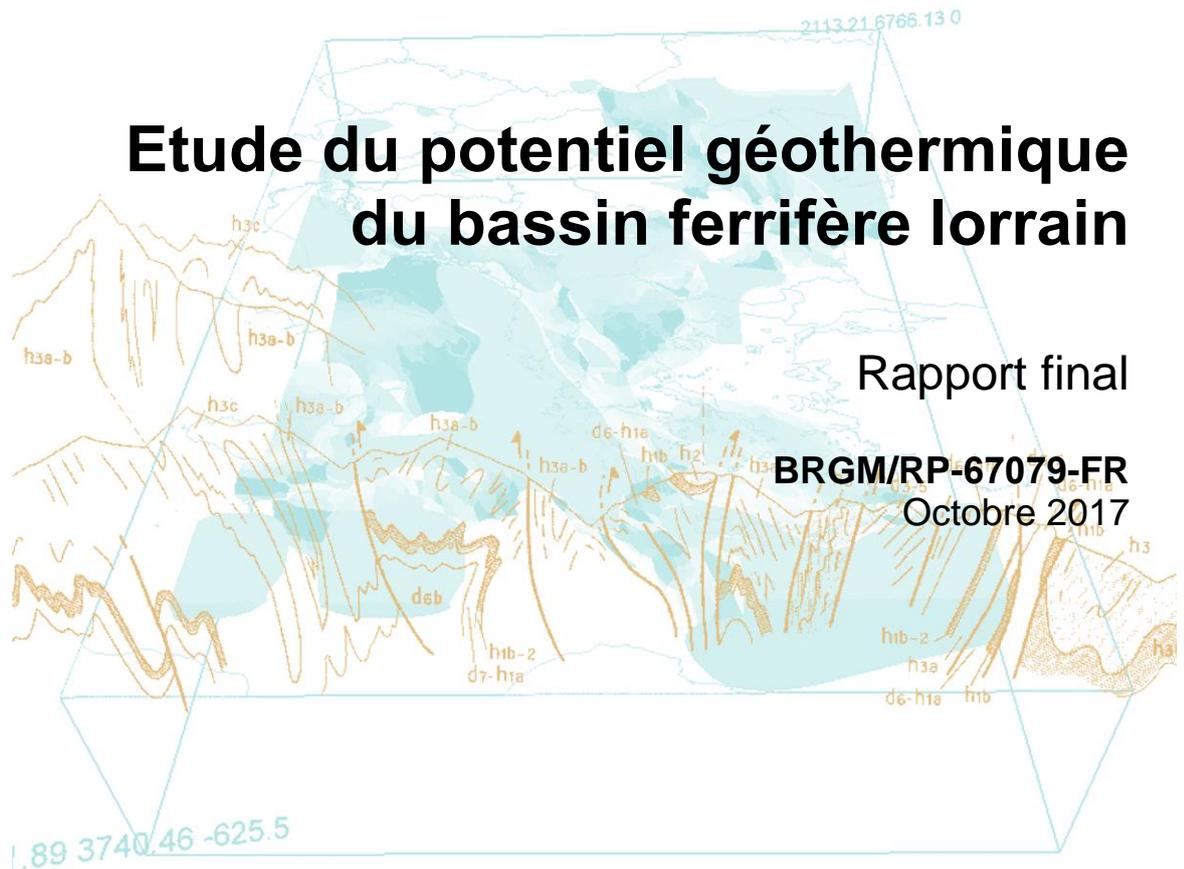




Etude du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain

Rapport final

BRGM/RP-67079-FR
Octobre 2017



Etude du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain

Rapport final

BRGM/RP-67079-FR
Octobre 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 13ENE1014

L. Vaute

Avec la collaboration de
G. Fourniguet, E. Giugliaris, C. Lored, G. Demangeon

Vérificateur :

Nom : V. Hamm

Fonction : Chef de projet
hydrogéologue– Division
Géothermie

Date : 26/10/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Midot

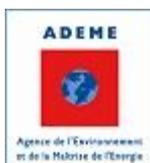
Fonction : Directeur régional
Grand-Est

Date : 27/10/2017

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : BASSIN FERRIFERE LORRAIN, RESERVOIR MINIER, GEOTHERMIE BASSE ENERGIE, POTENTIEL GEOTHERMIQUE, LORRAINE.

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

L. Vaute, G. Fourniguet, E. Giugliaris, C. Lored, G. Demangeon (2017) – Etude du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-67079-FR, 47 p., 14 ill., 5 ann.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le BRGM a été chargé d'étudier le potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie et par le Conseil Régional de la région Lorraine (aujourd'hui devenue la Région Grand Est). La connaissance de ce potentiel est en effet restreinte, or les principaux réservoirs miniers ennoyés du bassin constituent une réserve de près de 500 millions de m³ d'eau souterraine, qui pourrait représenter une opportunité d'exploitation géothermique importante. L'étude s'inscrit dans le cadre d'une démarche de valorisation géothermique du bassin ferrifère Lorrain, 25 ans après le début de l'arrêt des pompes d'exhaure dans les mines du secteur.

La présente étude a permis :

- de constituer à partir de données existantes, un référentiel d'informations sur les eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en rapport avec le potentiel géothermique des réservoirs ennoyés : ce référentiel comprend notamment la liste des points d'eau et des points d'accès aux réservoirs miniers, une caractérisation physico-chimique des eaux souterraines, une cartographie des zones urbanisées, des milieux souterrains issus de l'exploitation minière, de la profondeur des réservoirs miniers et de la profondeur du niveau piézométrique des réservoirs miniers,
- d'acquérir des données complémentaires *in situ* sur la température des eaux souterraines du réservoir minier et de la nappe du Dogger, dans les zones situées à l'aplomb des réservoirs miniers où des accès existent déjà, et de produire la cartographie associée,
- d'évaluer le potentiel géothermique intrinsèque de l'eau des réservoirs miniers sur la base de 3 critères (profondeur des travaux miniers, type de milieu souterrain créé par les travaux miniers, température de l'eau des réservoirs miniers) et de le mettre en relation cartographique avec les zones urbanisées et les zonages réglementaires,
- d'élaborer des fiches synthétiques des résultats de l'étude pour les 10 entités administratives (communautés de communes et communes) concernées par les réservoirs miniers ennoyés.

Cet état des lieux pourra être employé, grâce aux éléments recueillis et présentés dans le rapport et les documents numériques associés, pour orienter des études approfondies et détaillées sur des secteurs ciblés du bassin ferrifère.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Synthèse des données et des informations disponibles.....	11
2.1. DESCRIPTION DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN (ANNEXE 1).....	11
2.2. POINTS D'ACCES AUX RESERVOIRS ET POINTS D'EAU (ANNEXE 2).....	11
2.3. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES POINTS D'EAU (ANNEXE 3).....	12
2.4. TYPE D'EXPLOITATION A L'APLOMB DES ZONES URBANISEES ET PROFONDEUR DU TOIT DES RESERVOIRS MINIERES ET DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE.....	13
2.4.1. Zones Urbanisées.....	13
2.4.2. Type de milieu créé par les travaux miniers.....	13
2.4.3. Profondeur du toit des travaux miniers.....	14
2.4.4. Profondeur du niveau piézométrique des travaux miniers.....	14
3. Acquisition de données complémentaires sur la température.....	19
3.1. CAMPAGNES DE MESURES COMPLEMENTAIRES DE TEMPERATURE (ANNEXE 2).....	19
3.2. COMPARAISON AUX STATISTIQUES SUR LES MESURES DE TEMPERATURE DU RESEAU DE SURVEILLANCE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFERE (ANNEXE 2).....	19
4. Evaluation du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain.....	23
4.1. CALCULS PRELIMINAIRES.....	23
4.1.1. Couches d'informations nécessaires.....	23
4.1.2. Estimation d'un lien entre la profondeur et la température théorique de l'eau des réservoirs miniers.....	23
4.1.3. Recherche d'une corrélation entre l'écart à la température théorique et le taux de renouvellement de l'eau dans les travaux miniers.....	25
4.1.4. Evaluation d'une incertitude sur la température réelle liée au taux de renouvellement de l'eau.....	27
4.1.5. Conceptualisation des taux de renouvellement de l'eau dans les réservoirs miniers envoyés à différentes échelles.....	27
4.2. CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE INTRINSEQUE PAR CROISEMENT DES COUCHES D'INFORMATION ELEMENTAIRES (ANNEXE 4).....	28
4.3. TYPES D'USAGES ADAPTES A LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN.....	32
4.3.1. Généralités sur les usages potentiels d'une ressource géothermique de très basse énergie.....	32

4.3.2. Usage direct ou via une pompe à chaleur (PAC)	33
4.3.3. Exemples d'usages	34
4.4. SYSTEMES GEOTHERMIQUES ADAPTES A LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN	35
4.4.1. Les grands types d'installations géothermiques.....	35
4.4.2. Principaux critères de sélection d'une installation géothermique indépendamment des usages possibles	36
4.5. REGLEMENTATION APPLICABLE	38
4.5.1. Réglementation générale applicable aux opérations de géothermie	39
4.5.2. Dérogation au code minier pour la géothermie de minime importance	40
4.5.3. Réglementation spécifique au SAGE du bassin ferrifère lorrain.....	41
4.5.4. Carte des principaux zonages réglementaires du bassin ferrifère lorrain	43
4.6. CARTES ET FICHES SYNTHETIQUES DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE POUR LES 10 COLLECTIVITES TERRITORIALES CONCERNEES PAR LES RESERVOIRS MINIERES ENNOYES (ANNEXE 5 ET CD-ROM JOINT)	44
5. Conclusion.....	45
6. Bibliographie	47
Annexe 1 : Fiches descriptives du bassin ferrifère lorrain	
Annexe 2 : Température et caractéristiques des points d'accès à la ressource géothermique du bassin ferrifère lorrain	
Annexe 3 : Graphiques d'évolution des paramètres chimiques par point	
Annexe 4 : Calcul du potentiel géothermique intrinsèque du bassin ferrifère lorrain	
Annexe 5 et CD-ROM joint : Cartes et fiches synthétiques de présentation du potentiel géothermique pour les 10 collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés	

Table des illustrations

Illustration 1 :	Caractéristiques physico-chimiques des points d'eau.	12
Illustration 2 :	Type de milieu des travaux miniers.	15
Illustration 3 :	Profondeur du toit des travaux miniers.	16
Illustration 4 :	Profondeur du niveau piézométrique des réservoirs miniers.	17
Illustration 5 :	Température maximum des campagnes complémentaires 2014-2015.	21
Illustration 6 :	Température médiane des points du réseau de surveillance.	22
Illustration 7 :	Gradient géothermique du bassin houiller lorrain retenu pour calculer la température théorique de l'eau dans les travaux miniers du bassin ferrifère lorrain.	24
Illustration 8 :	Comparaison entre la température théorique liée au gradient géothermique retenu et la température mesurée au niveau des points d'accès à l'eau des réservoirs miniers.	24
Illustration 9 :	Recherche d'une corrélation entre l'écart à la température théorique et le taux de renouvellement de l'eau dans les réservoirs miniers, ce dernier étant approché par la baisse de la concentration en sulfate depuis l'ennoyage.	26
Illustration 10 :	Incertitude sur la température à attendre pour l'eau des travaux miniers calculée sur la base des statistiques sur les écarts de température théorique-mesurée.	26
Illustration 11 :	Tableau de croisement des grilles élémentaires regroupées par maille 500 x 500 m.	30
Illustration 12 :	Grille résultat du calcul du potentiel géothermique par maille 500 m x 500 m.	31
Illustration 13 :	Utilisation potentielle de la géothermie.	32
Illustration 14 :	Principaux critères fixant la compatibilité d'une installation géothermique avec le cadre réglementaire de la « géothermie de minime importance ».	41

1. Introduction

Le BRGM a été chargé d'étudier le potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie et par le Conseil Régional de la Région Lorraine (aujourd'hui devenue la Région Grand Est). La connaissance de ce potentiel est en effet restreinte, or les principaux réservoirs miniers ennoyés du bassin constituent une réserve de près de 500 millions de m³ d'eau souterraine, qui pourrait représenter une opportunité d'exploitation géothermique importante. L'étude s'inscrit dans le cadre d'une démarche de valorisation géothermique du bassin ferrifère Lorrain, 25 ans après le début de l'arrêt des pompages d'exhaures dans les mines du secteur.

Les objectifs de la présente étude sont :

- de constituer à partir de données existantes, un référentiel d'informations sur les eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en rapport avec le potentiel géothermique des réservoirs ennoyés,
- d'acquérir des données complémentaires *in situ* sur la température des eaux souterraines du réservoir minier et de la nappe du Dogger,
- d'évaluer le potentiel géothermique intrinsèque de l'eau des réservoirs miniers et de le mettre en relation cartographique avec les zones urbanisées et les zonages réglementaires,
- d'élaborer des fiches synthétiques des résultats de l'étude pour les 10 entités administratives (communautés de communes et communes) concernées par les réservoirs miniers ennoyés.

2. Synthèse des données et des informations disponibles

La première phase du projet a consisté à réaliser la synthèse des données et des informations qui étaient déjà disponibles sur le bassin ferrifère lorrain, notamment en rapport avec la température des eaux souterraines. Un référentiel d'informations sur les eaux souterraines a ainsi été élaboré. Son contenu est passé en revue dans les sous-parties qui suivent.

2.1. DESCRIPTION DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN (ANNEXE 1)

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité : il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage. C'est pourquoi depuis 1995 le BRGM assure la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Le lecteur trouvera en annexe 1 trois fiches synthétiques décrivant :

- le bassin ferrifère lorrain et le contexte de la mise en place de son réseau de surveillance,
- la structure et le fonctionnement des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain après l'arrêt des mines et l'envoyage des réservoirs,
- les principaux résultats d'une modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau.

