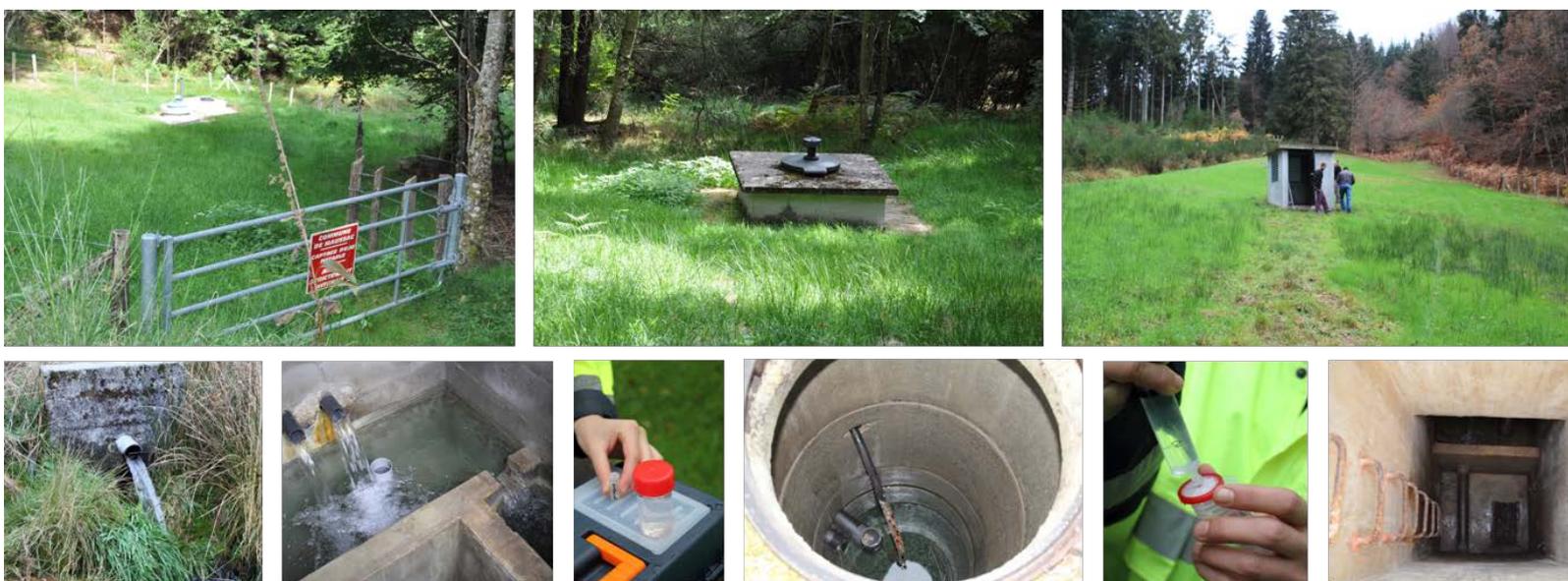


# RAPPORT FINAL :

## LA PROBLEMATIQUE DE L'ALUMINIUM DANS LA RESSOURCE EN EAU POTABLE DU PLATEAU DE MILLEVACHES



---

Rémy Buzier, Delphine Devillers, François Bordas et Gilles Guibaud

---

Avec la collaboration de :  
Adeline Charriau, Sophie Lissalde et Emmanuel Joussein

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les collectivités, les structures et les personnes qui nous ont reçus et se sont rendues disponibles pour nous aider à réaliser cette étude :

- Les communes participantes : Bonnefond, Lestards, Meymac, Peyrelevade et Saint-Sulpice-les-Bois, ainsi que la société SAUR pour l'accès aux captages étudiés,
- Les membres du comité de pilotage : ARS Limousin, Conseil Départemental de la Corrèze, EPIDOR, EPBV, PNR Millevaches, mairie de Meymac,
- L'Agence de l'Eau Adour-Garonne pour sa contribution financière,
- Le personnel technique du GRESE ayant participé à cette étude : Karine Cléries, Emmanuelle Ducloux, Thierry Hak et Patrice Fondanèche,
- Les étudiants de 2<sup>ème</sup> année de master « Ingénierie et Gestion de Eau et de l'Environnement » : Alexia Auvity, Philippe Lavaud, Thibaut Normand, Cécile Padey, Jonathan Guérin ; Jennifer Lefebvre et Christine Lekah,
- Ana Frutos, étudiante de 2<sup>ème</sup> année du master « Qualité et Traitement de l'Eau »,
- Les différents interlocuteurs des ARS des autres régions, qui ont bien voulu répondre à nos questions, et ont pris le temps de nous détailler leur situation.

# TABLE DES MATIERES

I.	Introduction.....	1
II.	Problématique générale de l'Aluminium .....	3
II.1	Source d'aluminium dans l'environnement humain et aquatique .....	3
II.1.1	Apport naturel.....	3
II.1.2	Apport anthropique.....	4
II.2	Propriétés de l'aluminium dans les eaux : sa spéciation.....	4
II.3	Exposition et toxicité chez l'homme.....	6
II.3.1	Exposition .....	6
II.3.2	Ingestion et diffusion .....	7
II.3.3	Toxicité .....	8
III.	L'Aluminium dans les captages du plateau de Millevaches .....	10
III.1	Contexte général .....	10
III.1.1	Géologie.....	10
III.1.2	Pédologie.....	10
III.1.3	Climatologie.....	11
III.1.4	Sylviculture .....	11
III.2	Contexte AEP : déroulement de l'étude .....	12
III.2.1	Présentation des captages .....	12
III.2.3	Prélèvements et analyse des eaux .....	13
III.2.4	Prélèvements et caractérisation des sols issus de quelques captages.....	14
IV.	Résultats et Discussion .....	16
IV.1	Point en distribution.....	16
IV.2	Qualité générale de l'eau des captages .....	18
IV.2.1	Paramètres généraux .....	18
IV.2.2	COT .....	18
IV.2.3	Paramètres liés à l'équilibre calco-carbonique.....	19
IV.3	Problématique aluminium.....	20
IV.3.1	Teneurs en aluminium .....	20
IV.3.2	Influence de la pédologie .....	22
IV.3.4	Influence de la pluviométrie.....	23
IV.3.5	Influence du dégel.....	27
IV.4	Chimie de l'aluminium dans les eaux du plateau .....	28
IV.4.1	Simulation de la spéciation de l'aluminium .....	28
IV.4.2	Evaluation de la spéciation par échantillonnage passif DGT.....	29
IV.5	Problématique similaire dans d'autres régions.....	30
V.	Conclusion.....	32

## TABLE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Formes particulières et solubles de l'aluminium dans l'eau (Rosin et al., 1990) ..5	
<b>Figure 2</b> : Diagramme de répartition des espèces hydrolysées de l'aluminium en fonction du pH. Concentration totale en Al = 0,5 mg/L..... 6	6
<b>Figure 3</b> : Absorption et libération de protons dans le système sol-plante et dans les processus d'ammonification et de nitrification. .... 12	12
<b>Figure 4</b> : Prélèvement de sol sur le site de Drouillat (a) Horizon A (0-4 cm) et B(4-35 cm) - (b) Horizon C (35-50 cm)	
<b>Figure 5</b> : Valeurs moyennes ( $\pm$ écart type) de paramètres enregistrés au niveau du captage et de la fontaine de Lestards entre le 2 mars et le 23 novembre 2015..... 17	17
<b>Figure 6</b> : Corrélation de la teneur en aluminium dissous au niveau du captage et de la fontaine de Lestards ..... 17	17
<b>Figure 7</b> : Teneur en COD (mg/L) en fonction du temps, selon les captages (référence de qualité à 2 mg/L)..... 19	19
<b>Figure 8</b> : Valeurs moyennes ( $\pm$ écart type) de pH et de conductivité enregistrées aux différents captages..... 20	20
<b>Figure 9</b> : Libération de l'aluminium en $\mu\text{g}/\text{kg}$ en fonction du volume percolé dans les différents horizons et dans le sol reconstitué (captage de Drouillat) ..... 23	23
<b>Figure 10</b> : Variation de la teneur en aluminium et de la pluviométrie, pour le 1 <sup>er</sup> groupe de captages, en fonction du temps ..... 24	24
<b>Figure 11</b> : Variation de la teneur en aluminium et de la pluviométrie, pour le 2 <sup>ème</sup> groupe de captage, en fonction du temps ..... 24	24
<b>Figure 12</b> : Schéma d'explication de la teneur en aluminium dans les eaux en milieu boisé ..... 26	26
<b>Figure 13</b> : Schéma d'explication de la teneur en aluminium dans les eaux en prairie ..... 26	26
<b>Figure 14</b> : Concentration en aluminium et température en fonction du temps. .... 28	28
<b>Figure 15</b> : Répartition de l'aluminium dissous calculée à partir de la composition moyenne de chaque captage (cf Annexe 2). Al-MO représente les complexes avec la matière organique. Seules les espèces présentes à plus de 1% sont représentées ..... 29	29

## TABLE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Principaux minéraux alumineux du sol..... 3	3
<b>Tableau 2</b> : Localisation et population desservie par les captages faisant l'objet de cette étude et du point suivi en distribution..... 13	13
<b>Tableau 4</b> : Epaisseur de chaque horizon de sol, épaisseurs et masses de sol sec placées dans chaque colonne..... 16	16
<b>Tableau 5</b> : Teneurs moyennes en aluminium sur un an dans les 6 captages..... 21	21
<b>Tableau 6</b> : Concentration en aluminium en et $\text{pH}_{\text{KCl}}$ des sols ..... 22	22

## **I. Introduction**

L'aluminium est contenu naturellement dans une partie des roches et des sols où il représente, en moyenne à l'échelle planétaire, 8% de la masse des matériaux. A l'exception du bassin de Brive, la région Limousin est principalement située sur un socle géologique cristallin sur lequel se développe des sols bruns acides ou alocrisols. Ces sols se caractérisent par un faible taux de bases échangeables (Na, K, Ca, Mg) et une quantité d'aluminium de plusieurs pourcents. Une partie de cet aluminium est sous forme échangeable et peut voir sa mobilité, dans les sols ou vers les cours d'eau, accrue en fonction de facteurs extérieurs naturels ou anthropiques.

Si les eaux de surface, tout comme les eaux de sub-surface, présentent un caractère acide et sont peu minéralisées, ce qui est le cas des eaux issues de socles cristallins comme en Limousin, l'aluminium reste en solution. Celui-ci peut être sous forme libre ou associé à des ligands comme la matière organique naturelle, les fluorures ou les phosphates. Ainsi, une ressource en eau peut contenir « naturellement » plusieurs centaines de µg/L d'aluminium et dépasser la référence de qualité réglementaire en termes de potabilisation. Les arrêtés du Code de la santé publique de janvier 2007 parus au JO du 06/02/2007, fixent pour l'aluminium total une référence de qualité à 200 µg/L pour l'eau distribuée.

Selon diverses études, présentées dans la suite du rapport, un risque chimique à long terme existe potentiellement au niveau de l'aluminium. Prenant en compte les inquiétudes sociétales liées à ce risque chimique à long terme, plusieurs collectivités françaises ont récemment substitué les sels d'aluminium (utilisés pour éliminer les matières colloïdales des eaux à potabiliser durant les traitements de coagulation-floculation) par, entre autres, des sels de fer.

Concernant l'alimentation en eau potable (AEP) sur le périmètre du PNR de Millevaches, une répartition hétérogène de la population dans des villages de faible dimension induit l'existence de nombreux captages d'AEP de petites capacités. Les coûts d'entretien et de traitement de l'eau sur ces petits captages dépassent souvent les budgets des communes qui distribuent donc une eau, au mieux, juste désinfectée à l'eau de Javel (hypochlorite de sodium) et donc potentiellement contaminée par des éléments chimiques d'origines naturelles, comme l'aluminium, issus de la percolation de l'eau dans les sols.

Une première synthèse concernant l'état de la qualité des eaux destinées à l'alimentation vis-à-vis de l'aluminium sur la partie corrézienne du PNR Millevaches a été discutée lors

du second COPIL en Février 2015 (cf. Annexe 1). On retiendra que la quantité de données disponibles de 2004 à 2014 par l'ARS UT19 sur chaque captage rend l'exploitation statistique peu robuste. En effet, l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution prévoit un prélèvement tous les cinq ans pour une ressource ayant un débit inférieur à 10 m<sup>3</sup>/j. Quelques indicateurs peuvent cependant être calculés : 21 communes sont concernées par des captages dépassant la référence de qualité de 200 µg/L pour l'aluminium, 15 UDI (zone de distribution d'une eau de qualité homogène) sur 54 présentent des non-conformités pour le paramètre Al soit 27,8%, ce qui représente 6,2 % (env. 1400 personnes résidants permanents) de la population corrèzienne du PNR Millevaches concernée par la problématique Al.

Pour améliorer la connaissance de cette problématique et plus globalement de la qualité physico-chimique de la ressource en eau pour les petits captages, le laboratoire GRESE de l'Université de Limoges, sous la demande du PNR Millevaches et le financement de l'Agence de l'eau Adour-Garonne a mené une étude d'un an (novembre 2014 - novembre 2015) sur les teneurs en aluminium de plusieurs captages d'eau potable sur le plateau de Millevaches, en mettant en place un suivi hebdomadaire à bimensuel. L'accès aux captages étudiés a été possible grâce aux communes participantes : Bonnefond, Lestards, Meymac, Peyrelevade et Saint-Sulpice-les-Bois, ainsi qu'à la société SAUR. Afin de mener à bien ce projet, un comité de pilotage, composé de l'ARS Limousin, du Conseil Départemental de la Corrèze, d'EPIDOR, de l'EPBV, du PNR Millevaches, de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, de la mairie de Meymac et du GRESE a été mis en place. Ce comité de pilotage s'est réuni à 3 reprises en septembre 2014, février 2015 et septembre 2015 (cf. annexe 1).

Ce rapport final rend compte des résultats du suivi physico-chimique des 6 captages de novembre 2014 à novembre 2015, ainsi qu'un point en distribution (entre mars et novembre 2015). Il cherche à déterminer les potentiels facteurs d'influence sur les teneurs en aluminium (e.g. environnement immédiat des captages, qualité de sols, pluviométrie, température extérieure). Ce rapport fait aussi état de quelques résultats obtenus par le GRESE sur l'outil DGT. Il présente également un début de comparaison avec des captages AEP à dépassements de référence de qualité en aluminium, dans des zones françaises au contexte géologique similaire à celui du Limousin, et fait état des interventions potentielles menées dans ces zones via les ARS locales.

## II. Problématique générale de l'Aluminium

### II.1 Source d'aluminium dans l'environnement humain et aquatique

#### II.1.1 Apport naturel

L'aluminium (Al) est le troisième élément chimique le plus abondant de la croûte terrestre (8%) après l'oxygène et le silicium. Il est le treizième élément du tableau périodique, il appartient à la famille des métaux pauvres. L'aluminium est un réducteur fort, au contact de l'air il s'oxyde en alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Il possède deux degrés d'oxydation 0 et +III. Dans la nature, il se trouve essentiellement sous le degré d'oxydation +III. Il se trouve donc à l'état naturel sous forme de différentes combinaisons avec l'oxygène. Les minéraux principaux contenant de l'aluminium sont les alumino-silicates (tableau 1).

**Tableau 1:** Principaux minéraux alumineux du sol

Constituants	Formule chimique
<b>Kaolinite</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
<b>Vermiculites</b>	$(\text{Mg,Ca})_{0,35}(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
<b>Smectites</b>	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
<b>Feldspaths</b>	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ (orthose) $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albite)
<b>Plagioclases</b>	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anorthite)
<b>Micas</b>	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (biotite); $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (muscovite)
<b>Illite</b>	$(\text{K})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (illite)
<b>Chlorites</b>	$(\text{Fe,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Les granites contiennent de nombreux micas et feldspaths. L'altération de la roche mère forme l'arène granitique puis, avec une dégradation plus avancée, des argiles. Cela explique la présence de l'aluminium dans les sols granitiques.

Différents paramètres accentuent la mobilité naturelle de l'aluminium des sols vers l'eau. Les facteurs anthropiques ont été fortement étudiés dans les années 90, car ils ont conduit à un fort dépérissement forestier ou à la mort de la vie aquatique comme en Europe du

Nord ou en France dans le massif vosgien (Christophersen et al., 1990, Dambrine et al., 1998). On citera les pluies acides dues aux rejets atmosphériques de l'industrie lourde (combustion des énergies fossiles), les dépôts secs atmosphériques issus de l'industrie ou de l'urbanisation, ou encore la sylviculture avec des rotations rapides de certaines espèces comme l'Epicéa.

Des études plus récentes incitent à penser que des facteurs naturels comme une forte pluviométrie, la présence de nombreuses zones humides à caractère acide et riches en matières organiques (tourbières, prés paratourbeux...), la géochimie des zones humides avec les phases d'oxydation et de réduction du fer, peuvent aussi augmenter la mobilité de l'aluminium des sols vers les eaux naturelles (Guibaud et Gauthier, 2003 & 2005).

### **II.1.2 Apport anthropique**

L'aluminium est extrait de la bauxite sous forme d'alumine ( $Al_2O_3$ ), puis l'alumine est réduite par électrolyse sous forme d'aluminium pur.

Il est utilisé en grande partie pour la fabrication d'alliage (Alpax, Duralumin), pour ses propriétés physico-chimiques (léger et inaltérable à l'air humide), matériaux pour l'aéronautique, l'automobile et la construction navale et ferroviaire.

L'aluminium est entré dans le quotidien de tous : papier d'aluminium, canette en aluminium, ustensile de cuisine, cadre de fenêtre... Il entre également sous forme d'hydroxydes dans la composition de certains produits cosmétiques, tels que les anti-transpirants et les dentifrices. Pour le domaine qui nous concerne, il est surtout utilisé sous forme polymérisée (polychlorosulfates) en tant que coagulant pour la potabilisation de l'eau.

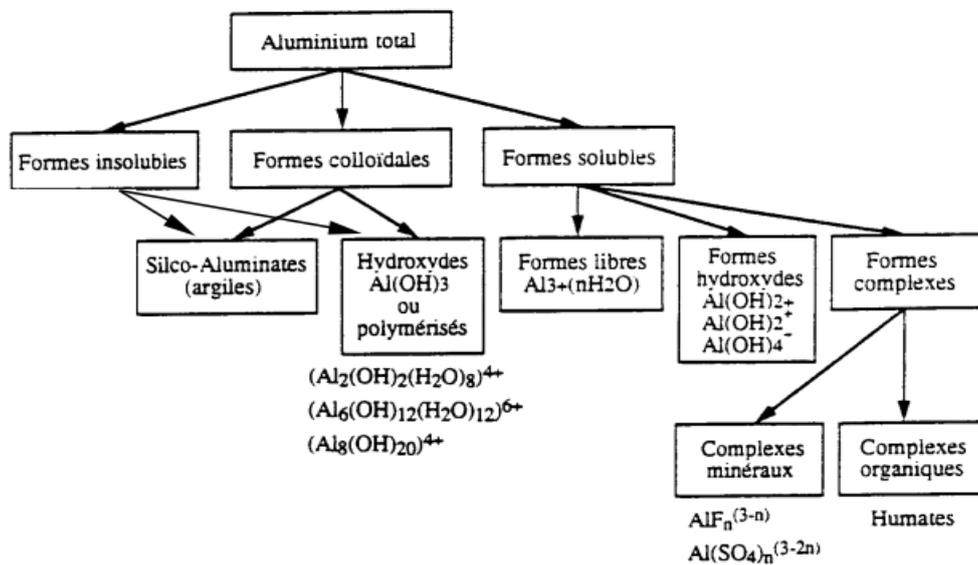
Cette omniprésence de l'aluminium dans l'environnement humain, nous pousse à savoir quels sont ses impacts sur la santé.

## **II.2 Propriétés de l'aluminium dans les eaux : sa spéciation**

La spéciation de l'aluminium correspond aux différentes formes dans lesquelles il peut se trouver dans les conditions du milieu (pH, température, organismes vivants, composition du sol, de l'eau...). Selon sa forme, il n'aura pas la même incidence sur le milieu.

