

# Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE  
*Géosciences appliquées*



***La qualité des eaux souterraines :  
processus et enjeux***

## Conclusion

Les résultats récents (concentrations en NMOR en légère hausse ou stagnantes sur les captages AEP, présence de fortes concentrations en NMOR et MOR sous le site industriel...) suggèrent plus à ce stade une tendance à la persistance de foyers de pollution dans le milieu naturel. Aussi, pour pouvoir avancer sur la gestion à terme de cette pollution, ainsi que sur la protection durable de la ressource et de l'alimentation en eau potable du secteur et, plus généralement, pour pouvoir agir de manière rationnelle face aux autres pollutions éventuelles qui pourraient survenir dans le secteur, il convient d'améliorer la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement de l'hydrosystème de la Craie (nappe de la craie + rivière du Commerce), et notamment de mieux appréhender la configuration des cheminements rapides et plus lents, des interactions entre la rivière et la nappe, et de leurs évolutions en fonction des saisons et des niveaux.

Il convient par ailleurs également de mieux synchroniser les campagnes de suivi de la NMOR et de la MOR (pour laquelle les seuils de détection et de quantification devraient pouvoir être abaissés) et de poursuivre les investigations du sous-sol au droit des sites pollués ou susceptibles de l'être, en particulier en termes de MOR sans pour autant négliger la NMOR.

## Bibliographie

- Avis de l'Anses Saisine n° 2012-SA-0172 relatif à « l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de N-nitrosomorpholine dans l'eau destinée à la consommation humaine », 14 p.
- Avis de l'Anses Saisine n° 2012-SA-0188 relatif à « l'impact éven-

tuel d'eau contaminée par la N-nitrosomorpholine (NMOR) sur la qualité sanitaire de certains produits agricoles », 12 p.

- David P.-Y. et Pennequin D., 2013 : Pollution par la morpholine et la N-nitrosomorpholine dans le secteur de Bolbec et au-delà. Avis du BRGM. Rapport BRGM/RP – 62004-FR, 95 p.
- Explore-CPGF Horizon, 2012 : Étude diagnostique du Bassin d'alimentation du Captage du Becquet, 56 p.
- Ginger, 2005 : Étude de protection des captages de St Marcel et de St Antoine la Forêt, 70 p.
- Hanin, G., 2010 : Contrôles structural et hydrogéologique sur la dynamique d'un champ captant en contexte crayeux karstique et sa sensibilité aux variations du signal climatique : implications en matière de la vulnérabilité de la source. Thèse de Doctorat, Université de Rouen/CODAH, 303 p.
- Hauchard E. et Laignel B., 2008 : Évolution morphotectonique de la marge nord-occidentale du Bassin de Paris. Zeitschrift für Geomorphologie 52 (4), 463-488.
- IDDEA, 2010 : Multitraçages à Radicatel (76). Présentation des résultats et interprétations. Rapport IC090185-4, 30 p., 4 annexes.
- IDDEA (Mai 2012) : Multitraçages BAC d'Yport. Première campagne. Résultats finaux. Rapport IC110187-2, 45 p., 11 annexes.
- IDDEA (Février 2013) : Multitraçages BAC d'Yport. Troisième campagne. Résultats finaux. Rapport IC120126-4, 45 p., 3 annexes.
- Lattelais C. (2012) : La turbidité : marqueur du fonctionnement d'un système karstique : cas du système karstique d'Yport. Master II mémoire de fin d'étude. Université de Rouen/CODAH, 62 p.
- Safège (2012) : Étude du bassin d'alimentation du captage de Radicatel. Phase 1. Délimitation du bac et étude de la vulnérabilité, 140 p.
- Safège (2012) : Étude du bassin d'alimentation du forage d'Yport. Phase 1. Délimitation du bac et étude de la vulnérabilité, 163 p.

## Le thallium dans les eaux souterraines : cas du Bajocien du Calvados

Thierry Gaillard<sup>1</sup> et Thierry Pay<sup>2</sup>.