Ce panorama des connaissances concernant l'hydrogéologie du bassin ferrifère lorrain est utile à la compréhension des résultats de la présente étude. Ces fiches synthétiques ont été produites par le BRGM dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2014 et 2015 (Guignat, 2017). Elles sont téléchargeables sur le SIGES Rhin-Meuse (<http://sigesrm.brgm.fr/Chroniques-semestrielles-hors-serie-du-bassin-ferrifere>).

Pour des informations plus détaillées sur le bassin ferrifère lorrain et son contexte hydrogéologique, le lecteur pourra consulter les études plus complètes figurant en bibliographie relatives au modèle conceptuel du bassin ferrifère lorrain (Vaute, 2007) et au simulateur numérique du bassin ferrifère lorrain (Vaute et al., 2013), ou encore l'état des lieux du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin ferrifère lorrain (cf. Vaute et al., 2007, et les documents du SAGE téléchargeables à l'adresse <http://www.lorraine.fr/sagebf>) qui dresse un panorama exhaustif de ce territoire.

2.2. POINTS D'ACCES AUX RESERVOIRS ET POINTS D'EAU (ANNEXE 2)

Une liste des points d'accès aux réservoirs miniers a été établie à partir des informations qui ont été compilées dans le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin ferrifère. Celle-ci a été complétée à partir de l'identification dans la Banque des données du

Sous-Sol (BSS) d'autres ouvrages souterrains sur tout le bassin. Au total, plus de 800 points ont été inventoriés.

L'analyse critique des informations de ce listing a été entrepris en triant et sélectionnant les points selon leur nature et en ne conservant que les ouvrages dont la profondeur était connue ou encore supérieure ou égale à 20 m, de manière en particulier à ne pas retenir les sondages géotechniques. Pour les ouvrages ainsi conservés, les coupes géologiques et techniques ont été examinées de façon à ne garder que les ouvrages en rapport avec les réservoirs. En fin de compte, la liste des points a ainsi été réduite à 118 ouvrages.

Ces points ont été reportés dans un Système d'Informations Géographiques (SIG) sous MapInfo. Cela a permis d'identifier les points qui avaient déjà été reconnus sur le terrain, ceux qui n'étaient pas connus mais qui semblaient potentiellement intéressants et qui devaient être vérifiés sur site, et les ouvrages qui avaient été rebouchés. Une liste de 102 ouvrages a ainsi été arrêtée.

Après vérification des dossiers BSS et reconnaissance sur le terrain le cas échéant, une liste finale de 54 points a été retenue (cf. les cartes de l'illustration 5 et de l'illustration 6 et la liste des points en annexe 2). Cette liste comprend des ouvrages captant les réservoirs miniers, la formation ferrifère non exploitée, la nappe des calcaires du Dogger, ainsi que des alluvions de cours d'eau.

2.3. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES POINTS D'EAU (ANNEXE 3)

Une caractérisation physico-chimique des points d'eau à partir de l'existant a été faite en faisant une extraction de la base publique d'Accès aux Données des Eaux Souterraines (ADES). Plus de 76 000 résultats analytiques concernant les 54 points d'eau ont ainsi été récupérés. La majeure partie de ces 54 points d'eau concerne les aquifères surveillés par le BRGM dans le cadre du réseau de surveillance.

Les caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'ensemble des 54 points pour les principaux paramètres relatifs à la géothermie sont présentées dans le tableau de l'illustration 1. Il s'agit d'eaux minéralisées, principalement sulfatées, bicarbonatées et calciques. Pour ces données, la moyenne de la température des eaux est de 11,8 C.

Paramètre (unité)	Température (°C)	pH (-)	Conductivité (µS/cm)	SO4 (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO3 (mg/L)	Ca (mg/L)	TAC (°F)	Fe (µg/L)	CO2 libre (mg/L)
Nombre valeurs	1698	211	204	208	129	129	129	3	129	17
Moyenne	11,8	7,4	1672	616	37	416	174	44	1,7	37

Illustration 1 : Caractéristiques physico-chimiques des points d'eau.

L'évolution temporelle de 9 paramètres chimiques du tableau ci-dessus est présentée en annexe 3 sous forme de 9 graphiques pour chaque point disposant de données sur la période mars 2008 - décembre 2015, hormis le titre alcalimétrique complet (TAC) trop peu analysé. La

date de début de période choisie pour les graphiques correspond à la fin de l'envoyage de tous les réservoirs miniers du bassin ferrifère. La liste des points est donnée en annexe 2, avec les données de température disponibles ou acquises dans le cadre de la présente étude (cf. chapitre 3). L'emplacement géographique des points de mesure est indiqué sur les 2 cartes de l'illustration 5 et de l'illustration 6.

2.4. TYPE D'EXPLOITATION A L'APLOMB DES ZONES URBANISEES ET PROFONDEUR DU TOIT DES RESERVOIRS MINIERES ET DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

2.4.1. Zones Urbanisées

Les zones urbanisées du bassin ferrifère ont été identifiées à partir d'une extraction de la base de données CORINE Land Cover.

Elles correspondent à l'extraction Corine Land Cover 2012 des polygones ayant les codes de niveau 3 suivants :

- 111 : tissu urbain continu,
- 112 : tissu urbain discontinu,
- 121 : zones industrielles ou commerciales et installations publiques,
- 122 : réseaux routier et ferroviaire et espaces associés,
- 123 : zones portuaires,
- 124 : aéroports.

Les zones urbanisées sont cartographiées sur les cartes de l'illustration 2 à l'illustration 6.

2.4.2. Type de milieu créé par les travaux miniers

Les données disponibles sont les informations provenant des anciens exploitants miniers et des services de l'Etat en charge du suivi de l'exploitation minière et de l'après mine.

Ce sont notamment les anciens plans des travaux miniers réalisés avant, pendant et en fin d'exploitation (lors de l'abandon) par les géomètres et ingénieurs miniers.

Ces plans, disponibles généralement par concession sous une forme numérique (scan), fournissent notamment, par couche exploitée et par secteur, les cotes altimétriques des travaux et des informations sur la nature de l'exploitation (dépilage, exploitation par ilots, galeries d'infrastructure ou isolées, piliers barrières, zone effondrée, zone remblayée, chambres et piliers, autres).

A partir de ces informations, un premier travail a consisté à identifier pour chaque maille de dimension 25 x 25 m d'une grille SIG (raster) le type de milieu hydrogéologique laissé par l'homme dans le sous-sol suite à l'exploitation minière. On examine l'ensemble des couches de travaux miniers superposés de manière à distinguer 3 types de milieux :

- milieu poreux : l'empilement sur la verticale des couches de travaux miniers ne comporte que des zones effondrées (foudroyages) ou remblayées,
- milieu vide : l'empilement sur la verticale des couches de travaux miniers ne comporte que des galeries et des zones de chambre et piliers encore en place,
- milieu mixte : correspond à l'empilement sur la verticale de couches de travaux de milieu poreux et vide.

Le résultat de ce traitement est présenté sur la carte de l'illustration 2.

2.4.3. Profondeur du toit des travaux miniers

A partir des informations altimétriques disponibles (cf. § précédent), un premier traitement a permis d'attribuer les cotes maximale et minimale de chaque secteur de travaux miniers à une grille (raster SIG) de maille de dimension 25 x 25 m, et ce pour chaque couche minière (autant de grilles que de couches).

Un second traitement a permis de calculer la cote maximale et la cote minimale des travaux de l'ensemble des couches minières empilées.

Nous disposons ainsi sur l'ensemble des travaux miniers du bassin ferrifère, pour chaque maille de 25 m x 25 m, de la cote maximale du toit des travaux miniers.

Par soustraction (cote topographique du Modèle numérique de terrain MNT 25 de l'IGN - cote maximale du toit des travaux miniers) nous obtenons la profondeur du toit des travaux miniers dans une grille 25 m x 25 m. Le résultat du traitement est présenté sur la carte de l'illustration 3.

2.4.4. Profondeur du niveau piézométrique des travaux miniers

Les réservoirs miniers ont un comportement hydrogéologique original : leur niveau piézométrique est quasiment identique en tout point (à quelques dizaines de cm près), en raison de la facilité pour l'eau d'y circuler (très faibles pertes de charges, contrairement à un milieu poreux ou fissuré classique). Le niveau piézométrique des réservoirs peut donc être connu avec une très bonne précision en connaissant la cote du seuil de débordement des réservoirs.

Pour chaque réservoir, par différence entre la cote du sol et la cote du seuil de débordement, il est possible de calculer la profondeur du niveau piézométrique. Le résultat est présenté sur la carte de l'illustration 4.

Nota bene : les réservoirs miniers sont semi-captifs sous les calcaires du Dogger. Ainsi, le niveau piézométrique d'un réservoir ne correspond au niveau réel de l'eau dans un ouvrage de captage que lorsque ce dernier a atteint les travaux miniers : le niveau de l'eau remonte alors par pression jusqu'à une cote légèrement supérieure au seuil de débordement.

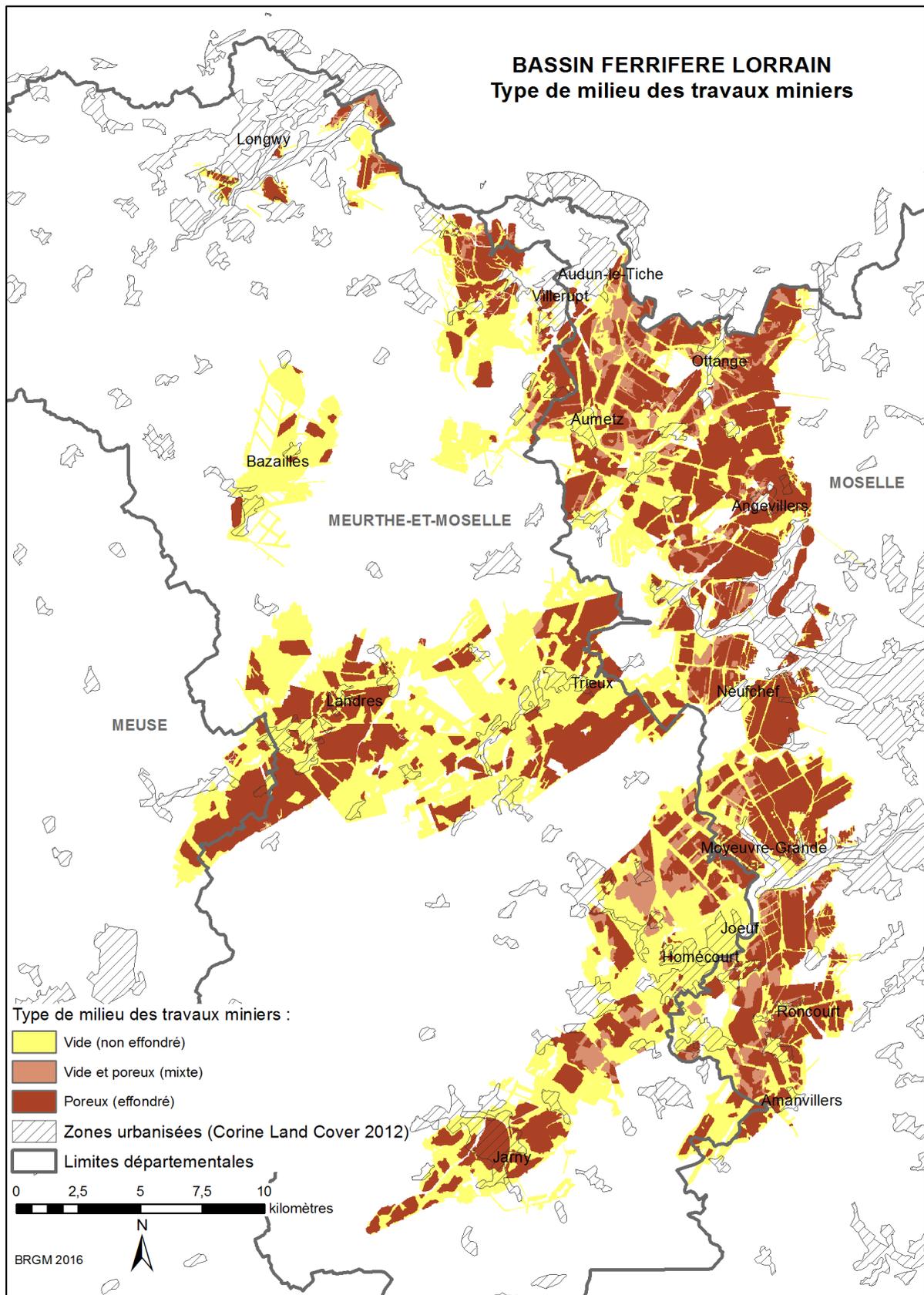


Illustration 2 : Type de milieu des travaux miniers.

