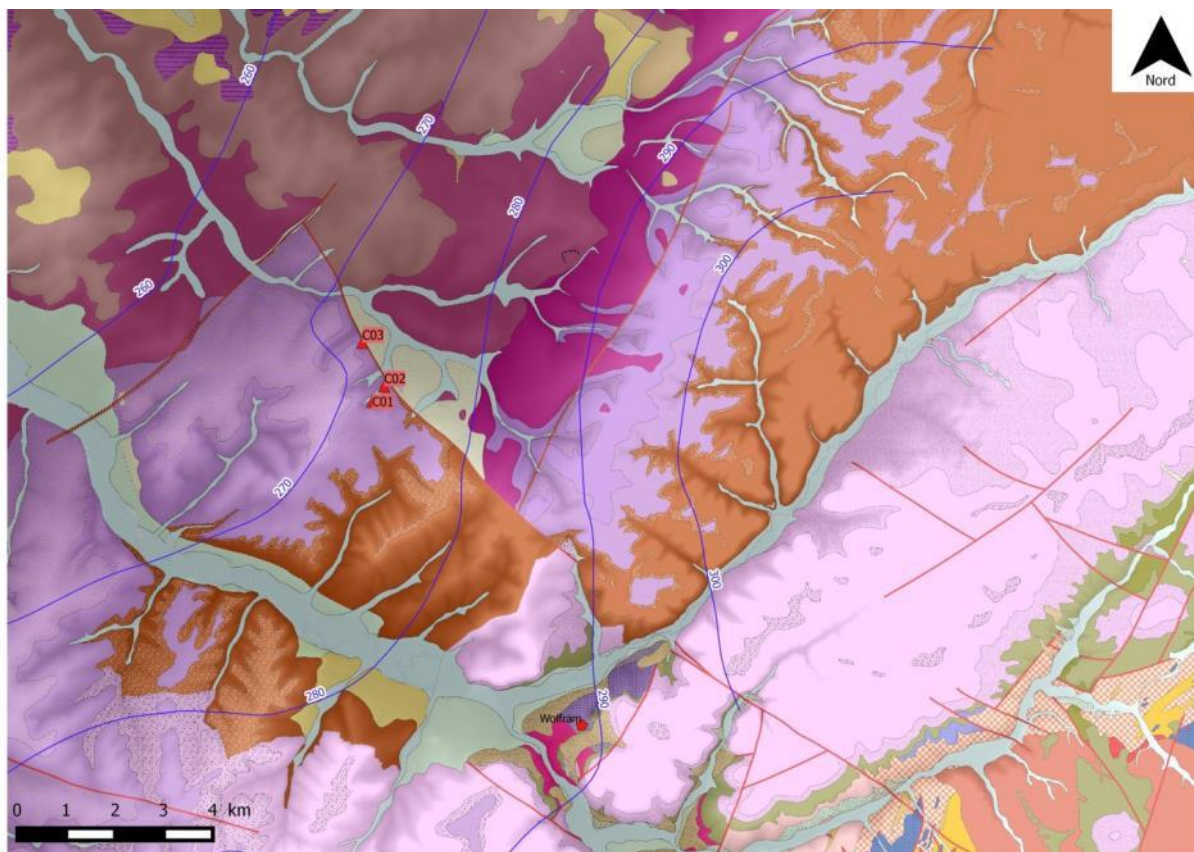


Illustration 4 : Écoulement de la nappe des GTI (modélisation 2010, Nguyen-Thé et al. 2010).

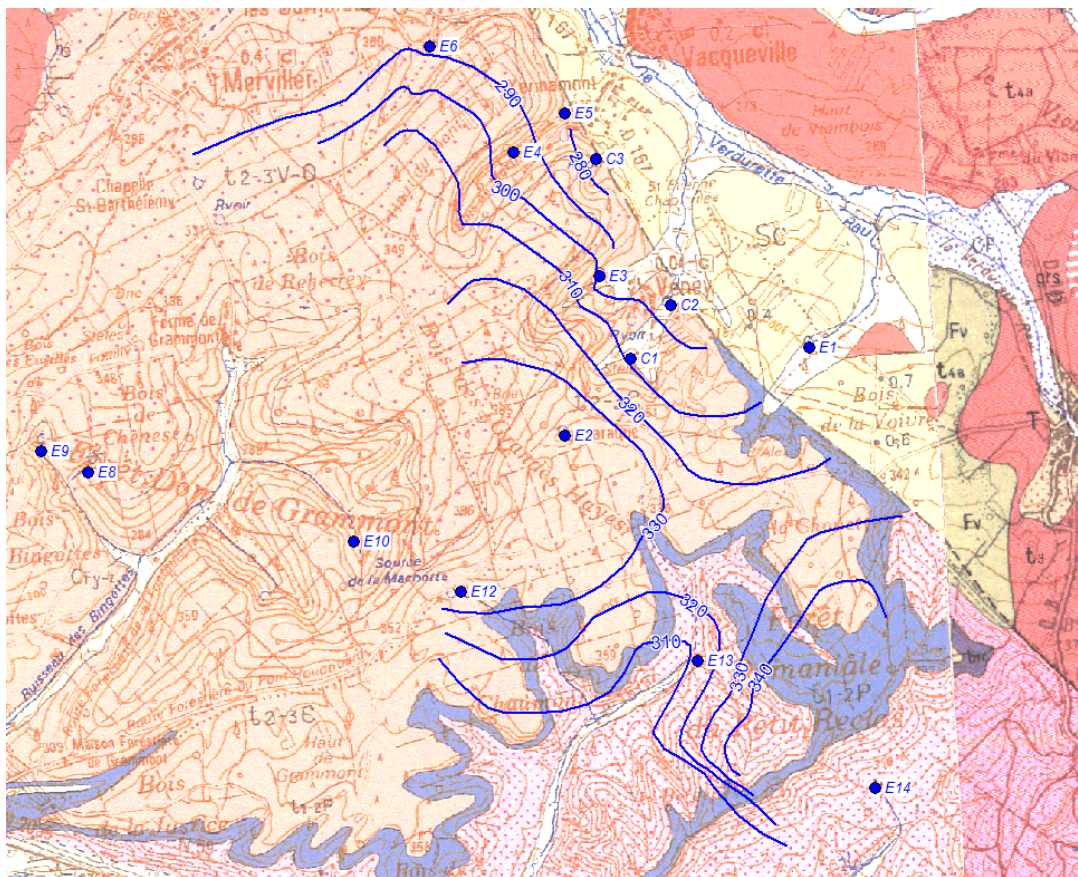


Illustration 5 : Esquisse piézométrique de la nappe des GTI en automne 2013 (Nguyen-Thè et al., 2014).

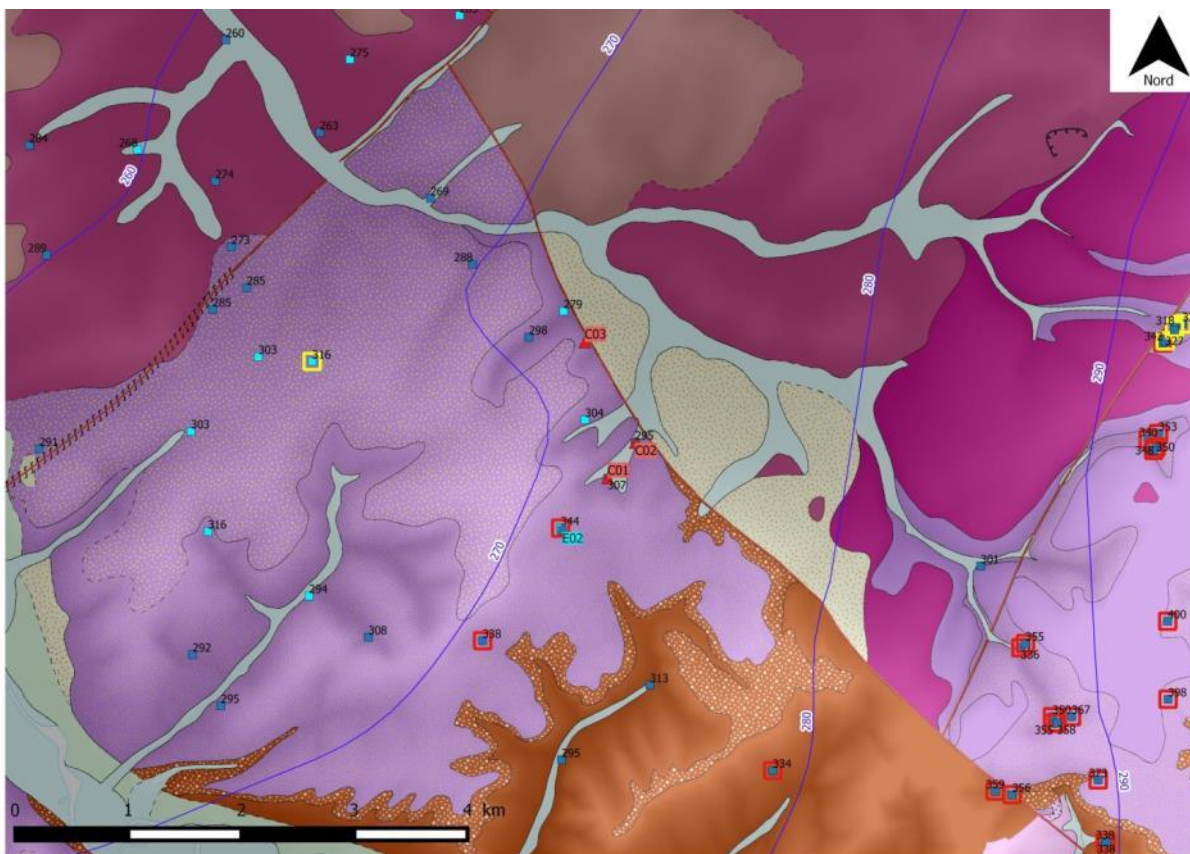


Illustration 6 : Altitude des sources situées à proximité de Veney (source : BSS, BRGM)

2.2.2. Autres nappes et résurgences

L'illustration 6 présente des altitudes des sources supérieures à celle estimée de la nappe des GTI. Ces sources situées à une altitude supérieure à celle de la nappe des GTI apparaissent à la faveur d'alternance de niveaux plus imperméables au sein des grès à Voltzia (t2-3) et des couches intermédiaires (t2_{a-b}). Dans les couches intermédiaires l'alternance locale des grès feldspathique grossiers (localement appelé conglomérats principaux) et des bancs d'argiles pourraient être à l'origine de ces résurgences de nappes perchées qui se forment dans ces horizons par l'infiltration des eaux météoriques.

2.2.3. Réseau de failles majeurs et faille de Veney

Les failles SSE-NNW pourraient jouer un rôle majeur d'un point de vue hydrogéologique en connectant les GTI avec les aquifères sus-jacents tels que les grès coquilliers du Muschelkalk (cf. le long de la faille de Veney).

La direction d'écoulement des eaux souterraines dans la faille de Veney n'est pas connue, les eaux sont susceptibles de provenir du nord-ouest ou du sud-est. En considérant le sens global d'écoulement de la nappe des GTI (orienté vers le nord-ouest), un écoulement des eaux dans la faille en direction du nord-ouest semble le plus probable, mais aucun élément ne permet de le démontrer.

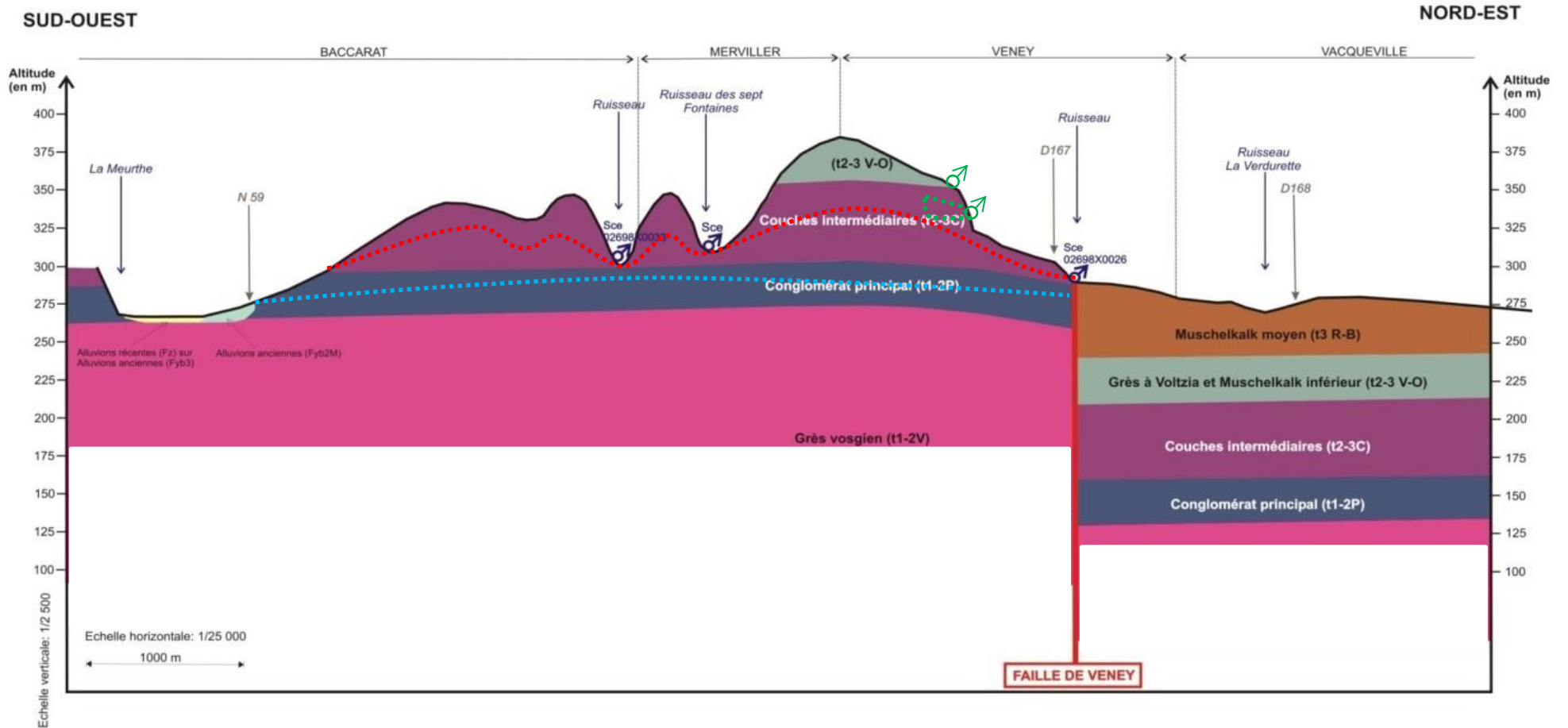
La faille de Veney semble néanmoins représenter un exutoire pour les eaux circulant au sein du horst de Baccarat.

La faille pourrait ainsi déconnecter les eaux circulant à l'ouest de la faille (horst) et les eaux circulant dans le compartiment à l'est (graben).

2.2.4. Répartition des eaux

L'étude réalisé par ANTEA en 2012 sur le secteur d'étude fournit quelques éléments sur le fonctionnement hydrogéologique des points d'eau étudiés. Dans la zone de Veney, la source A (C02 - 02698X0026/HY) ainsi que le nouveau forage (C03 - 02698X0052/F1) sont localisés à proximité immédiate de la faille. Les eaux captées au sein de ces deux ouvrages proviennent donc certainement des eaux drainées par la nappe des GTI et des eaux drainées par la faille de Veney.

A partir des concentrations en nitrates quantifiées dans les eaux à la source A (en amont de la faille) et avec une estimation des concentrations en nitrates des eaux arrivant de la forêt (basée sur les concentrations moyennes des captages du secteur avec couverture forestière du bassin d'alimentation), le pourcentage d'alimentation de ces deux zones présumées a été estimé (ANTEA 2012). Ces paramètres, couplés aux débits de prélèvements par équations, suggèrent que les eaux captées au forage C03 proviennent pour 60 % de la faille et 40 % de la nappe des GTI formant le plateau et les coteaux sud-ouest de la vallée.



-Nappe des GTI (carte piézométrique 2010)
-Nappe des GTI : niveaux probables en lien avec une alimentation par percolation, et avec les reliefs
-Nappe perchées potentielles : possibilité de la création de nappes perchées au-dessus de niveaux plus argileux des couches t2-3C ou t2-3 V-O

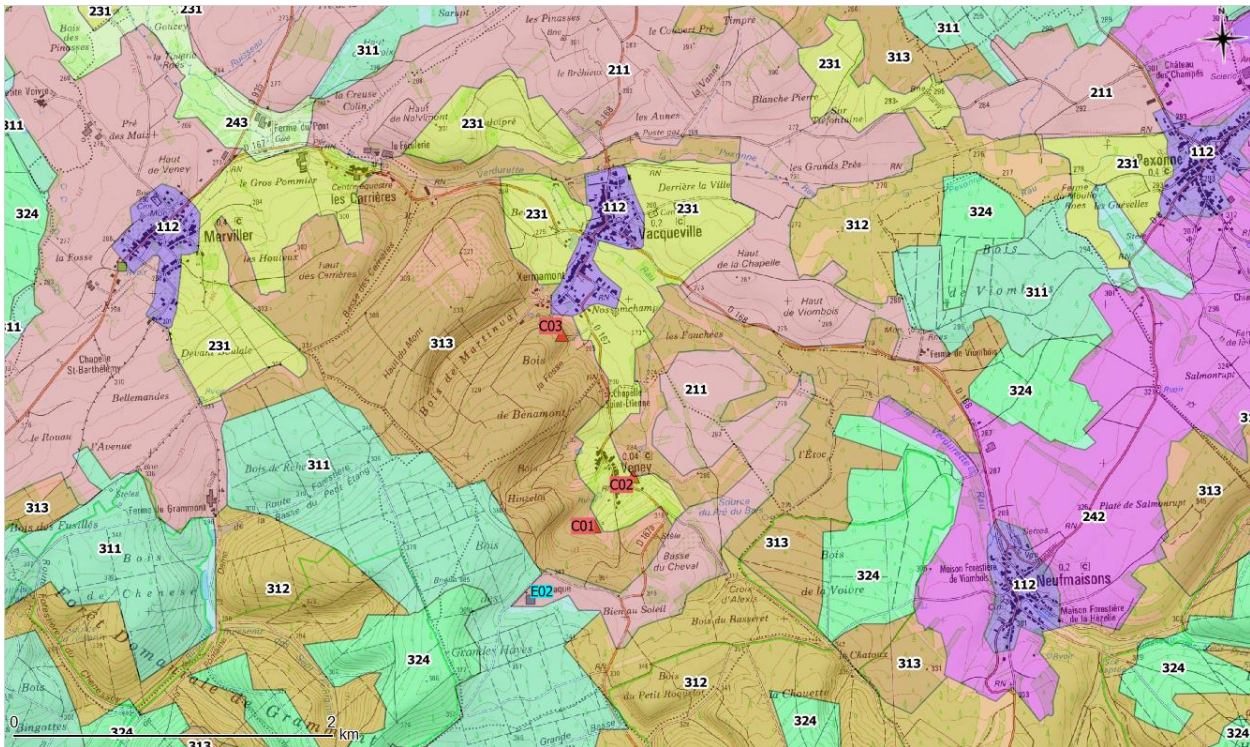
Illustration 7 : Coupe schématique sud-ouest / nord-est d'après ANTEA.

2.2.5. Occupation du sol dans le secteur d'étude

Selon la base de données européenne d'occupation biophysique des sols (Corine Land Cover, 2014) :

- la source C01 est située à la limite entre un espace de prairie et un espace de forêt ;
- la source C02 est située dans une prairie en aval d'un espace de prairie et de forêt mélangée ;
- la source E02 est située à la limite entre des terres arables agricoles et une forêt de feuillus ;
- le captage C03 est situé dans un espace de forêt.

Selon l'extension des bassins versants hydrogéologiques des sources C01 et C02, il est possible de noter la présence de terres arables et de forêts (illustration 8). On note également de la prairie pour la source C02.



Code CLC	Libellé
112	Tissu urbain discontinu
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation
231	Prairies
311	Forêts de feuillus
313	Forêts mélangées
324	Forêt et végétation arbustive en mutation

Illustration 8 : Usage des sols dans le secteur d'étude selon Corine Land Cover 2014.

2.3. CONTEXTE REGIONAL ET FOND GEOCHIMIQUE

Les données bibliographiques disponibles ont été consultées afin d'évaluer le contexte régional et le fond géochimique local notamment pour le mercure.

Les bases de données suivantes ont été consultées :

- BD-ETM (Base de Données sur les Éléments Traces Métalliques) ;
- ASPITET : Apport d'une stratification pédologique pour l'interprétation des teneurs en éléments traces ;
- GEMAS ;
- Inventaire géochimique du BRGM.

L'analyse de ces bases de données est présentée dans les parties suivantes.

2.3.1. *BD-ETM*³

Dans le cadre de la réalisation des plans d'épandage des boues de stations d'épuration urbaines, de très nombreuses analyses de huit éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn) ont été effectuées par l'INRA sur des échantillons d'horizons de surface de sols avant l'épandage de boues résiduaires, et ce sur l'ensemble du territoire national. Ces analyses ont été regroupées en deux campagnes principales (1997-1998 et 2008-2010). La première campagne a fourni des résultats statistiques de la présence de ces éléments métalliques dans les sols à l'échelle du département. La campagne de 2008-2010 a produit des résultats à l'échelle de la petite région agricole. Les données issues de la BDETM sur la campagne de 2008-2010 sur la petite région agricole « Montagne Vosgienne » (n°54307) ainsi que les données issues de la campagne nationale sont présentées dans le tableau 2 ci-dessous pour les composés présentant des teneurs plus importantes que les statistiques de la campagne nationale.

Nature des données	type de données	Mercure			Plomb		
		médiane (p 50)	p 75	p 90	médiane (p 50)	p 75	p 90
MONTAGNE VOSGIENNE (54307)	Campagne 2009	0,13	0,2	0,3	32,94	48,9	79,5
Statistiques de la campagne nationale	Maximum	0,3	0,7	2,1	36,5	48,9	94,3
	P 95	0,1	0,21	0,3	32,4	39,7	52,4
	médiane	0,05	0,07	0,1	19,9	24,6	30,2

Tableau 2 : BDETM – campagne 2008-2010 - résultats pour le mercure et le plomb (en mg/kg MS)

La médiane, le percentile 75 et le percentile 90 des teneurs en mercure et en plomb de la petite région agricole de la zone d'étude sont plus élevées que pour 95 % des petites régions agricoles de France ayant été échantillonnées. Les teneurs de la petite région agricole de la montagne vosgienne sont donc représentatives d'une anomalie naturelle en mercure et en plomb par rapport aux autres régions agricoles de France.