### Origine et propriétés du thallium

Découvert en 1861, le thallium (Tl) est un métal grisâtre, mou et malléable comme le plomb, et qui possède deux valences chimiques : Tl (I) et Tl (III). Similaire au potassium, la forme monovalente est la plus stable et la plus fréquente dans l'environnement (Karlsson, 2006). Le thallium se rencontre dans la croûte terrestre entre 0,3 et 100 mg/kg, avec une forte occurrence dans les basaltes et gabbros (SHAW, 1952). Peu abondant et disséminé dans des

minéraux rares (Peter *et al.*, 2004) le thallium est plus fréquent dans les minerais de zinc, de soufre, de cuivre et de plomb (Karlsson, 2006 ; Xiao, 2001).

Hautement toxique, il est de surcroît inodore et insipide sous forme de sulfate. En France, le Code de la Santé Publique ne fixe pas de valeurs limites pour l'eau potable. Les valeurs fixées par l'USEPA sont une limite de qualité à 0,5 µg/l (*Maximum Contaminants Level Goal*) et une valeur guide à 2 µg/l (*Maximum Contaminant Level*). En janvier 2013, l'ANSES<sup>3</sup> a lancé un appel à candidatures

1. SAFEGE, Direction Ressource en Eau. Courriel : [thierry.gaillard@safège.fr](mailto:thierry.gaillard@safège.fr)

2. Conseil Général du Calvados, Direction de l'eau et de la recherche. Courriel : [Thierry.PAY@calvados.fr](mailto:Thierry.PAY@calvados.fr)

3. Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

d'experts pour étudier les risques sanitaires associés à de nouveaux paramètres chimiques, dont le thallium, dans les eaux destinées à la consommation humaine.

## Recherche du Thallium dans les captages du Calvados

C'est à l'occasion d'un contrôle sanitaire suite à une casse de réseau, que des teneurs en thallium importantes ont été mesurées par le Laboratoire Départemental Franck Duncombe (Calvados) dans la plaine de Caen. Les premiers forages concernés, réalisés en 1986, alimentent en eau potable deux syndicats d'eaux, qui sont par ailleurs adhérents d'un syndicat de production d'eau potable assurant la sécurité de l'approvisionnement en eau de tout le sud du département du Calvados depuis le début des années 1990. Ils captent l'aquifère du Bathonien en limite de captivité sous les marnes calloviennes, avec une productivité cumulée d'environ 1 200 m<sup>3</sup>/j.

Face à l'apparition de ces teneurs anormales en thallium, l'ARS<sup>4</sup> a exigé la mise en place d'un suivi renforcé en divers points du réseau. La persistance de teneurs marquées, et ce malgré l'arrêt de la production des forages incriminés, a conduit à élargir la recherche du thallium aux ouvrages situés dans le même contexte hydrogéologique. Des teneurs en thallium ont ainsi été mises en évidence dans 5 des 7 forages du syndicat de production, à des teneurs pouvant atteindre 3 µg/L.

## Contexte hydrogéologique local

La série bathonienne est ici constituée d'une alternance de niveaux de calcaires coquilliers assez grossiers, plus ou moins oolitiques appelés « Pierres », séparés par des niveaux à tendance marneuse appelés localement « Caillasses ». Elle surmonte des niveaux condensés, sur quelques mètres, correspondant au Bajocien et au Lias reposant directement sur le socle armoricain (grès et schistes) ou sur des niveaux lenticulaires de dépôts fluviatiles triasiques (Deroin *et al.*, 1999). Dans la région de Mézidon, la série jurassique repose directement sur les grès et schistes plissés en formant une discordance angulaire (Photo 1). Cette alternance lithostratigraphique donne à l'aquifère du Bathonien un caractère multicouches qui conditionne sa productivité ainsi que sa qualité. En effet, les pierres de Ranville et de Bonmesnil en partie supérieure, constituent les niveaux les plus productifs où les oolites disjointes peuvent être apparentées à un sable. À l'inverse la pierre de Caen constituant la base de la série est nettement moins aquifère.