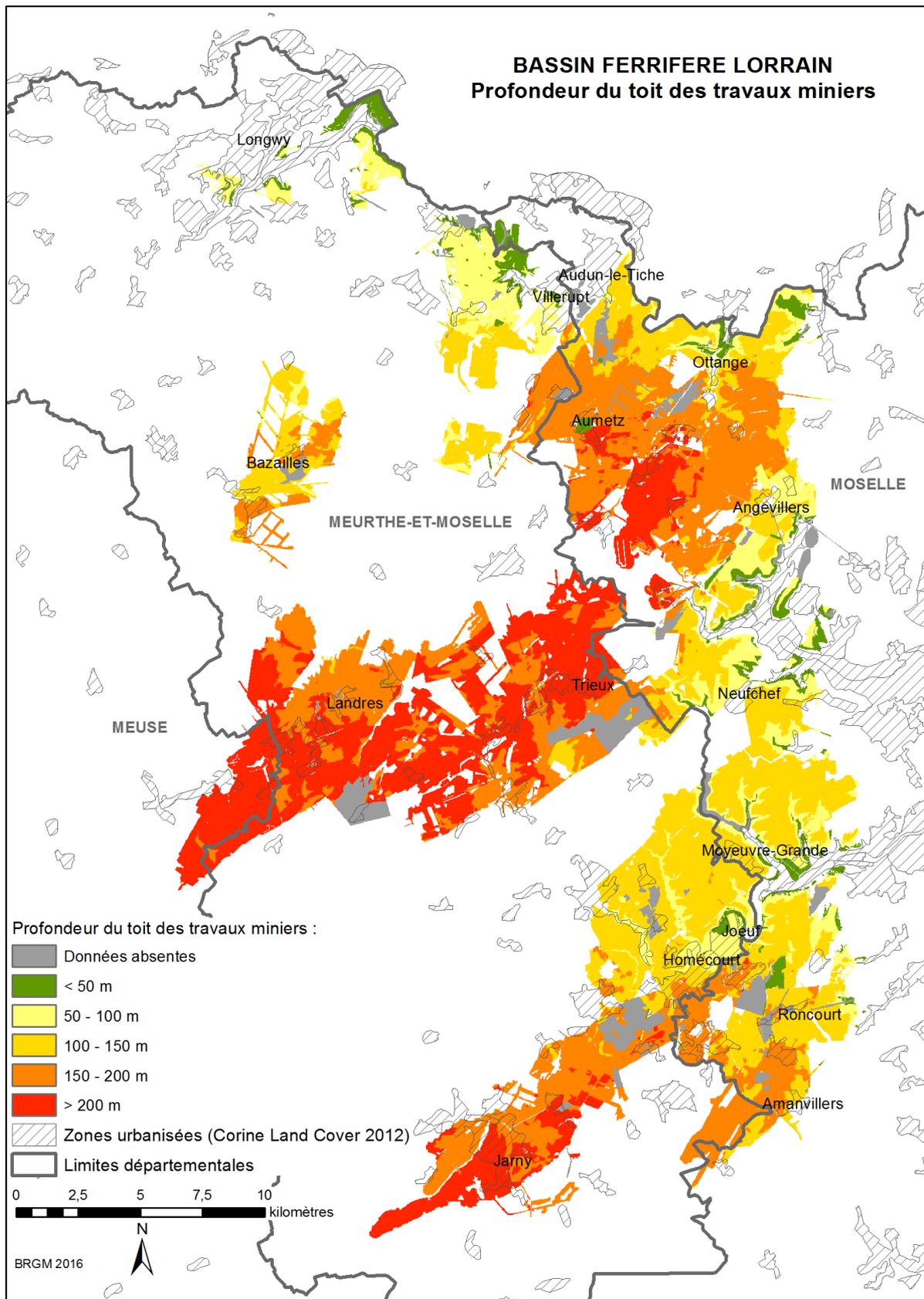


Illustration 3 : Profondeur du toit des travaux miniers.

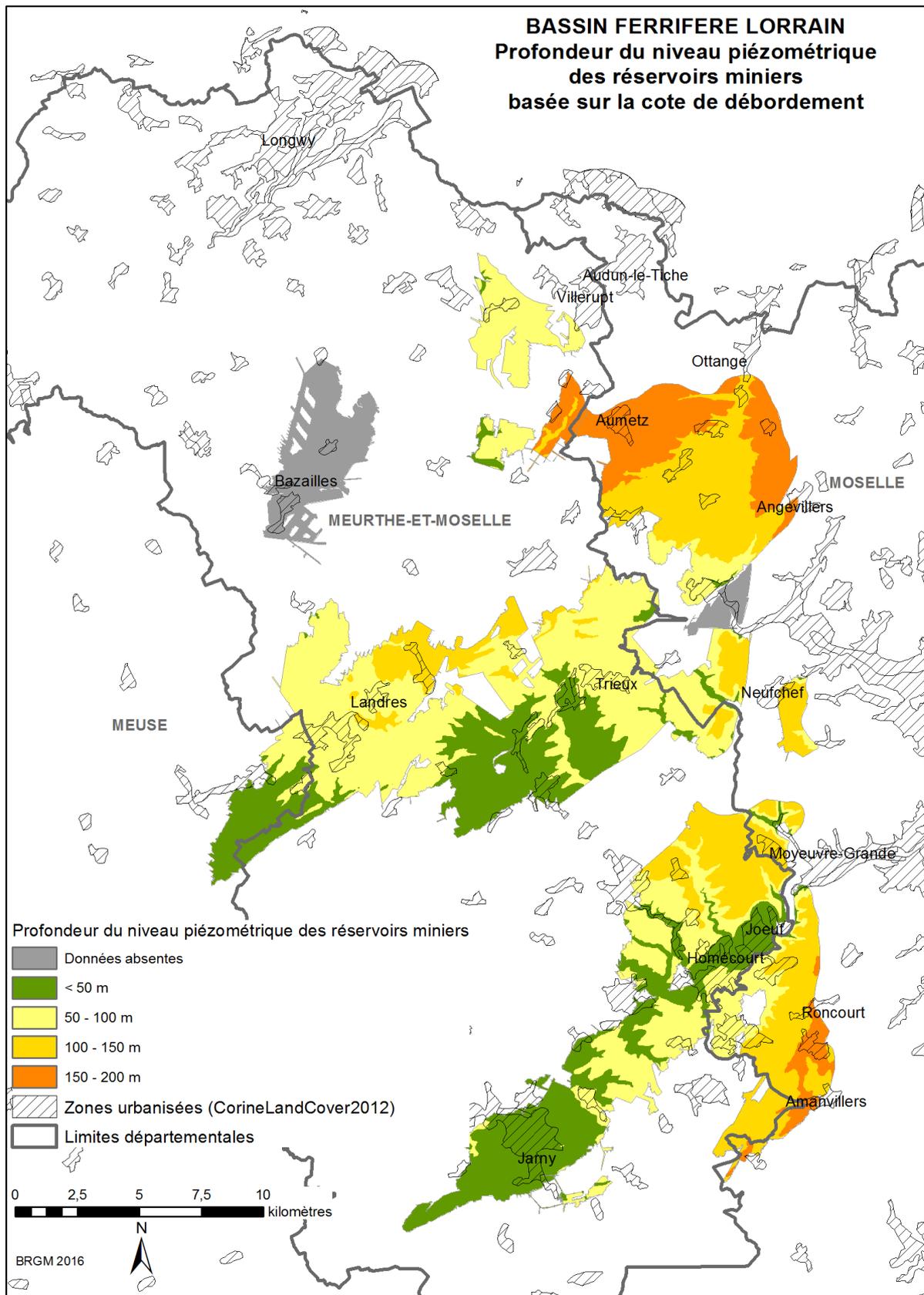


Illustration 4 : Profondeur du niveau piézométrique des réservoirs miniers.

3. Acquisition de données complémentaires sur la température

3.1. CAMPAGNES DE MESURES COMPLEMENTAIRES DE TEMPERATURE (ANNEXE 2)

La seconde phase du projet a consisté notamment à acquérir *in situ* des données sur la température des eaux souterraines au droit des réservoirs miniers. Deux campagnes de mesures complémentaires de températures ont été réalisées. La première campagne de mesures complémentaires a eu lieu en basses eaux du 3/10/14 au 17/10/14. Elle a concerné 29 points. La deuxième campagne de mesures complémentaires a eu lieu en hautes eaux les 5/01/15, 24/02/15 et 25/02/15. Elle a concerné 17 points.

Deux types de mesures ont été effectués lors des campagnes complémentaires :

- des profils de température le long de la colonne d'eau des ouvrages lorsque cela a été possible (anciens puits miniers, piézomètres, forages d'eau),
- des mesures ponctuelles (galeries de débordement, puits pompés).

Seules les statistiques sur les températures maximales des campagnes complémentaires seront discutées dans la suite du texte. En effet, on observe systématiquement une stratification des températures et de la minéralisation dans les puits miniers, en raison probablement d'infiltrations d'eau de la nappe du Dogger à travers le cuvelage des puits. Pour cette raison, seules les températures maximales mesurées en fond de puits à la cote de l'ouverture des galeries minières dans les puits sont représentatives de la température du réservoir minier.

Les températures maximales mesurées lors des campagnes complémentaires sont présentées sur la carte de l'illustration 5. On indique aussi sur la carte le code qui permet de retrouver dans le tableau de l'annexe 2 le point correspondant et ainsi que ses statistiques sur les températures.

Pour les réservoirs miniers, l'ensemble des valeurs maximales mesurées lors des 2 campagnes complémentaires présente une valeur moyenne de 12,6 °C, pour un minimum de 9,7 °C et un maximum de 16,6 °C.

3.2. COMPARAISON AUX STATISTIQUES SUR LES MESURES DE TEMPERATURE DU RESEAU DE SURVEILLANCE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFERE (ANNEXE 2)

Le tableau de l'annexe 2 présente des statistiques plus larges sur toutes les données de température acquises par le BRGM lors des campagnes de mesures effectuées dans le cadre de la gestion du réseau de surveillance du bassin ferrifère.

Comme les températures mesurées sont issues de contrôles sur le terrain non spécifiquement réalisés pour une étude géothermique (notamment il ne s'agit pas de profils dans les puits, mais de mesures ponctuelles en sortie de pompage), on tient compte de l'incertitude supplémentaire sur les mesures en considérant uniquement la médiane des valeurs, et non plus la valeur maximale.

Les températures médianes mesurées lors des mesures de surveillance sont présentées sur la carte de l'illustration 6. On indique aussi sur la carte le code qui permet de retrouver dans le tableau de l'annexe 2 le point correspondant et ainsi que ses statistiques sur les températures.

Pour les réservoirs miniers, l'ensemble des valeurs médianes mesurées lors des tournées de surveillance présente une moyenne de 12,0 °C, pour un minimum de 10,2 °C et un maximum de 15,6 °C. Ces statistiques sont proches de celles des campagnes complémentaires.

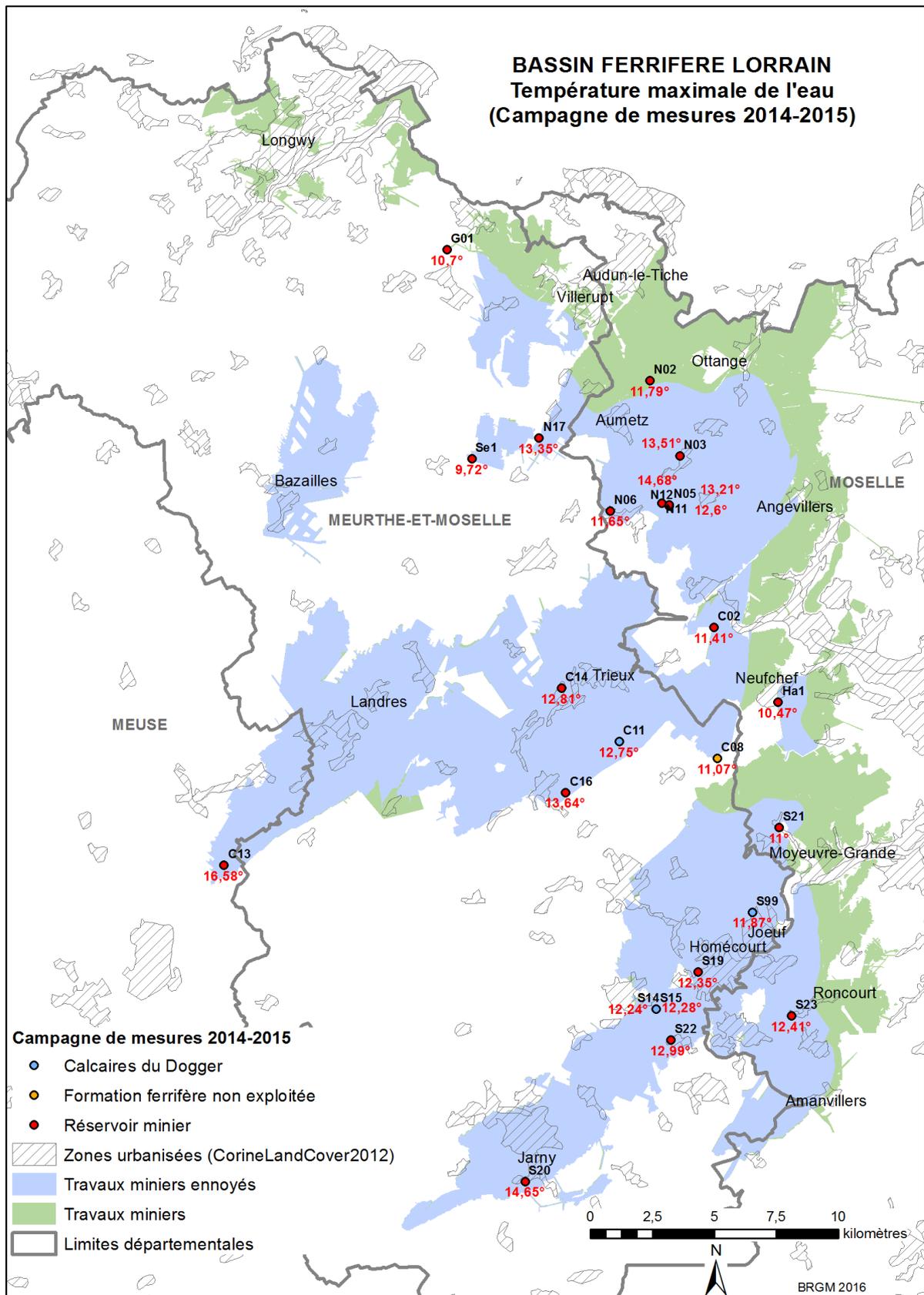


Illustration 5 : Température maximum des campagnes complémentaires 2014-2015.