³ <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-elements-traces-metalliques-bdetm-65>

2.3.2. ASPITET⁴

Sur la base de 3400 échantillons prélevés sur l'ensemble du territoire, l'INRA a déterminé des gammes de concentrations couramment observées pour des sols ordinaires, pour des anomalies naturelles modérées et des anomalies naturelles fortes (tableau 3).

	gamme de valeurs couramment observées dans les sols "ordinaires" de toutes granulométries	gamme de valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées	gamme de valeurs observées dans le cas de fortes anomalies naturelles
As	1,0 à 25,0	30 à 60 (1)	60 à 284 (1)
Cd	0,05 à 0,45	0,70 à 2,0 (1)(2)(3)(4)	2,0 à 46,3 (1)(2)(4)
Cr	10 à 90	90 à 150 (1)(2)(3)(4)(5)	150 à 3180 (1)(2)(3)(4)(5)(8)(9)
Co	2 à 23	23 à 90 (1)(2)(3)(4)(8)	105 à 148 (1)
Cu	2 à 20	20 à 62 (1)(4)(5)(8)	65 à 160 (8)
Hg	0,02 à 0,10	0,15 à 2,3	
Ni	2 à 60	60 à 130 (1)(3)(4)(5)	130 à 2076 (1)(4)(5)(8)(9)
Pb	9 à 50	60 à 90 (1)(2)(3)(4)	100 à 10180 (1)(3)
Se	0,10 à 0,70	0,8 à 2,0 (6)	2,0 à 4,5 (7)
Tl	0,10 à 1,7	2,5 à 4,4 (1)	7,0 à 55,0 (1)
Zn	10 à 100	100 à 250 (1)(2)	250 à 11426 (1)(3)

- (1) zones de "métallotectes" à fortes minéralisations (à plomb, zinc, barytine, fluor, pyrite, antimoine) au contact entre bassins sédimentaires et massifs cristallins. Notamment roches liasiques et sols associés de la bordure nord et nord-est du Morvan (Yonne, Côte d'Or).
(2) sols argileux développés sur certains calcaires durs du Jurassique moyen et supérieur (Bourgogne, Jura).
(3) paléosols ferrallitiques du Poitou ("terres rouges").
(4) sols développés dans des "argiles à chailles" (Nièvre, Yonne, Indre).
(5) sols limono-sableux du Pays de Gex (Ain) et du Plateau Suisse.
(6) "bornais" de la région de Poitiers (horizons profonds argileux).
(7) sols tropicaux de Guadeloupe.
(8) sols d'altération d'amphibolites (région de La Châtre - Indre).
(9) matériaux d'altération d'amphibolites (région de La Châtre - Indre)

Tableau 3 : ASPITET – gammes de concentrations (en mg/kg MS)

Au regard du référentiel ASPITET, la teneur médiane en mercure de la petite région agricole de la montagne vosgienne est représentative d'une anomalie naturelle modérée.

2.3.3. GEMAS

Le projet GEMAS propose une analyse des concentrations en mercure dans les sols agricoles et pâturages (Ottesen et al., 2013) en Europe. Les concentrations médianes sont respectivement de 0,03 et 0,035 mg/kg avec un centile 90 respectivement à 0,076 et 0,094 mg/kg et des concentrations maximales respectivement à 1,6 et 3,1 mg/kg. Ainsi les valeurs mesurées dans les sols de la région durant la phase 1 (cf. page 30) présentent une plus forte concentration en mercure que les sols européens ce qui est confirmé par l'étude du Gemas qui souligne une contamination en mercure dans les Vosges (Illustration 9).

⁴ <http://www7.inra.fr/dpenv/baizec39.htm>

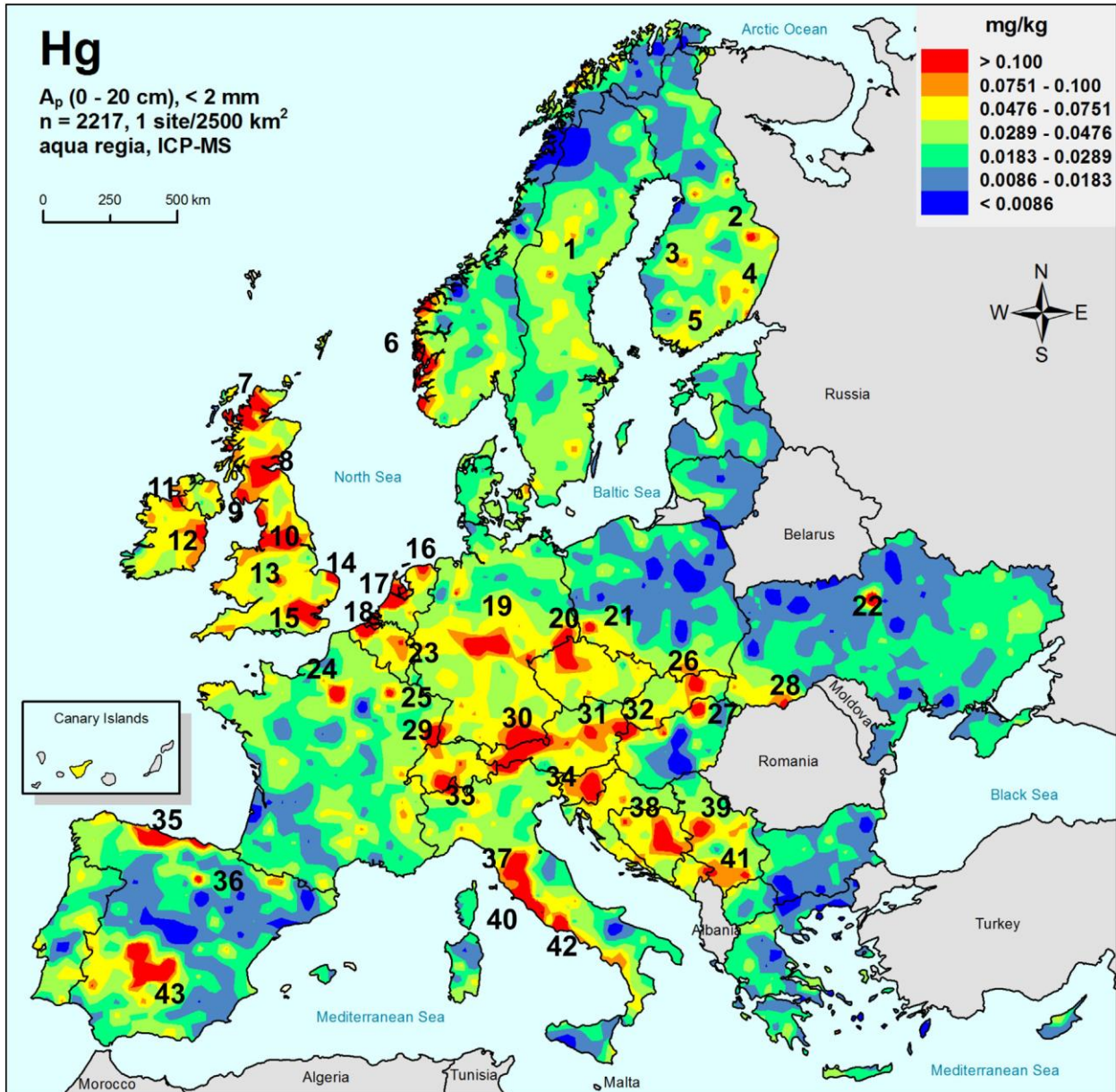


Illustration 9 : Carte géochimique des concentrations en mercure dans les sols agricoles européens (Ottesen et al., 2013).

Les anomalies sont numérotées (France : 24-Paris- contamination urbaine; 25-Verdun-contamination ; 29 : Vosges : Contamination ou minéralisation).

2.3.4. Inventaire géochimique du BRGM⁵

Le BRGM, conformément à sa mission de Service public et à la demande du Ministère de l'Industrie, a effectué de nombreuses campagnes de prospection à vocation minière entre les années 1975 et 1991 ; ces opérations étaient réalisées dans le cadre du programme dénommé « Inventaire des ressources minérales du territoire national ». Ces résultats sont maintenant regroupés dans une base de données représentant plus de 280 000 échantillons. Cette base a été complétée par environ 60 000 résultats d'analyses effectuées par la SNEAP⁶. Ces investigations géochimiques ont été menées pour déceler des gisements métallifères sur le territoire national. Ces investigations ont été faites par échantillonnage systématique, à une maille telle qu'un gîte minéral important sub-affleurant puisse être détecté avec une très forte probabilité. Cette base fournit une information des caractéristiques du sol entre 30 et 50 cm de profondeur et exclut l'horizon humifère de surface.

Les données issues des inventaires géochimiques du BRGM ont été consultées afin d'étudier les concentrations en métaux (notamment Ag, As, Cu, Pb, Sb et Zn). Le mercure ne fait pas partie des éléments analysés dans le secteur d'étude.

Seul de l'arsenic a été détecté à des concentrations significatives (Illustration 10) dans le secteur de Raon-l'Étape. Pour l'Ag, Cu, Pb, Sb et Zn, aucune teneur significative n'a été identifiée dans le secteur de Raon-l'Étape.

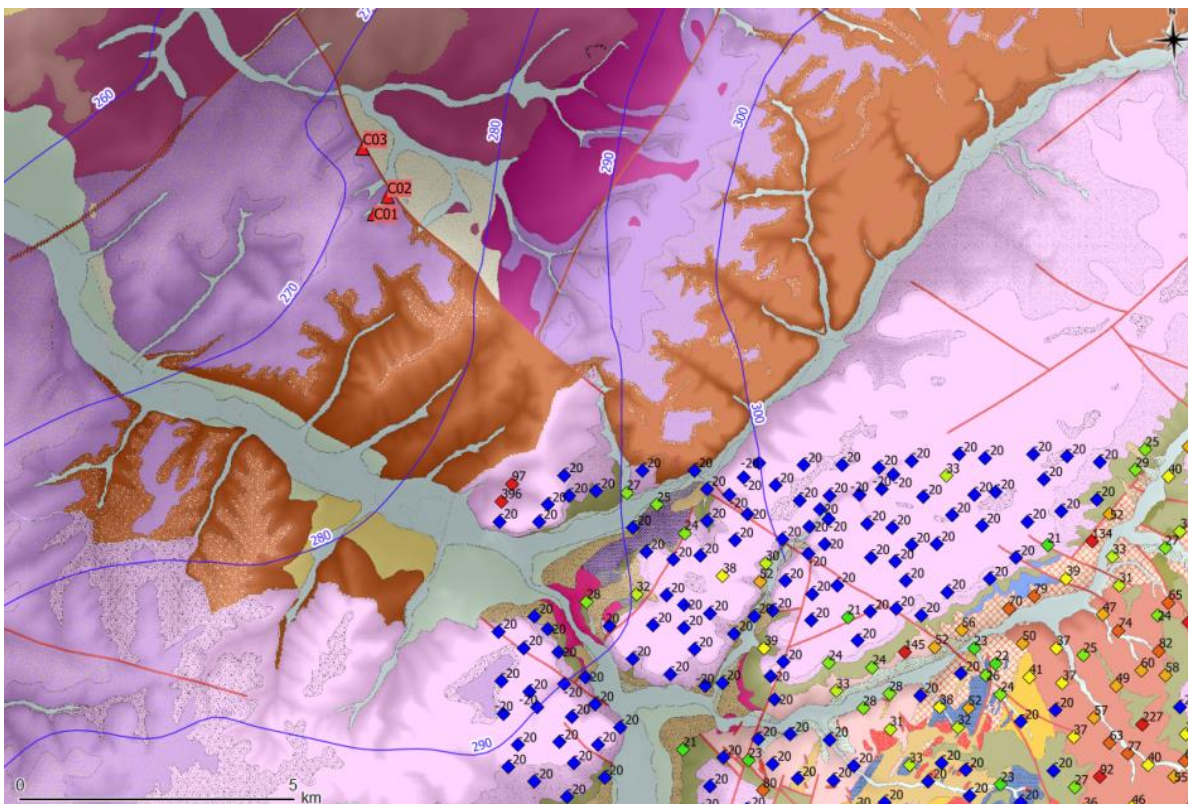


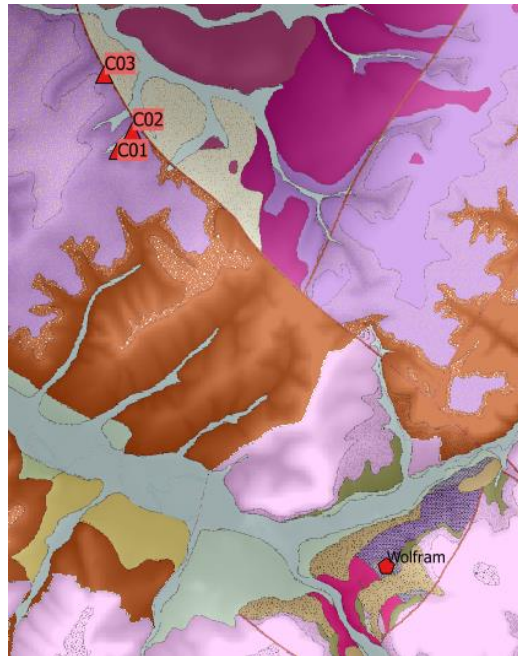
Illustration 10 : Teneurs en arsenic (en ppm , Inventaire géochimique du BRGM / SIG-MINES)

⁵ http://sigminesfrance.brgm.fr/geoch_inventaire.asp

⁶ Société Nationale Elf Aquitaine Production

2.3.5. Gites, gisements et indices

D'après les gites, gisements et indices recensés dans SIG-MINES, le seul gisement situé dans la zone d'étude est un gisement de wolfram (tungstène) dont la mise en place est associée à l'intrusion du massif granitique de Raon-l'Étape (Illustration 11). Ce type de gisement de wolfram n'est pas classiquement associé à la présence de mercure.



Fiche gîte : Raon L'Étape (FRA-04073)

Production : ?
Réserve : ?
Ressources : ?
Potentiel : ?

Substance et contexte géologique

Nom : Wolfram
Groupe : Sb-W-Bi-Sn-Mo-As
Type : Métaux ferreux et alliages
Morphologie : Amas et lentille stratiformes (syn-encaissant) de minerai massif à sub-massif
Géologie : Skarns à W (scheelite) - Mo : W, (Mo)

Informations complémentaires

Exploitation : Méthode d'exploitation indéterminée
Statut : Ancienne exploitation artisanale, gisement abandonné

Illustration 11 : Localisation et fiche du gisement de Raon-l'Étape (SIG-MINES).

2.3.6. Indices de la présence naturelle de mercure dans la bibliographie

La présence de cinabre dans le massif des Vosges est évoquée dans les rapports BRGM suivants :

- J. Lougnon, juillet 1985, contribution à la connaissance de la géologie de la région Vosges-Alsace-Moselle après 14 années de prospection de la part du B.R.G.M. rapport n°85 DAM 038 OP4 ;
- J. Meloux, 1983, Ressources minières françaises, Tome 13 – les indices de mercure (situation en 1983), rapport n°RR-41430-FR-13

Ces rapports reportent la découverte de cinabre dans la haute vallée de la Bruche, au lieu-dit du Han dans la commune de Bourg-Bruche (67) à environ 25 km au sud-est de Veney. Le cinabre a été découvert dans de minces fissures affectant des arkoses et des tufs du Permien. Cet indice a été considéré comme un indice métallogénique démontrant des minéralisations du Permien du Palatinat, mais dans les autres bassins permien des Vosges il n'a pas été retrouvé (à part des traces) d'indice alluvionnaire de cinabre, et le petit indice du Han reste le seul connu. L'illustration 12 présente la localisation de la commune de Bourg-Bruche (67).

Du cinabre associé à de l'or a également été découvert près d'Obernai dans un placier quaternaire (Meloux, 1983).

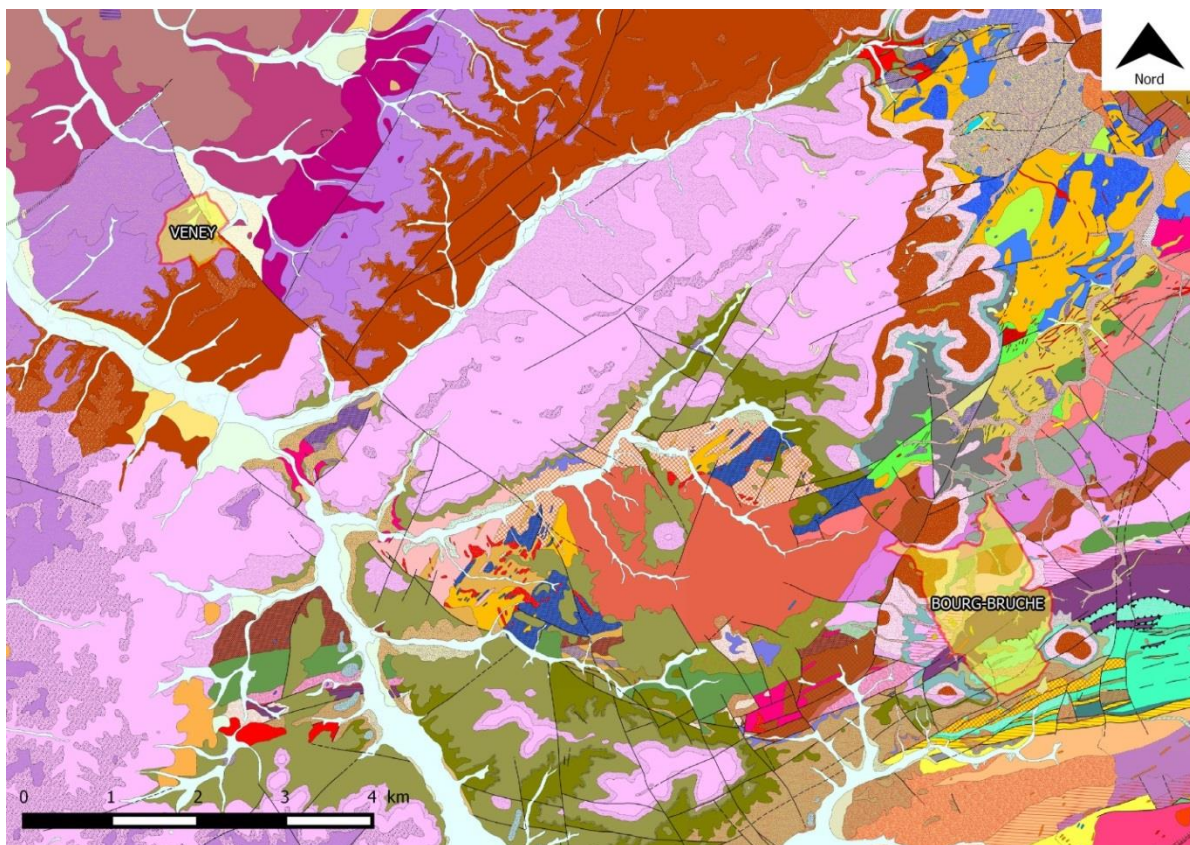


Illustration 12 : Localisation de Bourg-Bruche où un indice de cinabre a été découvert.

2.4. SYNTHÈSE DU CONTEXTE REGIONAL

Les données bibliographiques consultées ont permis d'identifier des éléments permettant de soupçonner une anomalie naturelle en mercure dans les sols superficiels sur la base des fonds géochimiques de la BD-ETM (Base de Données sur les Éléments Traces Métalliques) et des résultats du projet GEMAS.

Dans le cadre de prospections minières, le BRGM a également démontré la présence localisée de cinabres dans des minces fissures traversant le permien.

La faille de Veney traversant déjà les grès du Trias inférieur, s'étend probablement jusqu'au Permien. La présence de cette faille ancienne et des failles conjuguées offre un réseau de failles dans lequel des fluides ont pu circuler.

2.5. RAPPELS SUR LES CONCLUSIONS DES TRAVAUX ANTERIEURS

La pollution au mercure qui affecte les eaux des captages d'alimentation en eau potable des communes de Vacqueville et de Veney en Meurthe-et-Moselle a déjà fait l'objet de plusieurs études rappelées ci-après.

2.5.1. *Bureaux d'études et hydrogéologue agréé (2007-2008)*

Une première étude, axée principalement sur les concentrations en mercure total dans les eaux émergentes aux alentours de la source captée présentant les plus fortes concentrations en mercure (Source A - 02698X0026/HY), a été réalisée en février 2008 afin d'identifier une source potentielle de pollution (Revol, 2008). Deux sources de pollution étaient initialement considérées : (1) la décharge voisine et (2) le rejet d'une partie des eaux usées par le village voisin dans le vallon à l'amont de la source (Revol, 2007).

L'absence de mercure dans les prélèvements les plus distants de la source A exclue une pollution d'origine lointaine. Les analyses réalisées suggéraient une source de pollution limitée à la proximité du captage, vraisemblablement issue de la décharge sauvage avoisinante, ou située entre celle-ci et la source A. Cette possible origine anthropique compromet le maintien du captage de la source A pour l'alimentation en eau potable (A.E.P.) pour la commune de Vacqueville (Revol, 2008 ; Nguyen-Thé, 2012).

Après l'enlèvement des dépôts d'ordures non réglementaires et la réhabilitation des sols souillés des décharges avoisinantes, la persistance de la pollution dans la source captée A a mené la commune de Vacqueville à exploiter une ressource A.E.P. de substitution. La réalisation d'un forage (02698X0052/F1) captant la nappe des grès Vosgiens est préférée afin de garantir une meilleure protection de la zone principale d'alimentation de la commune (ANTEA, 2012). L'eau brute du nouveau forage, situé à Réclonville, présente des résultats d'analyse en mercure conforme aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine (Arrêté du 11 janvier 2007) , avec toutefois des concentrations en mercure faibles (inférieures à la norme de qualité des eaux potables) mais détectables (0,15-0,30 µg/L).

2.5.2. Etude BRGM Phase 1 (2014)

La présence de mercure dans le nouveau forage et les sédiments à Réclonville ont conduit à intensifier les investigations pour rechercher l'origine de la pollution basée sur l'échantillonnage d'eaux souterraines dans une zone plus étendue, de sols et de sédiments au sein des deux communes concernées (Nguyen-Thé et al., 2014).