Au cours des années 1980, la dégradation de la

qualité des eaux provenant de l'aquifère du Bathonien s'est avérée de plus en plus impactante pour l'alimentation en eau potable des régions de Falaise et Morteaux-Couliboeuf, certains points d'eau montrant déjà des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l.

La dégradation de la qualité de l'eau dans la haute vallée de la Dives, ainsi que l'arrêt des activités minières dans le bassin de Soumont - Saint-Quentin et par voie de conséquence les pompages d'exhaure des mines qui assureraient les besoins en eau de ce secteur, ont conduit le Conseil Général du Calvados à engager des recherches d'eau importantes dans les secteurs de Mézidon et Saint-Pierre-sur-Dives entre 1988 et 1990 (Allain, 1989). La qualité des données de suivi des travaux a permis de reconstituer les corps sédimentaires (Fig. 1), et de retrouver les séquences de dépôts décrites par Dugué *et al.* (1998). Ces recherches ont mis en évidence des ressources abondantes, estimées à 15 000 m<sup>3</sup>/jour, de qualité remarquable puisque exemptes de nitrates, et ce malgré un contexte de grandes cultures en tout point comparable à celui ayant conduit à la dégradation de l'aquifère quelques kilomètres plus au Sud.

L'absence de nitrates a été étudiée et ne peut être justifiée que par la présence d'un contexte dénitrifiant favorisé par le contexte hydrogéologique. La caillasse de Blainville, localement bien développée, constitue un écran de perméabilité à l'origine de phénomènes de dénitrification favorisés par l'apparition de conditions anoxiques au sein de la nappe. Une étude a mis en évidence la présence de bactéries dénitrifiantes et de pyrite lamellaire (SOGREAH, 2000). Par ailleurs un enrichissement en sulfates et une perte d'oxygène dissous ont été mesurés au droit du champ captant, traduisant l'équation de dénitrification.

C'est la mise en évidence de cette dénitrification qui



Photo 1. Discordance grès armoricains, calcaires du bajocien, Perrières - Calvados (cliché : Thierry Gaillard).

4. Agence Régionale de Santé.

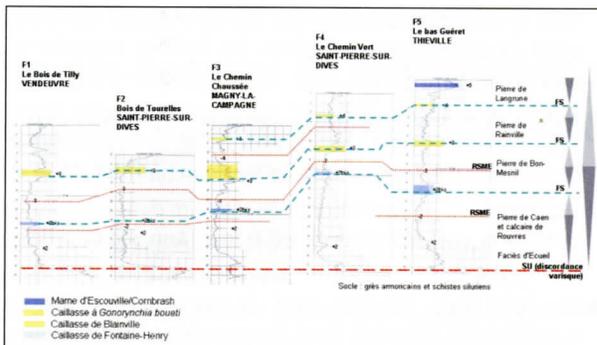


Figure 1. Corps sédimentaires du Bathonien de la plaine de Mézidon (source : diagraphies de Pierson interprétées par Thierry Gaillard).

a conduit à développer les prélèvements en eau souterraines dans cette région dans les années 1990 à partir d'un champ captant de 7 forages, d'une station de pompage et d'un réseau structurant de *feeder* d'environ 70 kilomètres, qui alimente en eau potable tout le sud du Calvados. Les ouvrages contaminés par les nitrates ont quant à eux été progressivement abandonnés donnant à ce secteur dénitrifiant un caractère stratégique essentiel pour les besoins en eau potable.

## Bilan de la recherche du Thallium dans les eaux et le sol

Dans ces conditions, la découverte de thallium dans les eaux souterraines constitue une contrainte à l'alimentation en eau potable de tout le secteur de Mézidon et Saint-Pierre-sur-Dives. Une étude a donc été lancée par le principal syndicat de production d'eau, afin d'étudier l'origine de la contamination, de délimiter la zone contaminée, de caractériser le rôle de la dénitrification naturelle dans le relargage éventuel du Thallium, et de définir le comportement du métal dans les réseaux. Seul le premier objectif sera discuté dans le cadre de cet article.