L'aluminium est présent dans les eaux naturelles sous forme de particules d'argiles insolubles en suspension et de sels solubles et insolubles. La Figure 1 résume les différentes formes de l'aluminium pouvant être retrouvées dans les eaux naturelles. Leur grand nombre montre la complexité de la chimie de l'aluminium dans l'eau. Toutes ces

formes de l'aluminium sont présentes dans les eaux de percolation. Lorsque l'aluminium est en solution, il influence fortement la qualité chimique et biologique des eaux.

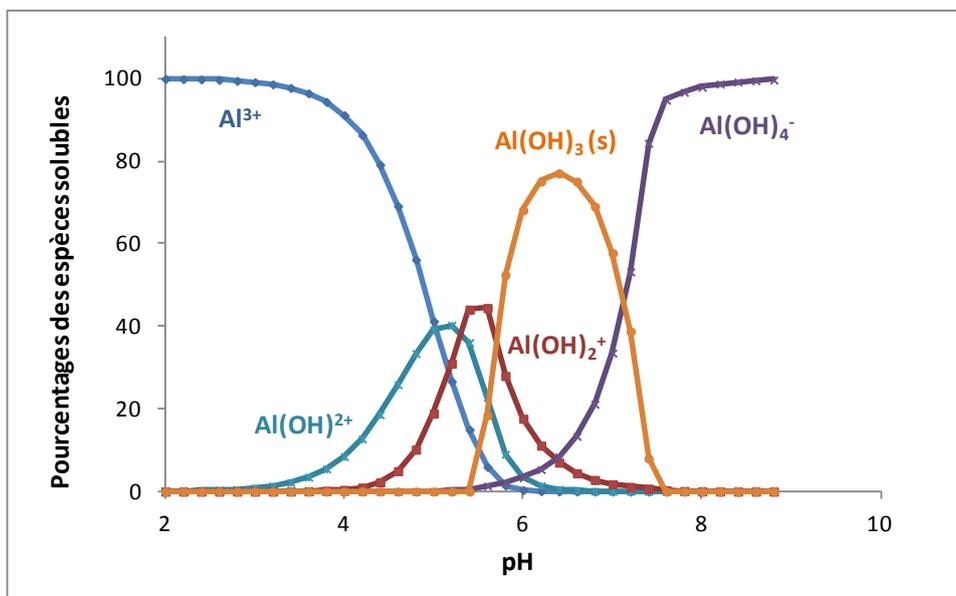


**Figure 1 :** Formes particulières et solubles de l'aluminium dans l'eau (Rosin *et al.*, 1990)

Dans les eaux naturelles, la forme dite « libre » de l'aluminium ( $Al^{3+}$ ) est capable de s'associer (par des mécanismes d'adsorption) à la surface des colloïdes (particules de taille de l'ordre de  $10^{-9}$  m à  $10^{-7}$  m) tels que les argiles ou la matière organique. Ainsi, il s'agit de la forme la plus mobile de l'aluminium.

Par ailleurs, l'aluminium est capable de se complexer avec les ions fluorures ( $F^-$ ), hydroxydes ( $OH^-$ ), sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) et phosphates ( $PO_4^{3-}$ ) ainsi qu'avec les composés organiques solubles.

La présence de ces différentes formes est conditionnée principalement par le pH.



**Figure 2** : Diagramme de répartition des espèces hydrolysées de l'aluminium en fonction du pH. Concentration totale en Al = 0,5 mg/L

D'après la Figure 2, lorsque le pH devient supérieur à 4, l'aluminium libre ( $Al^{3+}$ ) réagit avec les ions hydroxydes ( $OH^-$ ), dont la concentration augmente avec la valeur de pH. Il forme alors des hydroxydes d'aluminium au fur et à mesure que le pH augmente ( $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_3$ ) jusqu'à précipitation sous forme d'aluminium solide amorphe  $Al(OH)_{3(s)}$ , puis forme des espèces anioniques tel que  $Al(OH)_4^-$  quand le pH est supérieur à 7.

Le pH contrôle la solubilité ou la mise en solution de l'aluminium dans une eau pure. Or en contexte naturel, il existe une grande diversité de particules, de molécules et d'ions (organiques et minéraux) qui peuvent influencer les quantités d'aluminium en solution. En effet, l'aluminium a la capacité de s'adsorber sur la surface des particules, ou de se complexer avec des anions et avec la matière organique. Ces phénomènes de complexation et d'adsorption conditionnent la spéciation de l'aluminium en milieu naturel, et ainsi sa mobilité et sa toxicité.

## **II.3 Exposition et toxicité chez l'homme**

### **II.3.1 Exposition**

En 2014, l'EFSA estime que la dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) est de 1mg/kg/semaine. Néanmoins, l'étude EAT 2 (Etude de l'Alimentation Totale publiée par l'Anses, 2011) menée par l'Anses a montré que l'exposition moyenne française était en dessous de cette DHTP.

En effet, elle a pu estimer l'exposition moyenne de la population française à 0,28 mg/kg/semaine chez les adultes, et 0,42 mg/kg/semaine chez les enfants (de 3 à 17 ans). Après examen de l'ensemble des données de cette étude, il a été relevé que seulement 0,2% des adultes dépassent la DHTP contre 1,6% chez les enfants. Cependant, dans son rapport EAT 2 (2011) à la page 43, l'ANSES affirme par rapport à l'aluminium dans l'alimentation qu' "**il convient donc de poursuivre les efforts afin de réduire les contaminations et les expositions.**"

Il existe trois modes d'expositions :

- par ingestion : via l'alimentation (conservateur, colorant, additif...), l'eau de boisson et certains médicaments ;
- par inhalation : essentiellement en milieu industriel via les fumées et les poussières ;
- par voie cutanée : via les pommades, les anti-transpirants, les crèmes solaires...

Une fois dans le corps l'aluminium ne subit aucun métabolisme, *i.e.* il n'est pas transformé. Il est éliminé selon l'Ineris à 83% par les urines et à 1,8% dans les fèces. Son absorption gastro-intestinale est faible : de 0,1 à 1%.

L'aluminium se fixe principalement dans les os, le foie, les testicules, les reins, le cerveau. Les valeurs physiologiques varient de 1,1 à 1,9 µg/L dans le plasma, de 1 à 3 µg/g (poids humide) dans le foie, de 1 à 3 µg/g (poids sec) dans la matière grise cérébrale et de 56 à 215 mg/kg (poids sec) dans les poumons selon l'Ineris.

### **II.3.2 Ingestion et diffusion**

- L'alimentation

Les aliments contiennent naturellement de l'aluminium mais les teneurs peuvent être augmentées dans les produits transformés par l'emploi de différents additifs qui contiennent de l'aluminium et/ou contaminés par des emballages en aluminium. Selon un rapport de l'Ineris (2003), l'alimentation serait à 95% responsable de l'exposition à l'aluminium.

L'aluminium sous sa forme libre  $Al^{3+}$  est la plus mobile et la plus toxique. L'absorption de l'aluminium par ingestion peut être augmentée s'il est ingéré avec des acides carboxyliques tels que l'acide citrique et l'acide lactique. En effet, ces acides facilement assimilables par le corps sont des complexants de l'aluminium ainsi ils peuvent servir de transporteur actif de l'aluminium.

- L'eau de boisson

Il existe une référence de qualité, donnée par l'arrêté du 11 janvier 2007, de 200 µg/L pour l'eau potable. Cette valeur correspond à moins de 3% de la dose hebdomadaire tolérée.

Cette référence permet d'estimer le bon fonctionnement de la filière de traitement. En effet, l'aluminium est utilisé principalement sous forme de polymères d'aluminium, de formule générale  $Al_n(OH)_n(Cl)_p(SO_4)_q$ , pour la coagulation-floculation. Des dépassements peuvent être tolérés si :

- ils sont temporaires, des mesures correctives sont prises pour rétablir la qualité de l'eau ;
- il n'existe aucun autre moyen raisonnable de maintenir la distribution d'eau ;
- il est fixé et appliqué une valeur limite dérogatoire assurant le respect de la santé publique pendant cette période.

- Les médicaments

Pour soulager les brûlures d'estomac, un antiacide est souvent utilisé. Composé de substances basiques, ce médicament agit localement en neutralisant les acides sécrétés par l'estomac. Ces substances basiques sont souvent des hydroxydes de magnésium et/ou des hydroxydes d'aluminium car ces derniers possèdent un caractère basique relativement faible. Une étude menée par G. Pineton de Chambrun (2014), a montré qu'ils pouvaient entraîner des inflammations intestinales.

L'eau de dialyse et les vaccins peuvent constituer un moyen de contamination car ils contiennent une quantité non négligeable d'aluminium.

- Voie cutanée

L'exposition par voie cutanée se fait essentiellement via les cosmétiques. En effet, selon une étude d'Excley en 2013, l'utilisation d'anti-transpirant exposerait chaque jour l'utilisateur à environ 2g d'aluminium, cela peut monter à 5g avec l'utilisation de crème solaire.

### **II.3.3 Toxicité**

- Toxicité aiguë

Elle survient pour de fortes doses. Chez l'homme les cas d'intoxications aiguës par voie orale sont rares, souvent accidentels ou suicidaires par ingestion de phosphore d'aluminium (rodenticide). L'aluminium peut provoquer des œdèmes pulmonaires, tachycardies, hypotensions, dysfonctionnements hépatiques, protéinuries, anuries (Ineris,

2003; 2012). Néanmoins il n'est pas certain que ces altérations soient uniquement dues à l'aluminium.

- Toxicologie chronique

Dans le cadre de cette étude, les doses d'aluminium retrouvées dans les captages ne peuvent engendrer qu'une toxicité chronique.

- Inhalation :

Des cas de fibroses ont été décelés chez des personnes exposées à des poussières et poudres d'aluminium. Cependant, il est très probable que la fibrose soit due à l'exposition concomitante à d'autres composés, comme la silice.

Il a été observé chez des soudeurs exposés à de l'aluminium une augmentation des cas de bronchite chronique, mais il est difficile de relier cette pathologie à l'aluminium car ils sont également exposés à du fer et de l'acier inoxydable.

Des travailleurs d'une fonderie exposés pendant au moins 6 ans à des concentrations de 4,6 à 11,5 mg/m<sup>3</sup> d'aluminium montrent, par rapport à un groupe témoin, une altération significative des tests de performance évaluant le temps de réaction et la coordination oculomotrice. Cependant parmi les nombreuses études disponibles, le manque d'un suivi adéquat de l'exposition et les différents types d'expositions possibles à l'aluminium rendent difficile la comparaison et la conclusion quant au potentiel neurotoxique de l'aluminium inhalé chez les travailleurs (Ineris, 2003; 2012).

- Ingestion :

L'aluminium est suspecté de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer. En effet, sur 13 études épidémiologiques recensées par Flaten (2001) examinant l'association potentielle entre l'exposition orale à l'aluminium via l'eau de boisson et la maladie d'Alzheimer, 9 ont montré statistiquement un lien. Une autre étude de Forbes et McLachlan (1996) suggère que la relation entre la maladie d'Alzheimer et la présence d'aluminium dans l'eau de boisson pourrait exister à de hauts niveaux d'exposition pour des concentrations supérieures à 1 mg/L.

Selon l'Ineris (2003; 2012), d'autres pathologies neurologiques comme la sclérose latérale amyotrophique ou la démence parkinsonienne ont pu être reliées à l'accumulation d'aluminium dans le cerveau. Le lien entre l'ingestion d'aluminium et ces différentes pathologies reste contradictoire en fonction des études menées.

- Milieu hospitalier :

De nombreux cas d'encéphalopathie (problèmes d'élocution, développement de démences...) ont été décelés chez des insuffisants rénaux subissant des dialyses avec une eau de dialyse ayant une concentration en aluminium supérieur à 200 µg/L. Néanmoins rien n'a été observé chez des patients traités avec une concentration inférieure à 50 µg/L. L'aluminium peut être responsable d'ostéomalacie (décalcification osseuse), chez des insuffisants rénaux traités avec de l'hydroxyde d'aluminium à des teneurs supérieures à 30 µg/L (Ineris).

### **III. L'Aluminium dans les captages du plateau de Millevaches**

#### **III.1 Contexte général**

Sur le plateau de Millevaches, la libération d'aluminium par les sols et sa présence dans les eaux sont favorisées par des conditions géologiques, pédologiques et sylvicoles particulières.

##### **III.1.1 Géologie**

L'aluminium est davantage disponible et donc mobilisable à des pH faibles (< 5,5), c'est-à-dire, dans des milieux acides. Ainsi, de par leur propension à générer des eaux acides, certains contextes géologiques et sylvicoles seront plus propices à la libération d'aluminium.

Le plateau de Millevaches repose sur un socle cristallin à base de granites ou de gneiss principalement. Le granite est une roche magmatique à texture grenue (petits grains parmi lesquels on retrouve du quartz formé essentiellement de silice, de feldspath et de micas noirs et blancs en feuillets). Ce contexte géologique entraîne la libération d'acide silicique ( $\text{Si(OH)}_4$ ) qui contribue à donner au milieu son caractère acide.

##### **III.1.2 Pédologie**

Le plateau de Millevaches présente une dominante d'alocrisols, qui sont des sols acides, développés à partir d'altérites de grès, de schistes ou de roches cristallines modérément acides, que l'on observe le plus souvent sous forêts ou végétation naturelle (référentiel pédologique, 2008). Ils ont la particularité d'être dominés par la présence de composés minéraux de l'aluminium donc pouvant passer en solution. Ces sols présentent un taux de saturation inférieur à 30% et l'aluminium représente entre 20 et 50% de leur capacité d'échange cationique (CEC). L'aluminium lié à la matière organique et à la phase minérale

avec laquelle la solution du sol est en contact, va être entraîné par l'eau qui percole (lessivage du sol). La complexation de l'aluminium avec des molécules organiques de petites tailles ou avec des ions inorganiques (phosphates, sulfates, fluorures) va faciliter la migration de l'aluminium dans les eaux.

De par les caractéristiques géologiques et climatiques du territoire, les zones humides (ZH) ont une place prépondérante. Elles se caractérisent par des eaux stagnantes, avec un pH variant en fonction du marnage de l'eau et des changements de potentiel redox. Sur le territoire, les tourbières sont acides et à sphaignes. Les végétaux caractéristiques des zones humides peuvent intervenir sur l'acidité du milieu. En effet, les plantes telles que les sphaignes sont capables de libérer par leurs racines des protons ( $H^+$ ) pour altérer la roche. Cette attaque a pour but de récupérer les nutriments nécessaires à leur développement mais entraîne l'acidification du sol. Ainsi, l'aluminium peut être remobilisé au gré des conditions climatiques et de l'écosystème. Sur les 89 300 hectares du plateau de Millevaches, 6 100 hectares sont des zones humides, soit 6,8 % de la surface, avec une taille moyenne de 0,68 ha.

### **III.1.3 Climatologie**

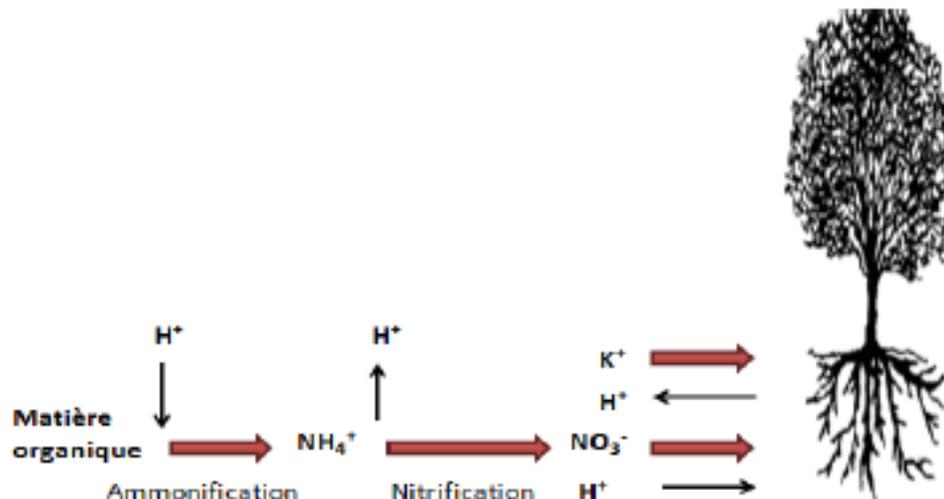
Le climat est de type océanique largement modifié par l'altitude. Le plateau de Millevaches a un climat pluvieux et frais, influencé par l'océan Atlantique et le relief. De ce fait, le Plateau de Millevaches a les caractéristiques du climat les plus nuancées et accentuées du Limousin. La pluviométrie du plateau est largement supérieure à la moyenne nationale avec plus de 1400 mm/an en moyenne.

### **III.1.4 Sylviculture**

La sylviculture est une activité économique majeure du Limousin. A l'échelle du Limousin, les essences feuillues dominantes sont le chêne (171 000 ha), le châtaignier (69 000 ha) le hêtre (40 000 ha). Les résineux comme le douglas (63 000 ha) et l'épicéa (38 000 ha) sont également des espèces récurrents (CRPF, 2013). La forêt occupe environ les deux tiers de la superficie du plateau de Millevaches.

Les forêts de conifères favorisent l'acidification des sols par des apports en matière organique importants, du fait de la décomposition de leurs aiguilles et de la rotation plus rapide de leur culture. La respiration des racines et des micro-organismes entraîne la libération de  $CO_2$  qui est également une source de protons (Figure 3). Le  $CO_2$ , en contact avec la solution du sol, va former de l'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) qui va libérer des protons

et des hydrogénocarbonates.



**Figure 3** : Absorption et libération de protons dans le système sol-plante et dans les processus d'ammonification et de nitrification.

## **III.2 Contexte AEP : déroulement de l'étude**

### **III.2.1 Présentation des captages**

Face aux problématiques posées par la présence de l'aluminium, abordées ci-dessus, et suite aux constats faits sur les teneurs en aluminium de la ressource en eau potable par une partie des différents acteurs intervenants sur le territoire du plateau de Millevaches, une étude à l'initiative du PNR Millevaches et laboratoire de l'université de Limoges (GRESE) est menée avec le financement de l'agence de l'eau Adour Garonne. Celle-ci est réalisée en partenariat avec l'ARS Limousin, le Conseil Départemental de la Corrèze, Mairie de Meymac, EPIDOR et EPBV sur une période d'un an de suivi (Nov. 2014-Nov. 2015).

Cette étude porte sur 6 captages du plateau de Millevaches (choisis par le comité de pilotage en septembre 2014, annexe 1, Tableau 2). Suite au comité de pilotage de février 2015 (Annexe 1), un point de prélèvement supplémentaire a été ajouté sur une eau distribuée (fontaine de Lestards sur la place de la mairie). Un descriptif et une localisation des points est disponible en annexe 2.

**Tableau 2** : Localisation et population desservie par les captages faisant l'objet de cette étude et du point suivi en distribution

Captage	Commune	Nombre d'habitants desservis	Fréquence de suivi (sur 1 an)	Environnement amont immédiat (200 m)
Geneyte	Peyrelevade	10	Bimensuel à mensuel	Prairie + Zone Humide
Drouillat	Peyrelevade	16	Hebdomadaire	Forêt
Cisternes	Saint-Sulpice Les Bois	12	Bimensuel à mensuel	Forêt
Celle	Meymac	111	Hebdomadaire	Prairie
Bonnefond	Fonfreyde	21	Bimensuel à mensuel	Forêt + Prairie + Zone Humide
Lestards Bourg	Lestards	65	Hebdomadaire	Forêt
Lestards Fontaine	Lestards	/	Hebdomadaire (sur 9 mois)	/ (Point en distribution)

### III.2.3 Prélèvements et analyse des eaux

Les prélèvements sont effectués depuis la semaine 48 de 2014 sur les 6 captages dont certains font l'objet d'un suivi hebdomadaire et d'autres d'un suivi bi-mensuel à mensuel (Tableau 2). La campagne de prélèvements a duré un an, et s'est terminée en novembre 2015.

Les paramètres mesurés dans ces différents sites peuvent être classés en deux catégories :

- Les paramètres généraux

Le pH, la température, l'oxygène dissous et la conductivité.

- Les éléments participant à la minéralisation de l'eau :

Les anions : fluorure (F<sup>-</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) et sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), TAC (Titre Alcalimétrique Complet).

Les métaux, les éléments alcalins et alcalino-terreux : calcium (Ca<sup>2+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>),

magnésium ( $Mg^{2+}$ ), sodium ( $Na^+$ ) et silicium (Si).