Ainsi, trois profils d'échantillonnage des sols recoupant la faille de Veney ont été réalisés ainsi qu'une campagne sur les sédiments des ruisseaux en aval, en vue de doser les teneurs en mercure. Ces campagnes ont permis d'analyser 26 échantillons d'eaux souterraines (Illustration 13), 79 échantillons de sols et 6 échantillons de sédiments. Les sédiments présentaient des concentrations en mercure comprises entre 0,11 et 0,35 mg/kg MS tandis que les sols présentaient des teneurs entre 0,06 et 0,35 mg/kg MS avec une anomalie à 1 mg/kg MS.

Ces valeurs sont conformes aux valeurs mesurées dans les sols tel que présenté au chapitre 4 (page 23).

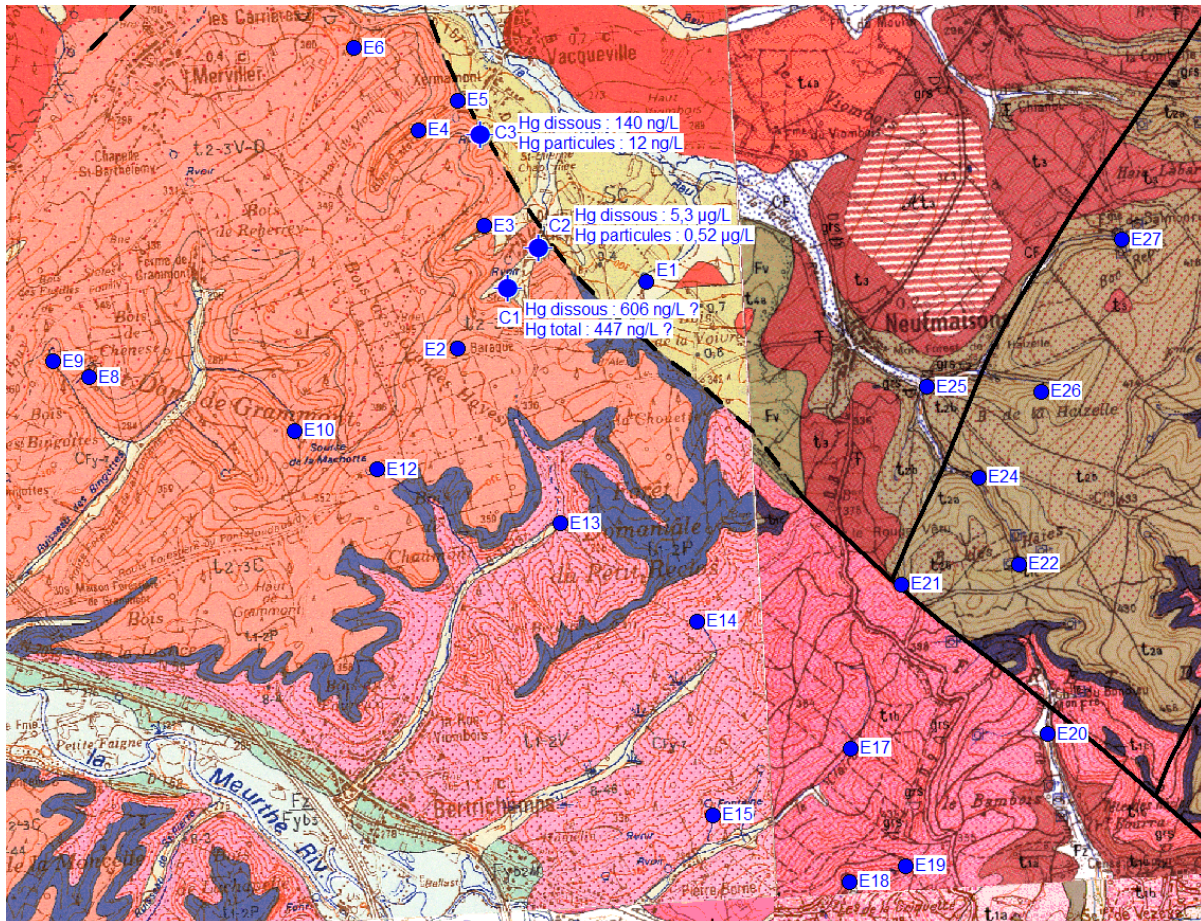


Illustration 13 : Points d'eau prélevés et mercure quantifié dans les eaux souterraines (Nguyen-Thé et al., 2014).

Cette étude a permis de tirer les enseignements suivants :

- les sols et les sédiments présentent quelques indices disséminés de la présence de mercure, sans toutefois révéler d'anomalies importantes au sein de la zone échantillonnée ;
- les deux décharges sauvages sont à écarter comme origine de la pollution affectant l'ensemble des 3 captages ;
- les résidus de munitions semblent à écarter comme origine du mercure en raison de la non contamination des eaux par les ions perchlorates ;

Les éléments apparus sur l'extension de la pollution (présence de mercure au forage et dans les sédiments à Réclonville) ont conduit à intensifier les investigations afin d'identifier l'origine de la pollution. Une origine naturelle (géogénique) au mercure, en association à d'autres métaux reconnus dans les formations géologiques, reste l'hypothèse la plus probable à l'issue de cette phase d'étude.

3. Programme d'investigation et résultats d'analyses

3.1. PROGRAMME D'INVESTIGATION

3.1.1. *Choix des points de prélèvements*

Le choix des points de prélèvements s'est basé sur les résultats et les conclusions de la phase 1 réalisée en 2014 (Nguyen-Thé et al., 2014). L'objectif des prélèvements étant une recherche de l'origine du mercure dans les eaux souterraines, la stratégie adoptée a été de :

- prélever les deux sources (C01-C02) impactées de Veney afin de caractériser la nature de la pollution ;
- prélever des eaux du forage (C03) de substitution de Vacqueville afin d'évaluer si les traces de mercure mesurées sont liées au mercure présent en fortes concentrations dans les sources de Veney ;
- prélever les eaux d'une source témoin (E02) située en amont des sources impactées, et captant si possible la même nappe que les sources de Veney.

Cette stratégie a abouti à la définition des points de prélèvement présentés dans le tableau 4.

NOM	indice BSS	Commune	Nature	Utilisation	Altitude du sol (m)	Profondeur de l'ouvrage (m)	Objectif
C01	02698X0025	Veney	Source	AEP abandonné	305	0	caractériser la nature de la pollution
C02	02698X0026		Source		297	0	
C03	02698X0052	Vacqueville	Forage	AEP	303	82	Évaluer les liens avec les sources de Veney
E02	02698X0028	Veney	Source	aucune	340	0	Témoin non impacté

Tableau 4 : Points de prélèvements retenus pour la phase 2

Le choix du prélèvement témoin E02 a été motivé par sa position en amont hydraulique des sources impactées de Veney (C01 et C2), ainsi que de l'absence de détection de mercure dans les eaux lors de la phase 1 (Illustration 13).

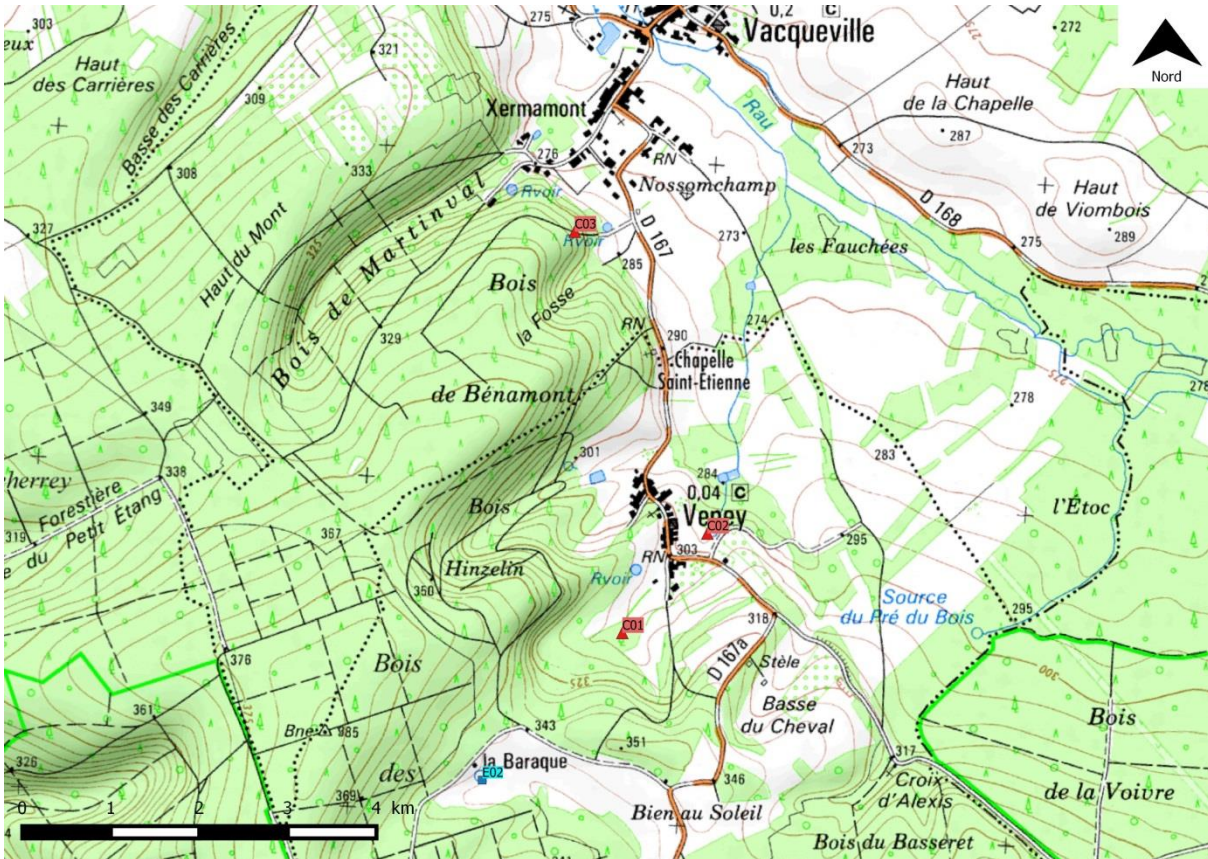


Illustration 14 : Localisation des points de prélèvements sur carte IGN

3.1.2. Réalisation de la campagne

La campagne de prélèvement a été réalisée le 26 avril 2016. L'illustration suivante présente des photos des points de prélèvements réalisés. L'accès aux points de prélèvements a été validé avec les maires des communes de Veney (C01 et C02) et de Vacqueville (C03).

Prélèvement	Photos	
C01		
C02		
C03		
E02		

Illustration 15 : Photos des prélèvements réalisés le 26/04/2016 par le BRGM.

3.2. PRELEVEMENTS ET ANALYSES

3.2.1. Acquisition des données de terrain

La mesure des paramètres physico-chimiques a été réalisée sur les eaux *in situ* avant leur prélèvement. Le tableau 5 présente les mesures réalisées sur le terrain le 24/04/2016.

N° échantillon	Nom	Date	Temp	pH	Eh	Cond	O2. Diss
			°C		mV	µS/cm 25°C	%
C01	Source B	26/04/16	7.9	7.3	130	115	94.3
C02	Source A	26/04/16	10.1	7.1	206	115	77.4
E02	Point témoin	26/04/16	9.6	4.7	332	45	86
C03	Forage	26/04/16	10	5.7	315	113	80.4

Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques au cours de la phase 2

3.2.2. Prélèvement et conditionnement

Les eaux prélevées ont été filtrées à 0,45 µm sur des filtres PVDF et conditionnés avant analyse. Le dosage des anions a été réalisé par chromatographie ionique (HPLC, incertitude analytique entre 5-10 %). Le dosage de l'alcalinité a été réalisé sur eau filtrée à 0,45 µm dans les 24h suivant le prélèvement par la méthode de Gran. Les échantillons destinés à l'analyse des cations et des éléments traces ont été acidifié avec HNO₃ (suprapur) puis conservés à 4°C. L'analyse des cations majeurs a été effectuée par ICP-AES (incertitude analytique à 5 %), les éléments traces ont été dosés par ICP-MS (incertitude analytique à 5 %).

Le dosage du mercure en solution a été réalisé par spectrométrie de fluorescence atomique selon le mode opératoire NF EN 17852 par génération de Hg⁰ gazeux (Cold Vapor), piégeage et détection par Spectrométrie de Fluorescence Atomique (AFS) (CV/AFS).

Les isotopes stables de l'eau ont été analysés par spectrométrie de masse. La précision des mesures est de +/- 0,1 ‰ pour l'oxygène, et de +/- 0,8 ‰ pour l'hydrogène. On utilise la notation δ exprimée en parts pour mille (‰) avec : $\delta \text{ (‰)} = [(R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$ où R est le rapport isotopique, isotope lourd sur isotope léger (e.g. ¹⁸O/¹⁶O). Le standard de référence est le SMOW (Standard Mean Ocean Water) qui est une eau de mer moyenne.

Les compositions isotopiques en Hg des échantillons ont été mesurées avec un MC-ICP-MS de type Nu Plasma (Multi Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Nu-Instruments, Royaume-Uni) en mode plasma sec. Un nébuliseur/désolvateur de type DSN-100 (Nu Instruments, Royaume-Uni) a été utilisé pour introduire simultanément l'échantillon et une solution étalon contenant du thallium (Tl) pour corriger le biais de masse instrumental (Illustration 16).

L'échantillon le plus concentré en mercure (échantillon n°2) a été introduit dans le MC-ICP-MS par l'intermédiaire d'un système de type génération de vapeur à froid en continu (CCVG, Blum et al, 2007). Les autres échantillons ont été pré-concentrés en ligne en utilisant un générateur de vapeur à froid et à amalgamation (CVG-DGA) couplé au spectromètre de masse MC-ICP-MS (Bérail et al., 2016).

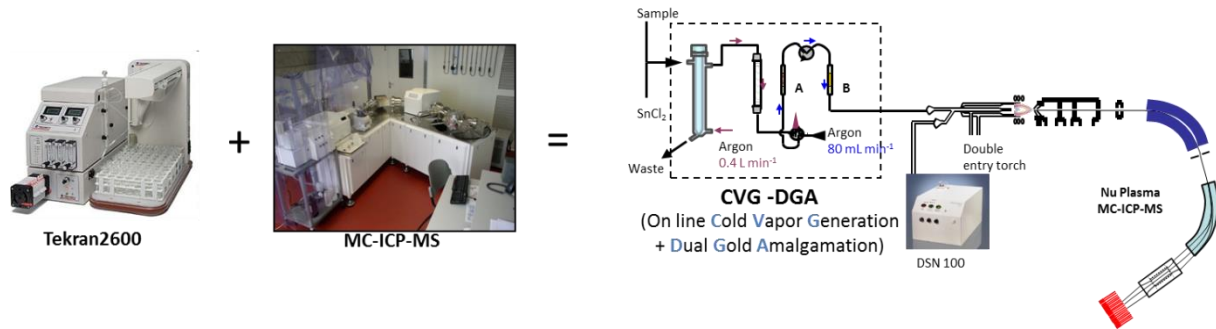


Illustration 16 : Chaîne analytique utilisant un générateur de vapeur à froid et à amalgamation (CVG-DGA) couplé au spectromètre de masse MC-ICP-MS.

3.3. RESULTATS ANALYTIQUES

Les paramètres physico-chimiques et les concentrations mesurées en éléments majeurs et traces pour la campagne d'échantillonnage de la phase 2 sont présentés dans les tableaux 6 à 8.

N° échantillon	Nom	Date	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	NO3	SO4	PO4	SiO2	COD	F
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
C01	Source B	26/04/16	8.5	3.3	2.8	2.9	11	6.8	18.7	10.5	0.1	8.1	0.6	< LQ
C02	Source A	26/04/16	9.1	2.2	4.6	3.6	11	11.4	17.6	5.8	< LQ	8	0.9	< LQ
E02	Point témoin	26/04/16	2.8	1	1.5	1.8	< LQ	1.9	5.2	6.5	< LQ	9	0.7	< LQ
C03	Forage	26/04/16	9.8	2.2	2.5	6.5	23	6.1	12.6	8.4	0.4	9.5	< LQ	< LQ

LQ : limite de quantification COD : Carbone organique dissous

Tableau 6 : Concentrations en éléments majeurs des eaux échantillonnées au cours de la phase 2

N° échantillon	Nom	Date	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Li
			µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
C01	Source B	26/04/16	4.11	0.44	6.04	94.2	0.41	0.01	< LQ	0.17	0.29	1.07	1.48	0.92
C02	Source A	26/04/16	9.96	2.38	5.86	92.8	0.25	0.05	< LQ	< LQ	1.09	1.75	8.84	0.76
E02	Point témoin	26/04/16	17.9	0.25	3.42	79.4	0.42	0.04	0.06	0.32	2.4	1.8	0.003	1.02
C03	Forage	26/04/16	1.82	2.54	5.18	64.2	0.04	0.05	< LQ	< LQ	21.6	< LQ	0.135	0.73

Tableau 7 : Concentrations en éléments traces des eaux échantillonnées au cours de la phase 2

N° échantillon	Nom	Date	Mn	Ni	Pb	Sn	Sr	Tl	U	Zn	Br	Cs	Rb
			µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
C01	Source B	26/04/16	3.47	3.02	< LQ	< LQ	27.9	< LQ	< LQ	3.14	< LQ	0.7	5.23
C02	Source A	26/04/16	24.6	3.38	< LQ	< LQ	34.5	0.26	0.09	5.8	< LQ	< LQ	6.04
E02	Point témoin	26/04/16	12.6	4.69	< LQ	< LQ	17.6	0.01	0.02	3.59	< LQ	< LQ	1.89
C03	Forage	26/04/16	0.64	2.15	2.07	0.05	26.5	0.06	0.16	115	< LQ	1.23	6.09

Tableau 8 : Concentrations en éléments traces des eaux échantillonnées au cours de la phase 2

Contrôle de la cohérence des analyses: la balance ionique

A partir du calcul de la balance ionique ou de l'électroneutralité $E_{\pm}(\%)$, il est possible d'évaluer la cohérence d'ensemble de l'analyse et ainsi de mettre en évidence toute incertitude sur les résultats d'analyse.

Le calcul permet de déterminer le pourcentage d'erreur sur la balance électrique ionique de la solution exprimée ci-dessous (Eq. 1). Une solution aqueuse doit être électriquement neutre, c'est-à-dire que la somme des charges des ions positifs doit être égale à la somme des charges d'ions négatifs pour toute composition chimique des eaux considérée comme naturelle.

$$E_{\pm}(\%) = \left| \frac{\sum z_i [C_i^{z_i+}] - \sum z_j [A_j^{z_j-}]}{\sum z_i [C_i^{z_i+}] + \sum z_j [A_j^{z_j-}]} \right| \times 100 \text{ (eq.1) (1)}$$

C : Cations ; A : Anions ; $E_{\pm}(\%)$: balance ionique ; z_i et z_j : charges

$E_{\pm}(\%) < 5 \%$: analyse correcte ; $5 \% < E_{\pm}(\%) < 10 \%$: problème analytique ou oubli d'une espèce ; $E_{\pm}(\%) > 10 \%$ problème analytique probable ou minéralisation particulière (présence importante de matière organique par exemple).

N° échantillon	Nom	Date	somme cations	somme anions	balance ionique
			meq/l	meq/l	%
C01	Source B	26/04/16	0.89	0.89	0
C02	Source A	26/04/16	0.93	0.91	-1
E02	Point témoin	26/04/16	0.33	0.27	-10
C03	Forage	26/04/16	0.94	0.93	-1

Tableau 9 : Balances ioniques des eaux échantillonnées au cours de la phase 2

On note une assez bonne cohérence de la balance ionique (autour de 1 % d'écart) dans les eaux captées aux sources A et B ainsi qu'au forage, ce qui confirme une bonne qualité des analyses pour les ions majeurs (tableau 9). La balance ionique est toutefois plus élevée dans les eaux du point témoin (10 % d'écart), ce qui reste commun dans des eaux faiblement minéralisées. Cet intervalle aurait probablement pu être amélioré avec une analyse du carbone inorganique dissous dans la mesure où à faible pH, une grande part de celui-ci doit se trouver sous la forme H_2CO_3 (ou $CO_{2,aq}$ dissous), non dosé.

4. Interprétation des données

4.1. FONCTIONNEMENT HYDROGEOCHIMIQUE

La première étape de l'étude consiste à replacer les eaux échantillonnées dans leur contexte locale et régionale afin d'identifier si ces eaux sont similaires ou bien si elles se distinguent de par leur faciès. Une potentielle distinction pouvant contribuer à identifier les mécanismes à l'origine de la contamination en mercure.

4.1.1. Diagramme de Piper

Les faciès hydrochimiques pour les échantillons des eaux de captages (C01, C02, C03) et le point témoin (E02) prélevés dans le cadre de cette étude (Phase 2) ainsi que lors de la phase 1 (Nguyen-Thé et al. 2014) ont été reportés dans le diagramme de Piper. Ces valeurs ont été calculées à partir des concentrations en éléments majeurs mesurées durant les 2 campagnes.

On note une bonne reproductibilité entre les deux campagnes avec une plus forte variabilité pour le point témoin E02 dont la faible minéralisation induit une plus forte incertitude sur les concentrations. Ceci a également été souligné lors du calcul de la balance ionique.

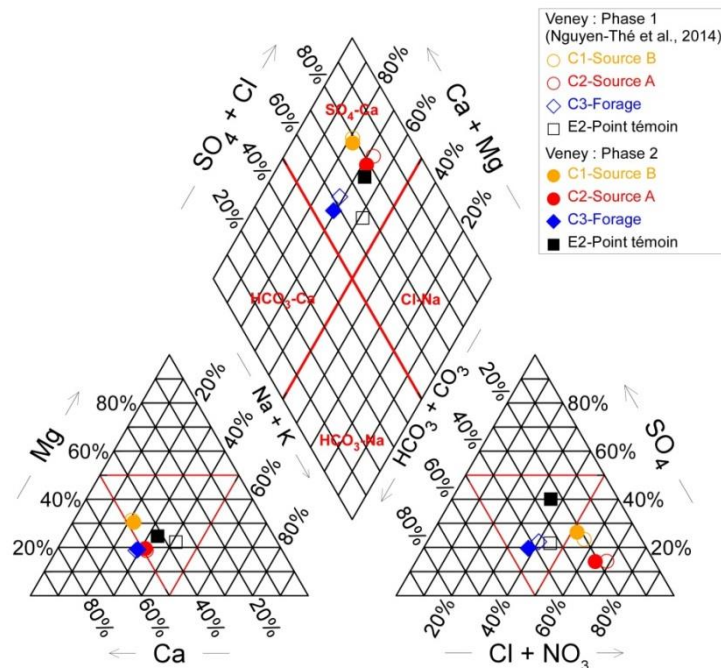


Illustration 17 : Diagramme de Piper des eaux échantillonnées dans le cadre de la présente étude.