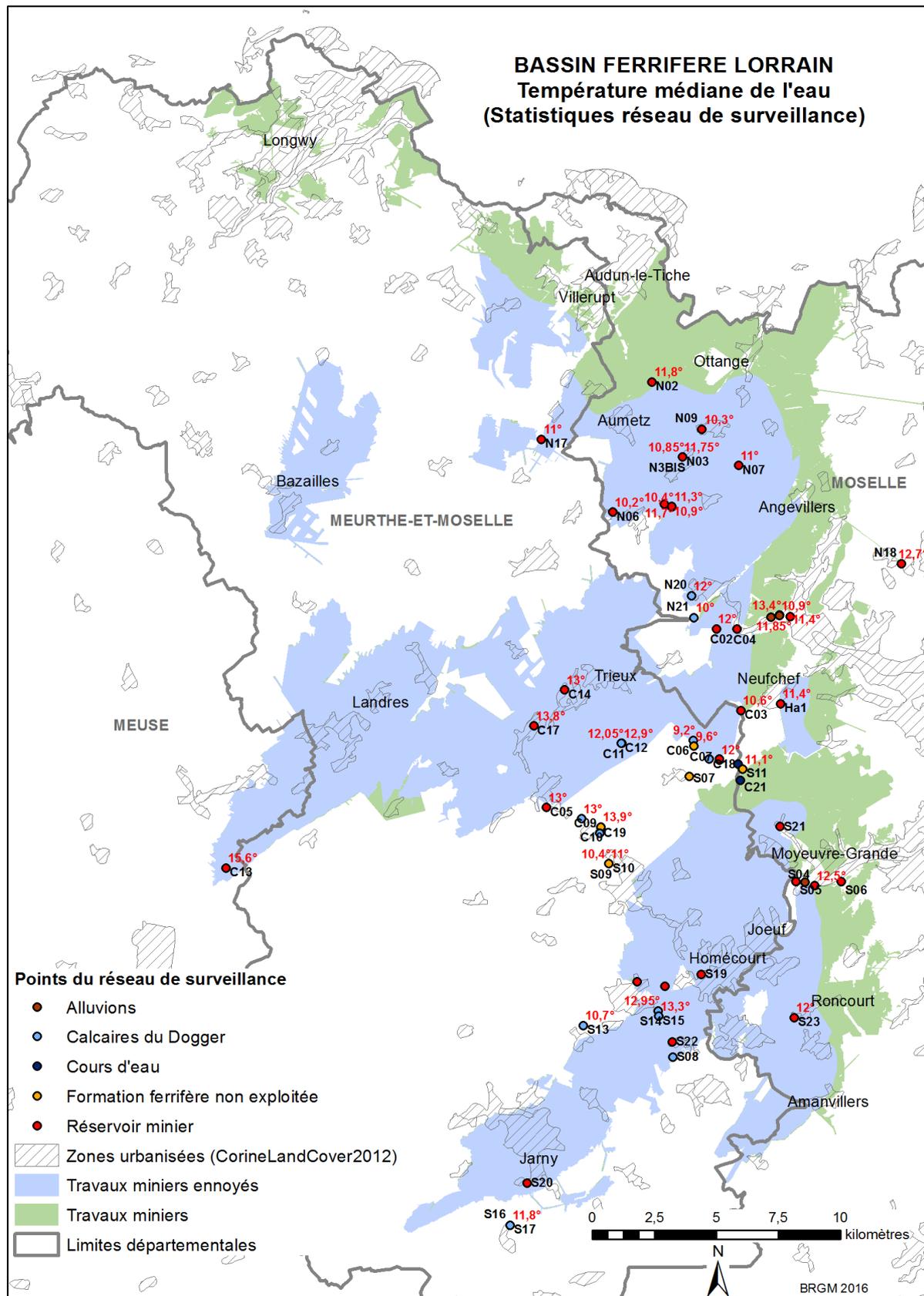


Illustration 6 : Température médiane des points du réseau de surveillance.

4. Evaluation du potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain

4.1. CALCULS PRELIMINAIRES

4.1.1. Couches d'informations nécessaires

Afin de calculer une grille de potentiel géothermique intrinsèque, il est nécessaire de disposer de couches d'informations pour chacun des paramètres jugés importants pour décrire les propriétés intrinsèques du sous-sol vis-à-vis d'un usage géothermique. Dans le cadre de cette étude, et compte tenu du modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés présenté en annexe 1, les 3 couches suivantes ont été retenues :

- grille du type de milieu créé par les travaux miniers,
- grille de la profondeur du toit des travaux miniers,
- grille de la température de l'eau dans les travaux miniers ennoyés.

Les deux premières grilles ont été calculées lors de la synthèse de données (Illustration 2 et Illustration 3) et les cartes finales résultantes à la maille de 500 m x 500 m tenant compte des nombreuses incertitudes sur les données du sous-sol sont présentées en annexe 4. La grille de la température théorique de l'eau selon la profondeur des travaux miniers présentée aussi en annexe 4 a fait l'objet d'un traitement particulier qui est exposé ci-après.

4.1.2. Estimation d'un lien entre la profondeur et la température théorique de l'eau des réservoirs miniers

La température théorique de l'eau des réservoirs miniers dépend uniquement du gradient géothermique local, et donc de la profondeur des travaux miniers. Toutefois, en raison du caractère très particulier de la structure des réservoirs miniers (zones d'infiltration reliées par des réseaux de galeries) qui peut mettre en relation des zones de travaux miniers profonds avec des zones d'infiltration plus froides, cette température théorique peut être modifiée dans chaque secteur de réservoir, chaque zone de travaux miniers, et au niveau même de chaque point de prélèvement.

Il n'est donc pas correct de se baser sur la température de l'eau mesurée aux différents points de prélèvement pour en tirer le gradient géothermique local. C'est pourquoi le gradient géothermique du bassin houiller lorrain a été utilisé pour calculer la température théorique du bassin ferrifère lorrain. En effet, ce gradient géothermique a été bien étudié dans les années 1980. L'illustration 7 montre les températures moyennes calculées par tranche de 100 m de profondeur à partir de 265 mesures disponibles à ces profondeurs (Barchi *et al.*, 2007). On calcule à partir de ces points un gradient géothermique moyen de 0,029°C/m, correspondant au gradient géothermique moyen mondial. Ce gradient géothermique a été utilisé pour calculer une grille de température théorique de l'eau dans les travaux miniers du bassin ferrifère lorrain en fonction de la profondeur (cf. grille de la température théorique de l'eau des travaux miniers en annexe 4) selon l'équation suivante : $T_{2015\text{ théorique}} = 0.0286 * Profondeur + 8.9143$

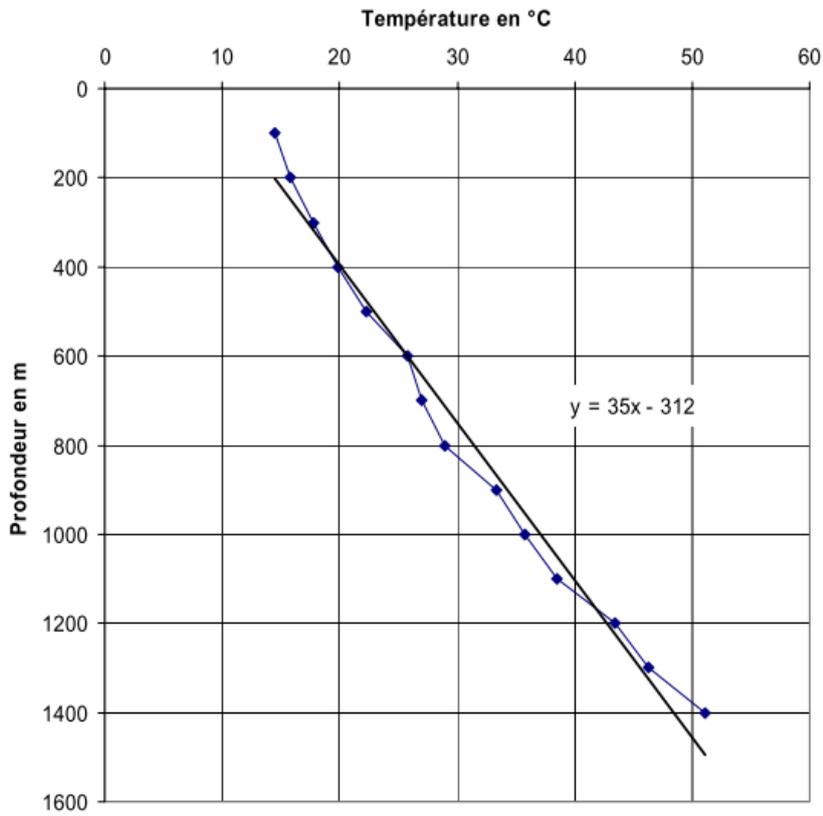


Illustration 7 : Gradient géothermique du bassin houiller lorrain retenu pour calculer la température théorique de l'eau dans les travaux miniers du bassin ferrifère lorrain.

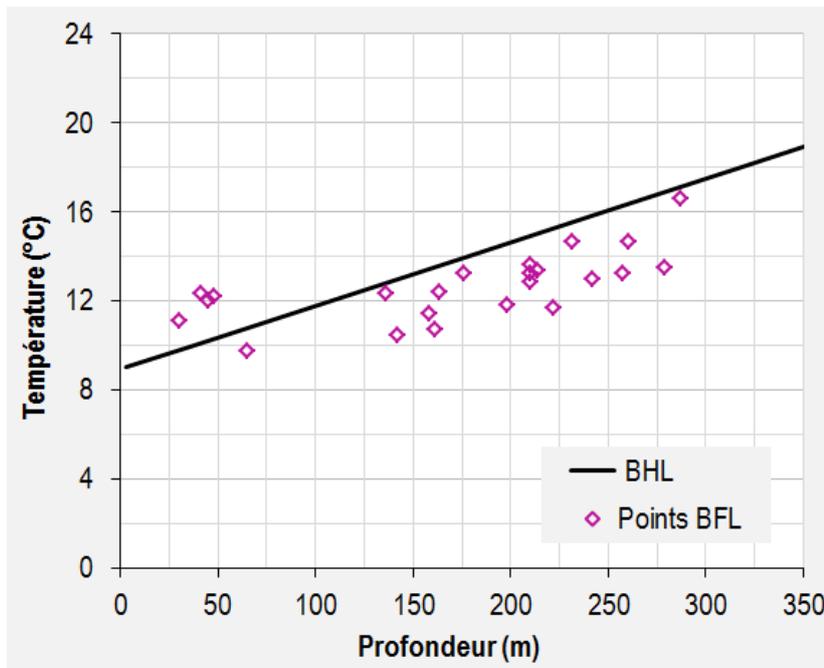


Illustration 8 : Comparaison entre la température théorique liée au gradient géothermique retenu et la température mesurée au niveau des points d'accès à l'eau des réservoirs miniers.

4.1.3. Recherche d'une corrélation entre l'écart à la température théorique et le taux de renouvellement de l'eau dans les travaux miniers

Les couples de points profondeur / température mesurée de chaque ouvrage donnant accès à l'eau des réservoirs miniers peuvent être comparés au gradient géothermique retenu (Illustration 8). On constate que les points s'écartent du gradient géothermique, l'eau mesurée dans les captages étant en général plus froide que la température théorique, sauf pour 4 points. L'écart de la température mesurée à la température théorique est défini ainsi :

$$\text{Ecart à la température théorique} = (T_{2015 \text{ observée}} - T_{2015 \text{ théorique}})$$

On peut chercher à corréler cet écart au taux de renouvellement de l'eau dans les secteurs des réservoirs miniers, en considérant que plus le taux de renouvellement est élevé, plus l'infiltration d'eau froide est importante et fait baisser la température observée par un apport constant d'eau plus froide.

Un taux de renouvellement de l'eau des travaux miniers par secteur de réservoir a été calculé lors du calage du modèle numérique du bassin ferrifère lorrain (cf. 3^{ème} fiche de synthèse en annexe 1). Il ne s'applique toutefois qu'à chaque secteur défini à l'occasion de cette étude, et pas à chaque point d'accès à l'eau des réservoirs miniers.

On peut alors tenter d'estimer un taux de renouvellement local propre à chaque point d'accès à l'aide du % annuel de baisse de la concentration en sulfates mesurée depuis 2009 (cf. tableau en annexe 2), puisqu'on sait que cette baisse est directement proportionnelle au taux de renouvellement de l'eau (cf. modèle conceptuel de structure et de fonctionnement du bassin ferrifère, 2^{ème} fiche de synthèse en annexe 1). La date de 2009 correspond à 9 mois après la fin de l'ennoyage du réservoir Nord, qui est le dernier réservoir ennoyé du bassin ferrifère.

$$\% \text{ Annuel Baisse } SO_4 = \frac{(\text{Concentration } [SO_4]_{2009} - \text{Concentration } [SO_4]_{2015}) * 100}{\text{Concentration } [SO_4]_{2009} * (2009 - 2015)}$$

L'exercice a été mené et son résultat est présenté sur l'illustration 9. Pour une partie des points (rectangle bleu sur le graphique), une corrélation significative peut effectivement être trouvée entre l'écart à la température théorique et le % annuel de baisse de la concentration en sulfates, généralement les puits miniers. On constate que les puits miniers du secteur 2 du réservoir Nord, qui représente l'essentiel du volume de ce réservoir, présentent la température la plus inférieure à la température théorique (de 2,5 à 3,5°C). Ceci indique un taux de renouvellement important pour ce secteur et est cohérent avec le fait qu'il s'agit du seul secteur qui est renouvelé « par le fond » grâce à un débordement via un puits minier profond (puits d'Havange).

Cependant, un grand nombre de points ne suit pas la règle (rectangle jaune sur le graphique), généralement en raison d'un fonctionnement différent. Il s'agit de galeries de débordement qui drainent tout ou partie d'un réservoir et dont la température peut être supérieure à la température théorique, ou de piézomètres captant une zone foudroyée (Cheminée Sud), la formation ferrifère non exploitée (Chevillon artésien) ou un petit réservoir peu renouvelé (Hayange Sud).