- Les éléments indésirables et contaminants :

Le manganèse ( $Mn^{2+}$ ), le fer ( $Fe^{2+}$ ), le Carbone Organique Dissous (COD), l'aluminium ( $Al^{3+}$ ) et l'arsenic (As).

L'ensemble des paramètres à l'exception du pH, TAC et conductivité sont mesurés sur échantillon filtré à 0,2  $\mu m$  sur site et conservé jusqu'à analyse à 4°C.

### **III.2.4 Prélèvements et caractérisation des sols issus de quelques captages**

#### **• Prélèvements**

Les sols utilisés pour cette étude ont été prélevés au niveau des bassins versants des captages de Celle ; Lestards ; Drouillat et Cisternes. Les sols des captages de Drouillat (Figure 4) ont fait l'objet d'une expérimentation plus poussée avec notamment la réalisation de colonnes de sols. Le bassin versant du captage de Drouillat représente une surface de 6,6 ha.

Les sols ont été prélevés le 17 mars 2015. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière et d'une pelle. La différenciation des horizons s'est faite par la couleur et seront notés par commodité de A à C selon leur profondeur sans autre distinction pédologique supplémentaire. Les horizons supérieurs présentent une grande quantité de matière organique ce qui leur donne une couleur foncée et au fur et à mesure que la quantité de matière organique diminue la couleur du sol devient plus claire (Figure4).

Les échantillons de sols ont été séchés à température ambiante et tamisés à 2 mm selon la norme AFNOR NF X 31-101. Ils ont été stockés dans des sacs en plastique à l'abri de l'air et de la lumière.

(a)



(b)



**Figure 4** : Prélèvement de sol sur le site de Drouillat (a) Horizon A (0-4 cm) et B(4-35 cm) - (b) Horizon C (35-50 cm)

- **Caractérisation des sols**

Les sols de l'étude se sont développés sur des roches métamorphiques ou sur une formation acide granitique (Drouillat) dont on retrouve des cristaux de quarts, de feldspath, de mica et parfois d'amphiboles. L'altération de ces roches a permis la formation de sols en milieu acide. Classiquement ces sols présentent une activité biologique très faible, et sont fortement appauvris en bases échangeables.

Le  $pH_{KCl}$  (Norme AFNOR X 31-104) mesure l'acidité potentielle. Il prend en compte les ions  $H^+$  libres dans la solution du sol et ceux déplacés par la solution de KCl (1M).

Les valeurs de pH des solutions de sol ont été directement mesurées à l'aide d'une électrode pH combinée connectée à un pH-mètre. Le pH- mètre a été étalonné à l'aide de solutions tampon de pH 4 et pH 7.

- **Etudes sur colonnes de sol (Drouillat)**

Les colonnes utilisées sont des tubes en verre avec une longueur interne de 9 cm et un diamètre de 2,4 cm. Les colonnes sont remplies de manière à obtenir une épaisseur proportionnelle à celle rencontrée sur les sites du prélèvement, pour ça la masse de sol dans chaque colonne est différente (Tableau 4). Cela permet de se rapprocher des conditions naturelles en conservant la proportion des hauteurs de chaque horizon et met en évidence l'influence des différents éléments mis en solution par les horizons superficiels sur les horizons inférieurs. Les horizons ont été étudiés séparément et simultanément (noté total) (Tableau 4).

Une solution d'eau ultra pure à pH 6,98, qui se rapproche de l'eau de pluie, a été percolée au travers des colonnes. L'alimentation des colonnes se fait de bas en haut ce qui facilite la sortie de l'air et limite les chemins préférentiels.

La solution percolée est recueillie à intervalles de temps réguliers, de 20 minutes. La colonne est alimentée avec une pompe péristaltique ISMATEC modèle MS Reglo (débit fixe). Le débit choisi pour les colonnes est d'environ 1 mL.min<sup>-1</sup> (fixe pour toute la manipulation).

Après filtration (0,45 µm) l'aluminium total a été dosé dans les solutions recueillies par spectrométrie d'absorption atomique.

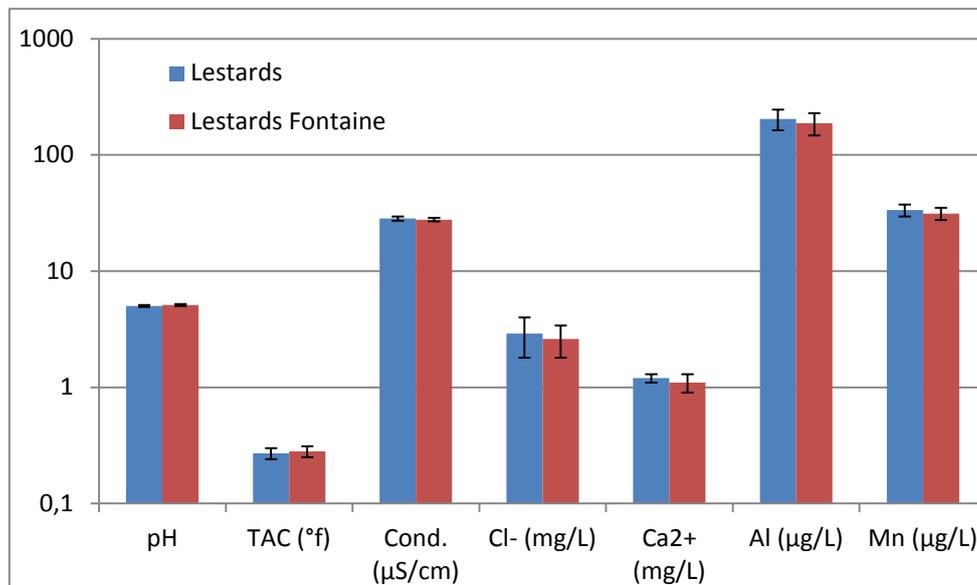
**Tableau 3:** Epaisseur de chaque horizon de sol, épaisseurs et masses de sol sec placées dans chaque colonne

<b>Drouillat 3</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>Masse sol (g)</b>
D3A 0-4 cm	4 mm	0,66
D3B 4-35 cm	3,1 cm	15
D3C 35-50 cm	1,5 cm	8,09
D3Total 0-50 cm	5 cm	23,75

## **IV. Résultats et Discussion**

### **IV.1 Point en distribution**

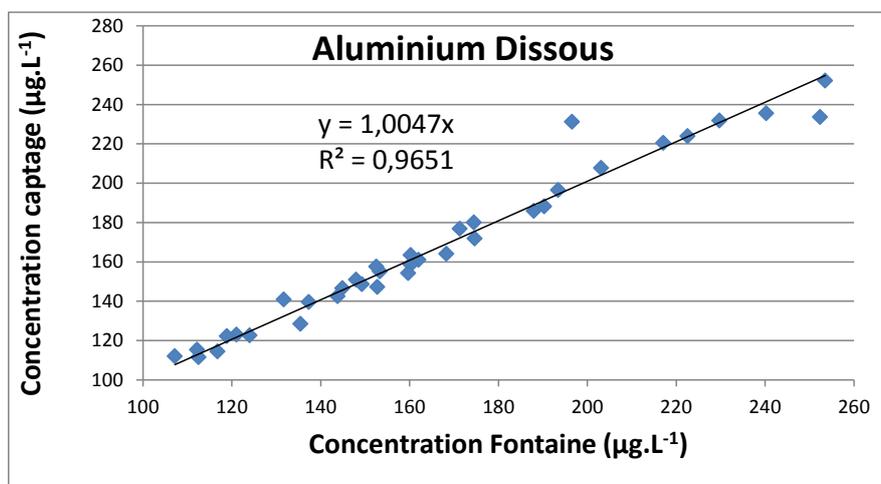
Cette étude étant réalisée sur les captages, la question de l'évolution de la qualité de l'eau au cours de sa distribution s'est posée. Pour discuter ce point, le suivi hebdomadaire du captage de Lestards Bourg a été complété par un suivi de la qualité de l'eau au niveau de la fontaine de Lestards. La Figure 5 présente les résultats moyens obtenus pour une sélection de paramètres.



**Figure 4** : Valeurs moyennes ( $\pm$  écart type) de paramètres enregistrés au niveau du captage et de la fontaine de Lestards entre le 2 mars et le 23 novembre 2015

Quels que soient les paramètres considérés, il n'y a pas de différence significative entre la qualité moyenne de l'eau sur la période considérée au niveau du captage et de l'eau distribuée au niveau de la fontaine.

La Figure 6 montre qu'il existe une corrélation entre la concentration en aluminium dissous au captage de Lestards et celle au niveau de la fontaine. La valeur de la pente de la droite de régression étant très proche de 1, on peut considérer, pour chaque prélèvement, que la teneur en aluminium dissous est, à l'incertitude analytique près, identique au niveau du captage et après sa distribution jusqu'à la fontaine.



**Figure 5** : Corrélation de la teneur en aluminium dissous au niveau du captage et de la fontaine de Lestards

Ces résultats montrent que les conclusions pouvant être tirées sur la qualité de l'eau au niveau du captage, restent valables après sa distribution à Lestards. La distribution n'a pas d'impact significatif sur les paramètres physico-chimiques suivis. Compte tenu des fortes similitudes entre les captages suivis, cette conclusion est probablement valable pour l'ensemble des 5 autres sites concernés par cette étude.

## **IV.2 Qualité générale de l'eau des captages**

L'ensemble des résultats sont présentés par captage et par paramètre dans l'Annexe 2.

### **IV.2.1 Paramètres généraux**

Les eaux de tous les captages présentent des pH acides entre 4,8 et 5,1, une conductivité électrique entre 30 et 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et des alcalinités (TAC) très faibles entre 0,23 et 0,29 °f. Ainsi, ces résultats confirment la faible minéralisation de ces eaux, en adéquation avec le contexte géologique. Pour chaque site, ces valeurs présentent une faible variabilité.

L'ensemble des paramètres  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , TAC,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  présentent de faibles variations (écart inférieur à 10% de la valeur moyenne) dans le temps pour un captage donné. Bien que de légères différences existent, les teneurs mesurées dans les différents captages sont du même ordre de grandeur. Ces valeurs faibles correspondent à des eaux très peu minéralisées et sont cohérentes avec le contexte géologique cristallin du plateau de Millevaches.

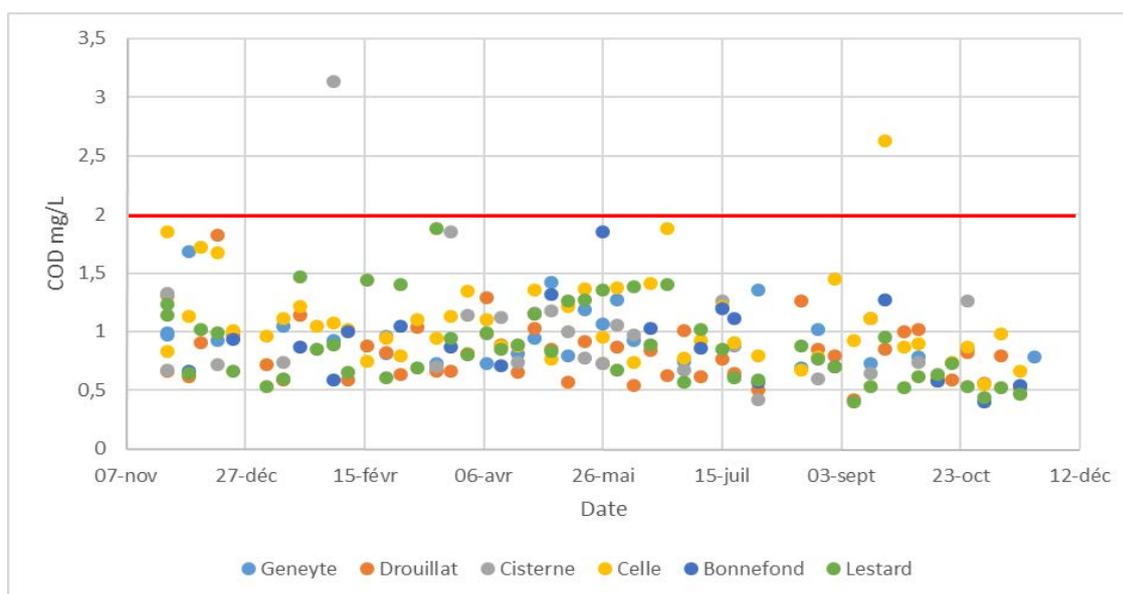
Pour les paramètres soumis à la réglementation (hors aluminium), aucun dépassement des valeurs de référence et des valeurs limites n'a été observé.

### **IV.2.2 COT**

Le carbone organique dissous (COD) est assimilable au carbone organique total (COT) dans des eaux sans teneurs significatives en particules, comme celles étudiées ici. La référence de qualité pour ce paramètre est fixée à 2 mg/L (arrêtés du Code de la santé publique de janvier 2007 parue au JO du 06/02/2007).

Des valeurs trop élevées de teneurs en COD peuvent favoriser le développement de microorganismes dans les ouvrages et réseaux, mais posent aussi la question des effets de la mise en place d'une désinfection au chlore sur la formation de sous-produits (Chlorophénols responsable de goût à l'eau et Tri Halo méthane (THM) composés CMR).

La Figure 7 montre l'évolution des valeurs de COD pour chacun des captages.



**Figure 6:** Teneur en COD (mg/L) en fonction du temps, selon les captages (référence de qualité à 2 mg/L)

Les valeurs de COD sont globalement stables autour de 1 mg/L et en dessous de la référence de qualité de 2 mg/L (Figure 7). Un seul dépassement a été observé pour les captages de Cisterne et de Celle. On notera quelques valeurs comprises entre 1,5 et 2 mg/L de COD pour chacun des captages suivis dont plusieurs valeurs s'approchant de 2 mg/L de COD pour le captage de Celle.

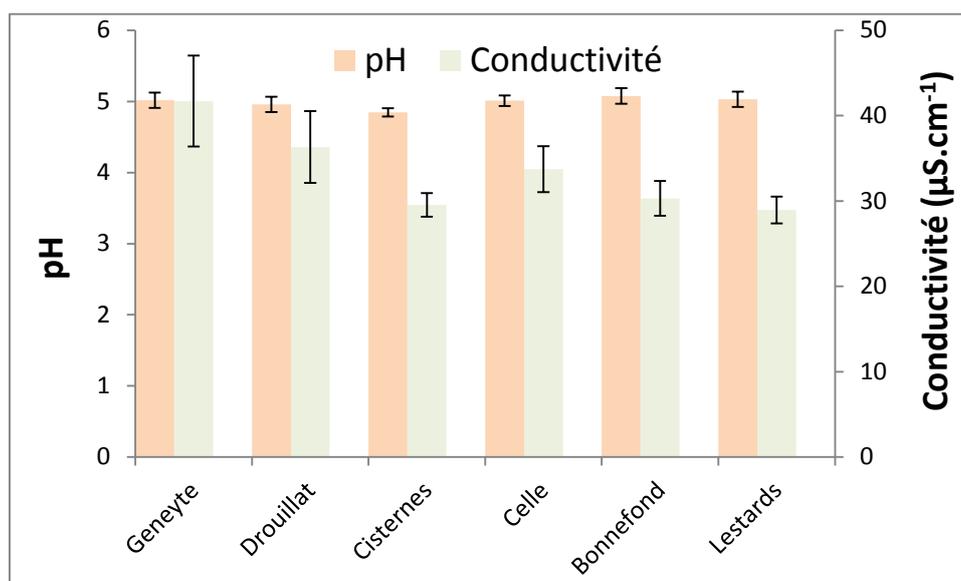
La majorité de l'année, ce paramètre ne pose donc pas de problèmes particuliers. Cependant, son évolution doit être suivie avec attention dans l'hypothèse d'une désinfection au chlore afin d'éviter un goût à l'eau et l'apparition potentielle de THM lors des quelques pics de COD détectés.

#### IV.2.3 Paramètres liés à l'équilibre calco-carbonique

La Figure 8 présente les valeurs moyennes de pH et de conductivité enregistrées aux différents captages. L'ensemble des captages montrent des eaux acides avec des valeurs de pH proches de 5 et très peu variables sur la période considérée (écart type < 0,1 unité pH). Ces valeurs sont inférieures à la référence de qualité de ce paramètre ( $6 \leq \text{pH} \leq 8$ ). Si l'on considère en plus les faibles valeurs de TAC (0,3°F environ, Annexe 2) et de  $\text{TH}_{\text{Ca}}$  (comprises entre 0,2 et 0,6 °F selon les captages), ces eaux se révèlent très nettement

agressives. Les valeurs de conductivités (Figure 8) sont également très faibles ( $< 40 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) et inférieures à la référence de qualité ( $180 \leq \text{conductivité} \leq 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), illustrant la faible minéralisation de ces eaux. Ces eaux agressives et peu minéralisées sont caractéristiques du contexte géologique du plateau (socle cristallin).

Les indices de Larsson (LR, indice de corrosivité) calculés pour ces captages montrent des valeurs comprises entre 1,4 et 1,9 attestant de qualité d'eaux qui ont une nette tendance à la corrosion ( $\text{LR} < 0,2$  : pas de tendance à la corrosion ;  $0,2 < \text{LR} < 1$  : tendance modérée à la corrosion ;  $\text{LR} > 1$  : tendance nette à la corrosion). En l'absence de traitements (reminéralisation et mise à l'équilibre calco-carbonique), ces eaux peuvent donc sur la durée provoquer une corrosion des canalisations de distribution et donc limiter la pérennité des installations. La dégradation des canalisations peut potentiellement dégrader la qualité de l'eau par solubilisation de métaux (fonction des matériaux de la canalisation) et en favorisant le développement bactérien.



**Figure 7** : Valeurs moyennes ( $\pm$  écart type) de pH et de conductivité enregistrées aux différents captages

### **IV.3 Problématique aluminium**

#### **IV.3.1 Teneurs en aluminium**

Les teneurs moyennes en aluminium mesurées sont présentées dans le Tableau 5. Les teneurs en aluminium sont sensiblement différentes pour les différents captages avec des

valeurs oscillant autour de 200 µg/L pour Celle, Bonnefond et le Bourg à Lestards, 300 µg/L pour Geneyte, autour de 400 µg/L pour Drouillat et presque 500 µg/L pour Cisternes.

**Tableau 4 :** Teneurs moyennes en aluminium sur un an dans les 6 captages

Captage	Celle	Bonnefond	Lestards	Geneyte	Drouillat	Cisternes
Al moyen (µg/L)	211 ± 19	229 ± 30	180 ± 47	302 ± 25	412 ± 87	493 ± 59

On rappellera que l'aluminium retrouvé dans l'eau des captages est d'origine naturelle (issu des sols) et que de nombreux facteurs naturels et anthropiques contrôlent sa mobilité des sols vers l'eau et vice-versa. Ainsi nous pouvons d'ores et déjà dire que ces captages se trouvent dans un contexte naturel favorisant la mobilité de l'aluminium.

Les teneurs en aluminium des 6 captages choisis, à l'exception de ceux de Celle et de Lestards, dépassent systématiquement la référence de qualité de 200 µg/L. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sur les captages de Cisternes (500-600 µg/L) et Drouillat (400-500 µg/L). Ainsi les personnes consommant les eaux des captages suivis, peuvent ingérer une quantité supplémentaire d'aluminium faisant passer la part contributive de l'eau d'alimentation de 2,8% (200 µg/L) à 5,6% (400 µg/L) ou encore 7% (500 µg/L) de la DHTP préconisée par l'EFSA. Même si l'eau de boisson est une source secondaire d'exposition à l'aluminium, sa présence à des teneurs élevées dans les captages étudiés va à l'encontre des recommandations de l'ANSES issues du rapport EAT2 (2011).

Il semble important de noter, pour le captage de Lestards, de fortes variations (entre 200 et 450 µg/L) sur les teneurs en aluminium au début de la campagne de prélèvement. En parallèle, au cours des visites de terrain, quelques phénomènes de fuites sur le bord du puit de collecte ont été observés. Ainsi, cette inconstance des premières valeurs pourrait s'expliquer par des infiltrations d'eau dans le puit, externes aux eaux apportées par les drains.