Le diagramme de Piper (Illustration 17) montre que les eaux des captages présentent une variabilité entre les points d'eau. Si le calcium domine les proportions de cations dans chacune des eaux ($Ca > 42\%$), la variation de faciès chimique est principalement induite par la variation des anions.

Les sulfates (43 %) dominent les proportions en anions dans les eaux du point témoin (E02). Ce faciès s'explique par une faible minéralisation des eaux principalement acquise par les apports météoriques plutôt que par le sol et la roche. Ceci est cohérent avec la nature de l'aquifère percolé principalement composé de quartz (grès à Voltzia). Ces eaux présentent ainsi un enrichissement en silice. Les nitrates (34 %) et les chlorure (35 %) co-dominent les proportions d'anions dans la source A (C02), alors que les nitrates (31 %) et les sulfates (25 %) co-dominent les proportions d'anions dans les eaux de source B (C01). La codominance des nitrates et des chlorures dans l'eau de ces deux sources suggère une contamination anthropique par des apports de nitrates liés à l'activité biologique sous couvert forestier ou aux pratiques agricoles en limite du bassin versant. Par contraste, les ions bicarbonate (41 %) dominent les proportions d'anions au niveau du forage (C03). Ceci indique que le forage capte des eaux de composition différente avec une influence majoritairement carbonatée. Ceci est confirmé par le ratio $(Ca+Mg)/HCO_3$ qui indique un équilibre avec des minéraux carbonatés de type calcite-dolomite.

Malgré cette variabilité, les eaux présentent un faciès chimique homogène de type sulfaté-calcique ($Ca-SO_4$).

4.1.2. *Faciès hydrochimique des eaux régionales*

Considérant la proximité de la faille de Veney, qui met en contact les formations du Muschelkalk moyen avec les formations des couches intermédiaires, du conglomérat principal et des grès Vosgien (Illustration 17), des données complémentaires permettant d'étendre la caractérisation hydrogéochimique à une échelle régionale sont considérées. Une meilleure compréhension de l'origine possible des eaux captées localement à Veney et Vacqueville est attendue.

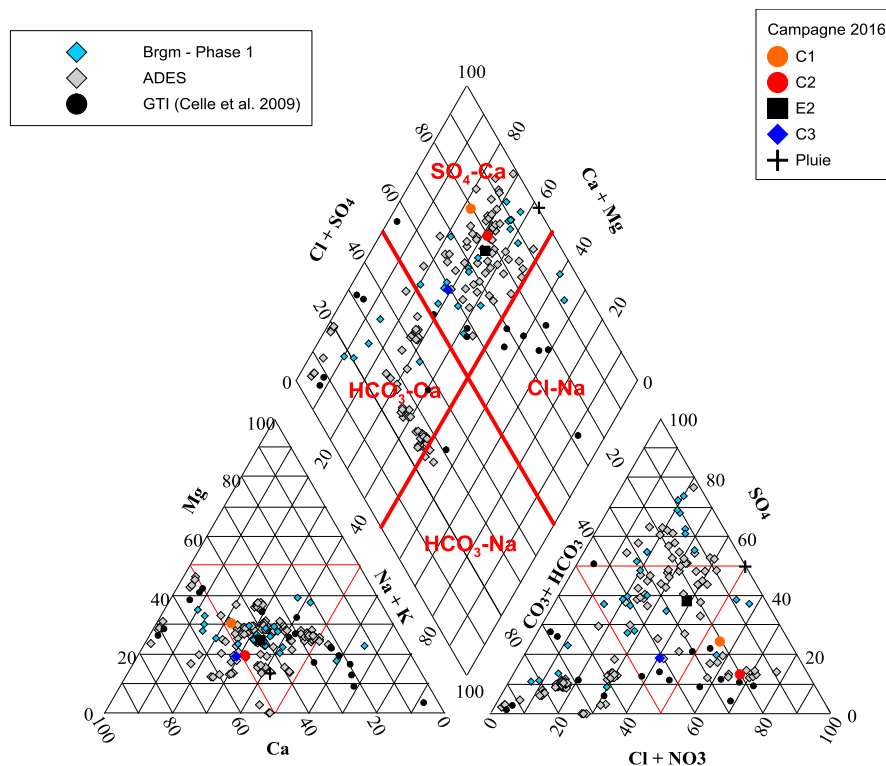


Illustration 18 : Diagramme de Piper des eaux à l'échelle régionale.

Sont reportées les données acquises dans le cadre de la présente étude et lors de la phase 1, les données bancarisées dans la base de données ADES, complétées par les données publiées par Celle-Jeanton (2009) pour l'aquifère des Grès- du Trias et une de pluie. A l'échelle régionale, un total de 15 sources ou forages sont référencés dans la base de données ADES, incluant les sources A et B (C02, C01), le forage (C03) et le point témoin (E02). Les compositions chimiques préalablement existantes de ces points d'eau sont utilisées en complément des échantillons de la phase 1 (Nguyen-Thé et al., 2014) et de la phase 2 composant ce projet.

Dans leur ensemble, ces points de captage permettent d'étudier la composition des eaux (Illustration 19) dans les différentes aquifères du secteur étudié et donc de définir les faciès des eaux résidant dans les grès Vosgiens, dans le conglomérat principal, les couches intermédiaires, les grès à Voltzia (composant ensemble la nappe des GTI) ainsi que les couches du Muschelkalk moyen.

On note que les installations de captage dans le conglomérat principal, principalement des forages, ne permettent pas de caractériser la composition de l'eau présente dans un niveau donné puisque l'eau pompée est généralement issue à la fois du conglomérat principal et des grès Vosgien sous-jacents. C'est notamment le cas du forage C03, point de captage de cette étude, qui capte le conglomérat principal et les grès vosgiens.

Dans les grès Vosgiens (et conglomérat principal), les eaux présentent un faciès chimique de type sulfatée-calcique (Ca-SO_4) pour les captages situés à 6-8 km en amont des points de captages de Veney et Vacqueville où les formations affleurent. A l'aval, on rencontre des eaux de type bicarbonaté-calcique.

Les faciès de ces eaux semblent évoluer le long de la ligne d'écoulement au sein des grès Vosgien avec l'augmentation de la salinité, via le doublement des concentrations en Mg, Ca, HCO_3 et en SO_4 , entre les points situés en amont et ceux situés en aval de Veney. Ceci supporte l'hypothèse d'une évolution chimique des eaux entre les zones de recharge et les eaux plus anciennes ayant interagit avec l'aquifère. Les eaux des GTI ont en profondeur un faciès de type chloruré sodique telle que décrit par Celle-Jeanton et al. (2009) en lien avec la présence d'évaporite (NaCl).

L'ouvrage de Gélacourt (02697X0035/F2), présente une eau de faciès différent de type bicarbonaté-calcique/bicarbonaté-sodique, ceci suggère une possible remontée d'eau profonde en lien avec la faille conférant un faciès atypique. Celle-Jeanton et al. (2009) supposent des venues d'eaux superficielles venant contaminer l'ouvrage.

Dans les **couches intermédiaires**, les eaux de captages présentent un faciès chimique majoritairement de type sulfatée-calcique (Ca-SO_4 ; incluant les sources A et B ainsi que le point témoin) principalement dans le bloc situé à l'ouest de la faille de Veney.

D'un point de vue quantitatif, de faibles variations sont observées dans les concentrations en éléments majeurs entre les points de la phase 1, les sources A et B ainsi que le point témoin. Les concentrations en HCO_3 et SO_4 sont relativement constantes dans tous les points présentés (Illustration 19). Les concentrations en Na, K, Mg et Ca sont généralement deux fois supérieures dans les eaux des sources A et B. Toutefois, les eaux des couches intermédiaires sont faiblement minéralisées en comparaison des eaux au sein des autres couches sédimentaires. Les concentrations en nitrates augmentent sensiblement avec l'augmentation des concentrations en chlorure. L'eau des sources A et B présentent les valeurs maximales en nitrates atteignant 18 et 25 mg/L, respectivement.

Dans les **grès à Voltzia**, les eaux de captages présentent un faciès chimique non-homogène, variant d'un type sulfatée-calcique (Ca-SO_4), vers un type bicarbonaté-calcique (Ca-HCO_3).

Les eaux des grès à Voltzia sont issues de sources émergeant à la surface à la jonction entre les couches de grès à Voltzia et les couches intermédiaires, favorisées par un système de nappes perchées. Les grès à Voltzia étant sous forme de reliefs apparents dans la région (Illustration 17), le sens d'écoulement des eaux au sein de cet aquifère est différent du sens d'écoulement présenté pour la nappe des GTI. D'un point de vue quantitatif, les concentrations en éléments majeurs des eaux des grès à Voltzia sont sensiblement similaires à celles des eaux faiblement minéralisées des couches intermédiaires. Cela suggère une possible recharge des couches intermédiaires via les grès à Voltzia sus-jacents.

Localement, les points de captage avec des eaux de type bicarbonaté-calcique (E04, E06, E25 et E26) présentent un enrichissement prononcé en HCO_3 (jusqu'à 47 mg/L) supérieur aux eaux de sources A et B et du forage C03. Cette enrichissement en HCO_3 est accompagné d'un enrichissement relatif en Ca et Mg atteignant des concentrations équivalentes à celles analysées dans les eaux de sources A et B et du forage C03.

Dans le **Muchelkalk moyen**, les eaux de captages présentent un faciès chimique de type bicarbonaté-calcique (Ca-HCO_3). L'unique point de captage (02697X0016/HY) se situe au nord de la faille de direction sud-ouest – nord-est (Illustration 17). Il s'agit d'une source drainant le calcaire du Muschelkalk inférieur. Bien que les données disponibles ne permettent pas d'évaluer l'évolution chimique des eaux spatialement, la composition minérale très différente de cet aquifère sédimentaire, incluant des bancs calcaires (CaCO_3), des bancs dolomitiques ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et la présence de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et anhydrite (CaSO_4) est cohérent avec les fortes concentrations en Ca, Mg, HCO_3 et SO_4 mesurées dans l'eau. Les fortes concentrations en NO_3 , les plus fortes mesurées (~35 mg/l) parmi l'ensemble des points présentés, suggèrent une contamination agricole de l'aquifère au point d'échantillonnage.

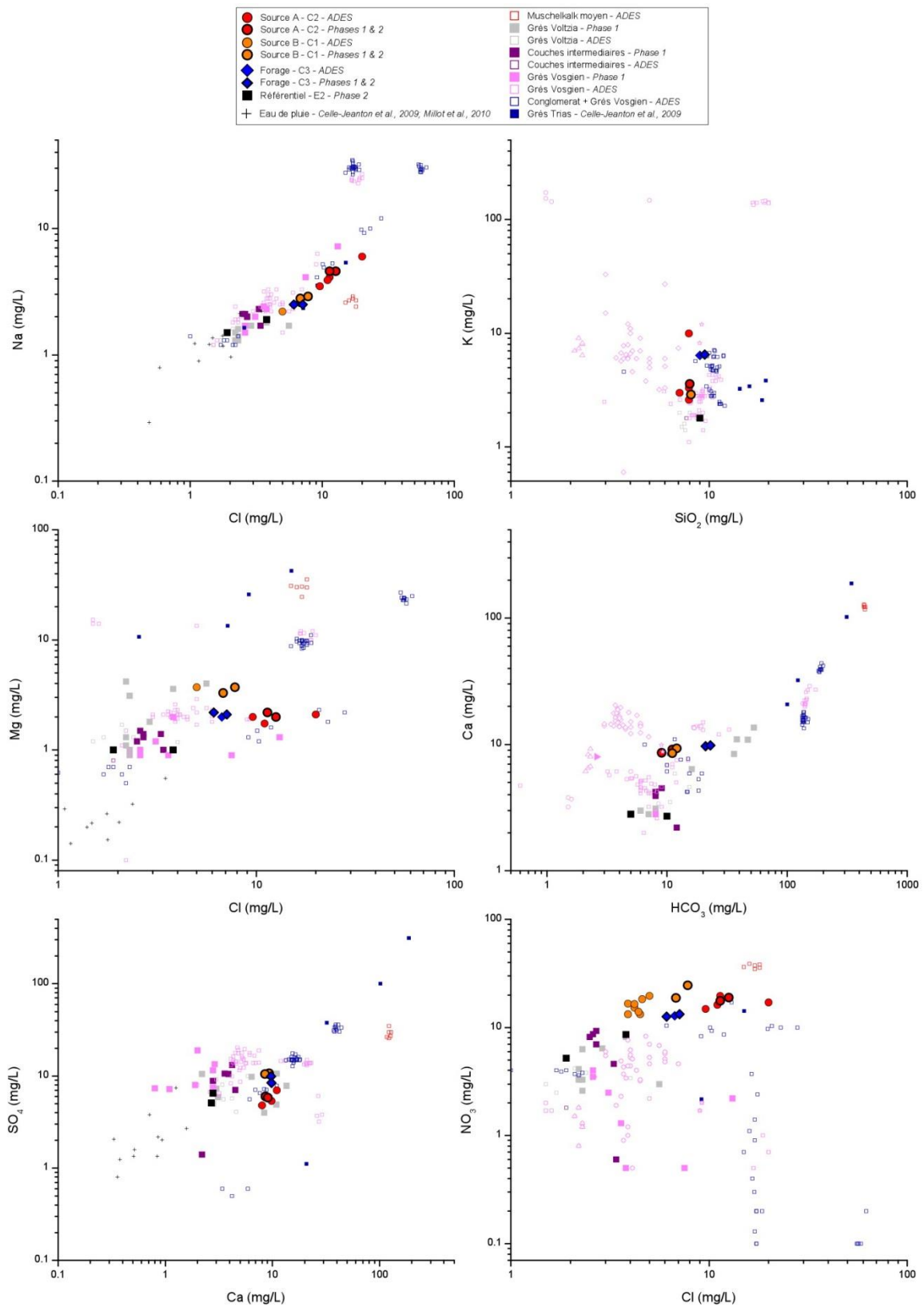


Illustration 19 : Concentrations en éléments majeurs (mg/l) dans les eaux souterraines.

Enfin, deux sources au sud de la zone d'étude drainant a priori les grès rouges du Buntsandstein (Phase 1 (E17-E20 : 02705X0042/HY-02705X0040/HY) présentent un faciès de type chloruré-sodique qui mériterait plus d'investigation pour définir la nature des formations géologiques drainées. Les concentrations en sodium et chlorures étant aligné sur la droite 1 :1 de dissolution de la halite (NaCl) (Illustration 19). Ce faciès est plutôt typique des roches de socle.

4.1.3. *Faciès hydrochimique des eaux de Veney et Vacqueville (phase 2)*

La variation naturelle des compositions en éléments majeurs montre que le faciès des eaux captées dans les sources A et B, du forage C03 et au point témoin est commun dans la région de Veney.

La source témoin E02 semble se rapprocher des faciès des grès à Voltzia tandis que les sources C01 et C02 sont semblables aux eaux des couches intermédiaires. Les eaux du forage C03 plus carbonatées n'atteignent pas pour autant les niveaux de concentrations observées dans les forages profonds du secteur notamment ceux drainant le conglomérat et les grès vosgiens profonds. Ceci marquerait donc un mélange d'eau possible entre les eaux carbonatées de la nappe des GTI et les eaux moins minéralisées des couches intermédiaires.

L'approche semi-qualitative, consistant à l'identification de concentrations extrêmes de certains éléments majeurs, a mis en évidence le caractère atypique de l'eau des sources captées en termes de concentrations en Na (source A), Ca (source A et B), Cl (source A et B) et NO₃ (source A et B) au sein des couches intermédiaires. Si les fortes concentrations en NO₃ sont attribuées à une origine anthropique certainement dans la zone de recharge alimentant la source, les concentrations en Na, Ca et Cl sont certainement liées à une minéralisation, bien que faible, des eaux le long de l'écoulement dans la nappe avant leur émergence.

L'eau des sources A et B se différencie des autres points principalement par les concentrations en NO₃ et Cl. Par contraste, l'eau du forage C03 selon les concentrations en HCO₃ et Ca et Mg. Ces éléments sont contrôlés par un équilibre avec des minéraux carbonatés de type calcite ou dolomie.

Le manque de données sur les eaux drainant le Muschelkalk moyen à proximité de la faille de Veney ne permet pas d'évaluer sa contribution au niveau du forage C03.

Les analyses en éléments traces montre la présence d'arsenic dans les eaux (~2,5 µg/l) dans les eaux de la source C02 et du forage C03. Ces concentrations sont en accord avec les concentrations en arsenic quantifiées dans les eaux du Trias qui peuvent atteindre des concentrations de l'ordre de 20 µg/l (Celle-Jeanton et al. 2010) voire plus dans certains contextes. C'est également le cas des concentrations en baryum (64 à 94 µg/l) et uranium (0,02 à 0,16 µg/l) qui sont dans la gamme des valeurs mesurées par Celle-Jeanton et al. (2009). Pour le cuivre, le zinc et le plomb c'est également le cas, à l'exception du forage C03 qui présente des concentrations exceptionnellement fortes. Ces valeurs seront à confirmer par de nouvelles données.

4.1.4. Isotopes de la molécule de l'eau

Les isotopes stables de l'eau comprennent ceux de l'oxygène (O) et de l'hydrogène (H) qui composent la molécule d'eau (H₂O). L'isotope oxygène-16 (¹⁶O) est le plus abondant (99,762 %), suivi du ¹⁸O (0,200%) puis de l'¹⁷O (0,038 %). L'hydrogène consiste en deux isotopes stables, ¹H et ²H. Le rapport isotopique traduit le rapport entre la quantité d'isotope « lourd » par rapport à l'isotope « léger » d'un même élément, ce rapport étant normé par rapport à un standard de référence et est exprimé en unité delta de déviation par rapport à ce standard.

Les isotopes stables de la molécule d'eau (δ¹⁸O, δ²H) ont des propriétés conservatrices qui dépendent uniquement des conditions atmosphériques lors de la recharge. Ainsi, ces isotopes permettent de fournir des informations sur les processus de recharge des eaux souterraines notamment l'origine des eaux et les temps de résidence. Par exemple, des eaux anciennes ont des signatures différentes des eaux modernes en fonction des climats au moment de la recharge. Sur l'illustration 20, les eaux les plus appauvries témoignent des eaux profondes du Trias (Celle-Jeanton et al. 2009) qui sont des eaux anciennes ayant une signature isotopique caractéristique. Les eaux les moins appauvries, proches de la signature de l'eau de pluie de la station de Karlsruhe, témoignent d'eaux de recharge moderne.

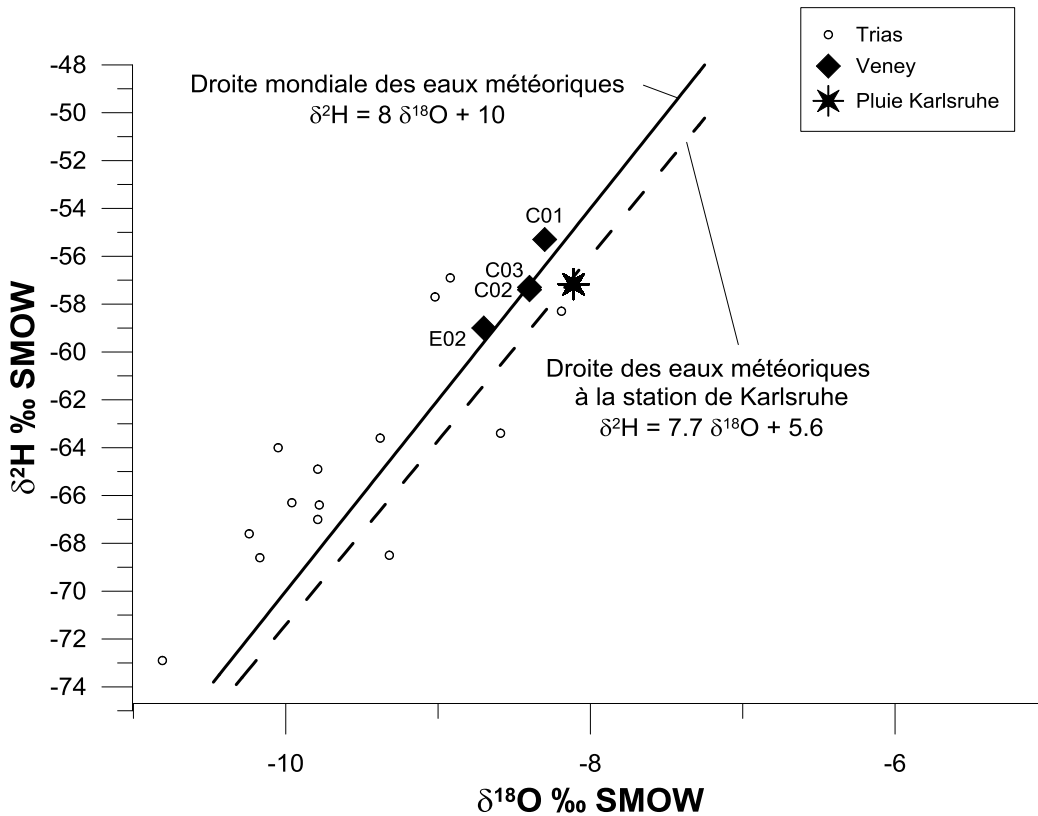


Illustration 20 : Droite des eaux météoriques et eaux de Veney pour les isotopes stables de l'eau (données du Trias et de la pluie d'après Celle-Jeanton et al. 2009).

Globalement les 4 points de la zone d'étude s'alignent avec la droite des précipitations annuelles au niveau mondial. On constate que les eaux de la source A (C02) et du forage (C03) ont une origine commune, probablement l'eau de la faille. L'eau du point témoin (E02), présente une eau plus appauvrie (-0.3 ‰ $\delta^{18}\text{O}$) par rapport au point C02 et C03. Le fait que la nappe soit perchée induit une zone de recharge à une altitude plus élevée. Ceci influence la signature des isotopes avec une signature plus appauvrie, cette variation est en accord avec une différence d'altitude de l'ordre de 50 à 100 m selon les gradients (Olive, 1996). Une période de recharge plus froide, probablement une recharge en période hivernale au niveau de la nappe perchée, entraînerait également une signature plus appauvrie.