En définitive, les exceptions à la loi de corrélation entre l'écart à la température théorique et le taux de renouvellement de l'eau au niveau de chaque point d'accès, bien qu'elles soient pour la plupart explicables, sont trop nombreuses pour que la corrélation puisse être utilisée convenablement dans un calcul de correction spatialisé de la grille de température théorique en fonction du taux de renouvellement estimé.

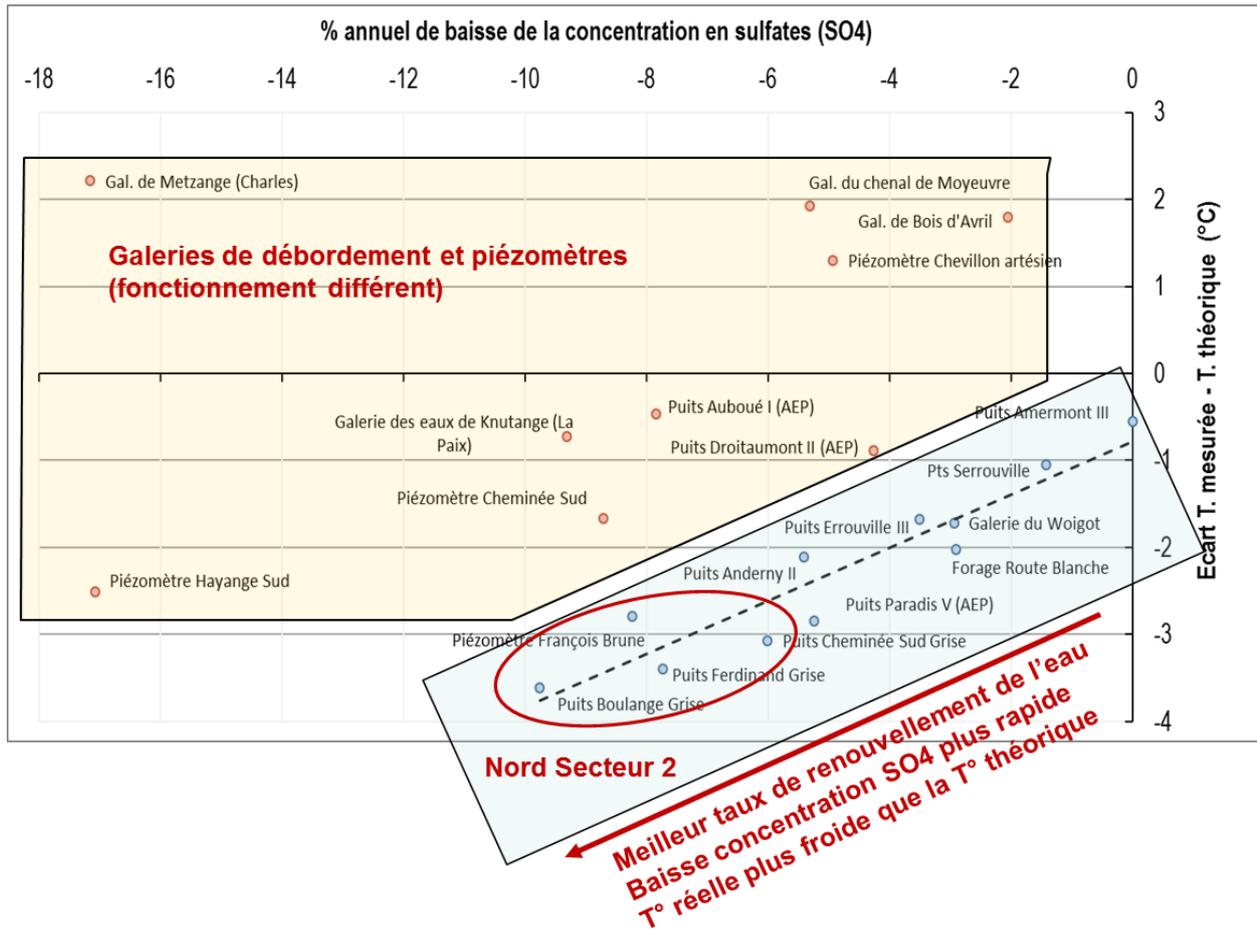


Illustration 9 : Recherche d'une corrélation entre l'écart à la température théorique et le taux de renouvellement de l'eau dans les réservoirs miniers, ce dernier étant approché par la baisse de la concentration en sulfate depuis l'ennoyage.

Type de point d'accès aux réservoirs	Nombre de points d'accès mesurés	Statistiques sur les écarts de température théorique - mesurée (°C)
Galerie de débordement	6	0,5 +/- 2,2
Puits minier	12	-1,5 +/- 1,4
Forage sur galerie	3	-2,5 +/- 0,3
Autre forage	2	-0,2 +/- 1,2
Tous points	23	-1,7 +/- 2,4

Illustration 10 : Incertitude sur la température à attendre pour l'eau des travaux miniers calculée sur la base des statistiques sur les écarts de température théorique-mesurée.

4.1.4. Evaluation d'une incertitude sur la température réelle liée au taux de renouvellement de l'eau

Une autre approche plus simple a donc été retenue : la grille de température théorique en fonction de la profondeur des travaux miniers est retenue dans le calcul du potentiel géothermique, mais elle est associée à une incertitude sur la température réelle à attendre, qui dépend principalement du taux de renouvellement de l'eau au point de captage de la ressource géothermique. Les autres types d'incertitudes (incertitudes liées aux mesures de température et de concentration notamment) ne peuvent pas facilement être évaluées et sont de plus déjà englobées dans l'incertitude globale associée à la grille de température théorique.

L'incertitude globale est évaluée sur la base des statistiques sur les écarts à la température théorique présentés au paragraphe précédent. Elle n'intervient pas dans le calcul du gradient géothermique, mais c'est une information qui est fournie en complément pour permettre d'estimer en chaque point de la grille de température théorique la température réelle qu'il devrait être possible d'obtenir.

Le résultat de ce calcul d'incertitude est présenté en annexe 2 ainsi que sur le tableau de l'illustration 10. Ainsi, **la gamme de température possible en un point quelconque de la grille de température théorique doit être calculée avec la formule suivante :**

gamme de température possible = température théorique -1,7°C +/- 2,4°C

La valeur de -1,7°C est la médiane des écarts de température mesurés sur l'ensemble des points d'accès (c'est-à-dire que l'eau des points d'accès est en moyenne plus froide de 1,7°C que la température théorique), et l'intervalle donné égal à 2 x 2,4°C est l'intervalle qui contient 80% des écarts mesurés (les écarts les plus extrêmes sont écartés de la statistique).

4.1.5. Conceptualisation des taux de renouvellement de l'eau dans les réservoirs miniers envoyés à différentes échelles

Le taux de renouvellement de l'eau n'est rigoureusement défini que pour un volume de vide limité dans l'espace. Ce n'est jamais le cas dans les systèmes hydrogéologiques naturels, mais cette notion présente toutefois l'intérêt de permettre la conceptualisation d'une hiérarchie des vides souterrains dans les travaux miniers. Du point de vue d'une installation captant une ressource géothermique dans un réservoir minier, on propose ainsi de distinguer 3 échelles d'observation spatiale et temporelle correspondant à 3 taux de renouvellement :

- **Le taux de renouvellement local à court terme** de l'eau souterraine au niveau de l'ouvrage équipé pour la géothermie : ce taux de renouvellement est directement mesurable par le débit d'écoulement de l'eau dans l'ouvrage autour de l'installation géothermique, sous l'effet de la gravité (galerie de débordement) ou d'un pompage (puits minier ou forage).
- **Le taux de renouvellement global à long terme** de l'eau souterraine au sein de chaque secteur de réservoir minier : ce taux a été évalué pour les grands secteurs des 3 principaux réservoirs envoyés du bassin ferrifère lorrain à l'occasion d'une modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau souterraine (cf. 3^{ème} fiche synthétique en annexe 1), il correspond au débit qui traverse un secteur depuis les points d'entrée de l'eau (zones d'infiltration telles que les zones foudroyées et les zones d'alimentation hors ennoyage) jusqu'aux points de sortie de l'eau (galeries de liaison avec les autres secteurs, débordements, pompages).

- **le taux de renouvellement à moyen terme** de l'eau souterraine au niveau des travaux miniers proches de l'ouvrage de captage, si l'on considère qu'il existe une hétérogénéité des vitesses d'écoulement et des températures à l'intérieur des travaux miniers d'un secteur, ce qui est vraisemblablement toujours le cas : ce taux n'est pas connu *a priori*, il doit faire l'objet d'une étude approfondie à partir des plans miniers, car les connexions hydrauliques entre les différents niveaux de galeries au sein d'un même puits ou entre les différentes zones d'un même secteur pourraient jouer le rôle de court-circuit entre des zones froides et chaudes.

4.2. CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE INTRINSEQUE PAR CROISEMENT DES COUCHES D'INFORMATION ELEMENTAIRES (ANNEXE 4)

La grille cartographique du potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain a été définie au pas de 500 m. Elle est calquée sur la grille réalisée dans le cadre de la cartographie nationale du zonage réglementaire de la géothermie de minime importance (GMI). Elle a été créée dans le système géodésique officiel en France, le réseau géodésique français 1993 (RGF93) et répond à la directive INSPIRE. Le fichier numérique de la grille est fourni sur le CD-ROM joint à ce rapport et est décrit dans la « note d'accompagnement » figurant en annexe 4 et sur le CD-ROM.

Cette grille fournit par maille de 500 m x 500 m les informations concernant le potentiel géothermique du bassin ferrifère. Elle a été obtenue par croisement des 3 grilles élémentaires à la maille 25 x 25 m : « type de milieu créé par les travaux miniers », « profondeur du toit des travaux miniers », « température théorique de l'eau dans les travaux miniers ennoyés », selon la méthodologie suivante (cf. tableau de croisement de l'illustration 11) :

- **Regroupement par maille de 500 x 500 m des informations contenues dans chaque grille élémentaire 25 x 25 m**, à la fois pour tenir compte des incertitudes sur l'ensemble des données et pour se calquer sur le maillage GMI. Pour les grilles élémentaires « profondeur d'accès à la ressource » et « température théorique de l'eau », le regroupement donne lieu au calcul d'un minimum, d'une moyenne et d'un maximum pour chaque maille de 500 x 500 m. Pour la grille élémentaire « type de milieu créé par les travaux miniers », le type de milieu le plus favorable rencontré est attribué lors du regroupement à chaque maille de 500 x 500 m : par exemple si une galerie de débordement peut être atteinte dans une maille de 500 x 500 m, cette maille recevra la note maximale, quels que soient les autres types de travaux pouvant être rencontrés dans la même maille.
- **Classification de chacune des 3 grilles regroupées** afin d'obtenir 4 à 6 notes pour chaque grille. Pour les grilles regroupées « profondeur d'accès à la ressource » et « température théorique de l'eau », la moyenne de la profondeur et de la température sont classifiées, le minimum et le maximum sont conservés à titre d'information complémentaire dans la table attributaire du fichier shapefile du potentiel géothermique du bassin ferrifère.
- **Calcul du potentiel intrinsèque pour chaque maille de 500 x 500 m par addition pondérée des notes** de chacune des 3 grilles classifiées, selon la formule suivante :

$$\text{Note potentiel} = 3 \times \text{note Profondeur} + \text{Note type de milieu} + \text{Note température}$$

- **Classification de la note du potentiel en 6 classes et attribution d'un code couleur associé** pour la cartographie : plus la classe calculée est élevée, plus le potentiel géothermique est élevé.

Les classes, les gammes de notes et les pondérations des 3 grilles élémentaires prises en compte dans le croisement ont été choisies pour fournir une image du potentiel géothermique soulignant l'importance de la profondeur et du type de travaux miniers, car ces deux critères conditionnent fortement techniquement et financièrement l'accès à la ressource géothermique. La température de l'eau, relativement basse et homogène dans les réservoirs miniers ennoyés, est dans le résultat du croisement un critère moins discriminant dans le domaine de la très basse énergie (cf. chapitre suivant), d'autant plus qu'il est linéairement corrélé à la profondeur.

La grille résultat du calcul du potentiel géothermique est présentée sur l'illustration 12. Les différentes classes de potentiel sont explicitées ci-dessous.

- **Classes 6 et 5 en bleu clair et bleu foncé** : selon la logique de calcul du potentiel exposée ci-dessus, les deux classes de potentiel géothermique les plus élevées correspondent respectivement aux galeries de débordement et aux puits miniers existants dans le bassin ferrifère. Ainsi, une maille en bleu clair ou bleu foncé contient au moins 1 point d'accès existant à la ressource géothermique.
- **Classe 4 en vert** : certaines zones disposent d'un potentiel géothermique élevé en raison essentiellement de leur faible profondeur, même si leur température est un peu plus basse que dans d'autres travaux miniers plus profonds. Il s'agit de la partie Nord du réservoir Sud, de la partie extrême Est du réservoir Centre ainsi que des petits réservoirs Hayange Sud, Burbach, Serrouville, Godbrange, et Bazailles (cf. carte des réservoirs dans la fiche de synthèse en annexe 1).
- **Classe 3 en jaune** : les zones moyennement profondes et donc plus difficiles d'accès, mais avec une température plus élevée, disposent d'un potentiel géothermique médian. Il s'agit de la partie centrale du réservoir Sud, de certaines petites parties du réservoir Centre et de l'auréole externe du réservoir Nord.
- **Classe 2 en rose** : en raison de leur profondeur, et malgré leur température plus élevée, les parties Sud-Ouest profondes des réservoirs Sud, Centre et Nord disposent d'un potentiel moins élevé.
- **Classe 1 en rouge** : cette classe de potentiel géothermique le moins élevé correspond exclusivement aux zones de travaux miniers foudroyés : aucune galerie de travaux miniers ne peut être atteinte dans ces mailles, quelle que soit la profondeur.