L'ensemble des données physico-chimiques ont été traitées statistiquement avec le logiciel Systat, le but étant de trouver une possible corrélation entre divers éléments ou paramètres. Un exemple d'analyses en composantes principales (ACP) pour le captage

de Lestards se trouve en Annexe 3. Il n'a pas été possible de mettre en évidence des phénomènes particuliers, bien que les quantités d'aluminium dissous semblent liées sur certains captages au pH de l'eau, ce qui est en accord avec les théories précédemment exposées. Il est parfois mis en évidence une corrélation très forte entre l'aluminium et le manganèse (captage de Lestards notamment), lui aussi présent naturellement dans le sol et qui pourrait être relargué selon le même processus.

Le nombre limité de mesures est toutefois un frein à toute analyse statistique poussée. Il pourrait être intéressant de faire une démarche similaire en incluant d'autres captages sur plusieurs années pour avoir un plus grand nombre de données. Il serait alors par exemple possible d'identifier statistiquement un cycle annuel lié aux conditions climatiques.

### V.3.2 Influence de la pédologie

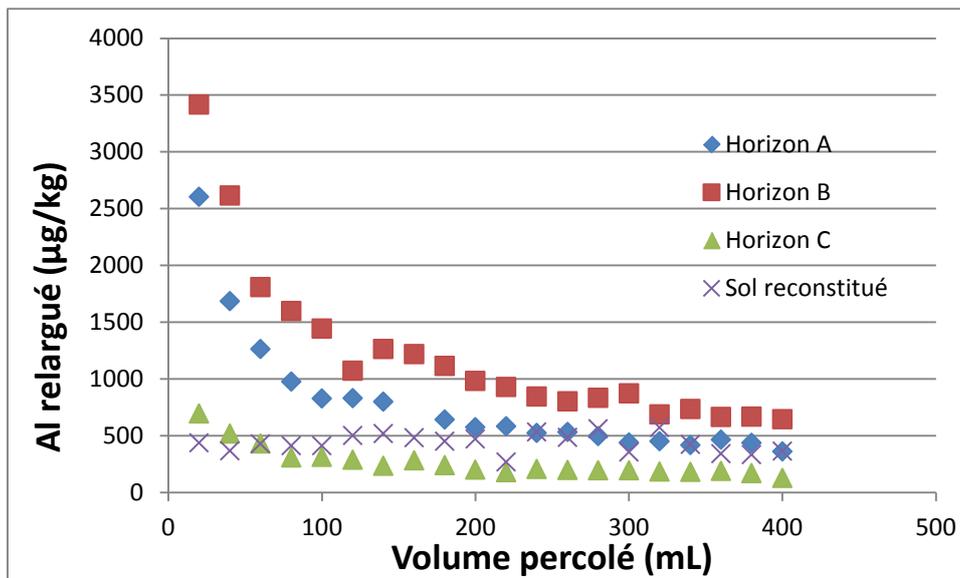
Le Tableau 6 présente la concentration moyenne annuelle en aluminium des eaux des captages et les  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  mesurant l'acidité des sols environnant les captages. On constate que plus le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  des sols est faible plus il y a d'aluminium retrouvé dans les eaux des captages à proximité.

**Tableau 5:** Concentration en aluminium en et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  des sols

	Celle	Bonnefond	Lestards	Geneyte	Drouillat	Cisternes
Al moyen ( $\mu\text{g/L}$ )	211 $\pm$ 19	229 $\pm$ 30	180 $\pm$ 47	302 $\pm$ 25	412 $\pm$ 87	493 $\pm$ 59
$\text{pH}_{\text{KCl}}$ des sols	4,3	/	4,3	/	3,7	3,8

Les expériences de potentiel de relargage d'aluminium sur colonnes de sols ont été réalisées pour les horizons des échantillons de Drouillat 3 (Figure 9).

Ainsi d'après la Figure 9, l'horizon intermédiaire B (profondeur 4-35 cm) est celui ayant la plus grande quantité d'aluminium échangeable. A l'opposé l'horizon le plus profond C (profondeur 35-50 cm) a le potentiel de relargage de l'aluminium le plus faible. On remarque que lorsque les horizons sont superposés (sol reconstitué), la quantité relarguée est stable et intermédiaire par rapport aux horizons séparés. Ce comportement illustre la capacité des horizons inférieurs à retenir de l'aluminium.



**Figure 8:** Libération de l'aluminium en µg/kg en fonction du volume percolé dans les différents horizons et dans le sol reconstitué (captage de Drouillat)

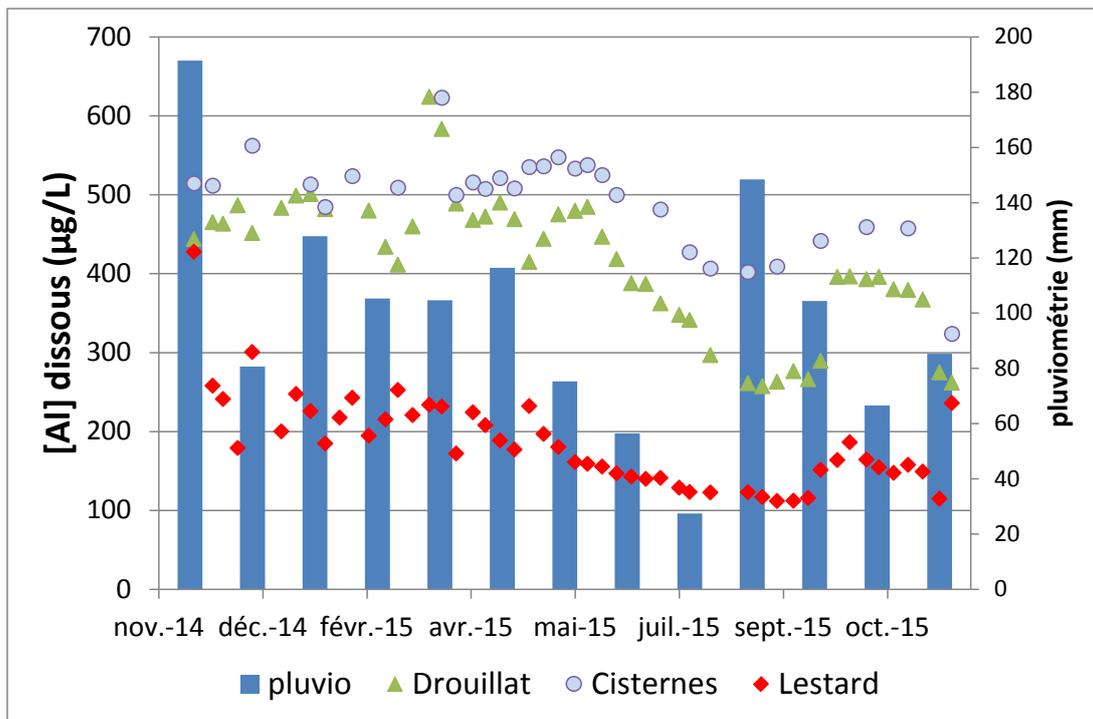
Ces quelques expérimentations réalisées sur les sols prélevés à proximité immédiate de certains captages étudiés, illustrent le rôle central de la qualité du sol dans les teneurs en aluminium que l'on retrouve dans les captages.

#### IV.3.4 Influence de la pluviométrie

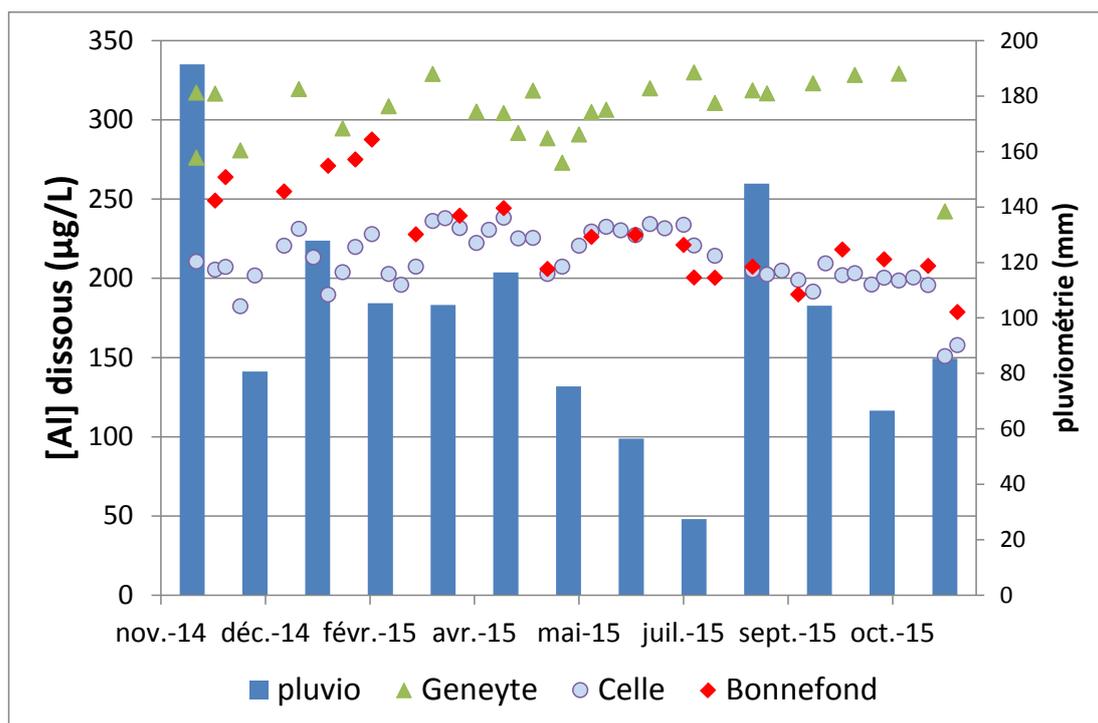
Les valeurs de pluviométrie ont été récupérées à partir des données Météo France correspondant aux stations de Peyrelevade, Meymac et Bugeat. Les teneurs en aluminium ont été mises en parallèle avec les cumuls mensuels de pluviométrie moyennés sur les trois stations. Deux groupes de captages se distinguent par rapport à leur comportement :

- Cisternes, Drouillat et Lestards : pour ces captages, les teneurs en aluminium varient avec la même tendance que la pluviométrie (Figure 10). Il semble tout de même qu'il y ait un décalage d'environ 1 mois entre les deux. Ainsi, lors de la chute de la pluviométrie entre avril et juillet inclus, les teneurs en aluminium diminuent. Au contraire, la forte pluviométrie du mois d'août, entraîne par la suite une augmentation des teneurs en aluminium dans les eaux de ces captages.

- Celle, Geneyte et Bonnefond : pour ces captages, les teneurs en aluminium varient peu dans le temps et ne présentent pas de liens apparents avec les variations de pluviométrie (Figure 11).



**Figure 9** : Variation de la teneur en aluminium et de la pluviométrie, pour le 1<sup>er</sup> groupe de captages, en fonction du temps



**Figure 10** : Variation de la teneur en aluminium et de la pluviométrie, pour le 2<sup>ème</sup> groupe de captage, en fonction du temps

L'environnement immédiat de ces captages est très différent : forêts avec mélanges de feuillus et résineux, prairies, proximité de troupeaux, zones humides (Tableau 2). Cependant, on remarque que les teneurs des captages qui se trouvent dans un contexte

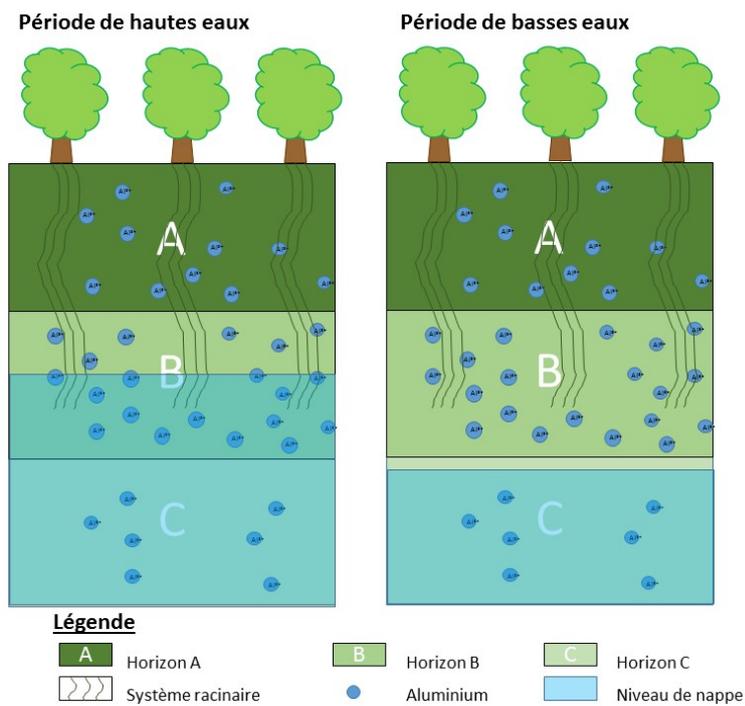
immédiat de forêt (Cisternes, Drouillat et Lestards) varient conjointement à la pluviométrie tandis que ceux bordés de prairies (Celle et Geneyte) restent relativement stables dans le temps. Seul le captage de Bonnefond déroge à ce constat, car ses teneurs en aluminium évoluent indépendamment de la pluviométrie pour bien qu'il soit entouré de forêt mais aussi de zones humides.

L'explication avancée pourrait alors être celle de l'absorption de l'eau par les chevelus racinaires des arbres, plus profond que celui des herbes, en période de basses eaux.

Il faut tout d'abord mettre en évidence deux périodes : une période de hautes eaux (d'octobre à avril) et une période de basses eaux (de mai à septembre). Entre ces deux périodes la hauteur du toit de la nappe varie. Deux hypothèses vont être émises pour tenter d'expliquer les variations de concentration en aluminium :

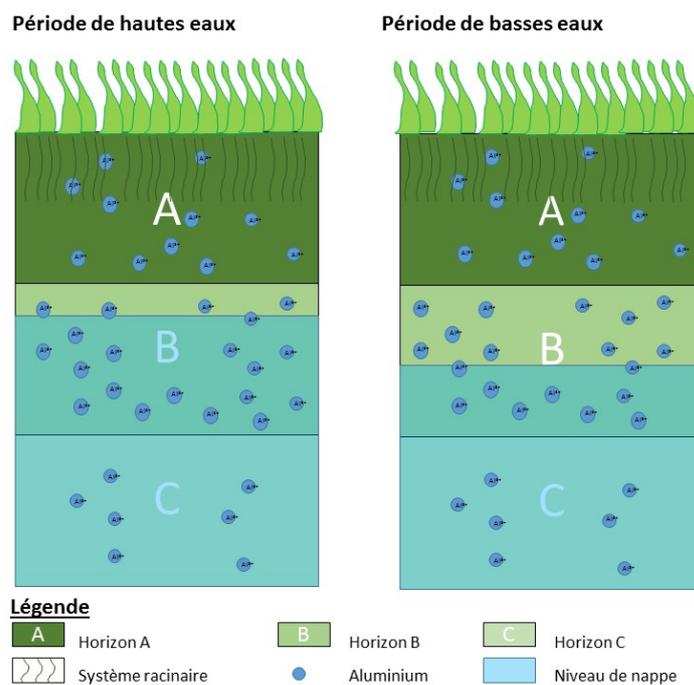
- 1<sup>ère</sup> hypothèse : Les caractéristiques chimiques et physiques des horizons A, B et C sont identiques pour chaque faciès (prairie, bois, zone humide) ;
- 2<sup>ème</sup> hypothèse : Les conclusions de la Figure 9 (Horizons A et B relarguent le plus d'aluminium) sont valables pour les six captages.

Dans le cas des captages se trouvant en zones boisées (Figure 12), le toit de la nappe se situerait dans l'horizon B en période de hautes eaux. Ce qui expliquerait les fortes concentrations en aluminium retrouvées pour les captages de Drouillat, de Cisterne et de Lestards pendant la période s'étalant d'octobre à avril. Ensuite, il est observé une diminution de la concentration en aluminium pour les mois de mai à septembre, correspondant à la période où le toit de la nappe est au plus bas et se situerait dans l'horizon C, qui relargue beaucoup moins d'aluminium.



**Figure 11:** Schéma d'explication de la teneur en aluminium dans les eaux en milieu boisé

Dans le cas des captages se trouvant dans une prairie (Figure 13), la pression de succion hydrique du couvert végétal herbacé des prairies est beaucoup moins importante que celle engendrée par les arbres. Ainsi le toit de la nappe s'abaisserait moins entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux, et resterait dans le même horizon ce qui expliquerait la relative constance des teneurs en aluminium dans les captages de Geneyte et de Celle.



**Figure 12:** Schéma d'explication de la teneur en aluminium dans les eaux en prairie

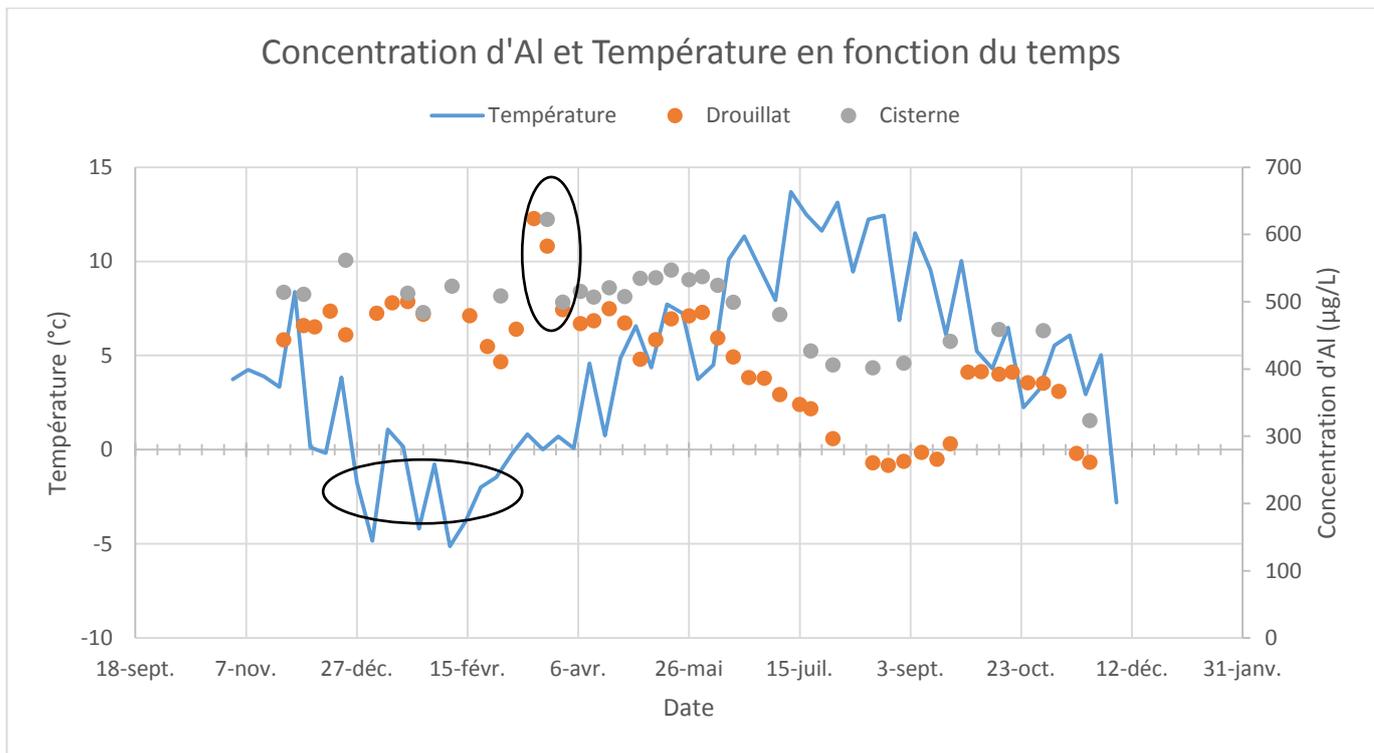
Le captage de Bonnefond est une exception par rapport aux autres captages se situant en zone boisée. En effet, la présence d'une zone humide proche du captage constituerait un apport plus régulier en eau limitant ainsi l'abaissement du toit de la nappe vers des horizons qui relargueraient moins d'aluminium (cas de la Figure 13). Il en résulte ainsi une relative stabilité de la teneur en aluminium dans l'eau du captage de Bonnefond.