4.1.5. Datation de l'eau

Les outils géochimiques, gaz dissous dans l'eau, ont été utilisés dans l'objectifs de donner une estimation des gammes d'âges des eaux (temps moyens de résidence des eaux au sein de l'aquifère). Pour cela les concentrations en CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF₆ dans les eaux souterraines des 4 points d'eau ont été mesurées (en pmol/l et fmol/l pour le SF₆).

A partir de la température et de l'altitude moyenne de recharge et de modèles simples de circulation des eaux, les concentrations en gaz dans l'atmosphère ont pu être calculées (en partie par trillion volumique pptv). Ces valeurs sont ensuite comparées aux chroniques des gaz mesurées à MaceHead (Ireland) afin d'en déduire la période de recharge de l'aquifère. Les concentrations sont données dans le tableau 10.

	CFC11	CFC12	CFC113	SF6	CFC 11	CFC 12	CFC 113	SF6	Estimation des âges apparents selon le modèle			
	pmol/l	pmol/l	pmol/l	pmol/l	pptv	pptv	pptv	pptv	Piston	Expon.	% mélange	% mélange d'eau anté 1950
C01	6,5	2,8	0,47	2,1	323	536	76	6	2004	10 ans		
C02	8,6	2,7	0,38	1	427	517	61	3			60-70	30-40
E02	5,3	2,6	0,45	2,2	263	498	72	6			90	10
C03	4	1,6	0,25	1	199	306	40	3			50-56	44-50

Tableau 10 : Concentrations en CFC et SF₆ dans l'eau et l'air (pptv) et estimation des âges apparents selon différents modèles de circulation (exponentiel, piston et mélange binaire)

Les modes de circulation probables, discutés dans cette étude, ont servis de base dans le choix des modèles d'estimation des âges. Ainsi, pour la source C01 on obtient des eaux d'une dizaine d'année de temps de résidence (modèle exponentiel) ou une recharge vers 2004 (modèle piston), pour la source C02 et le forage C03 des eaux issues d'un mélange de proportion respectivement 60-70 % et 50-56 % d'eau d'une dizaine d'année (et donc 30-40 % et 44-50 % d'eau antérieure à 1950) et enfin pour E02 une eau composée à 90 % d'eau actuelle (de 1 à quelques années).

4.1.6. Isotopes du strontium et du bore

Le bore et le lithium sont deux éléments qui permettent de tracer les eaux anciennes profondes et les venues hydrothermales. Dans le cas des eaux de Veney, les concentrations sont similaires aux concentrations mesurées dans les eaux de pluie par Millot et al. (2010) (Illustration 21). Ces valeurs permettent d'exclure une possible origine profonde des eaux captées à Veney telle que la présence de la faille aurait pu le suggérer.

La signature isotopique des eaux en strontium est en accord avec les eaux d'altération de roches silicatées (granites, ...) dont les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont généralement compris entre 0,712 et 0,718 (tableau 11). Les eaux des points C02 et C03 ont des rapports isotopiques du strontium plus bas ce qui confirme l'influence des carbonates sur ces deux points, le forage C03 étant le plus impacté par les eaux plus minéralisées de la nappe des GTI ce qui est cohérent avec les plus fortes concentrations en carbonates mesurées sur cet ouvrage.

La signature isotopique des eaux en bore ($\delta^{11}\text{B}$, ‰) montre une forte variabilité qui est en accord avec la variabilité observée dans les pluies par Millot et al. (2010). L'appauvrissement des eaux du forage en ^{11}B (13,9 ‰) peut s'expliquer par une interaction plus marquée des eaux avec des argiles (tableau 11). Ces argiles sont susceptibles d'être présentes dans les formations du Muschelkalk, à l'inverse des grès drainés dans le bloc à l'ouest de la faille.

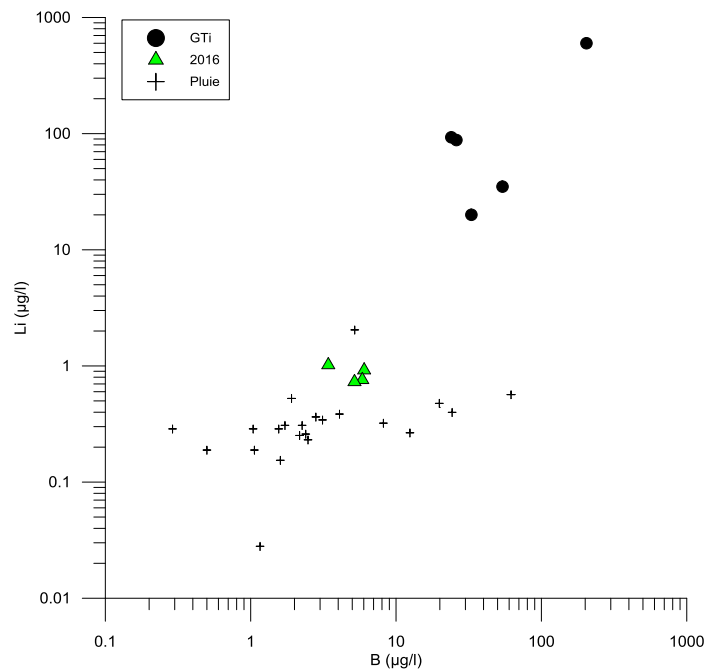


Illustration 21 : Concentrations en bore et en lithium dans les eaux de Veney (2016), l'eau de pluie (Millot et al. 2010) et la nappe des grès du Trias (GTI - Celle-Jeanton et al. 2009).

	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{11}\text{B}$ en ‰
C01	0,716578	21,76
C02	0,714883	23,45
E02	0,716411	29,20
C03	0,714196	13,94

Tableau 11 : Isotopes du strontium et du bore

En accord avec les concentrations relativement faibles en bore, les signatures isotopiques semblent indiquer que les eaux captées sont des eaux d'origine météorique ayant percolées au sein des aquifères sans être affectées par des fluides hydrothermaux.

4.1.7. Conclusion sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur étudié

Le point témoin amont (E02) draine la nappe perchée s'écoulant au sein des grès à Voltzia. Ceci se traduit par une faible minéralisation et un faciès des eaux différent des 3 autres captages. Les eaux sont principalement enrichies en silice du fait des interactions avec les grès (composé principalement de quartz – SiO₂) et l'absence de carbonates se traduit par le pH acide (4,7). La présence de pyrite dans ces faciès explique les valeurs de potentiel d'oxydoréduction plus faible mesurées lors de la phase 1 (-194 mV) et de fait la présence de plus fortes concentrations en fer (5 µg/l) qui reste néanmoins très faible compte-tenu du caractère oxydant des eaux durant la phase 2 (332 mV).

Les sources C01 et C02 malgré leur proximité présentent des différences, avec des eaux de la source C02 qui sont plus proches des eaux du forage C03. Les eaux du forage C03 en partie influencées par la faille permet de conclure sur une influence plus marquée de la faille sur les eaux de la source C02 comparées à la source C01. Par contre la faille ne semble pas drainer d'eaux anciennes/thermales profondes. Les eaux drainées par la faille seraient plutôt des eaux issues des grès du Trias avec le forage C03 qui présente une signature plus minéralisée qui tend vers les eaux de la nappe du Trias (Celle-Jeanton et al., 2009).

Les sources C01 et C02 sont toutes deux sujettes à des apports d'anthropiques en nitrates avec respectivement (18,7 et 17,6 mg/l), liés probablement aux pratiques agricoles en amont du bassin versant. Les concentrations en nitrates des eaux de la source E02 sont assimilables aux apports par les précipitations météoriques qui peuvent atteindre 4,4 mg/l (Celle-Jeanton et al., 2009). Au niveau du forage C03 un mélange entre une eau contaminée en nitrates et une eau appauvrie en nitrates permet d'expliquer cette concentration intermédiaire (12,6 mg/l). Selon la valeur de référence retenue pour les nitrates, le pourcentage de mélange au forage C03 serait compris entre 70% (NO₃ : 0 mg/l) et 55% (NO₃ : 5 mg/l). Ce qui est en accord avec les conclusions de l'étude réalisée par Antea (2012) qui propose une contribution de la faille à 60 %.

La chimie des eaux permet d'exclure une possible origine profonde des eaux captées à Veney telle que la présence de la faille aurait pu le suggérer. La présence de la faille serait alors à considérer comme ayant un rôle sur la mise en contact de ces eaux avec les formations géologiques à la base des grès et de potentielles minéralisations associées à la faille.

Les eaux des 3 captages semblent donc intermédiaires entre un pôle composé par les eaux de pluie et les eaux de type Ca-SO₄ émergeant dans la zone sud-est de l'étude (nord-est de Raon-l'Étape) et un pôle minéralisé de la nappe du Trias de type HCO₃-Ca. Ce faciès étant représentatif de la nappe des GTI à proximité des zones de recharge, la nappe des GTI évoluant d'un faciès Ca-HCO₃ à l'amont vers un faciès Na-Cl vers les zones les plus profondes et anciennes (Celle-Jeanton et al., 2009).

En accord avec les isotopes de la molécule d'eau, pour les 4 points d'eau, il semble s'agir majoritairement d'eaux modernes potentiellement vulnérables aux pressions agricoles. D'après la datation des eaux, les eaux de la source témoin sont bien des eaux actuelles (une à quelques années) drainant le massif des grès à Voltzia. Les eaux de la source C01 ont une dizaine d'années, elles correspondent vraisemblablement au drainage de la nappe des grès du bloc à l'ouest de la faille. La source C02 correspond à un mélange entre les eaux du bloc à l'ouest de la faille (60-70 %) et des eaux issues de la faille (30 à 40 %). Le forage C03 correspond quant à lui à un mélange de 50-50 entre les eaux de la faille (ou du bloc ouest) et des eaux issues du bloc à l'est de la faille (Nappe des GTI).

4.2. CONCENTRATIONS EN MERCURE

4.2.1. *Rappels sur le mercure*

L'utilisation du mercure en Amérique du Nord et en Europe a atteint un maximum à la fin des années 1970, et n'a cessé de décliner depuis. Progressivement, son utilisation a été interdite dans de nombreux produits (thermomètres, piles, peintures...) et procédés de fabrication (industrie du papier...). Chaque secteur environnemental affecté par le mercure fait l'objet de programmes d'études comportementales. De même, chaque procédé industriel utilisant encore le mercure fait l'objet d'un programme de reconversion dans des technologies sans mercure.

Le mercure est naturellement présent dans l'environnement: l'eau, l'air et les sols. Le cycle global du mercure est compliqué en raison de la volatilité du mercure élémentaire (Hg⁰). Cette propriété permet au mercure de se déplacer dans l'atmosphère, dans une séquence d'émission aux nombreuses étapes, incluant son transport, son dépôt et sa réémission. Il est émis, dans l'environnement, à partir de sources naturelles issues du dégazage de la croûte terrestre et de sources anthropiques. Les sources anthropiques peuvent être diffuses (amalgame, thermomètre...) ou ponctuelles (incinérateur, industrie du chlore, métallurgie des métaux non ferreux...). On le rencontre naturellement dans les eaux à des concentrations allant de 0,01 à 12 ng/l ; dans les sols entre 0,03 et 0,15 mg/kg et de 1 à 4 ng/m³ dans l'air. Dans les sols qui ont été pollués par des industries travaillant avec le mercure, les teneurs peuvent varier de 40 à 500 mg/kg dans le composite des premiers 20 cm.

Le mercure est un métal liquide et volatil à température ambiante. Il est extrait du minerai de cinabre (sulfure de mercure). Il est présent dans l'environnement sous les formes inorganiques aux degrés d'oxydation 0, I ou II, et sous les formes organiques aux degrés d'oxydation I ou II. Il s'associe avec de nombreux éléments pour donner des formes mercurielles qui regroupent les composés mercureux et mercuriques, les composés organiques, les amalgames et le mercure particulaire.

Le mercure présent dans les sols est issu de l'héritage du fond géochimique d'une part, et du cumul des apports anthropiques d'autre part. Le mercure déversé au sol est rapidement immobilisé. Il est fixé par les oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse et surtout par la matière organique. Il se lie avec la matière organique sous forme de complexes organiques très stables. Il se concentre principalement dans la partie superficielle des sols et se retrouve dans la fraction solide fine du sol.

Les différentes formes chimiques du mercure dans les eaux dépendent, principalement, du pH, de la présence ou de l'absence de matières organiques, du potentiel d'oxydo-réduction du milieu et de la concentration en matière en suspension. La présence de la matière organique favorise la production de dérivés mercuriels méthylés, tandis que la matière en suspension joue un rôle important dans le transport du mercure dans les eaux.

Les sédiments constituent un des réservoirs le plus important de mercure dans l'environnement. Les transferts du mercure entre les sédiments et le milieu aquatique peuvent favoriser l'accumulation du mercure dans les sédiments. Les conditions d'enfouissement des particules et les conditions d'oxydo-réduction, déterminent la formation des différentes formes chimiques du mercure.

Le mercure et ses dérivés possèdent un fort potentiel de bioaccumulation et de bio-amplification dans le milieu aquatique. Il s'accumule (bioaccumulation) dans les poissons, les invertébrés, les mammifères marins et les plantes aquatiques, sa concentration augmente en même temps que le niveau trophique (bioamplification). Le méthyl-mercure est le principal composé mis en cause dans ces phénomènes.

4.2.2. Concentrations en mercure dans les eaux échantillonnées

Les eaux échantillonnées lors de la phase 2 présentent des concentrations en mercure variables. Les eaux de la source A présentent la plus forte concentration de 8,84 µg/L, soit près de six fois la concentration analysée dans les eaux captées à la source B (Hg : 1,48 µg/L) et 65 fois la concentration dans les eaux pompées dans le forage (Hg : 0,135 µg/L). Rapportées aux chroniques de concentrations en Hg suivies sur ces mêmes points (Illustration 22), les valeurs déterminées au cours de cette phase 2 sont cohérentes et indiquent une stabilité des fortes concentrations. Le point de référence E02 présente une concentration en mercure de 0,003 µg/L.

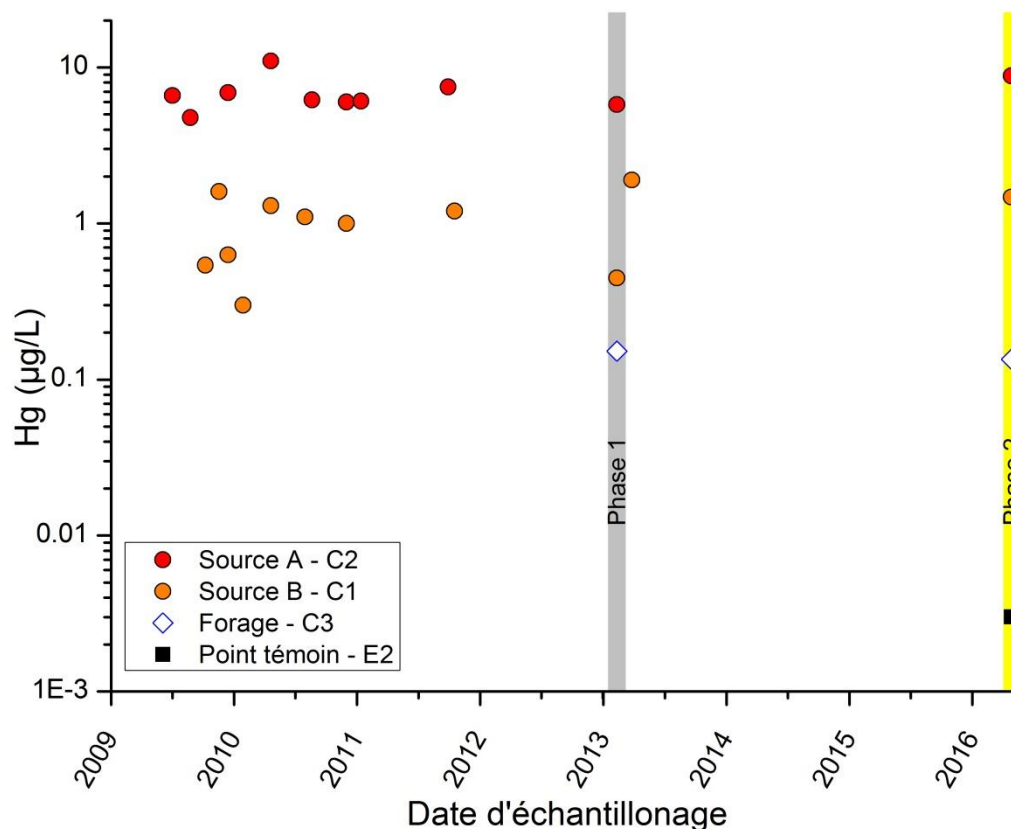


Illustration 22 : Chronique des concentrations en mercure dans les eaux (données ADES) et concentrations acquises durant la présente étude (Phase 2) et la phase 1 (Nguyen-Thé et al., 2014).

En comparaison la concentration en mercure mesurée dans la source E02 (3 ng/l) appartient à la gamme des concentrations naturelle connue dans les eaux (voir chapitre 4.2.1).

4.2.3. Masse annuelle de mercure présent dans les eaux de captage

L'estimation du bilan de masse du mercure dans les eaux de captage permet de déterminer l'ampleur de la source impliquée dans l'anomalie locale en mercure mesurée dans les eaux captées. Cette estimation est calculée à partir des concentrations en Hg mesurées dans les eaux ainsi que du débit moyen des deux sources captées (données ADES – référentiel captage AEP) et du débit de pompage recommandé pour les eaux captées au forage (ANTEA, 2012).

Point d'échantillonnage	Débit (m3/h)	Concentration en Hg			Masse de mercure		
		min (µg/L)	médiane (µg/L)	max (µg/L)	min (g/an)	médiane (g/an)	max (g/an)
Source A C02	3,33 ^a	4,78	6,4	11	139,6	186,9	321,2
Source B C01	0,29 ^a	0,3	1,1	1,9	0,8	2,8	4,9
Forage C03	7,00 ^b	0,085	0,18	0,28	5,2	11	17,2

^a base de données ADES

^b ANTEA (2012)

Tableau 12 : Estimation de la masse annuelle de mercure émergeant dans les eaux de captages en fonction du débit moyen et des concentrations en Hg.

D'après les valeurs rapportées dans le tableau 12, les masses de Hg qui émergent à la surface sont les plus élevées à la source A (140 à 321 g par an), puis au niveau du forage (5 à 17 g par an) et à la source B (1 à 5 g par an). En rapportant ces masses annuelles à la période de suivi des eaux depuis 2009, plus de 1 à 10 kg de Hg aurait été relâchés par la source A. De manière similaire, 55 à 85 g de mercure ont été pompés à la surface depuis la mise en service du forage en 2012. Ces fortes quantités excluent donc une potentielle pollution anthropique de la zone d'étude. Cela suggère plutôt une origine naturelle issue d'interactions eaux-roches impliquant des minéraux riches en mercure en contact avec l'eau alimentant les points de captage.

4.2.4. **Corrélations entre le mercure et les autres espèces dissoutes**

D'après les données, les concentrations en Hg se corrèlent positivement avec le chlorure, le sodium et le bore (Illustration 23). Les concentrations les plus élevées en chlorure et sodium ont été détectées dans les échantillons de la source A (C02) qui présente également les plus fortes concentrations en mercure. Les concentrations les plus élevées en nitrates, élément issu de l'activité anthropique agricole, sont détectées dans les échantillons de la source B (C01). Ces variations suggèrent l'émergence d'eaux aux origines multiples induit par des mélanges d'eaux, soit avec des origines différentes entre ces deux sources, soit avec des origines identiques mais avec des proportions de mélange différentes. Dans ce contexte la présence de nitrates pourrait induire l'oxydation des sulfures à travers la réduction des nitrates, phénomène naturel de dénitrification qui peut intervenir dans des aquifères en présence de sulfures.

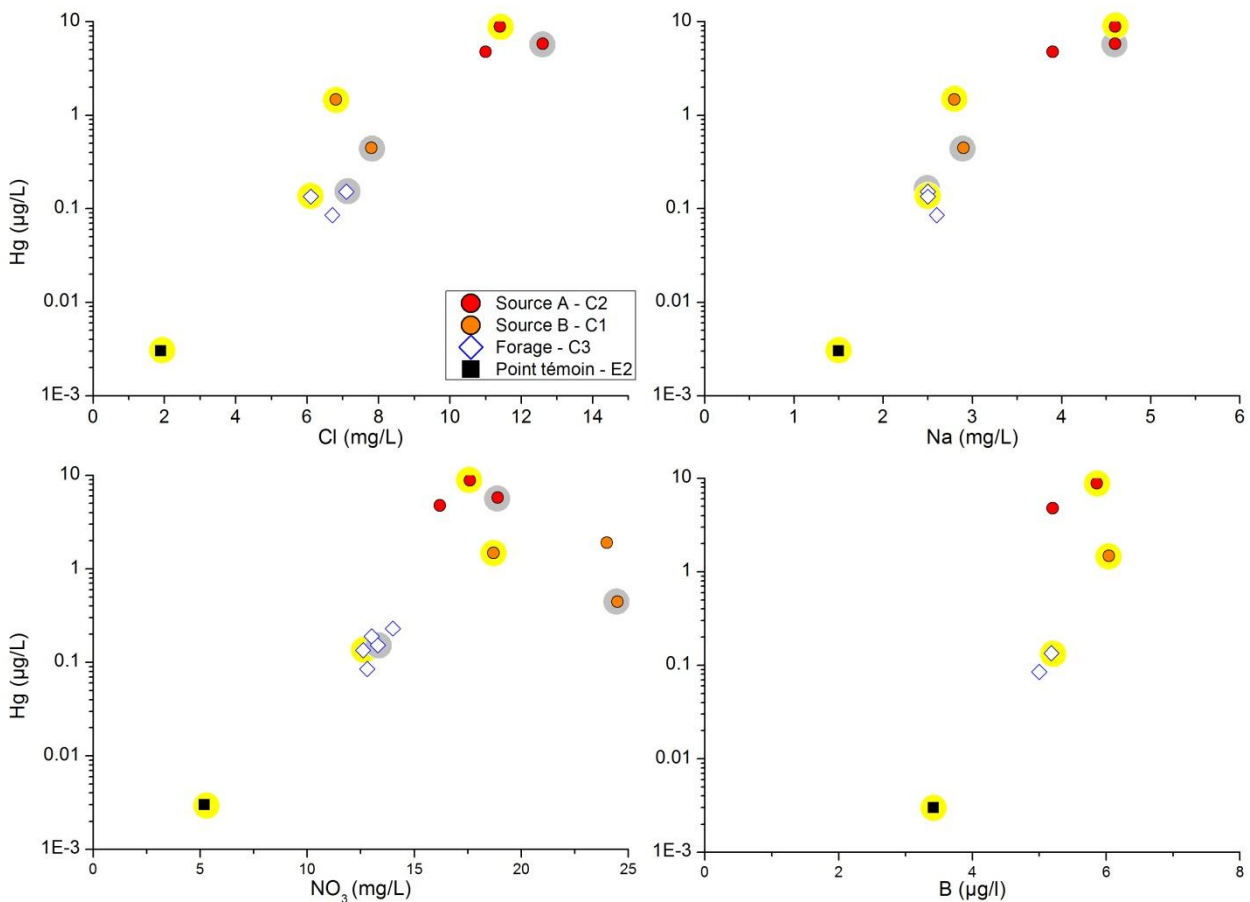


Illustration 23 : Concentration en Hg en fonction des concentrations en chlorure, sodium, nitrates et bore dans les eaux.