En complément du potentiel géothermique intrinsèque ainsi calculé, on présente en annexe 4 les cartes des grilles regroupées et classées « type de milieu créé par les travaux miniers », « profondeur d'accès à la ressource » et « température théorique de l'eau », ainsi que la grille regroupée et classée de la profondeur du niveau piézométrique des réservoirs miniers qui constitue une donnée associée importante pour le coût d'exploitation d'une installation géothermique profonde.

**Calcul du potentiel géothermique des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain :
Tableau de croisement des grilles élémentaires regroupées par maille 500 m x 500 m**

Thème	Grille regroupée (500 x 500 m)	Classes et notes correspondantes						Pondération
		> 200 m	150 - 200m	100 - 150 m	50 - 100 m	< 50 m	0 m	
Travaux miniers	Classes de profondeur d'accès à la ressource	1	2	3	4	5	6	3
	Notes de profondeur moyenne							
	Classes de type de milieu créé par les travaux miniers			Poreux (effondré)	Vide et poreux (mixte)	Vide (non effondré)	Accès existant (galerie, puits)	
Réservoir ennoyé	Notes de type de travaux miniers			-5	3	4	15	1
	Classes de température théorique de l'eau des réservoirs miniers			10 - 12 ° C	12 - 14 ° C	14 - 16 ° C	16 - 18 ° C	
	Notes de température moyenne			2	3	4	5	1
Calcul du potentiel	Notes de potentiel géothermique	Note potentiel géothermique = 3 x Note profondeur + Note type de milieu + Note température						
Potentiel géothermique classifié	Notes de potentiel géothermique		2 à 9	10 à 12	13 à 14	15 à 21	22 à 34	35 à 36
	Classes de potentiel géothermique		1	2	3	4	5 (puits existant)	6 (débordement existant)
	Couleur cartographique de la classe		Red	Orange	Yellow	Green	Blue	Dark Blue

Illustration 11 : Tableau de croisement des grilles élémentaires regroupées par maille 500 m x 500 m.

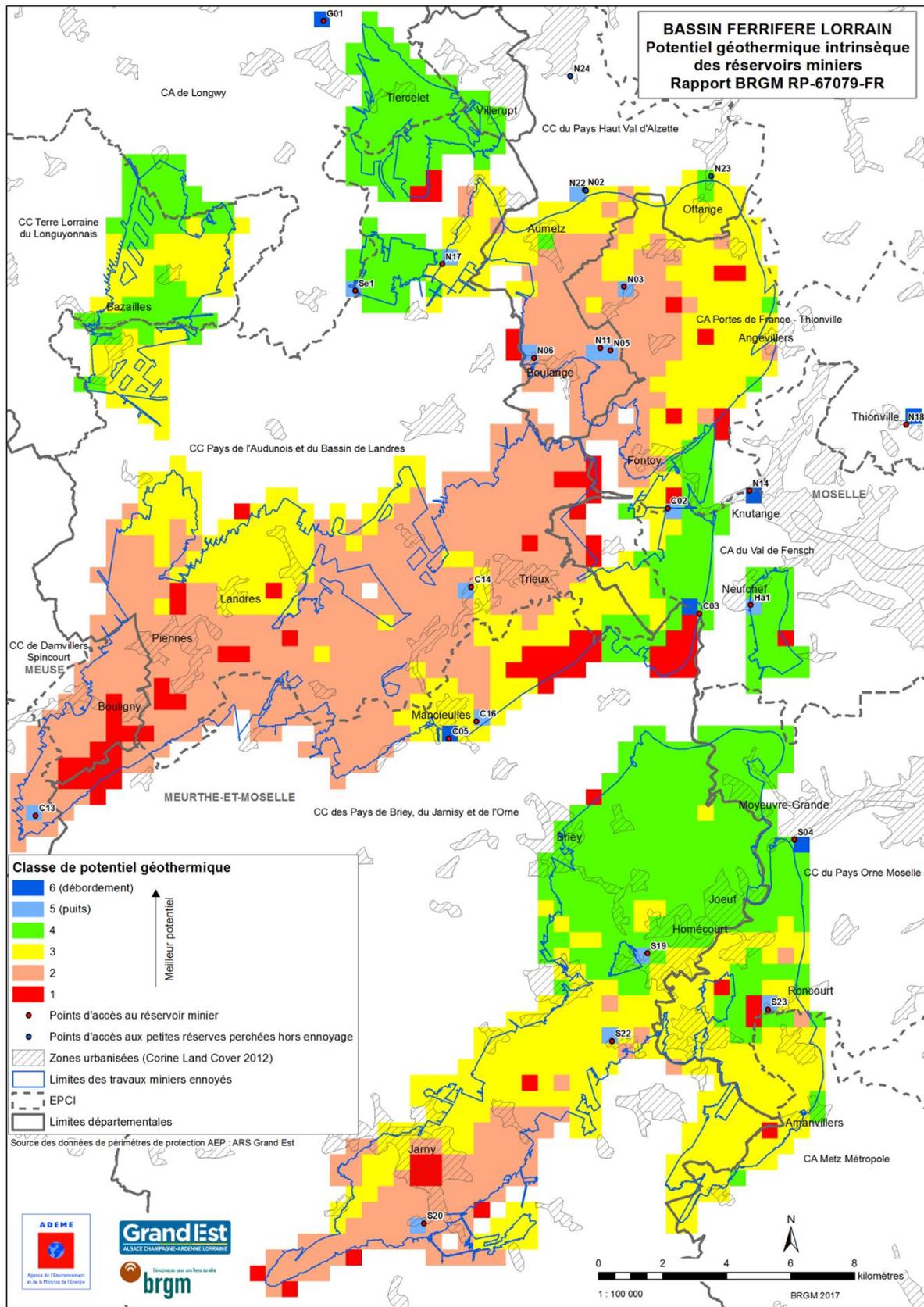


Illustration 12 : Grille résultat du calcul du potentiel géothermique par maille 500 m x 500 m.

Les installations peuvent être mises en place pour des bâtiments isolés ou pour des ensembles urbains neufs ou rénovés.

En très basse énergie, les différentes installations géothermiques peuvent fonctionner de façon réversible : en hiver, elles fournissent au réseau la chaleur qui sera redistribuée aux bâtiments ou sites industriels ; en été, elles stockent la chaleur prélevée dans les bâtiments climatisés, la chaleur fatale des usines ou encore les excédents de production des panneaux solaires.

Les évolutions technologiques de ces dernières années ont permis d'augmenter la rentabilité des systèmes géothermiques notamment en optimisant les systèmes de distribution. Le développement des projets actuels bénéficie d'un retour d'expérience important au niveau national. On pourra à ce titre citer le développement des réseaux « intelligents » (combinaison de multi-sources, boucles simultanées, stockages...) dans lesquels la géothermie peut se positionner dans le panel des sources d'énergie.

4.3.2. Usage direct ou via une pompe à chaleur (PAC)

a) Géothermie par usage direct : rafraîchissement et production de froid

La production de froid peut être réalisée par usage direct. En effet la gamme de température (9 à 16 °C) et les débits disponibles (très supérieurs ou supérieurs à 100 m³/h) permettent d'utiliser la ressource pour alimenter directement des boucles froides utilisables pour un rafraîchissement ou alimenter un réseau de froid.

b) Géothermie via une pompe à chaleur : production de froid, chaud et systèmes réversibles

L'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) permet d'abaisser la température de l'eau ou du fluide caloporteur pour produire du froid ou du chaud. Ainsi, une pompe à chaleur permet de produire :

- Du **chaud** pour assurer le chauffage.
- De **l'eau chaude sanitaire**, soit via un système indépendant du système de chauffage, soit via une pompe à chaleur intégrant les fonctions d'eau chaude sanitaire et de chauffage. Selon la température susceptible d'être fournie par la PAC, une résistance électrique peut être mise en place. A noter qu'il existe des fluides frigorigènes (R134a, par exemple) permettant d'atteindre des températures jusqu'à 65°C. Cela correspond notamment à la température nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire. Les pompes à chaleur utilisant ce fluide sont dites "à haute température".
- Du **froid**, c'est la pompe à chaleur dite "réversible" car il est alors possible d'inverser le cycle du fluide frigorigène. Pour assurer cette fonction, la pompe à chaleur est équipée d'une vanne d'inversion de cycle (4 voies). Le condenseur devient évaporateur et l'évaporateur devient condenseur.
- **Simultanément du chaud et du froid**, c'est la thermofrigopompe.

Ces systèmes requièrent de l'énergie électrique pour la pompe à chaleur. Actuellement 1KW électrique est suffisant pour produire 4 KW thermique. C'est la notion de coefficient de performance (COP) qui va dépendre de chaque type de pompe à chaleur et du dimensionnement de l'ensemble du système.

Ce type d'installation a fait la preuve de son efficacité puisque certaines opérations fonctionnent en continu depuis les années 60 (Source : AFPG - Association Française pour la Promotion de la Géothermie : www.afpg.asso.fr/nos-3-filieres/geothermie-assistee-par-pompe-a-chaleur).

Les PAC (toutes ressources confondues) ont produit 2000ktep en 2015. Elles sont encore majoritairement utilisées pour les installations individuelles mais avec les réseaux de chaleur 4ème génération et les boucles d'eau tempérées, elles sont amenées à jouer un rôle plus important dans les réseaux de chaleur de demain (source : Chiffres clés des énergies renouvelables, février 2017, ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat).

4.3.3. Exemples d'usages

a) Réseau à boucle tempérée

Une boucle d'eau tempérée est un réseau de distribution d'eau « basse température » par opposition aux réseaux de chaleurs. Elle permet de desservir des sous-stations équipées de pompes à chaleur (PAC), qui produisent l'eau chaude sanitaire, le chauffage et/ou l'eau froide ou glacée pour le rafraîchissement ou la climatisation d'un ou plusieurs bâtiments.

Contrairement à la plupart des réseaux de chauffage/refroidissement urbain, c'est donc un système décentralisé. Ses canalisations n'ont pas besoin d'être isolées thermiquement, ce qui représente une économie importante par rapport à un réseau haute ou très haute température. En outre, la régulation se fait de manière plus fine, au plus près des besoins.

b) Compléments entre refroidissement direct (freecooling) et pompe à chaleur

A certaines périodes de l'année lorsque seul un léger besoin de rafraîchissement est nécessaire (en intersaison ou en début d'été notamment) il est possible d'utiliser uniquement la fraîcheur de la source géothermique (8-16°) pour rafraîchir le bâtiment directement sans passer par la mise en route de la PAC.

Le principe est de faire circuler directement dans le réseau du bâtiment soit le fluide caloporteur via un échangeur dans le cas d'un système fermé, soit l'eau de la ressource dans le cas d'un système ouvert. La pompe à chaleur est contournée grâce à un bypass, alors qu'elle peut continuer à produire l'eau chaude sanitaire, et/ou le chauffage.

Un autre intérêt majeur de ce type d'optimisation dans une installation fonctionnant en chauffage l'hiver et rafraîchissement l'été est le rechargement potentiel de la ressource en calories durant l'été. Si le ou les compresseurs de la PAC ne fonctionnent pas, alors la seule consommation électrique du système de refroidissement sera celle de la pompe de circulation du fluide caloporteur.

Ce type d'installation peut être utilisé dans tous les types d'opérations de la géothermie très-basse énergie, d'une installation pour le particulier, jusqu'au réseau qui connecte plusieurs bâtiments collectifs.

L'utilisation de cette technique sur sonde hors aquifère est connue sous l'appellation de « géocooling ». Il est complexe de chiffrer le nombre d'opérations de géothermie qui exploitent cette technique relativement récente et encore plus d'estimer les kWh de froid produits (Source : AFPG - Association Française pour la Promotion de la Géothermie : www.afpg.asso.fr/nos-3-filieres/geothermie-assistee-par-pompe-a-chaueur).

4.4. SYSTEMES GEOTHERMIQUES ADAPTES A LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE DU BASSIN FERRIFERE LORRAIN

4.4.1. Les grands types d'installations géothermiques

Deux grands types d'installations géothermiques peuvent être définis :

- **Les systèmes comprenant une « boucle ouverte »** : l'eau est prélevée directement dans la ressource, dans le cas du bassin ferrifère via une galerie de débordement, un puits minier ou un forage. L'eau sera ensuite réchauffée ou refroidie par l'installation de surface (en usage direct ou via une pompe à chaleur) avant d'être réinjectée dans le réservoir minier ou évacuée après une autre utilisation dans un système en cascade. Il y a ainsi un transfert de matière et d'énergie entre la ressource et l'installation de surface.
- **Les systèmes comprenant une « boucle fermée »** : un liquide calorporteur circule dans des tubes immergés dans une galerie, un puits minier ou un forage. Il y a ainsi un échange de chaleur entre la ressource et l'installation de surface.

Au vu des débits disponibles, l'utilisation de systèmes ouverts semble présenter le plus grand potentiel d'exploitation de la géothermie dans le bassin ferrifère lorrain. Toutefois, cela implique une gestion de l'eau refroidie ou réchauffée (réinjection par un autre ouvrage du bassin ferrifère lorrain ou gestion en surface). Dans le cas où les installations se situeraient dans des zones présentant des réglementations sur les rejets d'eau refroidies ou réchauffées, les systèmes fermés peuvent constituer une solution.

A ces deux grands types d'installations peuvent s'ajouter des systèmes relativement innovants permettant d'optimiser la ressource tels que :

- **le stockage de chaleur** au sein de la ressource couplé avec des systèmes réversibles en surface : le procédé consiste à réchauffer la ressource en été et récupérer cette « chaleur » stockée en hiver,
- **les systèmes combinés et hybrides** (couplage avec des panneaux solaires, etc.).

Le couplage des différentes technologies en surface et au niveau du sous-sol permet une multiplicité de solutions et de techniques adaptables aux besoins en chaleur et en froid, simultanés ou alternés.