En conclusion, cette étude semble indiquer que les teneurs en aluminium dans l'eau des captages sont influencées directement par la hauteur de nappe. Ainsi, en fonction de la pluviométrie, du couvert végétal (Forêt ou prairie) et de la présence de zones humides à proximité immédiate des captages l'eau captée serait en contact avec des horizons ayant des potentiels de libération plus ou moins important d'aluminium, entraînant ainsi des variations de teneur en aluminium. Des traces d'hydromorphisme ont été relevées lors du prélèvement des sols de Drouillat ce qui vient appuyer ces hypothèses.

L'identification de ces facteurs d'influence des teneurs en aluminium, facile à identifier sur le terrain, combinée à la pluviométrie des mois passés pourrait permettre d'optimiser les campagnes de prélèvements réglementaires en identifiant si les teneurs en Al dans la ressource en eau peuvent fluctuer significativement sur l'année hydrologique.

#### **IV.3.5 Influence du dégel**

Les captages de Cisternes et de Drouillat présentent une augmentation assez forte des concentrations en aluminium (600 µg/L environ) à l'issue des conditions de températures négatives et de la présence de neige (données Météo France) durant la mi-mars 2015 (Figure 14).



**Figure 13:** Concentration en aluminium et température en fonction du temps.

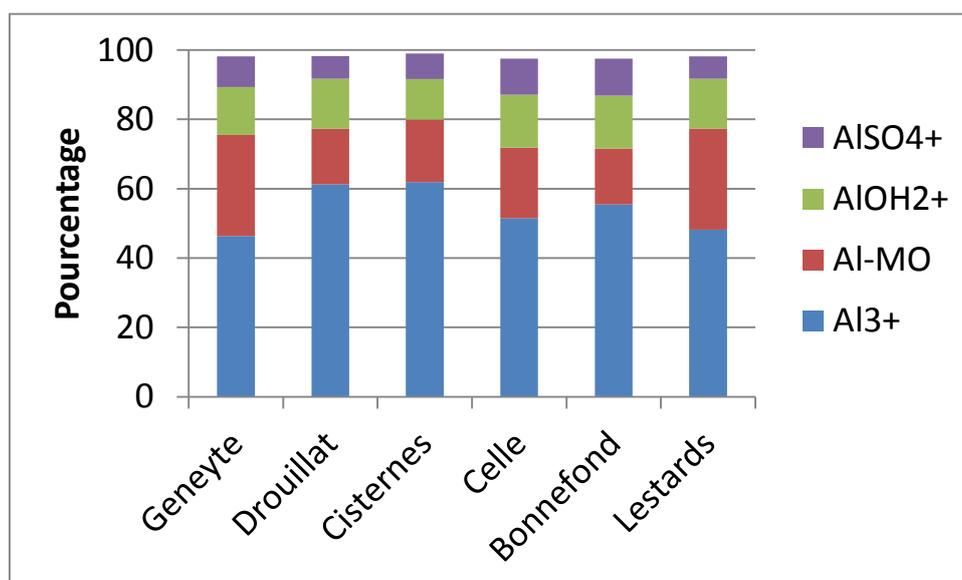
Cette augmentation peut être due aux phénomènes de dégel des sols et/ou à une reprise de l'activité microbienne du sol (Tomonari *et al.*, 2003). Dans notre cas, il s'agit très certainement d'une augmentation liée au dégel des sols, compte tenu des variations de température associées. Ainsi, cette fonte de neige ou de glace du sol emporterait l'aluminium en solution par lessivage.

#### **IV.4 Chimie de l'aluminium dans les eaux du plateau**

##### **IV.4.1 Simulation de la spéciation de l'aluminium**

A partir des compositions moyennes de chaque captage (Annexe 1), la répartition de l'aluminium dissous entre ses différentes espèces, *i.e.* sa spéciation, a été simulée avec le logiciel Visual Minteq (v. 3.0). Les résultats sont présentés sur la Figure 15. L'ensemble des captages montrent une répartition similaire avec 40 à 60% d'aluminium libre ( $Al^{3+}$ ), environ 20% sous forme de complexes inorganiques (12 à 15% d' $Al(OH)^{2+}$  et 6 à 10% d' $AlSO_4^+$ ) et 16 à 30% sous forme de complexes avec la matière organique. Cette proportion de complexes avec la matière organique est uniquement indicative car basée sur des paramètres génériques, ne correspondant pas nécessairement à la matière organique des sites étudiés. Il ressort de ces simulations qu'une part importante de l'aluminium est sous forme libre, cette dernière étant particulièrement accessible aux organismes, ce qui est aussi le cas dans une moindre mesure pour la forme  $Al(OH)_2^+$ . Ce

résultat n'est pas surprenant compte tenu du fait que les eaux étudiées sont acides.



**Figure 14:** Répartition de l'aluminium dissous calculée à partir de la composition moyenne de chaque captage (cf Annexe 2). Al-MO représente les complexes avec la matière organique. Seules les espèces présentes à plus de 1% sont représentées

#### IV.4.2 Evaluation de la spéciation par échantillonnage passif DGT

A titre exploratoire, l'aluminium a également été suivi par méthode d'échantillonnage passif DGT (Diffusive Gradients in Thin-films) sur les captages de Celle, de Cisternes et de Geneyte. Cette technique permet un échantillonnage continu et d'avoir accès à l'aluminium dit « labile », c'est-à-dire libre ou faiblement complexé. Pour cela, des échantillonneurs ont été déployés en triplicats à l'exutoire des surverses des trois captages étudiés (photos disponibles en Annexe 4) sur des périodes consécutives d'une semaine du 23 mars 2015 au 18 mai 2015. Pour les captages de Celle et Cisternes, l'aluminium labile correspond, aux incertitudes près, à l'aluminium dissous. Ce résultat signifierait que l'aluminium complexé à la matière organique le serait faiblement et pourrait être potentiellement disponible pour les organismes. Néanmoins, les résultats du captage de Geneyte sont aberrants car l'aluminium labile est supérieur à l'aluminium dissous. Le recul actuel sur ces résultats n'est pas suffisant pour savoir si cette aberration est spécifique à ce captage ou si elle révèle un potentiel biais pour les résultats d'aluminium labile des autres captages. Des expérimentations supplémentaires devront être envisagées pour approfondir ce point, avec notamment des expérimentations de laboratoires pour vérifier ou adapter les quelques résultats disponibles dans la bibliographie scientifique vis-à-vis de la mesure de l'aluminium labile par les systèmes

DGT.

#### **IV.5 Problématique similaire dans d'autres régions**

Les ARS d'autres régions ont été contactées afin d'évoquer la problématique de l'aluminium dans leurs captages et de faire un comparatif avec la situation dans le secteur d'étude. Les unités territoriales des ARS ont été choisies en fonction de la nature de leur territoire, avec un contexte géologique et climatique proche de celui du plateau de Millevaches. L'ensemble des contacts et leurs coordonnées respectives se trouvent en Annexe 5.

Certaines prises de contact se sont révélées infructueuses, c'est le cas des délégations se situant sur le massif du Morvan, la Côte d'Or et la Saône-et-Loire, qui appartiennent à l'ARS de Bourgogne et qui n'ont pas donné suite à nos demandes d'informations. Néanmoins, une étude menée par Van der Heijden *et al.* (2012), explique le contexte d'alocrisols et donc la présence d'aluminium sur le massif du Morvan. Des teneurs en aluminium dans les captages d'eau potable de ce secteur peuvent donc être suspectées.

En revanche, les ARS de Champagne-Ardenne, Bretagne et Lorraine ont pu nous apporter quelques données via certaines de leurs délégations territoriales qui se sont intéressées à cette problématique.

La délégation des Ardennes a mentionné qu'aucun captage ne contenait naturellement des teneurs en aluminium supérieures à la référence de qualité. Le massif ardennais est constitué d'un plateau dont l'altitude moyenne est autour de 500 mètres. Des schistes et des granites constituent la géologie de ce territoire, on y retrouve des sols limoneux et hydromorphes en fond de vallée. La forêt est principalement constituée de feuillus, hêtres et chênes, entrecoupée de quelques plantations d'épicéas ou douglas. La pluviométrie moyenne est de 800 mm par an, cette valeur est en-dessous de la moyenne du plateau de Millevaches (1400 mm). Le contexte est donc globalement similaire à celui du plateau Limousin, mais présente quelques différences au niveau de la géologie, des espèces forestières plantées et de la pluviométrie.

L'ARS du Morbihan a confirmé connaître le même problème de dépassement de la référence de qualité concernant l'aluminium sur certaines eaux brutes, notamment dans la partie nord du département. Cette zone, principalement rurale, est constituée majoritairement de forêt de feuillus avec quelques résineux sur un socle granitique. L'altitude est seulement de 250 m en moyenne mais la pluviométrie est assez élevée

(1000 mm/an). Un tableau de données regroupant les captages incriminés avec les valeurs moyennes des concentrations en aluminium sur les eaux brutes est disponible en Annexe 6. La référence de qualité est dépassée sur 17 captages avec des concentrations en aluminium variant entre 210 et 487 µg/L. Aucun traitement spécifique n'est effectué, le paramètre aluminium est corrigé par dilution sur certains captages pour lesquels la mise en œuvre est aisée.

La délégation territoriale des Vosges s'est montrée particulièrement sensible à ce sujet car une prise de conscience a eu lieu il y a quelques mois dans ce département. Elle a donc fourni quelques éléments sur la situation locale. Le contexte sur le massif vosgien est en effet très similaire à celui du plateau de Millevaches avec des eaux cristallines et peu minéralisées, des essences forestières favorisant l'acidité des sols et une pluviométrie importante (2000 mm/an). Il n'est donc pas surprenant d'y retrouver des teneurs en aluminium pouvant dépasser les 1000 µg/L dans certaines eaux brutes. Cependant, il est à préciser que des dépassements ont aussi été observés dans l'ouest du département sur des zones de plaines, dans des secteurs calcaires ou karstiques. Aucun traitement spécifique n'est mis en place mais la spécificité des adductions vosgiennes fait qu'une majeure partie de l'aluminium précipite avant la mise en distribution. En effet, d'après le technicien de l'ARS, pour acheminer l'eau des captages généralement situés en altitude, il existe souvent une succession d'ouvrages de type bac de réception, brise charge, collecteur qui assurent un dégazage du CO<sub>2</sub> qui remonte le pH et favorisent ainsi la précipitation de l'aluminium. Ensuite, lors d'un traitement de l'agressivité de l'eau et de sa reminéralisation sur filtre à calcaire, l'aluminium est retenu dans les filtres. En moyenne annuelle, il n'y a plus de collectivités qui distribuent de l'eau non conforme sur ce paramètre. Par ailleurs, les collectivités qui ont connu des problèmes en réseau par le passé ont, soit abandonné les captages incriminés, soit fait une correction du paramètre aluminium par une dilution avec des captages non ou faiblement contaminés ou une interconnexion de secours. Si une situation de dépassement venait à être constatée, l'ARS de Lorraine inviterait la collectivité à prendre des mesures correctives parmi celles évoquées ci-dessus ou mettre un traitement en place. Cependant, la question de la systématité des traitements peut se poser pour des petits captages tels que ceux du plateau de Millevaches.

## **V. Conclusion**

Ce rapport final fait la synthèse d'une année de suivi de la qualité chimique des eaux de 6 captages situés sur 5 communes de la partie corrézienne du plateau de Millevaches.

Au préalable de l'interprétation des résultats obtenus en utilisant l'arrêté du Code de la santé publique relatifs aux eaux destinées à la consommation humaine de janvier 2007 parue au JO du 06/02/2007, il est apparu important lors du COPIL 2 de Février 2015 d'évaluer l'impact du réseau de distribution sur la qualité physico-chimique des eaux. Ainsi pendant 9 mois, la qualité de l'eau prélevée à la fontaine au bourg de Lestards a été comparée à celle du captage. Tous les paramètres suivis étant similaires, on peut donc conclure, dans ce cas, que le réseau de distribution de quelques centaines de mètres de long n'entraîne pas de modifications significatives sur la qualité physico-chimique des eaux entre captage et distribution.

L'étude de la qualité des eaux des captages révèle qu'elles sont acides (pH autour de 5) et peu minéralisées (conductivité électriques de 25 à 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; TAC de 0,3 $^\circ\text{F}$  et  $\text{TH}_{\text{Ca}}$  de 0,2 à 0,6  $^\circ\text{F}$ ), ce qui est en accord avec la géologie cristalline locale. Sur la période de mesure, ces paramètres varient peu. L'agressivité de ces eaux peut entraîner dans le temps des détériorations des installations de captage et de distribution et mettre en circulation des éléments chimiques issus des matériaux de ces installations.

Concernant les valeurs en Carbone Organique Dissous (COD) des eaux, assimilable au Carbone Organique Total (COT) dans le cas d'eaux sans particules, on note très peu de dépassements de la référence de qualité fixée à 2 mg/L de C. Cependant, ce paramètre, traçant la teneur en matière organique dans les eaux, est à surveiller car de manière assez fréquente sur au moins un captage (captage de Celle à Meymac) ce paramètre s'approche de la valeur de la référence de qualité. En effet, la matière organique peut être une source de nutriments pour les micro-organismes dans les installations et réseaux, accélérant ainsi la dégradation des ouvrages ou encore favorisant le développement de biofilms, lieu potentiel d'hébergement de pathogènes. De plus, en cas de mise en place d'une désinfection par chloration, la présence de ces matières organiques peut être à l'origine de la génération de sous-produits organo-chlorés (Trihalométhanes (THM); composés chlorés générateurs de goûts et odeurs comme les trichlorophénols et potentiellement dangereux pour la santé). Si la désinfection des eaux par chloration est efficace et peu coûteuse pour lutter contre la présence de micro-organismes dans les

eaux distribuées, dans les captages étudiés aux teneurs de matières organiques variables, elle peut entraîner une dérive de qualité (limite de qualité pour les THM fixée à 100 µg/L) remplaçant le risque microbiologique par un risque chimique à long terme du fait du caractère CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) des THM. De plus, au niveau des populations concernées, l'acceptabilité des goûts et des odeurs potentiellement générés par la désinfection par chloration d'une eau trop chargée en matières organiques peut aussi être problématique. Si des captages de mêmes types que ceux étudiés, avec des teneurs en COT un peu élevées par rapport à la référence de qualité et comportant une désinfection au chlore, font l'objet d'un suivi sur le paramètre THM par l'ARS, il pourrait être intéressant de synthétiser les données disponibles pour mieux cerner cette conséquence indirecte de la teneur en matière organique de ces eaux.

Concernant les éléments métalliques et metalloïdes, les teneurs mesurées de As et Fe et, dans une moindre mesure, de Mn n'appellent pas de commentaires particuliers. Toutefois, au niveau de la teneur en Mn de certains captages (Drouillat, Peyrelevade, Bourg et Lestards), les teneurs sont proches de la référence de qualité de 50 µg/L, avec quelques valeurs en dépassement sur le captage de Drouillat à Peyrelevade.

Enfin, les teneurs en aluminium des 6 captages choisis, à l'exception de ceux de Celle à Meymac et du Bourg à Lestards dépassent systématiquement la référence de qualité de 200 µg/L. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sur les captages de Cisternes à Saint-Sulpice-Les-Bois (500-600 µg/L) et Drouillat à Peyrelevade (400-500 µg/L). Sur les 6 premiers mois de mesures, les concentrations en Al varient assez peu sur les 6 captages suivis à l'exception du captage du Bourg à Lestards.

On rappellera que l'aluminium retrouvé dans l'eau des captages est d'origine naturelle (issu des sols) et que de nombreux facteurs naturels et anthropiques contrôlent sa mobilité des sols vers l'eau et vice-versa. Ce travail montre le rôle central du sol de l'environnement du captage dans les teneurs en aluminium retrouvées dans les eaux et une limitation de leur acidification tend à limiter un transfert de l'aluminium du sol vers l'eau. Les facteurs naturels comme le couvert végétal (Forêt ou prairie), la pluviométrie, la température (gel-dégel) et la présence de zones humides expliquent quant à eux les variations des concentrations que l'on peut constater dans les suivi d'aluminium le long d'une année dans ce type de captage d'eau de sub-surface. En effet, ces facteurs contrôlent fortement, la battance de la nappe dans le sol la mettant en contact avec des horizons de sols libérant plus ou moins d'aluminium. L'identification de ces facteurs

d'influence pourrait être utilisée pour optimiser les campagnes de surveillance réglementaire de la ressource en eau.

Le suivi d'un an confirme les quelques données disponibles au niveau des ARS du Limousin dans le cadre du suivi réglementaire des eaux destinées à la consommation humaine. Pour rappel, cette étude montre que la distribution n'affecte pas la qualité de l'eau sur les paramètres physico-chimiques suivis. Ainsi les personnes consommant les eaux des captages suivis, peuvent ingérer une quantité supplémentaire d'aluminium faisant passer la part contributive de l'eau d'alimentation de 2,8% (200 µg/L) à 5,6% (400 µg/L) ou encore 7% (500 µg/L). Il est impossible, au vu des nombreuses études, parfois contradictoires, de cerner l'impact sur la santé que peut avoir cette exposition supplémentaire à l'aluminium via l'eau de boisson, la seule chose certaine étant que si des effets devaient en découler, ce serait sur le long terme (exposition chronique). Cependant, dans son rapport EAT2 (2011), l'ANSES recommande de continuer à limiter les sources d'exposition à l'aluminium pour l'Homme et donc la limitation de l'exposition par l'eau de consommation va dans ce sens.

Des traitements des dérives de qualités comme l'Al sont envisageables techniquement, mais le contexte local, e.g. petit captages; manque de moyens financiers, de structuration, de moyens techniques, ... est un verrou fort. A ce niveau, les retours d'expériences d'autres secteurs de France touchés par cette problématique (Morbihan ; Vosges, ....) entrevus via l'interrogation de plusieurs UT d'ARS sont à étudier pour savoir ce qui pourrait être applicable au secteur d'étude : abandon de captage, possibilité de correction du paramètre par dilution, traitement de reminéralisation, élimination du CO<sub>2</sub> agressif, .... Une autre piste envisageable pour lutter contre cette dérive de qualité du fait de l'origine de l'Al, est la préservation de la qualité des sols à proximité immédiate des captages. En effet, les sols de la région s'ils peuvent libérer de grandes quantités d'aluminium sous certaines contraintes entraînant de fortes dénaturations, sont aussi capables de fixer de grandes quantités d'aluminium s'ils sont préservés. Cette piste de travail, à priori peu coûteuse, est sûrement à considérer.

## BIBLIOGRAPHIE

Agence de l'eau Adour-Garonne (juin 2009), Evaluation économique des zones humides, Volume 2, Etudes de cas, Chapitre II-2, Cas d'étude du plateau de Millevaches en Limousin.

Anses (2011), Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2), Tome 1 : Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes, 346 p.

Association française pour l'étude du sol, (2008), Référentiel Pédologique.

Cathalifaud G. (1994), Élimination de micropolluants de micropolluants lors de la coagulation-floculation par Al(III) en présence de charbon actif, thèse de l'Université de Poitiers 2.

Christophersen, N., Neal, C., Vogt, R., Esser, J. M., Andersen, S., (1990), Aluminium mobilization in soil and stream waters at three Norwegian catchments with different acid deposition and site characteristics. *Science of the total environment*, 96,175-188.

CRPF (2013), <http://www.crfp-limousin.com/france/crfp-limousin-description-foret--82.htm>

Dambrine, E., Thomas, A.L., Party, J.P., Probst, A., Boudot, J.P., Duc, M., Dupouey, J.L., Gégout, J.C., Guérol, F., King, D., Landmann, G., Maitat, O., Nicolai, M., Pollier, B., Thimonier, A. (1998), Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses : Distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 84, 75-94.

Exley, C. (2007), Aluminium, tau and Alzheimer's disease (Letter), *Journal of Alzheimer's Disease*, 12, 313-315.

Flaten T.P. (2001), Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Research Bulletin*, 55, 2, 187-196.

Forbes W.F. and McLachlan D.R. (1996), Further thoughts on the aluminum-Alzheimer's disease link. *Journal of Epidemiol Community Health*, 50, 4, 401-403.

Frutos A. (2014), La solubilisation de l'aluminium dans le sol. Rapport de Master QTE, Université de Limoges.

Guibaud G (1996), Etude physico-chimique du transport de l'aluminium dans des sols Limousins-Essais de modélisation, Thèse de l'Université de Limoges.