Les données incluent la phase 2 (en jaune), la phase 1 (en gris) et les données bancarisées dans ADES.

4.3. APPROCHE THERMODYNAMIQUE

Une approche thermodynamique a été menée afin de calculer la spéciation des eaux et l'équilibre des eaux échantillonnées vis-à-vis de phases minérales majeures ou identifiées au sein de l'aquifère du Trias. L'équilibre est défini en fonction de l'état de saturation qui a été calculé à partir des concentrations mesurées dans les eaux en fonction du pH, du potentiel d'oxydoréduction (pE) et de la température des eaux (tableau 13). Le pE a été calculé à l'aide de la formule de Nernst à partir des valeurs de potentiel d'oxydo-réduction mesurées sur le terrain.

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	pH	pE	Température
C01	Phase 1	5.9	3.80	11.8
C01	Phase 2	7.3	2.33	7.9
C02	Phase 1	5.4	5.76	10.4
C02	Phase 2	7.1	3.67	10.1
C03	Phase 1	8	4.02	10.1
C03	Phase 2	5.7	5.61	10
E02	Phase 2	4.7	5.92	9.6

Tableau 13 : Valeurs de pH, pE et température utilisées dans la modélisation

L'indice de saturation (I.S.) d'une eau vis-à-vis d'un minéral donné correspond au logarithme du produit des activités ioniques et de la constante d'équilibre de la réaction d'intérêt à une pression et température définie.

Tous les calculs des activités ioniques et des I.S. ont été mis en œuvre grâce au logiciel PhreeqC-2 (Parkhurst et Appelo, 1999) associé à la base de données LLNL (Wolery, 1979), complété par la base de données Thermodem (Blanc et al., 2012) pour certains oxydes de fer et pour le mercure par les travaux de Blanc (2014). Les diagrammes proposés ont été réalisés au moyen de PhreePlot (Kinniburgh & Cooper, 2011). Les différentes espèces inorganiques dissoutes carbonatées, de soufre et d'azote ont été calculées selon les constantes d'équilibre associées à la base de données, après exclusion de l'espèce N₂ et équilibration des balances ioniques à partir des espèces dissoute carbonatées.

4.3.1. Calculs des indices de saturation

L'état de saturation des eaux étudiées vis-à-vis des minéraux silicatés identifiés au sein de l'aquifère des GTI (Tableau 14) indique un équilibre général vis-à-vis de la calcédoine et/ou du quartz (I.S. proche de 0). Ceci traduit une bonne réactivité des eaux en équilibre avec l'aquifère gréseux. En ce qui concerne les feldspaths, les eaux captées au sein des sources A et B semblent proche de l'équilibre avec la forme sodique des feldspaths (albite) et légèrement sur-saturée avec la forme potassique (sanidine). Alors que l'eau pompée dans le forage semble à l'équilibre avec des feldspaths potassiques (K-Feldspath). La source de référence est, quant à elle, uniquement équilibrée avec le quartz et la calcédoine ce qui confirme que la nappe perchée draine principalement la silice composant les grès.

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	Quartz	Muscovite	Albite	Anorthite	Feldspath K	Sanidine	Calcédoine
C01 – Source B	Phase 2	0.5	7.1	-0.8	-5.5	2.3	1.0	0.2
C02 – Source A	Phase 2	0.5	7.9	-0.6	-5.0	2.4	1.1	0.2
C03 – Forage	Phase 2	0.6	2.7	-3.5	-11	0.0	-1.3	0.3
E02 – Référentiel	Phase 2	0.5	-3.2	-6.2	-16	-3.0	-4.3	0.3

Tableau 14 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis des minéraux silicatés composant l'aquifère des GTI.

Vis-à-vis des minéraux carbonatés et sulfatés, identifiés dans le tableau 15, les eaux sont sous-saturées (I.S. < -1). Une exception demeure vis-à-vis de la phase minérale de la barite (BaSO_4), pour laquelle toutes les eaux étudiées semblent à l'équilibre. Ceci indique que les concentrations en baryum dans ces eaux sont contrôlées par la barite.

Ce déficit dans les eaux montre que si les eaux sont en contact avec des carbonates, les quantités mises en jeu ne sont pas suffisantes pour atteindre l'état d'équilibre. Dans l'hypothèse d'un mélange, un des pôles pourrait être équilibré avec les carbonates (calcite, dolomite) tel qu'observé dans les GTI par Celle-Jeanton et al. (2009). Toutefois le mélange modifie cet état d'équilibre car il survient en l'absence de calcite. Ceci serait le cas pour le forage C03. Celle-Jeanton et al. (2009) ne montre pas d'équilibre des eaux avec le gypse malgré la présence de ce minéral dans l'aquifère. Ceci s'explique car les quantités mises en jeu ne sont pas suffisantes pour atteindre l'équilibre, néanmoins la dissolution du gypse contribue à minéraliser les eaux en Ca et SO_4 .

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	Calcite	Dolomite	Gypse	Anhydrite	Halite	Barite	Strontianite
C01 – Source B	Phase 1	-2.9	-4.9	-3.3	-3.6	-9.1	--	--
C01 – Source B	Phase 2	-1.6	-2.3	-3.3	-3.7	-9.2	0.0	--
C02 – Source A	Phase 1	-3.6	-6.5	-3.5	-3.9	-8.7	--	--
C02 – Source A	Phase 2	-1.5	-2.4	-3.6	-3.9	-8.8	-0.4	-2.0
C03 – Forage	Phase 1	-1.1	-1.6	-3.2	-3.6	-9.3	--	--
C03 – Forage	Phase 2	-3.2	-8.6	-3.3	-3.7	-9.3	-0.3	-4.9
E02 – Référentiel	Phase 2	-4.7	-5.6	-4.0	-4.3	-10.0	-0.3	-3.7

Tableau 15 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis des minéraux identifiés au sein de l'aquifère des GTI.

Vis-à-vis des minéraux manganifères, référencés dans le tableau 16, les eaux captées au niveau des sources A et B semblent à l'équilibre avec la rhodocrosite (MnCO_3). Les concentrations en manganèse sont donc contrôlées par la précipitation de carbonates de manganèse, la source de manganèse étant à rechercher dans les aquifères drainés puisque cet aquifère est dépourvu de carbonates présent en quantité significatives (calcite, dolomite).

Pour l'aluminium, l'eau du forage semble à l'équilibre avec la gibbsite (oxyde d'aluminium). Au niveau du point témoin, l'eau est à l'équilibre avec la kaolinite. Au niveau des sources contaminées, la sursaturation des eaux vis-à-vis de la gibbsite et de la kaolinite suggère un possible excès d'aluminium sous forme particulaire.

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	Mn(OH)2(am)	Mn(OH)3	Manganite	Rhodochrosite	Gibbsite	Kaolinite
C01 – Source B	Phase 2	-6.0	-12	-5.9	0.0	1.7	5.0
C02 – Source A	Phase 2	-5.4	-11	-4.3	0.8	2.0	5.6
C03 – Forage	Phase 2	-9.8	-15	-8.2	-2.4	0.6	2.3
E02 – Référentiel	Phase 2	-11	-16	-9.6	-2.1	-0.8	0.0

Tableau 16 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de possibles minéraux secondaires manganésiens, d'oxydes d'aluminium et de la kaolinite (Mn non analysé lors de la phase 1).

Vis-à-vis des minéraux ferreux et ferriques, référencés dans le tableau 17, les eaux captées au niveau des sources A et B semblent principalement à l'équilibre avec la ferrihydrite. Tout comme le manganèse, le fer est présent dans l'aquifère probablement sous forme de pyrite puis il est contrôlé à l'émergence i.e. dans les zones oxydantes par la précipitation d'oxy-hydroxydes de fer comme la ferrihydrite. Dans le forage, les concentrations en fer sont trop faibles pour être quantifiées.

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₃	Magnetite	Hematite	Siderite	Ferrihydrite	Pyrite
C01 – Source B	Phase 2	-8.2	-3.4	0.2	4.8	-3.8	-0.7	-80
C02 – Source A	Phase 2	-8.5	-2.5	1.7	6.5	-3.8	0.2	-96
C03 – Forage	Phase 2	--	--	--	--	--	--	--
E02 – Référentiel	Phase 2	-13	-6.8	-11	-2.1	-5.7	-4.1	-88

Tableau 17 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de possibles minéraux ferreux et ferriques secondaires (Fe non analysé lors de la phase 1 et < LQ en C03).

Les phases minérales naturelles du mercure les plus communes, principalement associées avec des dépôts épithérmiques, sont le cinabre ($\alpha\text{-HgS}$), le metacinabre ($\beta\text{-HgS}$), le calomel (Hg_2Cl_2) et le mercure élémentaire ($\text{Hg}_{(0)}$). Les eaux étudiées sont sous-saturées vis-à-vis du cinabre et du metacinabre deux formes du sulfures de mercure et sursaturées vis-à-vis du calomel et du mercure élémentaire (tableau 18). Ceci implique l'absence de contrôle de la concentration en Hg par une espèce minérale aux points de captage.

Point d'échantillonnage	Phase d'échantillonnage	Cinabre	Metacinabre	Calomel	Hg(0)
C01 – Source B	Phase 1	--	--	4.9	7.0
C01 – Source B	Phase 2	-24	-24	2.5	7.3
C02 – Source A	Phase 1	--	--	3.5	4.1
C02 – Source A	Phase 2	-32	-32	3.6	6.3
C03 – Forage	Phase 1	--	--	4.5	6.6
C03 – Forage	Phase 2	-35	-35	1.3	3.5
E02 – Référentiel	Phase 2	-30	-30	-1.4	2.4

Tableau 18 : Indice de saturation des eaux échantillonnées vis-à-vis du mercure élémentaire (Hg⁰) et des phases minérales mercurées

Cela n'exclue toutefois pas une possible implication de ces minéraux dans les fortes concentrations en mercure déterminées. Un mélange ou une oxydation des eaux entre le point d'interaction entre les eaux et le mercure et le point de captage peuvent modifier les équilibres géochimiques. La concentration en solution du mercure pourrait alors être contrôlée par la concentration en chlorures et la possible précipitation de calomel en raison de la sursaturation des eaux vis-à-vis de cet élément (Tableau 18).

Ainsi la présence de nitrates permet d'envisager que leurs réductions implique l'oxydation de sulfures et le relargage d'éléments traces associés tel que le mercure dans le cas du cinabre. Au niveau du forage C03 la présence d'arsenic, de zinc, de plomb et de cuivre dans les eaux (Tableau 7 et Tableau 8) pourrait indiquer l'oxydation de sulfures tels que l'arseno-pyrite, la blende, la galène et la chalcopryrite. Ces sulfures peuvent être associés dans des minéralisations de type BCPG. En complément à ces minéralisations, on peut trouver la présence de barite avec laquelle les eaux de Veney sont bien équilibrées (Tableau 15). Le zinc et le plomb étant particulièrement plus solubles en conditions acides, le pH du forage C03 (5.7) permet d'expliquer cette plus forte solubilité comparé aux sources C01 et C02 (pH ~7.1 et 7.3).

Parmi ces différentes phases, le cinabre n'a pu être caractérisé, ni qualitativement, ni quantitativement dans les formations triasiques dans la région de Veney. La source de cinabre la plus proche a été identifiée dans des tufs du Permien (sous-jacent aux GTI) à environ 25 km de la commune de Veney dans la haute vallée de la Bruche (Flucke et al., 1975) et à Obernai. S'il n'est pas possible que le mercure contenu dans les eaux de captage étudiées résulte d'un transfert direct depuis la haute vallée de la Bruche, la présence de cinabre peut être regardée comme un indicateur de circulation de fluides minéralisés riches en mercure au cours de l'histoire du massif vosgien.

4.3.2. *Calcul de spéciation*

Le calcul de la spéciation des éléments dans les eaux en tenant compte des conditions physico-chimiques des eaux permettent de définir sous quelle forme les éléments chimiques et le mercure sont présents dans les eaux étudiées.

Globalement les eaux étudiées correspondent à des milieux peu minéralisés (force ionique de l'ordre $10^{-3}M$), oxydées à moyennement oxydées (Eh entre 200 et 300 mV) avec des pH généralement acides à neutres. De manière plus détaillée, les caractères physico-chimiques évoluent entre les deux phases d'échantillonnage pour un même point de prélèvement. Ainsi, les eaux captées au niveau des sources A et B sont plus neutres et relativement plus réduites lors de la seconde phase d'échantillonnage. Les eaux captées au sein du forage sont également relativement plus réductrices mais plus acides lors de la seconde phase d'échantillonnage. Le point témoin présente des valeurs de pH les plus acides. Toutefois, les valeurs de pH et Eh mesurées lors de la phase 1 au point témoin (E02) semblent peu réalistes en conditions naturelles (hors environnement minier) et sont donc exclues de la discussion.

L'illustration 24 présente les domaines de prédominance des différents complexes du Hg en solution ainsi que vis-à-vis des phases minérales du calomel et du cinabre en fonction du pH et de l'Eh. Les eaux captées au sein des sources A et B, du forage C03 et au niveau du point témoin appartiennent toutes au domaine de prédominance du mercure aqueux $Hg_{(aq)}$.

Parmi les différentes phases de prédominance contrôlant la solubilité du mercure dans le système, on notera l'absence de la phase minérale au sein du diagramme. Cette observation n'est pas en contradiction avec les indices de saturation (positifs) des trois eaux captées vis-à-vis du calomel. Cela illustre que pour les concentrations en Cl et Hg déterminées dans les eaux, en cas de précipitation minérale, la quantité de calomel resterait minoritaire en comparaison du mercure présent sous forme de complexes aqueux ou de cinabre, indépendamment des possibles variations de pH ou Eh.

La présence du cinabre au sein du diagramme Eh-pH suggère un possible contrôle du mercure dissous dans les eaux étudiées à des conditions plus réduites (Eh : 100 à -100 mV). Ces mêmes eaux étant substantiellement sous-saturées vis-à-vis de la phase minérale du cinabre, il est intéressant d'envisager l'hypothèse que les concentrations en mercure proviennent d'une minéralisation des eaux avec l'espèce minérale du cinabre en profondeur où des conditions réduites peuvent prédominer.

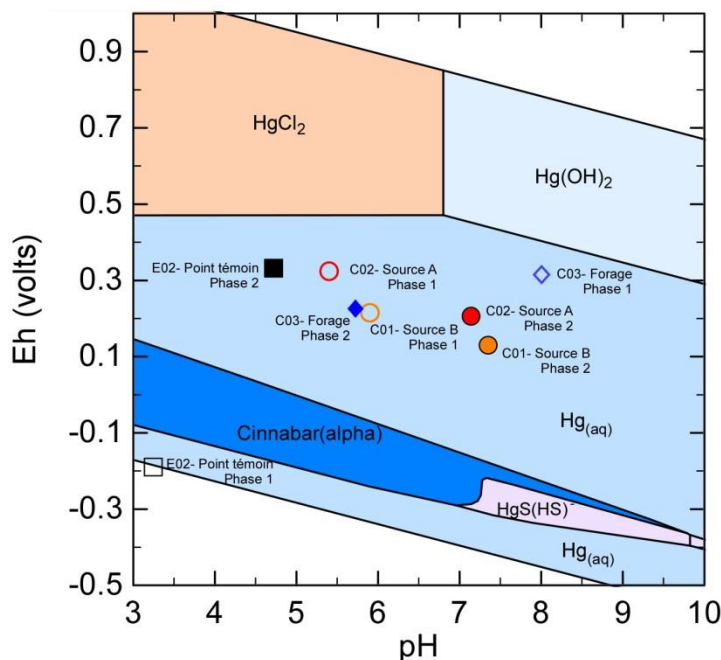


Illustration 24 : Diagramme de stabilité du Hg en fonction du Eh et du pH de la solution.

L'activités des espèces dissoutes a été calculé avec PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999) et la base de données Thermoddem (Blanc et al., 2012), complétée pour le mercure par les travaux de Blanc (2014). Les contours de stabilité entre les espèces du Hg dissous et les phases minérales du calomel et du cinabre ont été calculées à partir de la composition de l'eau captée au forage C03 durant la phase 2.

4.4. APPROCHE ISOTOPIQUE

4.4.1. Etat de l'art

Depuis quelques années, les isotopes du mercure commencent à être utilisés pour tracer les sources de mercure dans l'environnement⁷, en particulier dans l'atmosphère⁸, dans les bio-géo matériaux⁹, dans les minéralisations et les impacts miniers¹⁰. Cet outil isotopique est en plein développement, tant du point de vue des méthodes analytiques que de la compréhension des phénomènes de fractionnements isotopiques (dépendants ou indépendants de la masse) dans le cycle du mercure¹¹.

⁷ Smith et al., 2008 ; Gantner et al., 2009 ; Senn et al., 2010

⁸ Zambardi et al., 2009 ; Carignan et al., 2009

⁹ Ridley et Stetson, 2006 ; Blum et Bergquist, 2007 ; Renner, 2008 ; Biswas et al., 2008 ; Estrade et al., 2010

¹⁰ Foucher et al., 2009 ; Stetson et al., 2009

¹¹ Meija et al., 2010 ; Ghosh et al., 2008, Epov et al., 2008 ; Bergquist et Blum, 2007 ; 2009 ; Zheng et Hintelmann, 2009 ; Estrade et al., 2010 ; Zheng et Hintelmann, 2010a, b ; Laffont et al., 2009

4.4.2. Méthodologie

Le mercure (Hg) possède 7 isotopes stables (Illustration 25) avec les abondances relatives en pourcents entre parenthèses : ^{196}Hg (0,15 %), ^{198}Hg (9,97 %), ^{199}Hg (16,87 %), ^{200}Hg (23,10 %), ^{201}Hg (13,18 %), ^{202}Hg (29,86 %), ^{204}Hg (6,87 %).

Les compositions isotopiques sont communément reportées selon la notation classique δ (‰) relativement au standard NIST 3133 :

$$\delta^{xxx}\text{Hg}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^{xxx}\text{Hg}}{^{198}\text{Hg}} \right)_{\text{Ech.}}}{\left(\frac{^{xxx}\text{Hg}}{^{198}\text{Hg}} \right)_{\text{NIST3133}}} - 1 \right] \times 1000$$

xxx = 204, 202, 201, 200 ou 199.

La notation Δ est utilisée pour exprimer le fractionnement indépendant de la masse (MIF : Mass Independent Fractionation) comme proposé par Blum et Bergquist³ :

$$\Delta^{199}\text{Hg}(\text{‰}) = \delta^{199}\text{Hg} - 0,2520 \times \delta^{202}\text{Hg}$$

$$\Delta^{200}\text{Hg}(\text{‰}) = \delta^{200}\text{Hg} - 0,5024 \times \delta^{202}\text{Hg}$$

$$\Delta^{201}\text{Hg}(\text{‰}) = \delta^{201}\text{Hg} - 0,7520 \times \delta^{202}\text{Hg}$$

$$\Delta^{204}\text{Hg}(\text{‰}) = \delta^{204}\text{Hg} - 1,493 \times \delta^{202}\text{Hg}$$

L'analyse des compositions isotopiques du mercure se fait généralement par la technique de génération de vapeur froide (chlorure stanneux) couplé à un ICP-MS multi-collecteur (CVG-MC-ICP-MS) (Blum et Bergquist 2007).

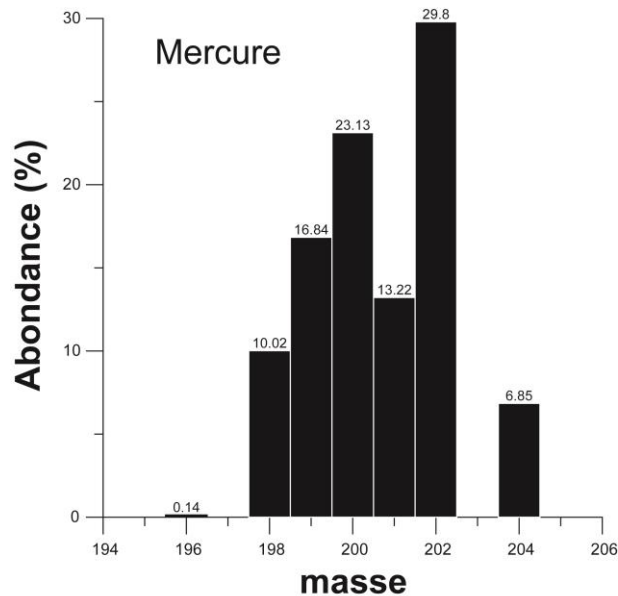


Illustration 25 : Abondances isotopiques du mercure.

4.4.3. Résultats

Les compositions isotopiques du mercure sont données par le rapport $\delta^{202}\text{Hg}$ dont les valeurs sont reportées dans le tableau 19. Les valeurs sont comprises entre -1,86 (source E02) et -1,18 ‰ (source A – C02).