La première phase du travail, essentiellement bibliographique, a permis de caractériser l'aquifère et de proposer plusieurs pistes quant à l'origine du thallium dans l'aquifère du Bathonien (SAFEGE, 2013a) :

- origine naturelle liée à une remobilisation en contexte réducteur comme décrit dans la littérature (VINK, 1991 ; SHAW, 1952) ;
- contamination liée à un échange nappe - rivière (SAFEGE, 2000), les cours d'eau prenant naissance plus au Sud et traversant les schistes d'Urville, riches en minerai de fer ;
- origine anthropique liée soit à des dépôts, soit à la retombée des fumées des « fours à griller » permettant d'enrichir en fer le minerai extrait dans les concessions

minières.

Dans les deux derniers cas, la source de thallium était supposée contenue dans les minerais de fer du socle (schistes d'Urville) étant donné que la littérature ne mentionne pas de contamination en milieu carbonaté, alors qu'au contraire les données de pollution post-mines sont nombreuses (Casiot *et al.*, 2012 ; Duchesne, 1964 ; Jakubowska, 2007 ; Xiao, 2001...).

Ces différentes voies de contamination ont fait l'objet d'une campagne de prélèvements et d'analyses : 47 échantillons de sols et 31 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés (SAFEGE, 2013b). En sus, un échantillon de minerai de fer des mines de Soumont et 10 prélèvements en rivières (eau et sédiments) ont été traités. Tous les prélèvements se sont révélés exempts de thallium. La piste d'un lien avec les schistes d'Urville et autres minéralisations du socle a donc été exclue, d'autant que les analyses des horizons pédologiques sur schistes et grès n'ont révélé aucune concentration « atypique » par rapport aux données bibliographiques (< 1,5 mg/kg MS, Tremel, 1996).

L'attention avait été heureusement portée sur des dépôts peu décrits, correspondant à la discordance varisque du Jurassique sur les grès armoricains (Photo 2). En effet, des horizons organiques, correspondant vraisemblablement à des milieux palustres, ainsi que des paléosols plus classiques sont associés au faciès d'écueil définis comme des calcarénites grossières et bioclastiques (Bigot, 1935, Deroin *et al.*, 1999). Les concentrations mesurées à ce niveau sont toutes supérieures à 10 mg/KgMS, en plusieurs endroits du bassin montrant la discordance (Perrières, Villedieu-lès-Bailleuls, Sassy).

Les ouvrages captant les eaux infra-Fontaine-Henry (sous la caillasse éponyme) sont tous affectés par la présence de thallium, à des teneurs variant de 0,7 à



Photo 2. Horizon organique dans le faciès d'écueil du Bajocien (cliché : Thierry Gaillard).

4,7 µg/L, tandis que les eaux du Trias en sont exemptes (< 0,1 µg/L sur 10 échantillons). Au-dessus de la caillasse de Fontaine-Henry, les teneurs diminuent (< 0,7 µg/L sur 5 échantillons). Dans un piézomètre captant l'intégralité de l'aquifère, un net gradient vertical a été mis en évidence, les concentrations variant de 0,9 à 4,7 µg/L vers la base.

### Conclusion

L'identification de la source de thallium dans la discordance varisque souligne l'importance d'une approche géologique de terrain solide. Le stock de thallium est difficile à évaluer en l'état et les échanges matrice-phase aqueuse restent à caractériser.

Le travail de caractérisation hydrogéologique du réservoir, et notamment l'analyse séquentielle des dépôts selon l'approche de Dugué *et al.*, (1998) n'aurait pas été possible sans les excellentes descriptions des logs de forages. Les diagraphies gamma-ray ont permis en outre de mettre en évidence le niveau de la caillasse de Fontaine-Henry, difficile à identifier en forage destructif. Sans ces données, il aurait été impossible de décrire les séquences et de mettre en évidence une stratification du thallium dans les eaux du Bathonien, renforçant ainsi les résultats d'analyses des niveaux argileux et organiques de la discordance.