Guibaud G., Gauthier C. (2003), Study of aluminum concentration and speciation of surface water in four catchments in the Limousin region (France). *Journal of Inorganic Biochemistry*, 97, 16-25.

Guibaud G., Gauthier C. (2005), Aluminum speciation in the Vienne river on it upstream catchment (Limousin region, France). *Journal of Inorganic Biochemistry*, 99, 1817-1821.

INERIS (2003), Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Manganèse et dérivés (mise à jour en 2012).

Pineton de Chambrun G. (2014), Mécanismes de régulation de l'inflammation intestinale : facteurs environnementaux, moléculaires et microbiens. Thèse de l'Université Lille II.

Rosin C., Morlot M., Lukaszka R., Trepagne P., Hartemann P. (1990), Impact des ultrasons dans le dosage de l'aluminium en absorption atomique sans flamme, T.S.M. L'eau, 2, 81-84.

Tomonari U., Yosuke U., Sho-Ichi A., Kin-Ichi T., Ken-Ichi S. (2003), Seasonal change in the level and the chemical forms of aluminum in soil solution under a Japanese cedar forest. The Science of the Total Environment 317, 149-157.

Van Der Heijden G., Legout A., Pollier B., Mareschal L., Turpault M.-P., Ranger J., Dambrine E. (2012), Assessing Mg and Ca depletion from broadleaf forest soils and potential causes - A case study in the Morvan Mountains. Forest Ecology and Management 293, 65-78.

# **ANNEXES**

**Annexe 1 : Compte-rendu des COPILs**

**Annexe 2 : Localisation des captages (source Géoportail)  
et vue d'ensemble des paramètres mesurés sur les  
captages pour la période du 24 novembre 2014 au 23  
novembre 2015**

**Annexe 3 : ACP avec les données des différents sites**

**Annexe 4 : DGT : Concentrations en aluminium dissous et  
labile (mesuré par DGT)**

**Annexe 5 : Contacts ARS**

**Annexe 6 : Données de l'ARS du Morbihan**

**Annexe 7 : Exemple de balances ioniques pour trois  
campagnes de prélèvements**

## Annexe 1 : Compte-rendu des COPILs

### **Cr de réunion n°1 : Projet étude des teneurs en Aluminium de quelques captages Eau potable sur le périmètre du plateau de Millevaches**

**Date** : 16-09-2014 de 10H à 12H15 à Meymac

**Présents** :

- G. Rodier & J. Collet (PNR Millevaches)
- M. Rateau (AE Adour Garonne)
- R. Genet et M. Rasselet (DT 19 ARS)
- N. Bardin (EPIDOR)
- F. Bordas, R. Buzier, G. Guibaud (GRESE, Université Limoges)
- S. Lorient (EPBV), excusé

#### **Rappel du contexte de l'étude.**

Cette étude a été initiée par Mr V. Magnet (PNR Millevaches) au printemps 2013. Un projet d'étude auprès des 2 agences de l'eau AG et LB a été déposé à l'été 2014 par le GRESE et le PNR Millevaches. Au printemps 2014, l'AEAG a accepté de financer le suivi par le GRESE de 4 captages du territoire sur une durée de un an.

Dans les captages d'eau non traitée par coagulation floculation, l'aluminium provient naturellement des sols et peut atteindre des teneurs pouvant dépasser la **référence de qualité fixée à 200µg/L**.

Les phénomènes conduisant à la mise en circulation de cet aluminium sont relativement bien connus et liés à des facteurs naturels (socle géologique cristallin, sols acides pauvres en bases échangeables, forte présence de zones humides à caractère acide, pluviométrie importante) et anthropiques liés à la sylviculture (acidification des sols due à des apports importants de matière organique provenant de la décomposition des aiguilles et feuilles).

#### **Discussion autour du contexte de l'eau potable sur le plateau de Millevaches**

On retiendra :

Beaucoup de captages rassemblés ou pas en plusieurs UDI, même pour l'alimentation de petites communes.

Une réticence sociologique vis-à-vis du traitement des eaux faussement réputées de « bonne qualité ».

Une gestion très isolée souvent à l'échelle de la commune qui ne permet pas une mise en place de traitements permettant de lutter contre les dérives de qualité (microbiologique, agressivité, Al, ...). Une structuration serait nécessaire pour augmenter les niveaux de compétences de gestion et de traitement. L'AEAG est prête à suivre financièrement les acteurs locaux.

Un relais des gestionnaires (PNR, EPTB) entre élus et services de l'état et AEAG pourrait permettre de faire avancer cette structuration nécessaire autour de l'AEP.

Dans ce sens, il est souhaitable d'ajouter le CG19 dans le pilotage de cette étude spécifique (F. Servières : [fservieres@cg19.fr](mailto:fservieres@cg19.fr)).

#### **Choix des points de mesure.**

A partir de l'analyse des extractions de SISEaux sur la période 2004-2014 sur le suivi des captages du plateau de Millevaches de l'UT19 de l'ARS (Al, pH, CE), il a été pré-sélectionné les communes suivantes pour servir de support à l'étude : Peyrelevade, Meymac, Lestards, Bonnefond, Toy Viam, Tarnac, St Sulpice Les Bois, St Augustin, Chaumeil.

L'UT19 de l'ARS a fourni comme convenu des données complémentaires pour effectuer le choix final des captages de l'étude :

Commune	UDI	CAP	Code	Personnes concernées
Meymac	Celle	Celle	000762	111
Bonnefond	Chadebec	Font Freyde	000053	21
Lestard	Lestard Bourg	Bourg	001215	65
Saint Sulpice les Bois	Cisterne	puy Clamoudet	00277	12
Toy Viam	Toy Viam Bourg	Montagne du Toy	000688	28
Peyrelevade	Drouillat	Font Vieille - source du drouillat	000809	16
Peyrelevade	Bessasas	Source de Geneyte (puits)	000811	10

Ces données nouvelles ont été intégrées à la synthèse présentée en réunion (cf. tableau en dernière page). Tous ces captages dépassent ou s'approchent (Drouillat, Peyrelevade) de la référence de qualité de l'AI, mais au vu du très faible nombre de données (1 ou 2 mesures), il est difficile de faire un choix sur la seule teneur de cet élément. Le choix final se fera par échange mail, en tenant compte de l'autorisation des maires pour travailler sur les captages et de l'accessibilité.

Un premier repérage des captages a été effectué sur les communes de Meymac et Toy Viam.

#### **Conduite et communication des résultats de l'étude.**

Il faudra obtenir l'autorisation des maires pour travailler sur les captages. Une fois le choix des sites fait, le PNR et le GRESE prendront contact avec les élus.

Les résultats de l'étude sont publics, mais il est souhaitable de maîtriser la communication. Elle sera faite dans un premier temps vers les élus et les organismes compétents en matière de gestion de l'eau. Par la suite, une communication adaptée à un public plus large sera réfléchie avec les différents acteurs de cette étude.

Un premier bilan de l'étude est prévu sur la 2<sup>e</sup> quinzaine du mois de février 2015. Le public visé sera les acteurs de cette étude ainsi que les élus du plateau.

Communes n'utilisant pas Al et présentant régulièrement Al>200 µg/L (exclusion des communes ne ressortant qu'une ou 2 fois)

Ne sont pas considérées les lignes où pas de mesure d'Al. Etant donné la fréquence de prélèvement faible, tous les autres prélèvements sont considérés

En rouge les captages qui ont été isolés

nom UGE	Utilisation FeCl3	TYPE D'EAU	TYPE INST	nom INST si unique	n	n [Al] > 200 µg/L	Fréquence dépassement	[Al] µg/L (moy)	[Al] µg/L (SD)	[Al] µg/L (max)	CDT 25 (moy)	CDT 25 (SD)	pH (moy)	pH (SD)	Code installation
PEYRELEVADE ADDUCTION COMMUNALE		ESO	CAP		13	3	23%	142	121	349	36	12	5,8	0,4	
			CAP	REGARD FONT VIEILLE, DROUILLAT	1	0	0%			189					000809
			CAP	REGARD SOURCE DE GENEYTE	1	1	100%			325					000811
	/		TTP		39	13	33%	272	195	991	41	9	5,6	0,6	
MEYMAC ADDUCTION COMMUNALE		ESO	CAP, MCA		50	10	20%	222	134	822	40	37	6,2	2,2	000762
			CAP	CELLE	2	2	100%	248		265					
	/		TTP		25	6	24%	94	92	239	31	8	5,8	0,4	
			UDI	CELLE	7	6	86%	227	29	278	34	2	5,3	0,2	
LESTARDS ADDUCTION COMMUNALE		ESO	CAP		5	1	20%	133	104	287	30	5	5,3	0,2	
			CAP	REGARD LE BOURG	3	1	33%			287					001215
	/		TTP		15	4	27%	146	82	297	29	4	5,6	0,5	
BONNEFOND ADDUCTION COMMUNALE			UDI	LESTARDS BOURG	12	10	83%	304	173	798	30	6	5,3	0,2	
		ESO	CAP, MCA		10	1	10%	144	190	682	32	8	5,5	0,4	
			CAP	REGARD DE FONT FREYDE	1	1	100%			682					000053
	/		TTP		18	3	17%	160	191	690	34	9	6,4	1,7	
TOY VIAM ADDUCTION COMMUNALE			UDI	CHADEBEC	4	4	100%	416	197	680	45	7	5,2	0,1	
		ESO	CAP	MONTAGNE DU TOY	2	2	100%	265	6	269	58		6,3		000688
	/		TTP	RESERVOIR DU BOURG	7	6	86%	367	150	589	27	6	5,6	0,3	
			UDI	TOY VIAM BOURG	17	11	65%	242	110	417	24	5	5,6	0,3	
TARNAC ADDUCTION COMMUNALE		ESO	CAP, MCA		12	6	50%	212	167	515	32	5	5,6	0,4	
	/		TTP		25	12	48%	158	126	450	38	36	5,7	0,4	
			UDI		20	19	95%	333	119	550	31	4	5,3	0,2	
ST SULPICE LES BOIS ADD. COMMUNALE		ESO	CAP		8	1	13%	97	100	300	29	6	6,3	2,6	
			CAP	REGARD PUY CLAMOUDET	1	1	100%			300					00277
	/		TTP		13	5	38%	147	130	363	27	6	5,6	0,4	
ST AUGUSTIN ADDUCTION COMMUNALE			UDI	CISTERNE	6	6	100%	359	105	528	23	2	5,1	0,2	
		ESO	CAP, MCA		9	2	22%	119	88	286	28	9	5,6	0,4	
	/		TTP		35	12	34%	182	73	352	31	6	5,6	0,4	
			UDI		29	8	28%	165	90	304	28	5	5,5	0,3	
CHAUMEIL ADDUCTION COMMUNALE		ESO	CAP, MCA		9	1	11%	140	68	276	23	4	5,7	0,5	
	/		TTP		31	12	39%	182	65	310	24	6	5,6	0,4	
			UDI		26	11	42%	181	67	315	26	6	5,4	0,3	
USSEL ADDUCTION COMMUNALE		ESU	CAP	DIEGE - COUZERGUES	24	20	83%	334	204	5620	52	5	6,9	0,3	
				LASTOUILLAS	9	3	33%	201	121	429	49	5	6,9	0,3	
	OUI		TTP	COUZERGUES	22	4	18%	92	171	619	230	90	7,7	0,5	
				RESERVOIR DE FAUGERON	6	0	0%								
			UDI	USSEL VILLE	95	36	38%	176	185	1431	166	93	7,4	0,5	

## **Cr de réunion n°2 : Etude des teneurs en Aluminium de quelques captages d'eau potable sur le périmètre du plateau de Millevaches**

**Date :** 19-02-2015 de 14H15 à 18H00 à Saint Pantaléon de Larche (locaux Agence de l'Eau Adour Garonne)

### **Présents :**

- J. Collet (PNR Millevaches)
- M. Rateau (AE Adour Garonne)
- R Genet et M Rasselet (DT 19 ARS)
- N. Bardin (EPIDOR)
- R. Buzier, G. Guibaud (GRESE, Université Limoges)
- F Servières (CG 19)
- B Gratia, Docteur en Sciences, (élu, Mairie de Meymac)
- J Guerin, J Lefebvre, C Lekat (Master 2 IGEE)
- S Lorient (EPBV), excusé
- G Rodier (PNR Millevaches en Limousin), excusé

### **Point sur l'étude**

Suite au COPIL du 16/9/2014, les mairies, où les captages ont été choisis pour l'étude, ont été contactés de manière à obtenir leur accord. Un courrier co-signé par le PNR Millevaches et le GRESE a été envoyé début octobre 2014. Par la suite, plusieurs contacts téléphoniques et réunions ont été nécessaires pour obtenir l'accord définitif des communes de Lestard, Bonnefond, Meymac, Saint Sulpice Les Bois et Peyrelevade. La commune de Toy Viam n'a pas souhaité pour le moment donner une suite favorable à la demande.

La phase de mesure a débuté fin Novembre 2014 sur 6 captages au lieu de 4 prévus de manière à pouvoir le cas échéant faire un choix ultérieur, les données disponibles de l'ARS UT19 n'ayant pas permis de faire un choix définitif au COPIL 1. Les fréquences de prélèvements ont été définies comme suit :

- Hebdomadaire sur les captages de Drouillat (Peyrelevade), Celle (Meymac), Le bourg (Lestard)
- Bi-mensuelle à mensuelle sur les captages de Geneyte (Peyrelevade), Fonfreyde (Bonnefond), Cisterne (Saint Sulpice les Bois)

Parallèlement à cette étude, le GRESE a lancé plusieurs recherches additionnelles pour être d'une part en mesure d'apporter des connaissances complémentaires aux acteurs locaux et d'autre part pour pouvoir valoriser scientifiquement ces résultats sous forme d'articles scientifiques. A savoir :

- Le suivi des teneurs en As de la ressource en eau
- L'apport de la DGT à la spéciation de l'Al et la possibilité de l'utiliser comme outil de surveillance.
- La caractérisation des sols entourant 4 des captages étudiés et de leur potentiel de libération de l'Al.

### **Principaux résultats obtenus sur les 2 premiers mois de suivi et décision sur le suivi**

L'état du génie civil des captages et des périmètres de protection est très variable d'un captage à l'autre. L'environnement immédiat des captages est aussi très différent : forêts avec mélanges de feuillus et résineux, prairie, proximité de troupeaux, zone humide,...

Les teneurs en **aluminium** des captages sont stables à l'exception du captage de « le Bourg » de Lestard,. Les teneurs les plus faibles enregistrées sont pour le captage de Celle à Meymac avec une valeur oscillant autour de 200 µg/L et les plus fortes sur le captage de Drouillat à Peyrelevade et Cisterne à Saint Sulpice les Bois avec des valeurs proche de 500µg/L.

Les eaux de tous les captages présentent des **pH** acides autour de 5, une **conductivité électrique** entre 30 et 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et des **alcalinités** (TAC) très faibles de l'ordre de 0,3 $^\circ\text{f}$ . Ces résultats confirment l'agressivité des eaux bien identifiée dans la région et posent la question de la dégradation des ouvrages ainsi que du besoin de reminéralisation pour une distribution conforme à la réglementation.

Les eaux présentent des variations importantes des valeurs en **COD** oscillant entre 1 et 6 mg de C/L. Dans 1/3 des cas les valeurs enregistrées dépassent la limite de qualité de 2 mg/L de C. On notera que dans le cas des eaux étudiées sans particules, la teneur en COD est équivalente à la teneur en COT. Ces variations de teneurs en COD peuvent favoriser le développement de microorganismes dans les ouvrages et réseaux mais pose aussi la question des effets de la mise en place d'une désinfection au chlore sur la formation de sous produits (Chloramine, THM).

On notera que toutes les eaux présentent une teneur en **As** total inférieure à 1 $\mu\text{g}/\text{L}$  ou 5 $\mu\text{g}/\text{L}$  ce qui est inférieur à la limite de qualité de 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ .

Les autres paramètres sur la minéralisation des eaux qui ont été suivis (**P, Mn, Fe, F, formes de l'azote (sauf NTK)**) ne présentent pas de valeurs qui nécessitent de commentaires particuliers pour le moment. On notera des valeurs faibles en nitrates (3 à 7 mg/L) et des teneurs en Mn qui s'approche parfois de la référence de qualité de 50 $\mu\text{g}/\text{L}$  (Drouillat à Peyrelevade (40 à 46  $\mu\text{g}/\text{L}$ ), Cisterne à Saint-Sulpice les bois (46 à 49  $\mu\text{g}/\text{L}$ )).

Le système DGT permet de montrer que 40 à 60% de l'aluminium dans les eaux est sous forme libre ou sous la forme de complexes labiles.

Les premiers résultats de l'analyse des sols montrent que le pH de ces derniers est lié aux pH des eaux des captages échantillonnés : les eaux de captage ayant des pH légèrement inférieurs à 5 présentent sur leur environnement les sols les plus acides, alors que les eaux avec des pH légèrement supérieurs à 5 montrent les pH de sols les moins acides.

### **Conclusions vis-à-vis des résultats**

Les valeurs en Al des eaux des captages sont cohérentes avec les données du contrôle sanitaire et à ce qui était attendu lors du choix en COPIL n°1 et il est décidé de continuer à suivre les évolutions de l'Al et des autres paramètres physico-chimiques de ces 6 captages pour mieux comprendre la problématique, même si seulement 4 captages devaient être suivis initialement.

La question est posée sur l'impact de la distribution (réseaux, réservoir) sur l'évolution des paramètres physico-chimiques suivis en l'absence de traitement. Il est décidé de suivre jusqu'au prochain COPIL de Juin 2015 un point de distribution. Suite au COPIL, l'ARS UT19 propose de suivre la fontaine de la place de la mairie de Lestard. Ce point facile d'accès est alimenté en permanence par la surverse du réservoir du captage "le bourg". Le GRESE intègre ce point dès sa campagne de mesure de la semaine 10 de 2015.

### **Présentation du projet de plaquette sur la problématique à communication vers les élus.**

Lors du montage du projet et de son financement entre le PNR Millevaches (V Magnet), le GRESE et AEAG (JP Rebillard, M Rateau), il avait été décidé en accompagnement de l'étude de communiquer sur la thématique, notamment auprès des élus du PNR.

La manière de communiquer a été discutée lors du COPIL n°1 et il a été décidé que le COPIL validerait les documents réalisés de manière à maîtriser la communication.

Un projet de plaquette a été réalisé par un groupe de projet du Master IGEE en collaboration avec les enseignants chercheurs du GRESE, tout comme l'essai de synthèse des données ARS 2004-14 et l'exploitation des 2 premiers mois de suivi du GRESE. Les données ARS 2004-14 ont été fournies en aout et septembre 2014 par l'UT19 de l'ARS à partir d'une extraction de SISEaux, suite à la demande de AEAG et du GRESE. La demande concernait uniquement les eaux de captage sans traitement aux sels d'aluminium, pour les paramètres Al, pH et CE, sur le périmètre corrézien du PNR de Millevaches.

Pour information et avis, ce projet de plaquette a été envoyé courant Janvier 2015 aux membres du COPIL avec pour objectif d'être débattu au COPIL de Février 2015. Seul l'ARS a émis des réserves par mail, en ne cautionnant pas le contenu et la forme ( présentation sous format Flyer), notamment vis-à-vis des données sur les teneurs en Al des captages. Après comparaison des données ayant permis la réalisation du graphique « Concentration maximale en aluminium de différentes communes » il s'avère que les données ne concernent pas uniquement des résultats d'analyses des captages. Pour exemple la concentration de 991 µg/L retenue concerne le réservoir de Vinzanet à Peyrelevade, la valeur de 798 µg/L concerne une unité de distribution.