	Composition isotopique Hg (‰)									
	$\delta^{204}\text{Hg}$	2SD	$\delta^{202}\text{Hg}$	2SD	$\delta^{201}\text{Hg}$	2SD	$\delta^{200}\text{Hg}$	2SD	$\delta^{199}\text{Hg}$	2SD
Source C01	-2.38	0.26	-1.62	0.13	-1.16	0.06	-0.82	0.14	-0.27	0.15
Source C02	-1.82	0.58	-1.18	0.42	-0.90	0.20	-0.62	0.42	-0.20	0.04
Source E02	-2.75	0.28	-1.86	0.28	-1.39	0.14	-0.91	0.01	-0.37	0.27
Forage C03	-2.13	0.49	-1.41	0.27	-1.05	0.37	-0.75	0.31	-0.26	0.15
	$\Delta^{204}\text{Hg}$	2SD	$\Delta^{201}\text{Hg}$	2SD	$\Delta^{200}\text{Hg}$	2SD	$\Delta^{199}\text{Hg}$	2SD		
Source C01	0.04	0.15	0.06	0.09	0.00	0.14	0.14	0.14		
Source C02	-0.06	0.07	-0.02	0.20	-0.03	0.22	0.10	0.15		
Source E02	0.02	0.39	0.01	0.09	0.03	0.13	0.10	0.24		
Forage C03	-0.02	0.16	0.01	0.17	-0.04	0.18	0.10	0.11		

Tableau 19 : Résultats des analyses isotopiques (‰).

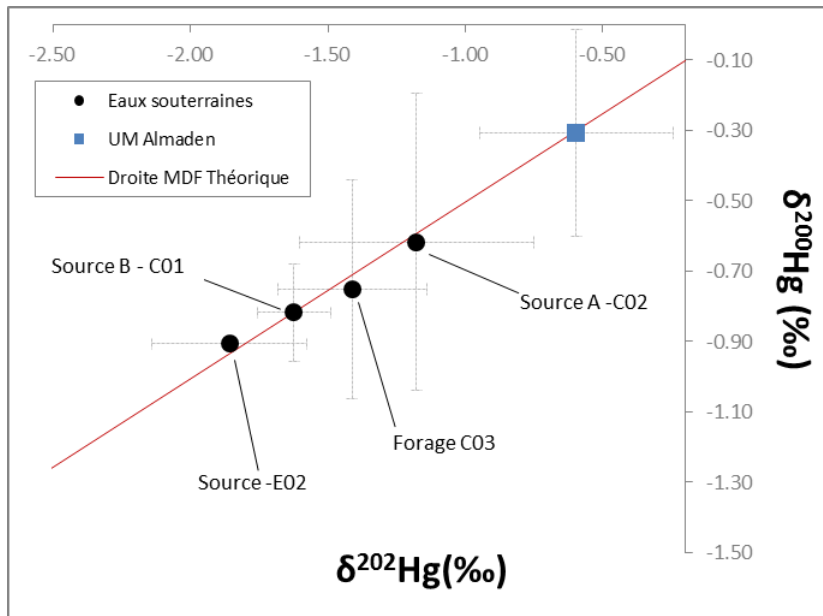


Illustration 26 : Diagramme tri-isotopique $\delta^{200}\text{Hg} = f(\delta^{202}\text{Hg})$.

A titre de référence la signature isotopique du minerai de la Mine d'Almaden est reportée sur l'illustration 26. Malgré un écart-type (SD) significatif les valeurs s'alignent correctement sur la droite théorique de fractionnement dépendant de la masse (MDF) confirmant la fiabilité des données acquises (Illustration 26).

L'illustration 27 présente la composition isotopique du mercure ($\delta^{202}\text{Hg}$, ‰) en fonction de l'inverse de la concentration en mercure dans l'eau (ng/L).

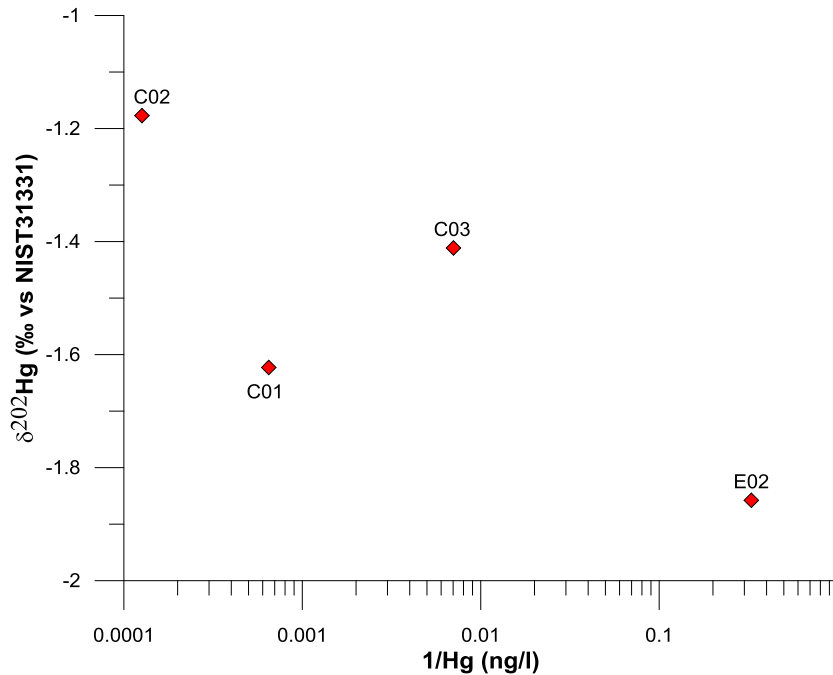


Illustration 27 : compositions isotopiques du mercure ($\delta^{202}\text{Hg}$, ‰) reportées en fonction de l'inverse de la concentration en mercure (ng/L) dans l'eau.

Les différents points analysés à Veney s'alignent selon un fractionnement isotopique du mercure le long de la droite horizontale illustrant soit une sorption du mercure soit une méthylation (illustration 28). Les travaux de Remi (2015) sur la source et l'étang de Veney ont montré une très faible méthylation du mercure avec une majorité de mercure inorganique en solution et dans les sédiments de l'étang.

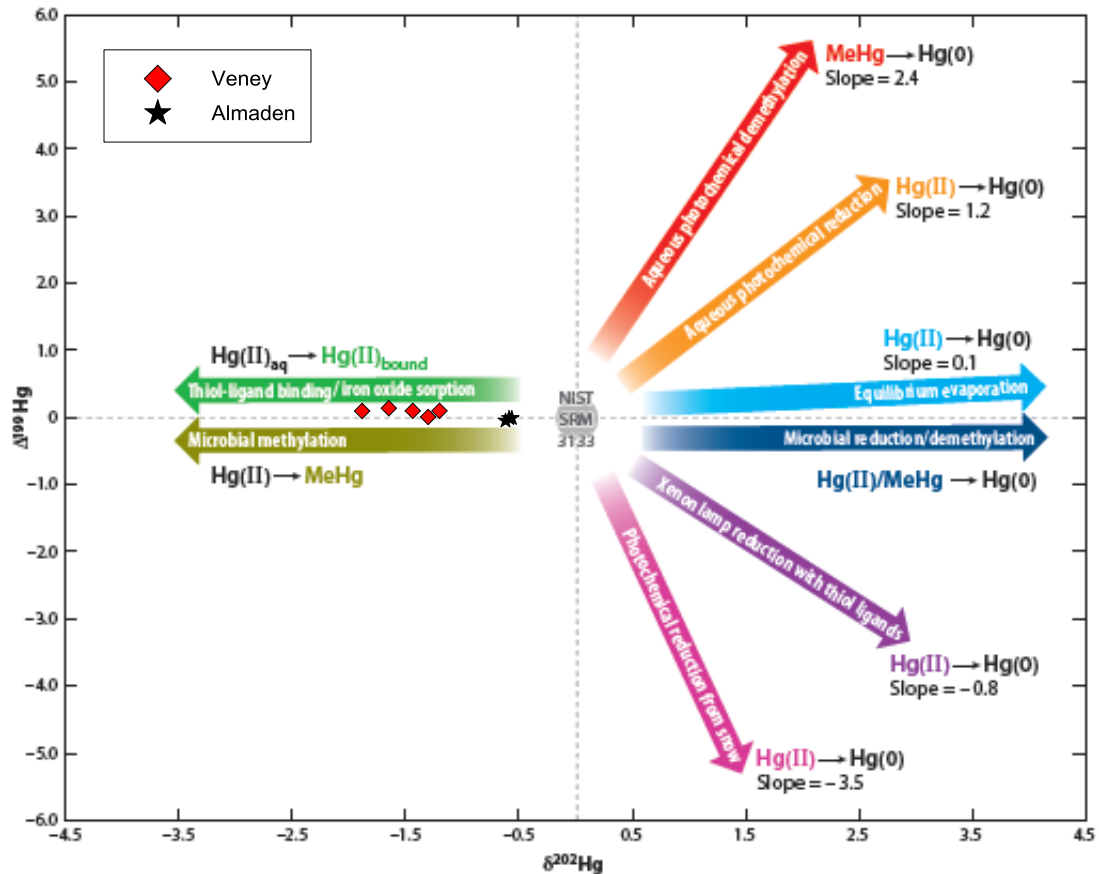


Illustration 28 : Schéma général du fractionnement isotopique observé expérimentalement ($\Delta^{199}\text{Hg}$ vs. $\delta^{202}\text{Hg}$).

Pour chaque processus, les flèches indiquent l'évolution isotopique de chacune des espèces (d'après Blum et al., 2014). Les valeurs de Veney et du minerai d'Almaden (Standard, Blum and Bergquist, 2007) sont reportées.

La flèche bleu clair indique le fractionnement pendant l'évaporation (MIF en raison de l'effet de volume nucléaire); la flèche bleu foncé indique le fractionnement lors de la réduction microbienne du Hg(II) et déméthylation de MeHg; la flèche verte indique le fractionnement pendant la liaison Hg à des ligands thiol et la sorption de Hg à des oxydes de fer; la flèche verte foncée indique le fractionnement lors de la méthylation du Hg(II) par des bactéries réductrices de sulfate; la flèche rouge indique le fractionnement lors de la déméthylation photochimique de MeHg à partir de solutions aqueuses (MIF en raison de l'effet magnétique); la flèche orange indique le fractionnement lors de la réduction photochimique de Hg(II) à partir de solutions aqueuses (MIF en raison de l'effet isotopique magnétique); la flèche magenta indique le fractionnement lors de la réduction photochimique de Hg(II) à partir de cristaux de neige (MIF en raison de l'effet isotopique magnétique); et la flèche pourpre indique le fractionnement de Hg(II) en raison de la réduction induite par la lumière artificielle par l'intermédiaire des ligands thiol (MIF en raison de l'effet isotopique magnétique). Abréviations: MIF, fractionnement indépendant de la masse ; NIST SRM 3133 : l'Institut national des normes et de la technologie des matériaux standard de référence 3133.

Les signatures isotopiques sont en accord avec celles observées dans des minerais comme ceux de Almaden, puis le mercure aurait subi des processus de sorption durant son transport jusqu'au point de prélèvement. Ce mécanisme pouvant expliquer un fractionnement isotopique dépendant de la masse (Illustration 26). Il est néanmoins difficile de différencier avec certitude d'une origine anthropique directe qui peut aussi avoir le même genre de profil (ex: signature du Hg(0) liquide : Estrade et al 2009 : $\delta^{202} = -1.06 \text{ ‰}$, $\Delta^{199} = 0.01 \text{ ‰}$).

Néanmoins l'absence de fractionnement indépendant de la masse (MIF) démontre l'absence de fractionnement associé à des réactions de type photochimique. Il s'agit donc d'un mercure d'origine locale ou d'une contamination directe depuis une source profonde. Ces réactions photochimiques se font dans l'atmosphère, il s'agit donc d'un mercure qui n'a pas circulé dans l'atmosphère. L'absence de méthylation du mercure dans les eaux échantillonnées par Remi (2015) sur la source C02 pourrait indiquer une origine géogénique.

4.5. CONCLUSIONS

A partir de l'analyse chimique des eaux, il est possible de conclure que les eaux captées à Veney ne présente pas un faciès significativement différent des eaux présentes dans le secteur étudié. Selon les aquifères drainés, on note des différences en fonction de la nature des roches drainées et des temps de résidence. Les eaux captées correspondent à des eaux météoriques et des eaux drainant les formations du Trias plutôt que des eaux thermales profondes.

La recherche d'une source anthropique de mercure n'a pas aboutie lors des études précédentes par contre le flux de mercure quantifié sur les sources captées présente des quantités de mercure non négligeables (en moyenne 200 g/an). La signature isotopiques du mercure montre une contamination par du mercure *a priori* d'origine naturelle n'ayant pas subi de réaction au contact avec l'atmosphère (photochimie).

Compte-tenu de la chimie des eaux, il est possible de proposer un schéma où les eaux de recharge sont en contact avec les minéralisations en mercure présentes à faible profondeur au sein de l'aquifère ou au sein des fractures et fissures. En effet, les eaux sont moins minéralisées qu'au sein de l'aquifère du Trias ce qui va dans le sens d'eaux jeunes ayant encore pas ou faiblement interagit avec les GTI. Les eaux échantillonnées sont néanmoins équilibrées avec certains minéraux de l'aquifère ce qui témoigne d'une réactivité de ces eaux. Les eaux sont ainsi à l'équilibre avec un minéral associé fréquemment aux minéralisations, la barite (BaSO_4). Les eaux sont également à l'équilibre avec la calcédoine et le quartz, deux minéraux qui contrôlent la solubilité de la silice notamment dans les formations gréseuses. Dans l'hypothèse où le mercure serait présent sous forme de sulfures, la présence de nitrates dans les eaux pourrait induire l'oxydation des sulfures en relation avec la réduction des nitrates. La dénitrification serait alors le mécanisme contrôlant le relargage du mercure d'origine naturelle. Le mercure pourrait être contrôlé en solution par la solubilité du calomel et donc la concentration en chlorures mais ceci n'exclue pas une source sous forme de cinabre plus en profondeur.

5. Conclusions sur l'origine du mercure et recommandations

Dans le cadre de la présente étude, les trois points d'eau contaminée en mercure ont été échantillonnés en avril 2016 afin de réaliser un ensemble d'analyses chimiques et isotopiques sur ces eaux. L'objectif de ces investigations visait à caractériser le fonctionnement hydrogéochimique de ces systèmes pour tenter d'identifier l'origine du mercure ou son mécanisme de mobilisation. En complément un quatrième point d'eau non contaminée a été prélevé comme référence.

Conclusions sur le fonctionnement hydrogéologique du secteur étudié

Les eaux échantillonnées s'inscrivent dans les gammes de concentrations et les faciès décrits sur le secteur et à l'échelle régionale. On ne note pas de propriétés particulières permettant de les distinguer des autres eaux, ce qui aurait pu être un indice d'un fonctionnement atypique conjointement à la contamination en mercure.

A une échelle plus fine, on note quelques distinctions entre ces points d'eau. Les sources C01 et C02, malgré leur proximité, présentent des différences, avec des eaux de la source C02 qui sont plus proches des eaux du forage C03. Les eaux du forage C03 en partie influencées par la faille permet de conclure sur une influence plus marquée de la faille sur les eaux de la source C02 comparé à C01. Par contre la faille ne semble pas drainer d'eaux anciennes/thermales profondes.

En accord avec les isotopes de l'eau, pour les 4 points d'eau, il semble s'agir majoritairement d'eaux modernes.

Les eaux des 3 captages ont un faciès intermédiaire entre un pôle composé par les eaux de pluie et les eaux de type Ca-SO₄ émergeant dans la zone sud-est de l'étude (nord-est de Raon-l'Etape) et un pôle minéralisé de la nappe du Trias de type HCO₃-Ca. Ce faciès étant représentatif de la nappe des GTI à proximité des zones de recharge la nappe des GTI évoluant d'un faciès Ca-HCO₃ à l'amont vers un faciès Na-Cl vers les zones les plus profondes et anciennes (Celle-Jeanton et al., 2009).

Les sources C01 et C02 sont toutes deux sujettes à des apports d'anthropiques en nitrates (respectivement 18,7 et 17,6 mg/l), liés à l'activité biologique sous couvert forestier ou aux pratiques agricoles en limite du bassin versant. Les concentrations en nitrates des eaux de la source E02 sont assimilables aux apports par les précipitations météoriques qui peuvent atteindre 4,4 mg/l (Celle-Jeanton et al., 2009). Au niveau du forage C03 un mélange entre une eau contaminée en nitrates et une eau appauvrie en nitrates permet d'expliquer cette concentration intermédiaire (12,6 mg/l). Selon la valeur de référence retenue pour les nitrates, le pourcentage de mélange au forage C03 serait compris entre 70% (NO₃ : 0 mg/l) et 55 % (NO₃ : 5 mg/l). Ce qui est en accord avec les conclusions de l'étude réalisée par Antea (2012) qui propose une contribution de la faille à 60 %.

La chimie des eaux permet d'exclure une possible origine profonde des eaux captées à Veney telle que la présence de la faille aurait pu le suggérer. Il s'agit vraisemblablement d'eau de pluie qui lors des circulations dans ce bloc entre en contact avec du mercure présent à la base des grès ou dans le réseau de fracture, soit la faille de Veney soit des failles conjuguées.

La présence de la faille serait alors à considérer comme ayant un rôle sur la mise en contact de ces eaux avec le mercure localisé soit dans les formations géologiques soit dans le réseau de failles. La faille de Veney est une faille majeure dont l'âge n'est pas défini, celle-ci a joué postérieurement au Trias puisqu'elle décale les formations triasiques mais son ampleur laisse supposer une histoire complexe.

Les signatures isotopiques du mercure semblent montrer l'absence de fractionnement indépendant de la masse (MIF), ceci indiquerait que le mercure n'aurait pas subi de fractionnement photochimique en lien avec les réactions se déroulant dans l'atmosphère. Il s'agirait donc de mercure d'origine profonde avec une signature potentiellement assimilable à un minerai tel que celui du gisement d'Almaden (Trias, Espagne). L'alignement des points échantillonnés sur la droite de fractionnement dépendant de la masse (MDF) semble montrer un fractionnement qui pourrait être à relier avec de la sorption. Ce phénomène est classiquement observé dans les eaux souterraines durant la circulation des eaux au sein des roches aquifères entraînant ainsi naturellement une atténuation des concentrations en éléments traces et en mercure (interaction eau-roche).

Synthèse du contexte régional

Les données bibliographiques consultées ont permis d'identifier des éléments permettant de soupçonner une anomalie naturelle en mercure dans les sols superficiels sur la base des fonds géochimiques de la BD-ETM (Base de Données sur les Éléments Traces Métalliques) et des résultats du projet GEMAS. Dans le cadre de prospections minières le BRGM a également démontré la présence localisée de cinabre dans les Vosges dans de minces fissures traversant le Permien (Bourg-Bruche) et au Quaternaire (Obernai).

L'origine du mercure est alors à chercher en lien avec le volcanisme des Vosges.

La faille de Veney traversant les grès du Trias inférieur, s'étend probablement jusqu'au Permien (dont la profondeur au droit de la zone d'étude n'a pas pu être précisée faute de données disponibles). La présence de cette faille ancienne et des failles conjuguées offre un réseau de failles dans lequel des fluides dans le passé ont pu circuler et favoriser la mise en place de minéralisation notamment du mercure. En effet, la mise en place de mercure en lien avec des phénomènes épithermaux (hydrothermalisme de basse température) ont pu potentiellement entraîner la migration du mercure vers les formations permienno-triasiques dont la porosité est favorable à ces circulations. Ces minéralisations sont également à envisager dans les réseaux de failles et fractures associés à la faille de Veney.

Aujourd'hui, les eaux modernes circulent dans ce système et percolent en contact avec ces potentielles minéralisations ce qui contribuerait localement à la contamination des eaux en mercure.

Recommandations

L'ensemble des données tend à montrer une source en mercure d'origine naturelle. Une source naturelle de mercure est envisageable en raison du contexte géologique. En lien avec la faille de Veney d'importance majeure à l'échelle géologique et la présence d'intrusion de roche éruptive et de roches volcano-sédimentaires à proximité de Veney (Raon-L'Etape à 6 km), une source de mercure et sa migration est possible. La ou les formations hôtes ainsi que les mécanismes géologiques et les éléments ayant conduit à sa mise en place restent à définir.

Des investigations de cartographie sur le terrain complétées par la réalisation de forages pourraient permettre de mieux comprendre le sous-sol. Des investigations seraient à conduire à deux échelles.

- à l'échelle « semi-régionale », sur une zone englobant Venay et Raon-l'Etape ((soit 10 à 15 km de rayon environ), il serait nécessaire de compiler les données géologiques, géologiques et géochimiques des sols avec des compléments d'échantillonnage (sol, sédiment, roche) le cas échéant et d'analyser le mercure dans les eaux souterraines et les sources sur un maximum de points d'eau, avec des méthodes analytiques présentant des seuils de quantification aussi bas que possible (1 à 15 ng/l). Cela permettrait d'obtenir une cartographie des concentrations en mercure qui permettrait d'une part de réaliser une première évaluation du risque sanitaire (est-il limité au secteur de Veney ?) et d'autre part de donner des indications sur l'origine du mercure (en mettant en évidence une éventuelle liaison avec le volcanisme permien par exemple) ;
- à l'échelle locale, une cartographie plus détaillée, combinée avec un complément d'échantillonnage visant à prélever des sols plus en profondeur (10 à 100 cm) que lors de la phase 1 (5 à 10 cm) devrait permettre de mieux caractériser les roches sous-jacentes. Si des indications sur la présence de mercure sont confirmées, il pourra être envisagé de réaliser des sondages pour caractériser le substratum, à savoir le Trias et/ou le Permien sous-jacents et préciser l'origine du mercure.

6. Bibliographie

ANTEA (2012). Dossier de demande d'exploiter et de distribuer l'eau du forage F1 de Vacqueville (54) pour la consommation humaine. Rapport anteagroup A67056, 122 p., 6 fig., 10 tabl.

Allard J-F., (1964). « Trapp » de Raon-l'étape (Vosges) – rapport de prélèvement. Rapport BRGM n°306-1-27.

Bérail, S. et al. (2016) Determination of total Hg isotopic composition at ultra- trace level by on line Cold Vapor Generation and Dual Gold-Amalgamation coupled to MC-ICP-MS. JAAS (submitted).

Bergquist B-A., Blum J-D. (2007). Mass-dependent and -independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems. *Science* 318: 417-420.

Biswas A., Blum J-D., Bergquist B-A., Keeler G-J., and Xie Z-Q., (2008). Natural Mercury Isotope Variation in Coal Deposits and Organic Soils. *Environmental Science & Technology*, 42(22): 8303-8309.

Blanc P. (2014). Mercury associated physical and chemical constants: updating of the THERMODDEM database, IMAHg SNOWMAN SN-03/08 project. Rapport BRGM/RP-61299-FR, 26 p., 10 fig., 2 tabl.