4.4.2. Principaux critères de sélection d'une installation géothermique indépendamment des usages possibles

Le choix d'un système géothermique dépend de l'adéquation entre les besoins en surface (puissance mais aussi diversité, flexibilité, adaptabilité...) et de la ressource disponible. Cette phase de dimensionnement permettra de déterminer la rentabilité du système, tant d'un point de vue économique qu'énergétique.

La proximité entre la ressource (zone de prélèvement des calories) et la zone d'utilisation peut devenir un critère économique important, voire prédominant, dans le dimensionnement de l'opération. En effet, le coût des travaux et de l'exploitation (acheminement de l'eau, maintien de la température...) peuvent impacter la rentabilité économique du projet. Ce critère pourra être majeur dans le cas d'un bâtiment isolé ou un réseau de chaleur classique ou mineur dans le cas d'utilisation de PAC décentralisée (cas d'une « boucle tempérée » par exemple). Dans le cas d'un réseau, les prix des conduites peuvent aller de moins de 300 € par mètre linéaire de réseau (€/ml) à plus de 1300 €/ml (matériel et pose) en fonction du diamètre, de l'environnement, de la densité urbaine... (Fiche optimisation du coût des réseaux de distribution, CEREMA 2013).

Dans la présente étude relative à l'évaluation du potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain, nous nous intéressons uniquement aux caractéristiques de la ressource qui peuvent orienter le choix d'un type d'installation, indépendamment des usages possibles.

Compte tenu de la complexité des écoulements souterrains dans les travaux miniers et de la multiplicité des situations rencontrées, il n'est pas possible de proposer des installations type adaptées au bassin ferrifère. Une étude détaillée est le plus souvent nécessaire. Toutefois, il est possible de proposer des recommandations générales sur la base des caractéristiques de la ressources, résumées par type de point de prélèvement en annexe 4 et commentées ci-dessous.

a) La température et son évolution due à la modification éventuelle des taux de renouvellement de l'eau

Ce critère et son évolution conditionnent le choix initial et la pérennité de l'installation géothermique. La gamme de température de l'eau mesurée dans les réservoirs miniers (9,5 à 16,5 °C) est peu discriminante dans cette première approche des types de systèmes géothermiques adaptés au bassin ferrifère, mais elle aura naturellement son importance dans l'optimisation d'une solution technique. Les températures les plus froides seront préférées pour l'installation de systèmes de refroidissement. Inversement, les températures les plus élevées seront plus adaptées aux installations de systèmes de production de chaleur.

La constance de la température de la ressource conditionne largement la pérennité de la solution envisagée et son optimisation. De ce point de vue, les galeries de débordement représentent un cas particulier très favorable. Le taux de renouvellement local à court terme de l'eau dans ces ouvrages est généralement fort voire très fort (jusqu'à plusieurs m³/s), et la température reste *a priori* constante : un usage nécessitant une température d'entrée stable pourra donc être privilégié (refroidissement direct, boucle froide d'un réseau intelligent par exemple).

Dans le cas général, la future installation géothermique perturbera plus ou moins le système hydrogéologique :

- soit en modifiant les écoulements dans les travaux miniers : cas d'une boucle ouverte avec mise en place d'un pompage assorti éventuellement d'une réinjection dans le même secteur,
- soit en modifiant la température par la création d'une bulle froide ou chaude : cas d'une boucle fermée ou ouverte.

Dans le premier cas, il faut évaluer autant que possible le risque d'une arrivée d'eau de température différente (plus froide ou plus chaude selon le cas) depuis la zone de réinjection éventuelle, depuis les galeries de connexion avec les travaux miniers voisins, et depuis les zones d'infiltrations naturelles (zones foudroyées, pertes de rivières karstiques).

Dans le deuxième cas, il faut évaluer la taille de la future bulle de température différente et la manière dont elle sera évacuée naturellement par les circulations souterraines.

Le choix d'un système précis d'exploitation géothermique d'une zone de travaux miniers identifiée doit donc être guidé autant que possible par une étude détaillée de la géométrie des vides et des circulations potentielles de l'eau souterraine dans ces vides, naturellement ou sous l'influence de pompages et/ou de réinjections. Une première approche de faisabilité peut consister à évaluer les différents taux de renouvellement de l'eau aux différentes échelles décrites au. § 4.1.5.

b) *La profondeur et la nature des travaux miniers*

Ces deux critères liés impactent fortement le coût des travaux en cas de réalisation d'un forage, car le coût de création augmente beaucoup avec la profondeur ainsi qu'avec la difficulté à atteindre certains types de travaux miniers comme une galerie minière isolée.

Les galeries de débordement, les puits de mines et les forages existants constituent ainsi un accès peu coûteux à la ressource géothermique des réservoirs miniers ennoyés. Le cas le plus favorable est le captage de la ressource au niveau d'un ouvrage de débordement tel qu'une galerie de débordement ou un puits connecté à une galerie de débordement. Le coût d'exploitation est alors minimum puisque l'eau peut être captée de manière gravitaire.

c) *La profondeur du niveau de l'eau d'un puits ou d'un forage captant un réservoir minier*

La profondeur du niveau de l'eau d'un puits ou d'un forage captant un réservoir minier (profondeur à laquelle l'eau remonte dans les puits ou forages) est liée à l'altitude du point de débordement principal d'un réservoir, cf. § 2.4.4). Ce critère impacte le coût d'exploitation et donc la rentabilité de l'installation géothermique en cas de fonctionnement de pompes.

Il est à noter que le rabattement du niveau piézométrique dans un puits ou forage captant un réservoir est négligeable en raison de la faible perte de charge des écoulements dans les réseaux de galeries (cf. annexe 1). Un réservoir minier ennoyé se comporte ainsi comme un réservoir avec un trop-plein situé au niveau du point de débordement : en cas de pompage, son niveau baisse très peu tant que le débit prélevé est inférieur au débit de débordement (ce débit peut atteindre quelques m³/s).

d) Le débit exploitable

Ce critère ne concerne que les systèmes ouverts. En raison des particularités hydrogéologiques des réservoirs miniers ennoyés (cf. annexe 1), le débit exploitable n'est pas limitant dans le choix d'un type d'installation géothermique classique (généralement inférieur à 200 m³/h, cf. ADEME, 2017) sauf dans le cas particulier d'un système ouvert exploitant une galerie de débordement au débit faible ou intermittent. Par ailleurs, dans le cas d'une réinjection ou d'un stockage de chaleur, ce débit pourrait devoir être limité en fonction de la taille et de la vitesse de déplacement de la bulle de température plus froide ou plus chaude.

Dans tous les autres cas, compte tenu des faibles pertes de charge des écoulements dans les travaux miniers et du volume très important directement accessible (de l'ordre de 50 à 200 millions de m³ par réservoir), le débit n'est limité que par des contraintes réglementaires ou de bonne pratique (partage de la ressource avec les autres usagers).

e) La composition chimique de l'eau et sa constance

La nature chimique des eaux du bassin ferrifère lorrain ne devrait *a priori* pas être une contrainte forte d'exploitation pour la plupart des systèmes existants, en raison :

- de l'évolution favorable de sa composition (stabilité ou tendance à la baisse de la minéralisation, cf. par exemple Guignat, 2017),
- de son pH proche de la neutralité (cf. par exemple Guignat, 2017),
- de son caractère *a priori* proche de l'équilibre vis-à-vis des principaux minéraux (Collon, 2003).

Il est à noter toutefois qu'en cas de réinjection d'eau refroidie dans un réservoir minier, les équilibres chimiques et/ou les cinétiques de précipitation/dissolution de minéraux pourraient être modifiés.

4.5. REGLEMENTATION APPLICABLE

Chaque projet de géothermie nécessite de réaliser différentes démarches administratives obligatoires liées à la réglementation du sous-sol. La profondeur du système, la puissance soutirée mais aussi le contexte géologique sont les principaux paramètres influant les démarches à réaliser. A l'exception des puits canadiens, des fondations thermiques (pieux) et des installations géothermiques installées à une profondeur inférieure à 10 mètres, toutes les installations géothermiques doivent être déclarées ou autorisées.

La réglementation française évolue régulièrement, et il est recommandé aux maîtres d'ouvrage de se rapprocher des services locaux (départementaux et régionaux) en charge de l'instruction des dossiers de déclaration et d'autorisation (DDT et DREAL) afin de prendre connaissance de la réglementation en vigueur au moment de la préparation de leur projet.

4.5.1. Réglementation générale applicable aux opérations de géothermie

Les textes réglementaires qui s'appliquent aux opérations de géothermie, c'est-à-dire à l'exploitation des calories souterraines, ainsi qu'aux forages d'eau, principale méthode d'exploitation de la géothermie relèvent de quatre codes (Bézègues-Courtade et Martin, 2011) :

- **le code minier et ses textes d'application** prévoient principalement que :
 - tout forage de plus de 10 m de profondeur doit faire l'objet d'une déclaration de forage (article L.411-1) ;
 - les opérations de géothermie sont classées en haute ou basse température selon que la température est supérieure ou inférieure à 150 °C (article 1 du décret n°78-498 du 28 mars 1978) ;
 - les opérations à « haute température » sont régies par le décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain ;
 - les opérations à « basse température » sont régies par le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie ;
 - les travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques sont régis par le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 ;
 - dans certaines conditions fixées par le paragraphe II de l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié (cf. § 4.5.2 ci-dessous), une opération de géothermie est considérée de « minime importance » et bénéficie d'un régime dérogatoire simplifié ;
- **le code de l'environnement** prévoit des procédures de déclaration ou d'autorisation pour :
 - la réalisation de forage destiné à un prélèvement d'eau (déclaration) ;
 - les prélèvements d'eau : régime de déclaration ou d'autorisation selon les volumes annuels ou le secteur géographique considéré ;
 - les réinjections : régime de déclaration ou d'autorisation selon les débits considérés ;
- **le code de la santé publique** lorsque le forage est également destiné à un usage alimentaire ;
- **le code général des collectivités territoriales** pour les forages à usage domestique avec des prélèvements inférieurs à 10000 m³/an.

Concernant les redevances aux agences de bassin, la loi du 30 décembre 2006 (LEMA) a exonéré de la redevance pour prélèvement d'eau les prélèvements liés à la géothermie.

4.5.2. Dérogation au code minier pour la géothermie de minime importance

Les détails du cadre réglementaire applicable à la géothermie de minime importance sont précisés sur le site www.geothermie-perspectives.fr à l'adresse :

<http://www.geothermie-perspectives.fr/article/nouveau-cadre-reglementaire-geothermie-minime-importance>

Les critères permettant à une installation géothermique de bénéficier du cadre réglementaire simplifié de la « géothermie de minime importance » sont fixés au paragraphe II de l'article 3 du décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié). Schématiquement, une opération de géothermie est considérée de « minime importance » (Martin *et al.*, 2015 et Illustration 14) lorsque :

- pour un échangeur fermé (corbeilles, verticaux ou sondes....) :
 - la profondeur d'installation est supérieure à 10 m et jusqu'à 200 m,
 - la puissance soutirée du sous-sol est inférieure à 500 kW,
 - l'échangeur est localisé en zone verte ou orange sur les cartes des zones d'aléas du sous-sol disponibles sur l'espace cartographique du site internet www.geothermie-perspectives.fr ;
- pour un échangeur ouvert (sur aquifère) :
 - les critères précédents sont respectés,
 - la température de l'eau puisée en sous-sol est inférieure à 25 °C,
 - le prélèvement et la réinjection ont lieu dans le même aquifère,
 - aucun volume n'est prélevé pour un usage autre (arrosage, consommation, agriculture, industrie...),
 - le débit pompé est inférieur à 80m³/h.

Conformément au décret n°2015-15 du 8 janvier 2015, il est prévu que pour les activités et installations relevant de la géothermie de minime importance :

- une déclaration soit établie conformément à l'article 22-2 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié
- la carte des zones relatives à la géothermie de minime importance soit prise en considération lors du choix de la localisation du forage d'un échangeur géothermique ;
- l'ouvrage géothermique soit mis en œuvre par une entreprise de forage qualifiée, selon l'arrêté des prescriptions générales prévu par l'article 22-5 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié ;
- sur les zones orange, un expert agréé atteste de la compatibilité du projet aux regards des intérêts du code minier notamment la préservation de la solidité des édifices publics et privés et de la ressource en eau.