Le contenu de la plaquette a longuement été débattu en COPIL, on peut retenir :

- la quantité de données disponibles de 2004-14 par l'ARS UT19 sur chaque captage rend l'exploitation statistique peu robuste. En effet, l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution précise que la fréquence annuelle des prélèvements d'échantillons d'eau et d'analyses d'eau prélevée sur une ressource ayant un débit inférieur à 10 m<sup>3</sup>/J est de 0,2 (soit un prélèvement tous les cinq ans) On peut cependant calculer quelques indicateurs, comme cela a été proposé dans le projet de plaquette,
- L'ARS UT 19 a recalculé pour vérification et complété ces indicateurs **pour la partie corrézienne du PNR Millevaches** et les a communiqué au COPIL : 21 communes touchées par des captages dépassant la référence de qualité pour Al, 15 UDI ( zone de distribution d'une eau de qualité homogène) sur 54 présentent des non-conformités pour le paramètre Al soit 27.8%, ce qui représente 6.2 % (env. 1400 personnes résidant permanent) de la population corrézienne du PNR concernés par la problématique Al.
- Mr Gracia fait remarquer que selon lui, il est très réducteur d'attribuer à la forêt, notamment de résineux, la responsabilité de l'acidification des sols de la région et que l'on peut prendre en compte de nombreux autres phénomènes : les autres essences forestières, la neige, les dépôts atmosphériques, la réduction du Fe dans les sols, .... qui auraient une importance bien plus forte dans ce phénomène. Il souligne que selon lui des moyens techniques existent pour lutter efficacement et de manière pérenne sur l'acidification des sols. Selon lui, l'augmentation des fréquences de culture forestière est un facteur qui peut localement augmenter l'aluminisation des sols. Il suggère d'intégrer la pluviométrie aux données enregistrées sur les captages et de mettre en relation l'aluminium mesuré dans les eaux à la somme des anions ou des cations exprimée en méq/L.
- Contrairement à ce qui est avancé dans la plaquette basée sur des publications scientifiques et les recommandations de l'EFSA (1 mg/kg de PC/semaine), L'agence régionale de santé souligne que, les études de l'ANSES de 2008 n'ont pas pu conclure vis-à-vis du lien entre Maladie d'Alzheimer et ingestion d'Al dans l'alimentation.
- Avec une eau à 500µg/L d'Al au lieu de 200µg/L, la part d'aluminium ingérée par un homme de 75kg via l'eau de boisson passe de 2,8 à 7% au regard de la préconisation de l'EFSA (1 mg/kg de PC/semaine). Cette contribution de l'eau de boisson peut sembler modeste, comme le font remarquer certains membres du COPIL, mais on ne sait pas anticiper les effets potentiels sur la santé de l'homme à long terme.

L'ARS émet des doutes sur la pertinence d'une plaquette pour communiquer devant le nombre de cas particulier qu'elle estime sur le territoire.

Le PNR de Millevaches maintient sa volonté initiale de valoriser les résultats obtenus au travers d'opérations de communication à destination principalement des élus locaux. La plaquette présentée pourra être réétudiée lorsque le COPIL aura partagé des constats et validé les conclusions de l'étude. D'autres propositions de vulgarisation des données pourront également être discutées mais à ce stade, il faut se concentrer davantage sur la méthode et les résultats de l'étude.

Par ailleurs, le PNR de Millevaches rappelle que la problématique de l'eau potable ne doit pas être déconnectée du milieu dans lequel elle est produite. Nous ne pouvons pas aborder les solutions uniquement curatives pour améliorer la qualité de l'eau (chaulage notamment) mais il est important d'aborder les sources de perturbation sur lesquelles il est possible d'agir (même si cette étude n'a pas vocation à les lister de manière exhaustive ou les hiérarchiser). Cette étude doit à terme permettre de créer des relations plus étroites entre production d'eau potable et outils de gestion des milieux aquatiques tels que les contrats territoriaux.

Il est décidé :

- de ne pas travailler sur le projet de plaquette actuel pour le moment et de ne pas le diffuser devant le manque de données sur chaque captage sur la qualité de la ressource en eau pour l'Al disponible par les ARS,
- de trouver un porteur de projet pour communiquer une fois l'étude terminée,
- de réfléchir à un support et une démarche adaptée et d'accompagner les collectivités,
- d'une démarche globale des acteurs concernés.

### **Questions et informations diverses**

Y a t il des traitements adaptés aux très petits captages pour traiter les problématiques connues et confirmées en partie par cette étude : bactériologie, agressivité, présence d'Al, de COD.

Les ARS des départements 88, 90, 70 vont être interrogées par leur collègue du Limousin pour connaître leur retour d'expérience vis à vis de ces problématiques. En effet, ces régions ont été fortement touchées en France par l'acidification des sols et les libérations d'Al dans les années 80-90 aux dépôts atmosphériques acides en provenance de l'industrie lourde de l'Est de l'Europe renforcé par la culture intensive de résineux sur un contexte géologique défavorable.

Un message a été adressé par mail le 26 février 2015. Si des éléments sont retournés l'agence régionale de santé en fera part à l'ensemble des membres du Copil.

Un prochain COPIL est prévu en juin 2015 pour discuter de résultats obtenus sur 6 mois de suivi sur les captages et sur le point en distribution ajouté lors de ce COPIL.

### **Remarque**

Suite à ce COPIL, un document de synthèse avec la présentation des captages et les premiers résultats de suivi a été diffusé aux membres du COPIL.

## Cr de réunion n°3 : Etude des teneurs en Aluminium de quelques captages d'eau potable sur le périmètre du plateau de Millevaches

Date : 16-09-2015 de 14H00 à 17H30 à Saint Pantaléon de Larche (locaux Agence de l'Eau Adour Garonne)

Présents :

- J. Collet (PNR Millevaches)
- M. Rateau (AE Adour Garonne)
- M Rasselet (DT 19 ARS)
- F Servières (CD 19)
- R. Buzier, G. Guibaud (GRESE, Université Limoges)
- S Lorient (EPBV), excusé
- G Rodier (PNR Millevaches en Limousin), excusé
- N. Bardin (EPIDOR), excusée
- B Gratia, Docteur en Sciences, (élu, Mairie de Meymac), excusé

Ce compte-rendu complète le rapport et le diaporama de présentation envoyé par mail.

A/ Suite à la présentation des résultats plusieurs questions se posent par rapport à la qualité des eaux des captages:

i) Variation des teneurs en matières organiques des eaux et risque de création de sous-produits donnant des goûts à l'eau ou soumis à réglementation comme les THM, en cas de mise en place d'un système de désinfection par chloration.

- L'ARS 19 doit examiner ses bases de données pour savoir si des analyses ont été faites concernant les sous-produits de chloration dans des captages similaires à ceux de l'étude.
- Les stratégies de désinfection sont aussi à réfléchir, car ces dernières au vu du contexte local s'avèrent nécessaire pour sécuriser microbiologiquement la qualité des des eaux distribuées.

ii) Variations des teneurs en aluminium.

- M Rateau expose un rapport de 2003 des agences de l'eau qui préconise de boiser les points de captages pour les protéger. Si les préconisations de ce rapport restent globalement valables, il conviendra cependant de les moduler en tenant mieux compte des contextes locaux, notamment au niveau du potentiel de relargage des sols en éléments chimiques comme l'Al.
- Pour l'instant, les variations enregistrées en période sèche montrent l'importance de la pluviométrie dans le phénomène de migration de l'aluminium des sols vers l'eau captée. B Gratia, par mail, expose une méthode qui permettrait d'identifier les ions co-migrants avec l'aluminium.
- Une reminéralisation est elle capable d'éliminer l'Al par remontée du pH et précipitation : ceci permettrait de traiter 2 problèmes de qualité des eaux à la fois, i.e. agressivité et aluminium. Chimiquement, cela est possible, mais il conviendra de le vérifier par l'expérience, car un pH local trop basique sur les colonnes de calcaire terrestre pourrait resolubiliser l'Al ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ) qui dans un premier temps aurait précipité ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).
- L'interrogation de l'ARS 19 au sujet d'éventuel traitement ou gestion de la problématique Al, des ARS du secteur du Massif des Vosges (88, ...) n'a pas obtenu de retour.

iii) Le sol comme point central des dérives de qualité des eaux vis à vis de l'Al et de la Matière organique : plusieurs réflexions sont discutées pour essayer de mettre en place des mesures de gestion pour prévenir et ou limiter la circulation de ces éléments.

- sur quels captages doit on porter des efforts de préservation ? les captages avec des teneurs autour de 200µg/L ou inférieures à cette valeur pourraient être ciblés prioritairement.
- a-t'on une idée des impacts des essences dans le contexte local sur la qualité des sols, notamment en terme de production de matières organiques à l'origine de l'altération des sols lors

de sa décomposition? D'après l'expertise de B Gratia, exposé lors des réunions passées, l'accélération des rotations de cultures est le problème essentiel plus que l'essence considérée. La synthèse sur l'environnement immédiat des captages et les teneurs en aluminium observées présentée lors de la réunion tend à soutenir cette hypothèse, i.e il n'y a pas de relation absolue entre les teneurs en Al des eaux et l'environnement immédiat des captages visible aujourd'hui.

- est-on en mesure de recommander un périmètre autour des captages permettant de limiter les impacts de l'évolution des sols sous différentes contraintes ? Cette étude n'est pas suffisante pour préconiser une distance ou une surface de vigilance, mais il est fort probable que des mesures pour préserver la qualité des sols à l'abord immédiat des captages ne peuvent être que bénéfiques à moyen-long terme ou au pire ne peuvent pas aggraver les teneurs actuelles d'Aluminium. Seules des études sur des suivis de tendance dans des contextes bien définis, permettront de répondre plus précisément à cette question.

#### B/ Conclusion

De l'avis général de tous les techniciens réunit, il conviendrait aujourd'hui que les élus se réapproprient la problématique "Eau potable" sur le secteur d'étude pour permettre la mise en place de mesures améliorant la qualité des eaux distribuées. Il convient aussi d'informer Mr le Préfet de la Corrèze des résultats obtenus par cette étude et des interrogations qui en découlent. Pour remobiliser les décideurs concernés, il est proposé de présenter les premiers résultats de l'étude aux élus du secteur d'étude, en présence des services compétents de la Préfecture de Corrèze. Pour mener à bien ce projet de réunion qui pourrait se tenir en Novembre 2015 :

- Le PNR millevaches se chargent d'interroger les élus courant Octobre 2015,
- L'ARS doit informer les services de Mr le Préfet de la Corrèze oralement et/ou via une note
- Le GRESE se prépare à exposer les résultats de cette étude et les questions qu'elle pose.

#### C/ Complément apporté par le PNR Millevaches par mail du 02/10/2015

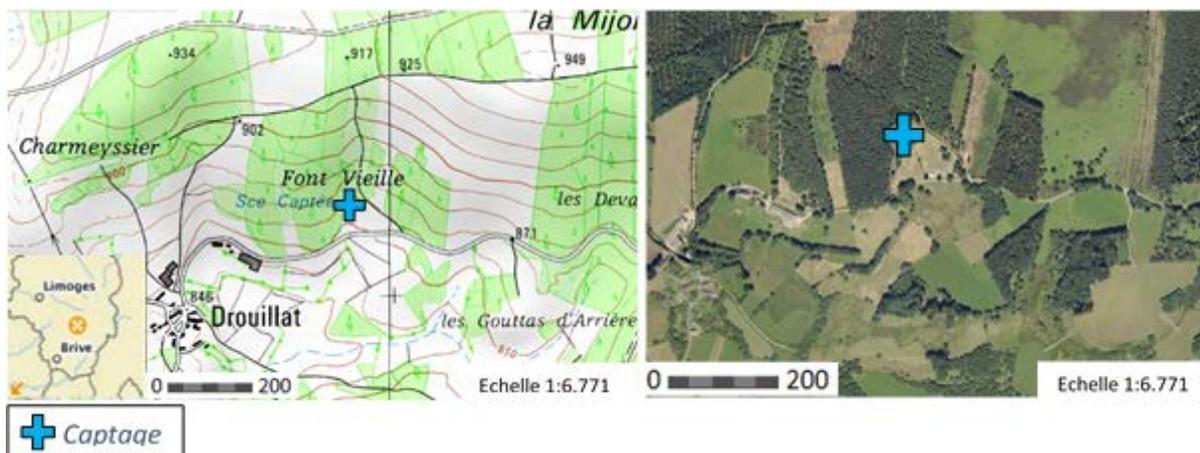
*" L'information par le PNR en direction des élus sera précédée d'un avis du conseil scientifique du Parc (mi-octobre) - cet avis sera présenté par la suite en bureau syndical (courant novembre) pour valider un niveau d'information et une méthode d'information (si la Corrèze est concernée par l'étude, les 3 départements sont concernés par la problématique).*

*L'information portée auprès de la Préfecture doit comporter le besoin de diffuser l'information auprès DES préfectures. Les possibilités de gestion des aires d'alimentation de captage doivent être abordées en indiquant qu'une étude supplémentaire devrait être menée pour définir les modalités de gestion dans le but d'épargner au maximum les solutions de traitements des eaux de captages. Il est évident que la gestion 'de prévention' portée sur les périmètres de protection de captage est insuffisante pour assurer une eau de qualité pour la plupart des paramètres et inadaptée pour la question de l'aluminium. (Cf. Rapport interministériel n°008725-01 - 'Pour une meilleure efficacité et une simplification des dispositions relatives à la protection des captages d'eau potable' - juin 2014 - <http://agriculture.gouv.fr/ministere/pour-une-meilleure-efficacite-et-une-simplification-des-dispositions-relatives-la> ). La (ou les) Préfecture(s) doivent prendre la mesure du travail à amorcer...*

*En parallèle, il conviendrait de faire un point bibliographique sur les effets avérés et potentiels de l'aluminium pour ne pas se limiter à des mises en relations hâtives et pour éviter des préoccupations inutiles."*

**Annexe 2 : Localisation des captages (source Géoportail) et vue d'ensemble des paramètres mesurés sur les captages pour la période du 24 novembre 2014 au 23 novembre 2015**

**Captage de Drouillat**



Paramètre	Moyenne ± Ecart type (n=48)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	9,2 ± 0,9	8,1-12,1	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	5 ± 0,1	4,8-5,2	≥ 6,5 et ≤ à 9 <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,27 ± 0,04	0,18-0,33	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C (µS/cm)	36± 4	31-52	≥ 180 et ≤ 1 000 <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	95 ± 3	79-100	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> (µg/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	2,7 ± 0,7	1,4-4,0	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	5,8 ± 1,7	1,8-9,1	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	1,2 ± 0,3	0,4-1,8	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	2,3 ± 0,3	1,8-3,6	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	1,3 ± 0,2	0,9-1,6	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,29 ± 0,09	0,20-0,81	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,43 ± 0,05	0,33-0,52	
Si (mg/L)	2,4 ± 0,3	1,2-2,8	
Al (µg/L)	412 ± 87	257-624	200 <sup>(R)</sup>
As (µg/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer (µg/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn (µg/L)	40 ± 8	27-65	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC/L)	0,8 ± 0,3	0,4-1,8	2 <sup>(R)</sup>

<sup>(L)</sup> : limite de qualité

<sup>(R)</sup> : référence de qualité

## Captage de Celle

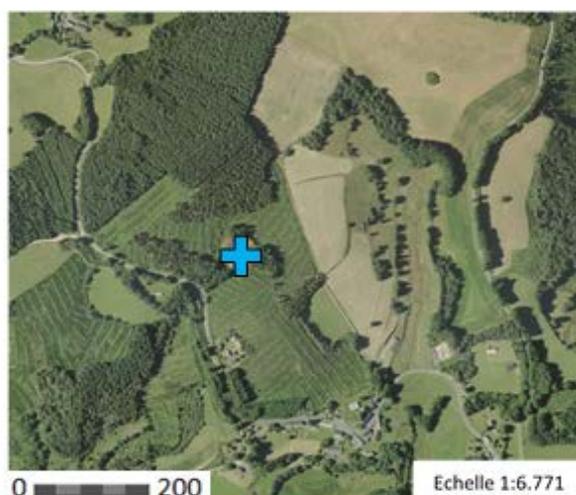
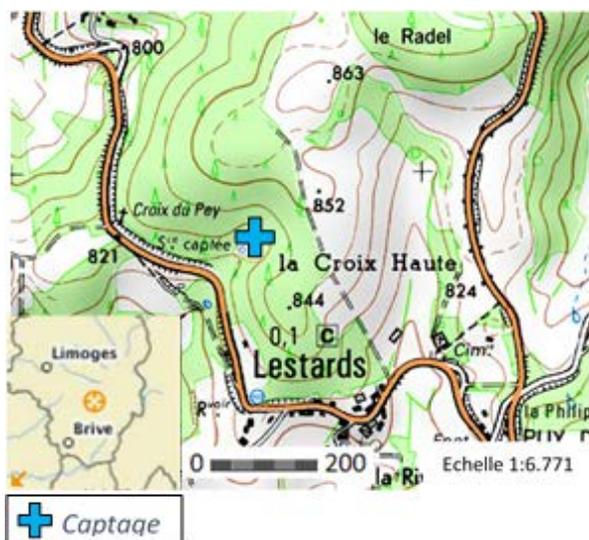


Paramètre	Moyenne ± Ecart type (n=50)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	9,9 ± 1,6	5,8-12,7	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	5,0 ± 0,1	4,8-5,1	≥ 6,5 et ≤ à 9 <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,28 ± 0,05	0,04-0,38	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C (µS/cm)	34 ± 3	28-38	≥ 180 et ≤ 1 000 <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	91 ± 2	86-95	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> (µg/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	2,5 ± 0,8	1,4-4,9	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	5,0 ± 1,6	2,7-11,1	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	2,1 ± 0,6	1,2-4,5	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	2,0 ± 0,3	1,4-2,6	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	1,8 ± 0,2	1,1-2,5	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,81 ± 0,08	0,60-0,99	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,33 ± 0,03	0,25-0,39	
Si (mg/L)	2,7 ± 0,5	2,0-3,8	
Al (µg/L)	211 ± 19	151-238	200 <sup>(R)</sup>
As (µg/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer (µg/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn (µg/L)	18 ± 2	13-25	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC /L)	1,1 ± 0,4	0,5-2,6	2 <sup>(R)</sup>

<sup>(L)</sup> : limite de qualité

<sup>(R)</sup> : référence de qualité

## Captage de Lestards

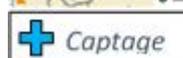
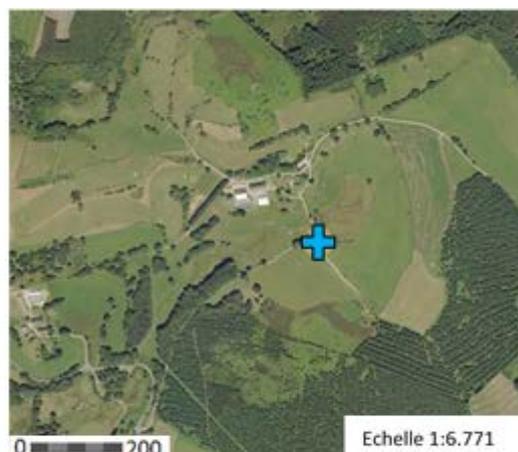
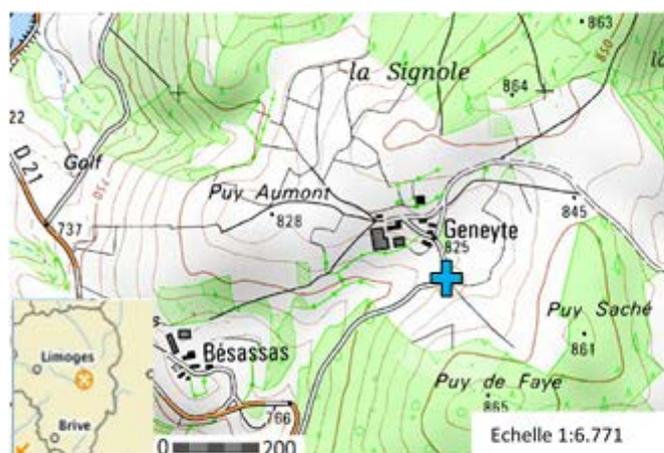


Paramètre	Moyenne $\pm$ Ecart type (n=50)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	10,0 $\pm$ 1,4	7,0-13,4	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	5,0 $\pm$ 0,1	4,8-5,3	$\geq 6,5$ et $\leq 9$ <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,27 $\pm$ 0,03	0,19-0,36	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C ( $\mu$ S/cm)	29 $\pm$ 1,6	27-36	$\geq 180$ et $\leq 1\ 000$ <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	82 $\pm$ 6	71-91	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> ( $\mu$ g/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	2,6 $\pm$ 0,7	1,8-5,1	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu$ g/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	4,4 $\pm$ 0,8	2,8-6,2	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	1,1 $\pm$ 0,3	0,7-1,8	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu$ g/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	2,2 $\pm$ 0,3	1,6-3,5	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	1,2 $\pm$ 0,1	0,8-1,4	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,33 $\pm$ 0,05	0,24-0,44	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,35 $\pm$ 0,03	0,26-0,42	
Si (mg/L)	2,3 $\pm$ 0,3	1,7-2,7	
Al ( $\mu$ g/L)	180 $\pm$ 47	112-300	200 <sup>(R)</sup>
As ( $\mu$ g/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer ( $\mu$ g/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn ( $\mu$ g/L)	30 $\pm$ 6	21-43	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC /L)	0,9 $\pm$ 0,3	0,4-1,9	2 <sup>(R)</sup>