Blanc P., Lassin A., Piantone P., Azaroual M., Jacquemet N., Fabbri A., Gaucher E-C. (2012). Thermodem: A geochemical database focused on low temperature water/rock interactions and waste materials. *Applied Geochemistry* 27, 2107–2116. doi:10.1016/j.apgeochem.2012.06.002

Blum J-D., Bergquist B-A. (2007). Reporting of variations in the natural isotopic composition of mercury. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 388: 353-359.

Carignan J., Estrade N., Sonke J-E., and Donard O.F.X. (2009). Odd Isotope Deficits in Atmospheric Hg Measured in Lichens. *Environmental Science & Technology*, 43(15): 5660-5664.

Epov V-N., Rodriguez-Gonzalez P, Sonke J-E., Tessier E, Amouroux D, Bourgoïn L-M., Donard OFX (2008). Simultaneous determination of species-specific isotopic composition of Hg by gas chromatography coupled to multicollector ICPMS. *Analytical Chemistry* 80: 3530-3538.

Estrade N., Carignan J., Sonke J.E., and Donard O.F.X. (2010). Measuring Hg Isotopes in Bio-Geo-Environmental Reference Materials. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1): 79-93.

Foucher D, Ogrinc N, Hintelmann H (2009). Tracing mercury contamination from the Idrija mining region (Slovenia) to the Gulf of Trieste using Hg isotope ratio measurements. *Environmental Science & Technology* 43: 33-39

Gantner, N., Hintelmann, H., Zheng, W., and Muir, D.C. (2009). Variations in Stable Isotope Fractionation of Hg in Food Webs of Arctic Lakes. *Environmental Science & Technology*, 43(24): 9148-9154.

Ghosh, S., Xu, Y.F., Humayun, M., and Odom, L. (2008). Mass-independent fractionation of mercury isotopes in the environment. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9.

Delany J.M., Puigdomenech I., Wolery T.J. (1986). Precipitation kinetics option for the EQ6 geochemical reaction path code. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, 44 p.

Fluck P., Weil P., Wimmenauer W. (1975). Géologie des gîtes minéraux des Vosges et des régions limitrophes. Mémoire du B.R.G.M., n°87, 190p.

Kinniburgh D., Cooper D. (2011). PhreePlot Creating graphical output with PHREEQC.

Laffont L., Sonke J.E., Maurice L., Hintelmann H., Pouilly M., Bacarreza Y.S., Perez T., and Behra P. (2009). Anomalous Mercury Isotopic Compositions of Fish and Human Hair in the Bolivian Amazon. *Environmental Science & Technology*, 43(23): 8985-8990.

Meija J., Yang L., Sturgeon R.E., and Mester Z. (2010). Certification of natural isotopic abundance inorganic mercury reference material NIMS-1 for absolute isotopic composition and atomic weight. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(3): 384-389.

Nguyen-Thé D. (2010). Pollution des eaux souterraines par du mercure à Veney (54) – Lorraine. Rapport BRGM/RP58241-FR, 24 p., 5 fig.

Nguyen-Thé D., Ollagnier S., Pétrignet M., avec la collaboration de Thonnon J., Joannes O. (2010). Carte piézométrique de la nappe des grès du Trias inférieur en 2010. Rapport BRGM/RP-59294-FR, 30 p., 8 ill., 2 ann., 1 Cd-rom.

Nguyen-Thé D., Demangeon G., Midot D. (2014). Caractérisation de la pollution des eaux souterraines au mercure à Vacqueville et Veney (54) – Lorraine. 1^{ère} Phase. Rapport BRGM/RP63962-FR, 56 p., 14 fig.

Ottesen RT, Birke M, Finne TE, Gosar M, Locutura J, Reimann C, et al. (2013). Mercury in European agricultural and grazing land soils. *Applied Geochemistry*. 2013;33:1-12.

Parkhurst D.L., Appelo C. a. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2) : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. WRI - 99-4259). United States Geological Survey.

Renner R. (2008). Mercury isotopes may put the finger on coal. *Environmental Science & Technology*, 42(22): 8177.

Revol P. (2007). Captage communal sur la commune de Veney 02698X0026/HY, Rapport d'hydrogéologue agréé, Pollution en mercure. Commune de Vacqueville, 20 p., 6 fig., 15 ph.

Revol P. (2008). Captage communal sur la commune de Veney 02698X0026/HY, Rapport d'hydrogéologue agréé, Pollution en mercure, Mesures des teneurs en mercure. Commune de Vacqueville, 26 p., 9 fig., 1 tabl., 1 ann.

Ridley W.I. and Stetson S.J. (2006). A review of isotopic composition as an indicator of the natural and anthropogenic behavior of mercury. *Applied Geochem.*, 21(11): 1889-1899.

Senn D.B., Chesney E.J., Blum J.D., Bank M.S., Maage A., and Shine J.P. (2010). Stable Isotope (N, C, Hg) Study of Methylmercury Sources and Trophic Transfer in the Northern Gulf of Mexico. *Environmental Science & Technology*, 44(5): 1630-1637.

Smith C.N., Kesler S.E., Blum J.D., and Rytuba J.J. (2008). Isotope geochemistry of mercury in source rocks, mineral deposits and spring deposits of the California Coast Ranges, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 269(3-4): 398-406.

Stetson S.J., Gray J.E., Wanty R.B., and Macalady D.L. (2009). Isotopic Variability of Mercury in Ore, Mine-Waste Calcine, and Leachates of Mine-Waste Calcine from Areas Mined for Mercury. *Environmental Science & Technology*, 43(19): 7331-7336.

Zambardi T., Sonke J.E., Toutain J.P., Sortino F., and Shinohara H. (2009). Mercury emissions and stable isotopic compositions at Vulcano Island (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1-2): 236-243.

Zheng W. and Hintelmann H. (2009). Mercury isotope fractionation during photoreduction in natural water is controlled by its Hg/DOC ratio. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73(22): 6704-6715.

Zheng W. and Hintelmann H. (2010a). Nuclear Field Shift Effect in Isotope Fractionation of Mercury during Abiotic Reduction in the Absence of Light. *Journal of Physical Chemistry A*, 114(12): 4238-4245.

Zheng W. and Hintelmann H. (2010b). Isotope Fractionation of Mercury during its Photochemical Reduction by Low-Molecular-Weight Organic Compounds. *Journal of Physical Chemistry A*, 114(12): 4246-4253.

Annexe 1 :



Légende de la carte géologique harmonisée



Code	intitulé
c5â	Basalte porphyrique à biotite de Thélod (neck du Crétacé supérieur)
döq	Trachyte quartzifère (quartz-kérophyre, Dévonien moyen)
dS	Argilites schisteuses et grauwackes (Dévonien inférieur à moyen)
E	Formations de versant : éboulis, colluvions
E-GP	Eboulis et grouine périglaciaire
Fu	Alluvions très anciennes, résiduelles, des plus hautes terrasses (+170-200 m)
Fv	Alluvions anciennes, résiduelles, des très hautes terrasses
Fw	Alluvions anciennes des hautes terrasses
Fx	Alluvions anciennes des moyennes terrasses
Fxy	Alluvions anciennes des basses à moyennes terrasses
Fy	Alluvions anciennes des basses terrasses
Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles
gâ	Basalte d'Essey-la-Côte = néphéline à mélilite et olivine (neck de l'Oligocène)
GP	Grouine (formation périglaciaire)
hydro	Réseau hydrographique
j2a-b	Calcaires à polypiers, calcaire à entroques, calcaire sableux, marnes micacées (Bajocien)
j2b1	Oolithe de Jaumont / oolithe milière inférieure, marnes de Longwy, calcaires siliceux de l'Orne (Bajocien sup.)
j2b2	Calcaires oolithiques divers, marnes du Jarnisy et de Gravelotte, calcaire coquillier de Vernéville (Bajocien sup.)
j3a	Calcaires cristallins ("caillasses") à Anabacia, marnes à térébratules (Bathonien inf.)
j3b	Alternance de bancs de marnes et de calcaires ("caillasses") à rhynchonelles (Bathonien moyen à sup.)
j3b-c	Calcaire oolithique : "dalle d'Etain" etc. (Bathonien moyen-sup.)
j4-5	Argiles de la Woëvre : argiles et marnes à rares bancs calcaires (Callovo-Oxfordien)
j5a1	Alternances marno-calcaires, calcaires à chailles (Oxfordien inf. à moyen)
j5b	Calcaires à polypiers, calcaire oolithique, marno-calcaires (Oxfordien moyen-sup.)
j5c	Calcaires à astartes inférieurs (Oxfordien sup.)
l1-2	Calcaires et marnes à gryphées (Sinémurien-Hettangien)
l2	Argiles à Promicroceras (Lotharingien = Sinémurien sup.)
l2-3	Calcaires à Prodactyloceras, marnes et calcaires marneux (Carixien) ; calcaires ocreux (Lotharingien = Sinémurien sup.)
l3a	Marnes à Amaltheus Margaritatus (Domérien moyen)
l3b	Calcaires marneux, gréseux ou silteux ("grès médioliasiques", Domérien sup.)
l4	Marnes sableuses ("grès supraliasiques"), marnes à septaria, schistes cartons (Toarcien)
l4-j1	Formation ferrifère - à "minette" de Lorraine - indifférenciée (Toarcien sup.-Aalénien)
LP	Limons des plateaux sur substrat reconnu ou non
LP-Fe	Limons des plateaux à fer fort en grains
p	Graviers pliocènes
r2ó	Rhyolite de la coulée du Nideck (Saxonien)
r2VS	Tufs, arkoses et conglomérat de Frapelle, tufs hyperacides de Meisenbuckel (Saxonien)
r3a	Grès fins en dalles : couches de Champenay (Thuringien inf.)



Code	intitulé
r3b	Arkoses et brèches arkosiques : couches de St-Dié (Thuringien sup.)
RF-L	Alluvions anciennes résiduelles mêlées à des limons des plateaux
t1a	Grès vosgien inférieur (Buntsandstein inf.)
t1b	Grès vosgien supérieur (Buntsandstein moyen)
t1c	Conglomérat principal (Buntsandstein moyen)
t2-3	Grès coquillier (Muschelkalk inf.), grès à Voltzia et couches intermédiaires (Buntsandstein sup.), indifférenciés
t2a-b	Couches intermédiaires : grès prédominants, argilites (Buntsandstein sup.)
t2c	Grès arkosique à Voltzia (Buntsandstein sup.)
t3	Dolomies, marnes à myacites, grès coquillier (Muschelkalk inf.)
t4	Dolomies +/- gypsifères, marnes et dolomies à intercalations de gypse ou d'anhydrite, argilites bariolées (Muschelkalk moyen)
t5	Calcaires à térébratules et cératites, marnes, calcaire à entroques (Muschelkalk sup.)
t6a	Dolomies et marnes (Lettenkohle = Keuper inf.)
t6a-b	Marnes irisées inférieures : argilites renfermant des couches de sel gemme et de gypse (Keuper inf.-moyen)
t6b1	Marnes irisées moyennes et grès à roseaux (Keuper moyen)
t6b2	Dolomie de Beaumont (Keuper moyen)
t6c	Marnes irisées supérieures, dolomies silicifiées et gypsifères, argilites rouges de Chanville (Keuper sup.)
t7a	Grès infraliasiques : grès et argilites à Avicula contorta (Rhétien inf.)
t7b	Argilites rouges de Levallois (Rhétien sup.)
U	Travertins (tufs calcaires)
X	Remblais, déblais de mines, crassiers



Annexe 2 :

Fiches BSS des points prélevés

		INDICE : 0269 8X 0025 Désignation : HY	Niveaux Documents scannés Microfiches Logs vérifiés Point d'eau Dans BSS-EAU Dans ADES	1 9 10 <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
Recueilli par	BRGM	Au titre de	Code Minier		
Département	54 MEURTHE-ET-MOSELLE	Commune	560 VENEY		
Lieu-dit, adresse	CAPTAGE COMMUNAL				
Région géologique	LORRAINE				
Saisi en	Lambert 1 - Nord	X/Longitude	930.8 KM	Y/Latitude	94.57 KM
Soit en	Lambert 2E		930 903 m		2 394 383 m
	Lambert-93		981 697 M		6 824 935 M
	Longitude latitude WGS 84 (DMS)		6°48'43.05"E		48°27'48.58"N
	Longitude latitude WGS 84 (DD)		6.811958		48.463495
Qualité du positionnement		Précision X/Y			
Altitude	305.000 m	Précision altitude	EPD		
Altitude Z_BDALTI	307.0 m				
					
Nature	SOURCE		Nombre d'observations		
Date fin de travaux		Importance du sujet	1	Échantillons conservés	Non
Maître d'oeuvre					
Propriétaire					
Exploitant	COMMUNE				
Entrepreneur					
Dossier instruit par	MORLOT	Date d'instruction	21/09/1981		
Confidentialité	Domaine public	Date domaine public	Date dernière mise à jour 31/01/2013		
Références					
Code liaison	N° liaison				
Profondeur atteinte/hauteur	m	Diamètre tubage (intérieur mini crépine)	mm		
Profondeur eau/sol	m le	Type profondeur			
Altitude origine coupe	m	Précision altitude coupe			
Auteur coupe	le				
Mode d'exécution		État de l'ouvrage	ACCES,EXPLOITE,PRELEV.		
Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance			
Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation	AEP.		
Documents	AUTORISATION.	Gisement			

		INDICE : 0269 8X 0026 Désignation : HY	Niveaux : 1 Documents scannés : 22 Microfiches : 18 Logs vérifiés : <input type="checkbox"/> Point d'eau : <input checked="" type="checkbox"/> Dans BSS-EAU : <input checked="" type="checkbox"/> Dans ADES : <input checked="" type="checkbox"/>																
Recueilli par : BRGM Département : 54 MEURTHE-ET-MOSELLE Lieu-dit, adresse : SOURCE AEP DE VACQUEVILLE Région géologique : LORRAINE	Au titre de : Code Minier Commune : 560 VENEY																		
Saisi en : Lambert 1 - Nord Soit en : Lambert 2E Lambert-93 Longitude latitude WGS 84 (DMS) Longitude latitude WGS 84 (DD)	X/Longitude : 931.04 KM Y/Latitude : 94.89 KM 931 144 m 981 941 M 6°48'55.64"E 6.815455	2 394 703 m 6 825 252 M 48°27'58.46"N 48.466239																	
Qualité du positionnement Altitude : 297.000 m Altitude Z_BDALTI : 295.0 m	Précision X/Y Précision altitude : EPD																		
Nature : SOURCE Date fin de travaux Maître d'oeuvre Propriétaire : COMMUNE DE VACQUEVILLE Exploitant : COMMUNE DE VACQUEVILLE Entrepreneur Dossier instruit par : NOELLE (ENSG) Confidentialité : Domaine public Références	Importance du sujet : 1	Nombre d'observations Échantillons conservés : Non Date d'instruction : 01/06/1972 Date dernière mise à jour : 14/01/2016																	
Code liaison Profondeur atteinte/hauteur : m Profondeur eau/sol : m le 01/06/1972 Altitude origine coupe : m Auteur coupe	N° liaison Diamètre tubage (intérieur mini crépine) : mm Type profondeur Précision altitude coupe le																		
<table border="1"> <tr> <td>Mode d'exécution</td> <td></td> <td>État de l'ouvrage</td> <td>ACCES,EXPLOITE,PRELEV.</td> </tr> <tr> <td>Objet de la recherche</td> <td></td> <td>Objet de la reconnaissance</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Objet de l'exploitation</td> <td>EAU.</td> <td>Utilisation</td> <td>AEP,EAU-SERVICE-PUBLIC.</td> </tr> <tr> <td>Documents</td> <td>AUTORISATION,ANALYSE-CHIMIQUE-EAU.</td> <td>Gisement</td> <td></td> </tr> </table>	Mode d'exécution		État de l'ouvrage	ACCES,EXPLOITE,PRELEV.	Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance		Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation	AEP,EAU-SERVICE-PUBLIC.	Documents	AUTORISATION,ANALYSE-CHIMIQUE-EAU.	Gisement				
Mode d'exécution		État de l'ouvrage	ACCES,EXPLOITE,PRELEV.																
Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance																	
Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation	AEP,EAU-SERVICE-PUBLIC.																
Documents	AUTORISATION,ANALYSE-CHIMIQUE-EAU.	Gisement																	

		INDICE : 0269 8X 0028 Désignation : SOURCE	Niveaux Documents scannés 0 Microfiches 1 Logs vérifiés 0 Point d'eau <input checked="" type="checkbox"/> Dans BSS-EAU <input checked="" type="checkbox"/> Dans ADES <input type="checkbox"/>																
Recueilli par BRGM Département 54 MEURTHE-ET-MOSELLE Lieu-dit, adresse LA BARAQUE Région géologique LORRAINE	Au titre de Hors Declaration Commune 560 VENEY																		
Saisi en Lambert 1 - Nord Soit en Lambert 2E Lambert-93 Longitude latitude WGS 84 (DMS) Longitude latitude WGS 84 (DD)	X/Longitude 930.39 KM 930 491 m 981 282 M 6°48'21.84"E 6.806068	Y/Latitude 94.125 KM 2 393 939 m 6 824 494 M 48°27'34.99"N 48.459719																	
Qualité du positionnement BON Altitude 340.000 m Altitude Z_BDALTI 344.0 m	Précision X/Y M025 Précision altitude ENG																		
Nature SOURCE-CAPTEE Date fin de travaux Maître d'oeuvre Propriétaire Exploitant Entrepreneur Dossier instruit par G.BOURRET Confidentialité Domaine public Références	Importance du sujet Date domaine public AQUIFÈRE DANS DES GRÈS BIGARRÉS - TERRAIN SOUS-JACENT : GRÈS VOSGIEN (CONGLOMÉRAT PRINCIPAL) - TEMPÉRATURE = 11°C, DURETÉ = 8°F, DÉBIT = 0.2 L/MN	Nombre d'observations Échantillons conservés Non Date d'instruction 01/09/1972 Date dernière mise à jour 24/07/2000																	
Code liaison Profondeur atteinte/hauteur Profondeur eau/sol Altitude origine coupe Auteur coupe	m m le m le	N° liaison Diamètre tubage (intérieur mini crépine) Type profondeur Précision altitude coupe le	mm																
<table border="1"> <tr> <td>Mode d'exécution</td> <td></td> <td>État de l'ouvrage</td> <td>ACCES.</td> </tr> <tr> <td>Objet de la recherche</td> <td></td> <td>Objet de la reconnaissance</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Objet de l'exploitation</td> <td>EAU.</td> <td>Utilisation</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Documents</td> <td></td> <td>Gisement</td> <td></td> </tr> </table>	Mode d'exécution		État de l'ouvrage	ACCES.	Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance		Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation		Documents		Gisement				
Mode d'exécution		État de l'ouvrage	ACCES.																
Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance																	
Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation																	
Documents		Gisement																	

		INDICE : 0269 8X 0052 Désignation : F1	Niveaux : 4 Documents scannés : 4 Microfiches : 0 Logs vérifiés : <input type="checkbox"/> Point d'eau : <input checked="" type="checkbox"/> Dans BSS-EAU : <input checked="" type="checkbox"/> Dans ADES : <input checked="" type="checkbox"/>																
Recueilli par : BRGM Département : 54 MEURTHE-ET-MOSELLE Lieu-dit, adresse : LA FOSSE Région géologique : LORRAINE	Au titre de : Code Minier Commune : 539 VACQUEVILLE																		
Saisi en : Lambert 2 étendu Soit en : Lambert 2E Lambert-93 Longitude latitude WGS 84 (DMS) Longitude latitude WGS 84 (DD)	X/Longitude : 930.69 KM Y/Latitude : 2395.585 KM 930 690 m 981 495 M 6°48'36.04"E 6.810012	2395 585 m 6 826 137 M 48°28'27.80"N 48.474389																	
Qualité de positionnement : BON Altitude : 303.000 m Altitude Z_BDALTI : 302.0 m	Précision X/Y : M020 Précision altitude : EPD																		
Nature : FORAGE Date fin de travaux : 05/08/2011 Maître d'oeuvre : ANTEAGROUP Propriétaire : COMMUNE Exploitant : COMMUNE Entrepreneur : RAFFNER SAS Dossier instruit par : SGRLOR_S Confidentialité : Domaine public Références : DECLARATION 1071/54	Importance du sujet	Nombre d'observations Échantillons conservés : Non	Date d'instruction : 18/11/2011 Date dernière mise à jour : 05/04/2016																
Code liaison Profondeur atteinte/hauteur : 82.000 m Profondeur eau/sol : 26.310 m le 01/08/2011 Altitude origine coupe : m Auteur coupe : M.DURENDEAU	N° liaison Diamètre tubage (intérieur mini crépine) : 182 mm Type profondeur Précision altitude coupe le 18/11/2011																		
<table border="1"> <tr> <td>Mode d'exécution</td> <td>ROTATION,EAU,MARTEAU-FOND.</td> <td>État de l'ouvrage</td> <td>CREPINE,CIMENTATION-EXTRADOS,MASSIF-GRAVIER,TUBE-METAL.</td> </tr> <tr> <td>Objet de la recherche</td> <td></td> <td>Objet de la reconnaissance</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Objet de l'exploitation</td> <td>EAU.</td> <td>Utilisation</td> <td>AEP.</td> </tr> <tr> <td>Documents</td> <td>COUPE-TECHNIQUE,COUPE-GEOLOGIQUE,DECLARATION-CODE-MINIER,PLAN-SITUATION,POMPAGE-ESSAI.</td> <td>Gisement</td> <td></td> </tr> </table>	Mode d'exécution	ROTATION,EAU,MARTEAU-FOND.	État de l'ouvrage	CREPINE,CIMENTATION-EXTRADOS,MASSIF-GRAVIER,TUBE-METAL.	Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance		Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation	AEP.	Documents	COUPE-TECHNIQUE,COUPE-GEOLOGIQUE,DECLARATION-CODE-MINIER,PLAN-SITUATION,POMPAGE-ESSAI.	Gisement				
Mode d'exécution	ROTATION,EAU,MARTEAU-FOND.	État de l'ouvrage	CREPINE,CIMENTATION-EXTRADOS,MASSIF-GRAVIER,TUBE-METAL.																
Objet de la recherche		Objet de la reconnaissance																	
Objet de l'exploitation	EAU.	Utilisation	AEP.																
Documents	COUPE-TECHNIQUE,COUPE-GEOLOGIQUE,DECLARATION-CODE-MINIER,PLAN-SITUATION,POMPAGE-ESSAI.	Gisement																	



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Régionale Grand Est
1, allée du Parc de Brabois
54500 Vandoeuvre-lès- Nancy – France
Tél. : 03 83 44 81 49