Enfin, du point de vue sanitaire, une étude épidémiologique serait à mener sur ce territoire étant donné que l'exposition remonte à la mise en service des ouvrages.

### Références bibliographiques

- Allain G., 1989 : Programme départemental de recherche d'eau, Région Sud. Recherche d'eau par forage. Réalisation de cinq forages d'essai. Compte rendu technique. Conseil Général du Calvados.
- Bigot A., 1935 : Les récifs bathoniens de Normandie. Bulletin de la Société Géologique de France, 5e série, tome 4, fasc. 8-9, 697-736, 4 fig., pl. 37-43
- CNRC (Centre national de recherches Canada), 1982 : Fiches de données sur certains éléments toxiques. CNRC, Comité associé sur les critères scientifiques concernant l'état de l'environnement, Ottawa.
- Casiot C, Egal M, Bruneel O, Verma N, Parmentier M, Elbaz-Poulichet F., 2012 : Predominance of aqueous Tl(I) species in the river system downstream from the abandoned Carnoulès mine (Southern France). Environ. Sci. Technol. 2011 Mar 15, 45(6), 2056-64.
- Deroin J.P., Lerouge G., Bargier G., Vernhet Y., Coutard J.P., Ozouf J.C., Langevin C., 1999 : Notice explicative, carte géologique de la France (1/50000), feuille de Mézidon (146). BRGM Ed.
- Duchesne, J. C., 1964 : Présence de thallium dans les sulfures de fer de la mine de Pallières (Gard, France). Ann. Soc. Géol. Belg., Mem. 1964, 87, 1-17.
- Dugué O., Fily G., Rioult M., 1998 : Le Jurassique des Côtes du Calvados. Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum, 85, 2.
- Jakubowska M., Pasiieczna A., Zembruski W., Swit Z., Lukaszewski Z., 2007: Thallium in fractions of soil formed on flood-plain terraces. Chemosphere, Volume 66, Issue 4, January 2007, 611-618.
- Karlsson U., 2006: Environmental levels of thallium. Influence of redox properties and anthropogenic sources. Örebro Studies in Chemistry 5, Universitetsbiblioteket 2006.
- Peter A.L.J., Viraraghavan T., 2005: Thallium: a review of public health and environmental concerns, Environment International, 2005, 31(4), 493-501.
- SAFEGE, 2000 : Impact des pompages des forages F1 et F8 dans la région de Percy-en-Auge. Rapport d'étude 20/SK/1278, juillet 2008.
- SAFEGE, 2013a : Étude de l'origine du thallium dans les eaux souterraines et les réseaux. Phase 1 : compilation documentaire. Auteurs : Boccognano A., Gaillard T.
- SAFEGE, 2013b : Étude de l'origine du thallium dans les eaux souterraines et les réseaux. Phase 2 : campagnes de mesures. Auteurs : Boccognano A., Gaillard T., Bernard A.
- Shaw D. M., 1952 : The geochemistry of thallium. Geochimica & Cosmochimica Acta, vol. 2, Issue 2, 118-154.
- SOGREAH, 2000. : Étude des mécanismes de dénitrification naturelle de l'aquifère bathonien dans la région de Saint-Pierre-sur-Dives. Rapport 100.641R3.
- Tremel A., 1996 : Transfert du thallium du sol vers la plante. Caractérisation du risque dans les agrosystèmes. Thèse I.N.P.L. Nancy, 221 p.
- Vink B.W., 1993 : The behaviour of thallium in the (sub) surface environments in terms of Eh and pH. Chemical geology, 1993, 109, 1-4, 119-123.
- Xiao T., 2001 : Environmental impact of thallium related to the mercury-thallium-gold mineralization in southwest Guizhou province, China. Thèse présentée à l'Université de Chicoutimi (Canada).