<sup>(L)</sup> : limite de qualité

<sup>(R)</sup> : référence de qualité

## Captage de Geneyte

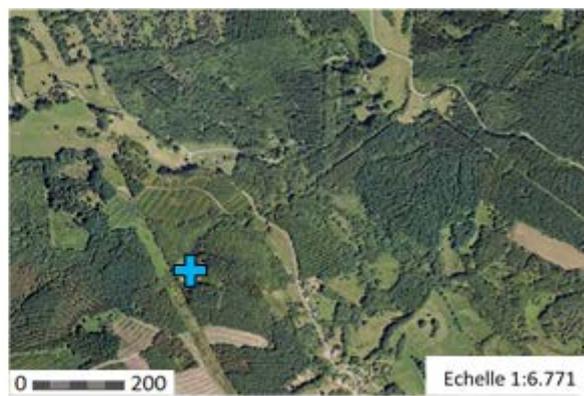
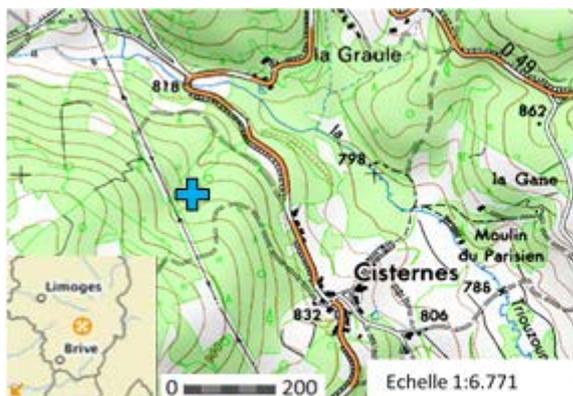


Paramètre	Moyenne ± Ecart type (n=27)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	10,0 ± 0,9	7,9-11,6	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	5,0 ± 0,1	4,8-5,2	≥ 6,5 et ≤ 9 <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,34 ± 0,04	0,28-0,40	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C (µS/cm)	42 ± 5	35-61	≥ 180 et ≤ 1 000 <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	89 ± 4	82-96	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> (µg/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	2,9 ± 0,9	1,9-5,4	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	7,7 ± 3,0	5,4-15,7	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	1,8 ± 0,4	1,3-2,6	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1,7 ± 0,2	1,2-2,1	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	2,4 ± 0,3	1,6-2,8	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,59 ± 0,07	0,42-0,71	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,61 ± 0,08	0,46-0,79	
Si (mg/L)	2,26 ± 0,25	1,66-2,57	
Al (µg/L)	302 ± 25	235-329	200 <sup>(R)</sup>
As (µg/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer (µg/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn (µg/L)	17 ± 3	12-23	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC /L)	0,94 ± 0,27	0,53-1,68	2 <sup>(R)</sup>

<sup>(L)</sup> : limite de qualité

<sup>(R)</sup> : référence de qualité

## Captage de Cisternes

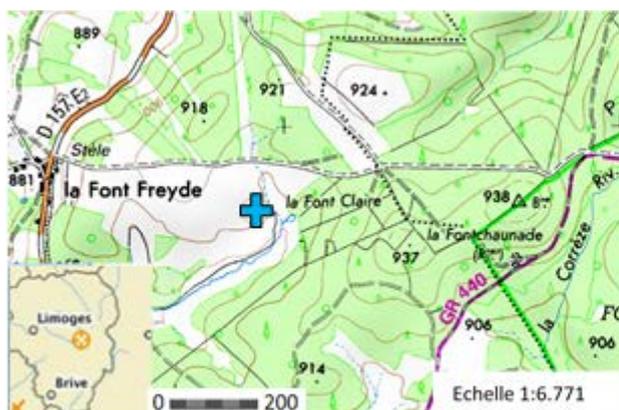


Paramètre	Moyenne ± Ecart type (n=29)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	8,9 ± 1,1	6,8-11,8	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	4,8 ± 0,1	4,7-5,0	≥ 6,5 et ≤ à 9 <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,23 ± 0,03	0,15-0,29	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C (µS/cm)	29,5 ± 1,4	27,2-33,5	≥ 180 et ≤ 1 000 <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	93 ± 3	87-97	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> (µg/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	2,2 ± 0,4	1,5-3,3	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	5,0 ± 1,1	2,7-7,6	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	1,1 ± 0,3	0,6-1,6	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1,8 ± 0,2	1,4-2,8	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	0,9 ± 0,1	0,6-1,1	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,44 ± 0,06	0,33-0,60	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,25 ± 0,03	0,19-0,30	
Si (mg/L)	2,0 ± 0,2	1,4-2,8	
Al (µg/L)	493 ± 59	324-622	200 <sup>(R)</sup>
As (µg/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer (µg/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn (µg/L)	46,1 ± 6,0	33,7-64,5	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC /L)	1,0 ± 0,5	0,42-3,1	2 <sup>(R)</sup>

(L) : limite de qualité

(R) : référence de qualité

## Captage de Bonnefond



Paramètre	Moyenne ± Ecart type (n=21)	Minimum - Maximum	Limite/référence de qualité
Température (°C)	9,0 ± 1,3	5,4-10,7	<25°C <sup>(R)</sup>
pH	5,1 ± 0,1	4,95-5,4	≥ 6,5 et ≤ à 9 <sup>(R)</sup>
TAC (°f)	0,29 ± 0,04	0,23-0,4	8 (valeur usuelle en exploitation)
Conductivité à 20°C (µS/cm)	30 ± 2	25-33	≥ 180 et ≤ 1 000 <sup>(R)</sup>
Taux de saturation en oxygène dissous (%)	91 ± 5	81-98	< 30 <sup>(L)</sup>
F <sup>-</sup> (µg/L)*	<170		1 500 <sup>(L)</sup>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)*	1,5 ± 0,7	0,4-3,8	250 <sup>(R)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)*	<25		500 <sup>(L)</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)*	5,7 ± 1,6	1,9-8,4	50 <sup>(L)</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)*	2,2 ± 0,7	0,6-3,1	250 <sup>(R)</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/L)*	<25		
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1,7 ± 0,2	1,2-1,9	200 <sup>(R)</sup>
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	1,6 ± 0,2	1,4-1,8	
K <sup>+</sup> (mg/L)	0,25 ± 0,04	0,16-0,30	
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	0,50 ± 0,06	0,35-0,56	
Si (mg/L)	2,34 ± 0,33	1,73-2,84	
Al (µg/L)	229 ± 30	179-288	200 <sup>(R)</sup>
As (µg/L)	<1		10 <sup>(L)</sup>
Fer (µg/L)	<30		200 <sup>(R)</sup>
Mn (µg/L)	26 ± 4	16-33	50 <sup>(R)</sup>
COD (mgC /L)	0,9 ± 0,3	0,4-1,9	2 <sup>(R)</sup>

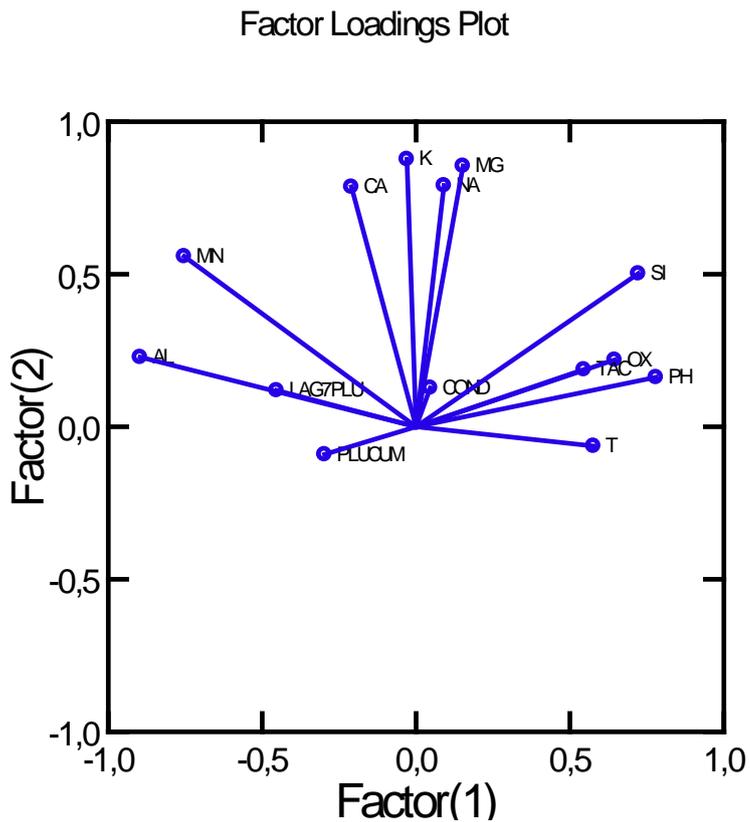
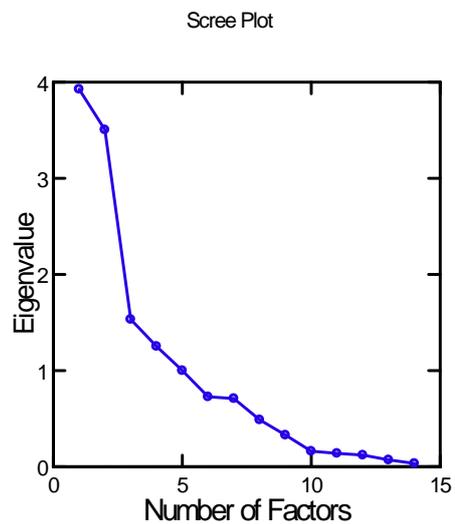
<sup>(L)</sup> : limite de qualité

<sup>(R)</sup> : référence de qualité

### Annexe 3 : ACP pour le captage de Lestards

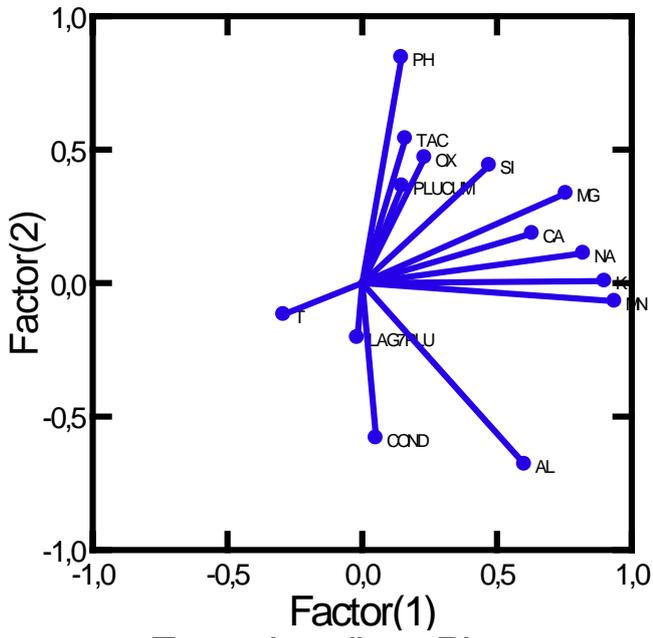
- Analyse générale :

Percent of Total Variance Explained	
1	2
27,99017	25,10050

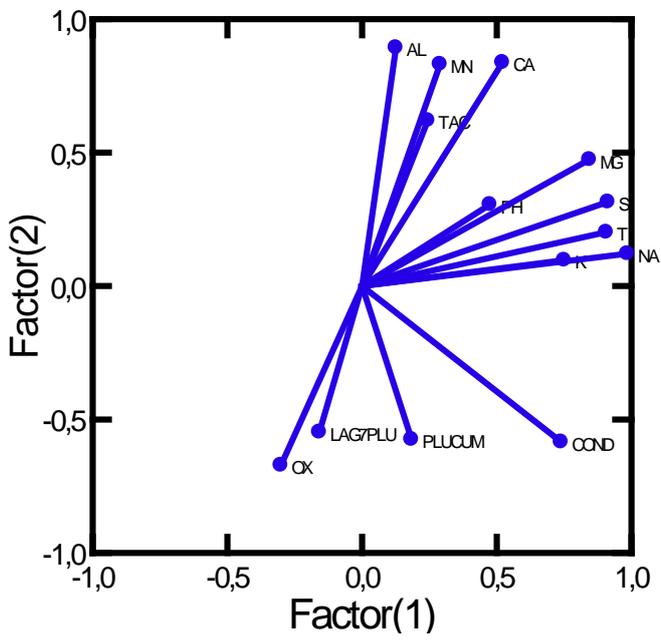


- Analyse par période de température et de pluviométrie

Factor Loadings Plot

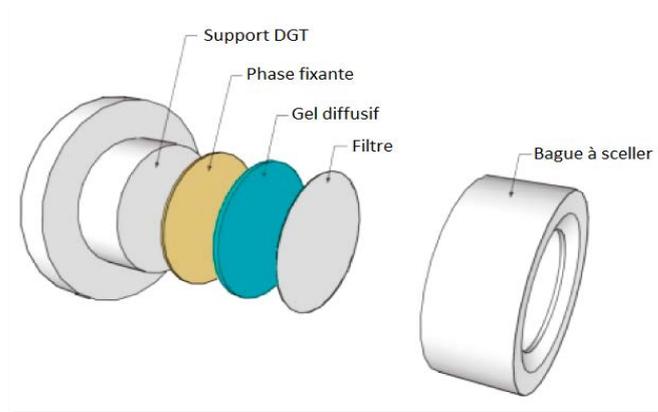


Factor Loadings Plot



## **Annexe 4 : DGT : Concentrations en aluminium dissous et labile (mesuré par DGT)**

### **Photo et vue éclatée d'un échantillonneur DGT**



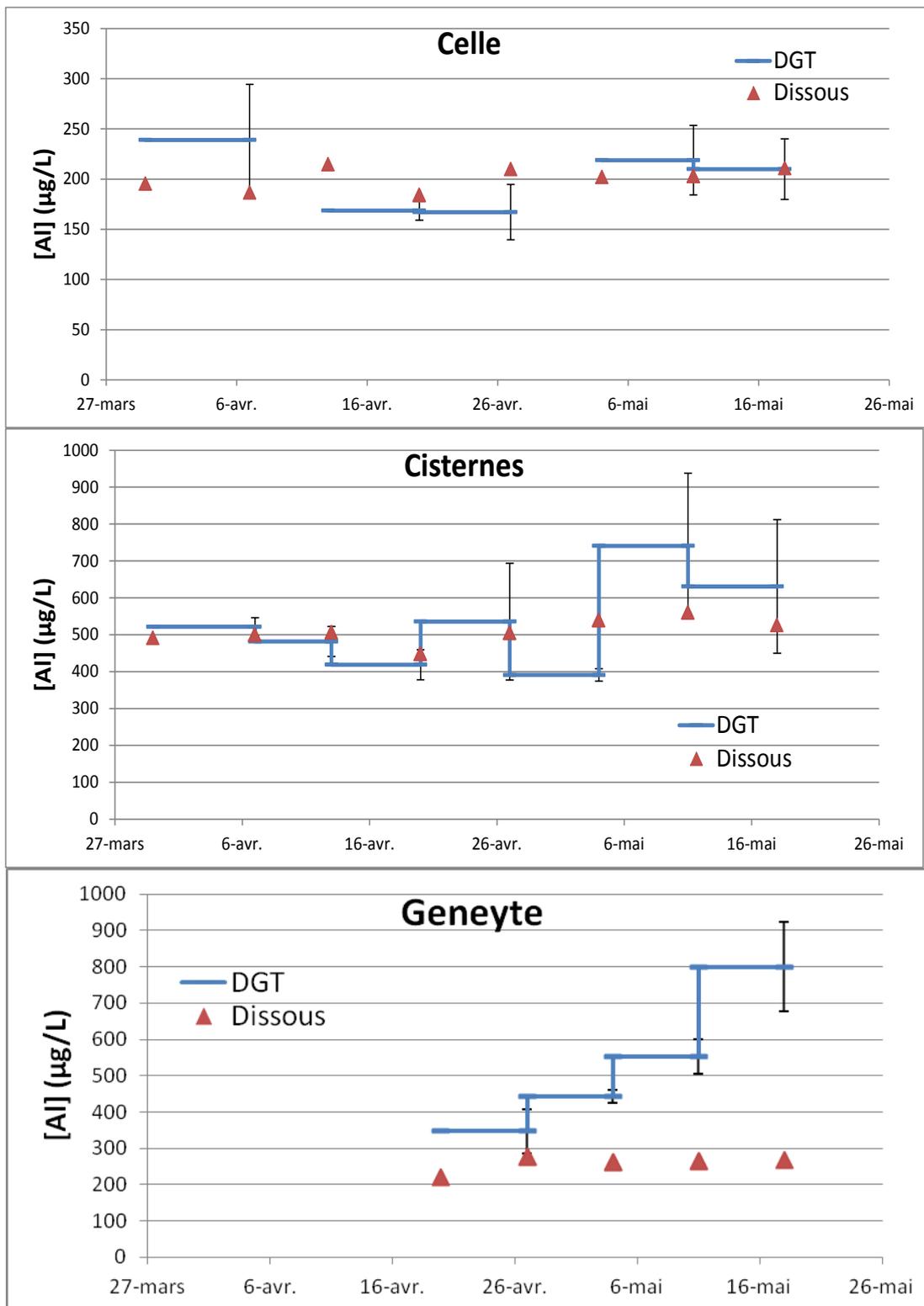
### **Mise en œuvre au captage de Celle**



### **Mise en œuvre au captage de Cisternes**



## Concentrations en aluminium dissous et labile (mesuré par DGT)



## Annexe 5 : Contacts ARS

ARS	Délégation territoriale	Contact	Coordonnées
Champagne-Ardenne	Ardennes		03 24 59 72 00
Bourgogne	Côte d'or		08 20 20 85 20
	Saône et Loire		
Lorraine	Vosges	Nicolas Reynaud	03 29 64 66 56 <a href="mailto:nicolas.reynaud@ars.sante.fr">nicolas.reynaud@ars.sante.fr</a>
		Antoine Gendarme	03 29 64 66 52 <a href="mailto:antoine.gendarme@ars.sante.fr">antoine.gendarme@ars.sante.fr</a>
Bretagne	Morbihan	Myriam Beillon	02 97 62 77 45 <a href="mailto:myriam.beillon@ars.sante.fr">myriam.beillon@ars.sante.fr</a>

## **Annexe 6 : Données de l'ARS du Morbihan (56)**

<b>Captage</b>	<b>Commune</b>	<b>Nombre de mesures</b>	<b>Dates</b>	<b>Al moy (µg/L)</b>
SAINT COLOMBIER	SAINT NOLFF	2	2005 - 2006	210
TREFLIS	SAINT NOLFF	1	2009	283
GRANUHAC	MEUCON	1	2011	270
TY GLASS	GRANDCHAMP	1	2011	240
BRAMBAZO	BUBRY	24	2007 - 2015	355
PONT ARROCH	RIANTEC	1	2003	280
KERHON	SAINT NOLFF	2	2009 - 2011	233
GUERNEVE	MEUCON	1	2011	300
COULAC	GRANDCHAMP	1	2011	350
LOGO PUIITS 1	QUESTEMBERT	14	2010 - 2015	487
CADIGUE	GUISCRIF	1	2004	200
KERVREHEN	PRIZIAC	1	2013	310
SENCE	MALGUENAC	17	2006 - 2015	249
POULGLASS	MALGUENAC	1	2008	210
KERMER	MONTERREIN	2	2013 - 2014	275
LAMBRUN	PAIMPONT	1	2003	230
LOGO PUIITS 2	QUESTEMBERT	3	2010 - 2013	302

## Annexe 7 : Exemple de balances ioniques pour trois campagnes de prélèvements