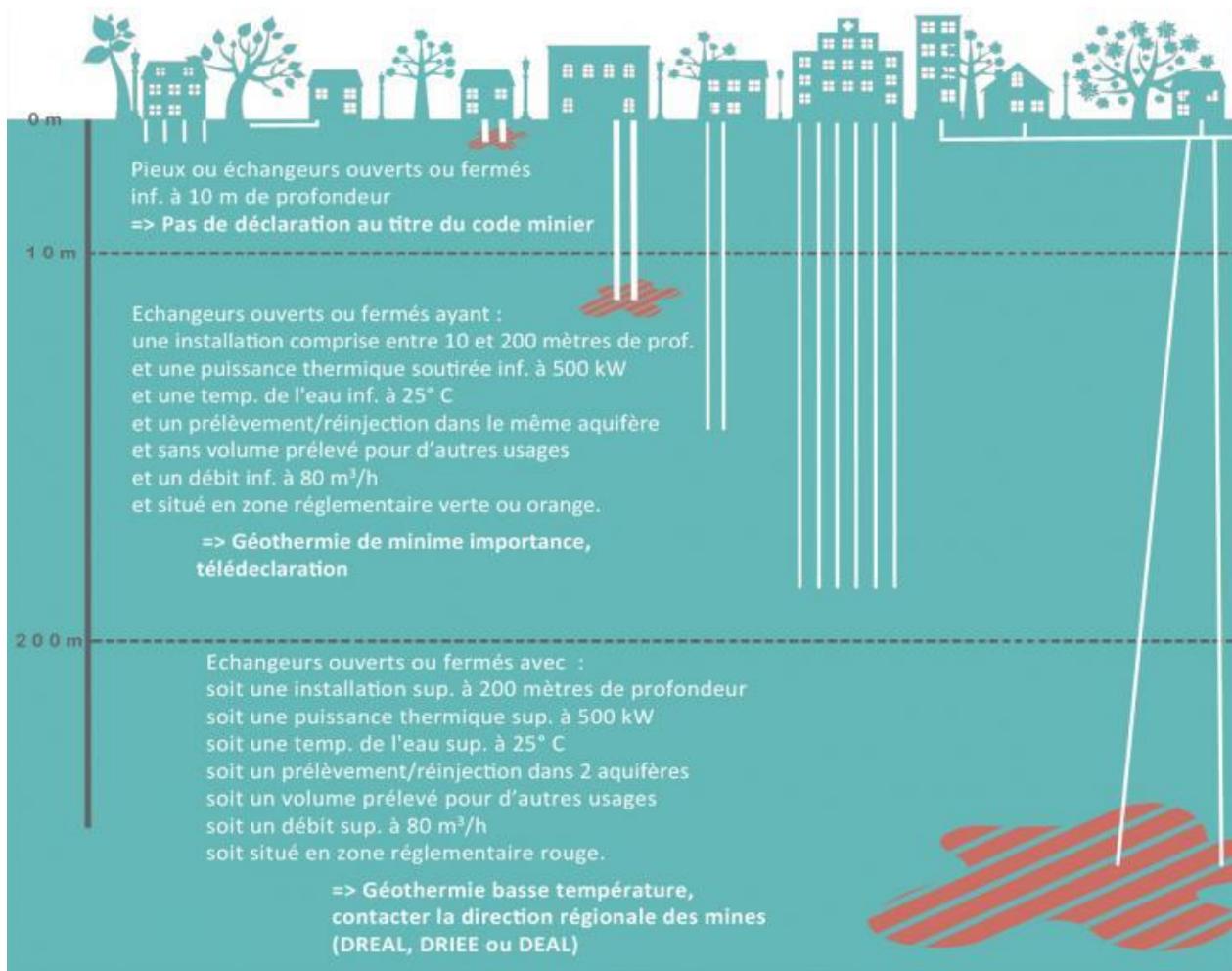


Illustration 14 : Principaux critères fixant la compatibilité d'une installation géothermique avec le cadre réglementaire de la « géothermie de minime importance » (<http://www.geothermie-perspectives.fr/article/etape-3-reglementation-demarches>).

4.5.3. Réglementation spécifique au SAGE du bassin ferrifère lorrain

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité : il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage.

Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin ferrifère lorrain fixe les objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des

ressources en eaux superficielles et souterraines et des écosystèmes aquatiques, ainsi que de préservation de la continuité écologique et des zones humides (cf. articles L.210-1, L.211-1 et L.430-1 du code de l'environnement). Le SAGE comporte deux documents (cf. articles L.210-1, L.211-1, L.212-3 et L.212-5 et L.430-1 du code de l'environnement) :

- Le plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD) : il fixe les orientations et les dispositions pouvant être opposables aux décisions de l'Etat et des collectivités locales. Le PAGD relève du principe de compatibilité. Cela signifie que tout projet développé sur le bassin versant ne doit pas aller à l'encontre des enjeux et des objectifs du SAGE déclinés dans le PAGD.
- Le règlement du SAGE, opposable à toute personne publique ou privée pour l'exécution de toute installation, ouvrage, travaux ou activités (IOTA) mentionnées à l'article L.214-1 et suivants du code de l'environnement.

Les documents du SAGE sont téléchargeables à l'adresse <http://www.lorraine.fr/sagebf>.

Concernant les forages géothermiques et les ouvrages et prélèvements dans les aquifères, le SAGE considère qu'il est indispensable de prévenir, au nom du principe de précaution, un risque de contamination de la ressource en eau des réservoirs miniers, étant donné sa vulnérabilité intrinsèque et les enjeux identifiés, tant en terme d'environnement que de santé publique (alimentation en eau potable collective), pour cette ressource en eau, du fait de la multiplication probable de forages captant cette ressource.

Il considère ainsi que la nappe des réservoirs miniers doit être protégée, par la réalisation dans les règles de l'art de tous les ouvrages dans cet aquifère, et par l'interdiction de forages autre que ceux faisant l'objet d'une DUP ou permettant d'améliorer la connaissance hydrogéologique, dans les secteurs les plus sensibles, à savoir les périmètres de protection rapprochés des captages AEP existants (en fonctionnement ou en sommeil, susceptibles d'être réactivés).

En conséquence, l'article 3 du règlement du SAGE du bassin ferrifère prévoit que :

a) *les forages géothermiques, ouvrages et prélèvements dans les réservoirs miniers sont soumis au respect de l'ensemble des conditions suivantes :*

- les prescriptions visées à l'arrêté du 11 septembre 2003 (fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement) ;
- les prescriptions de l'arrêté du 11 septembre 2003 (fixant les prescriptions générales applicables aux prélèvements soumis à déclaration en application des articles L.214-1 à L.214-6 du code de l'environnement) ;
- les prescriptions de l'arrêté du 11 septembre 2003 (fixant les prescriptions générales applicables aux prélèvements soumis à autorisation en application des articles L.214-1 à L.214-6 du code de l'environnement) ;
- les prescriptions de la norme AFNOR NF X 10-999 (Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages) ;

- les prescriptions de la norme NF X 10-970 (Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) - Réalisation, mise en oeuvre, entretien, abandon) ;
- la mise en place d'une cimentation en tête à l'avancement permettant une bonne étanchéité est (dans le cas des sondes verticales) ;
- la mise en place d'un détecteur de fuite de liquide caloporteur (dans le cas des sondes verticales et horizontales) ;
- dans le cas d'un prélèvement d'eau pour le fonctionnement d'un doublet géothermique avec réinjection, l'absence de réinjection dans un périmètre de protection éloigné de captage AEP d'eau ;

b) les forages, autres que pour l'AEP ou la surveillance des aquifères, situés dans un périmètre de protection rapproché d'un captage AEP dans les réservoirs miniers, sont interdits.

L'article 3 s'applique à tous les forages géothermiques, ouvrages et prélèvements dans les aquifères, y compris ceux non soumis à déclaration ou autorisation au titre des articles L.214-1 à L.214-6 du code de l'environnement ou à déclaration, enregistrement ou autorisation au titre des articles L.511-1 à L.512-20 du code de l'environnement dans la mesure où dans cette hypothèse ils entraînent des impacts cumulés significatifs en termes de prélèvements et de rejets dans le périmètre du SAGE.

Cette règle s'applique, à compter de l'entrée en vigueur du SAGE, aux nouveaux forages ou aux forages existants qui sont l'objet de modifications substantielles, ainsi qu'à ceux pour lesquels un nouveau dossier d'autorisation ou de déclaration IOTA ou ICPE est déposé.

Le **a)** s'applique uniquement dans les réservoirs miniers.

Le **b)** s'applique dans les périmètres de protection rapprochés des captages AEP situés dans les réservoirs miniers.

4.5.4. Carte des principaux zonages réglementaires du bassin ferrifère lorrain

La carte des principaux zonages réglementaires du bassin ferrifère lorrain est fournie en annexe 4. Elle comporte le zonage lié au cadre réglementaire de la géothermie de minime importance, ainsi que les périmètres de protection des captages d'eau potable en vigueur et en projet.

Ces zonages réglementaires sont aussi reportés sur la carte du potentiel géothermique en annexe 4, ainsi que sur les cartes par collectivité territoriale en l'annexe 5 (cf. § suivant).

4.6. CARTES ET FICHES SYNTHETIQUES DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE POUR LES 10 COLLECTIVITES TERRITORIALES CONCERNEES PAR LES RESERVOIRS MINIER ENNOYES (ANNEXE 5 ET CD-ROM JOINT)

L'annexe 5 contient 10 cartes et 1 CD-ROM joint.

Pour chacune des 10 collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés (communautés d'agglomération ou communautés de communes) une carte du territoire de la collectivité présente :

- les classes de potentiel géothermique des réservoirs miniers accessibles sur le territoire,
- les points d'accès aux réservoirs miniers,
- les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable (AEP) en vigueur et en projet,
- les zones soumises à autorisation dans le cadre de la géothermie de minime importance,
- les zones urbanisées,
- la limite d'ennoyage des travaux miniers.

Les 10 cartes sont présentées dans l'ordre alphabétique du nom des collectivités territoriales :

- CA Longwy
- CA Metz Métropole
- CA Thionville
- CA Val de Fensch
- CC Audunois
- CC Briey
- CC Damvillers Spincourt
- CC Longuyonnais
- CC Orne Moselle
- CC Pays-Haut Val d'Alzette

En complément, sur le CD-ROM joint au présent rapport, le lecteur trouvera 10 fiches synthétiques numériques au format PDF pour chacune des collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés. Ces fiches contiennent la carte présentée ci-dessus et résument l'information présentée dans le présent rapport.

5. Conclusion

Le BRGM a été chargé d'étudier le potentiel géothermique du bassin ferrifère lorrain par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie et par le Conseil Régional de la Région Lorraine (aujourd'hui devenue la région Grand Est), car la connaissance de ce potentiel était restreinte, or les principaux réservoirs miniers ennoyés du bassin constituent une réserve de près de 500 millions de m³ d'eau souterraine, qui pourrait représenter une opportunité d'exploitation géothermique importante.

La présente étude a permis :

- de constituer à partir de données existantes, un référentiel d'informations sur les eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en rapport avec le potentiel géothermique des réservoirs ennoyés : ce référentiel comprend notamment la liste des points d'eau et des points d'accès aux réservoirs miniers, une caractérisation physico-chimique des eaux souterraines, une cartographie des zones urbanisées, des milieux souterrains issus de l'exploitation minière, de la profondeur des réservoirs miniers et de la profondeur du niveau piézométrique des réservoirs miniers,
- d'acquérir des données complémentaires *in situ* sur la température des eaux souterraines du réservoir minier et de la nappe du Dogger, dans les zones situées à l'aplomb des réservoirs miniers où des accès existent déjà, et de produire la cartographie associée,
- d'évaluer le potentiel géothermique intrinsèque de l'eau des réservoirs miniers sur la base de 3 critères (profondeur des travaux miniers, type de milieu souterrain créé par les travaux miniers, température de l'eau des réservoirs miniers) et de le mettre en relation cartographique avec les zones urbanisées et les zonages réglementaires,
- d'élaborer des fiches synthétiques des résultats de l'étude pour les 10 entités administratives (communautés de communes et communes) concernées par les réservoirs miniers ennoyés.

Cet état des lieux pourra être employé, grâce aux éléments recueillis et présentés dans le rapport et les documents numériques associés, pour orienter des études approfondies et détaillées sur des secteurs ciblés du bassin ferrifère.

6. Bibliographie

ADEME (2017) – Chauffer et rafraîchir avec une énergie renouvelable : géothermie basse énergie. Brochure ADEME n°010136, 101 p.

Barchi P., Cartannaz C., Fourniguet G. (2007) – Projet MINEWATER : géologie du bassin houiller lorrain et potentialité géothermique. Rapport BRGM/RP-56096-FR, 53 p., 25 fig., 2 ann.

Bézèlgues-Courtade S., Martin J-C. (2001) – Synthèse de la réglementation française codifiant la recherche et l'exploitation de l'énergie géothermique. Rapport BRGM/RP-60195-FR, 110 p., 8 ann.

Collon P. (2003) – Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain : de l'expérimentation en laboratoire à la modélisation *in situ*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine soutenue le 21 octobre 2003, 203 p., 4 ann.

Guignat S. (2017) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain pour la période 2014-2015. Rapport BRGM/RP-66934-FR, 51 p., 32 ill., 2 ann.

Martin J-C., Durst P., Jaudin F., MEDDE (2015) – Eléments de présentation de la nouvelle réglementation française pour la géothermie de minime importance. Ce document a été réalisé dans le cadre du projet Européen ReGeoCities, 13 p., http://www.geothermie-perspectives.fr/sites/default/files/regeocities-gth_minime_importance_2015_06_30_0.pdf

Ollagnier S. (2013) – Optimisation des réseaux de surveillance quantitative et qualitative des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-60939-FR, 103 p., 41 ill., 3 ann.

Vaute L. (2007) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2006. Rapport BRGM/RP-56142-FR, 104 p., 40 fig., 4 tabl., 1 ann.

Vaute L., Lanini S., Galet N. (2013) – Construction et mise en œuvre d'un simulateur hydrologique et chimique du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM/RP-62998-FR, 67 p., 41 fig., 6 tabl.

Vaute L., Durendeau B., Fourniguet G., Soulas C., Mathieu E. (2007) – Schéma d'aménagement et de gestion des eaux du bassin ferrifère lorrain – Séquence n°1 : l'état des lieux. Rapport BRGM/RP-55434-FR, 235 p., 96 fig., 15 tabl., 34 photos, 5 ann.

Annexe 1 : Fiches descriptives du bassin ferrifère lorrain

Cette annexe 1 contient trois fiches synthétiques décrivant :

- le bassin ferrifère lorrain et le contexte de la mise en place de son réseau de surveillance,
- la structure et le fonctionnement des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain après l'arrêt des mines et l'ennoyage des réservoirs,
- les principaux résultats d'une modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau.

Ce panorama des connaissances concernant l'hydrogéologie du bassin ferrifère lorrain est utile à la compréhension des résultats de la présente étude. Ces fiches synthétiques ont été produites par le BRGM dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2014 et 2015 (Guignat, 2017). Elles sont téléchargeables sur le SIGES Rhin-Meuse (<http://sigesrm.brgm.fr/Chroniques-semestrielles-hors-serie-du-bassin-ferrifere>).



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°1 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité : il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage.

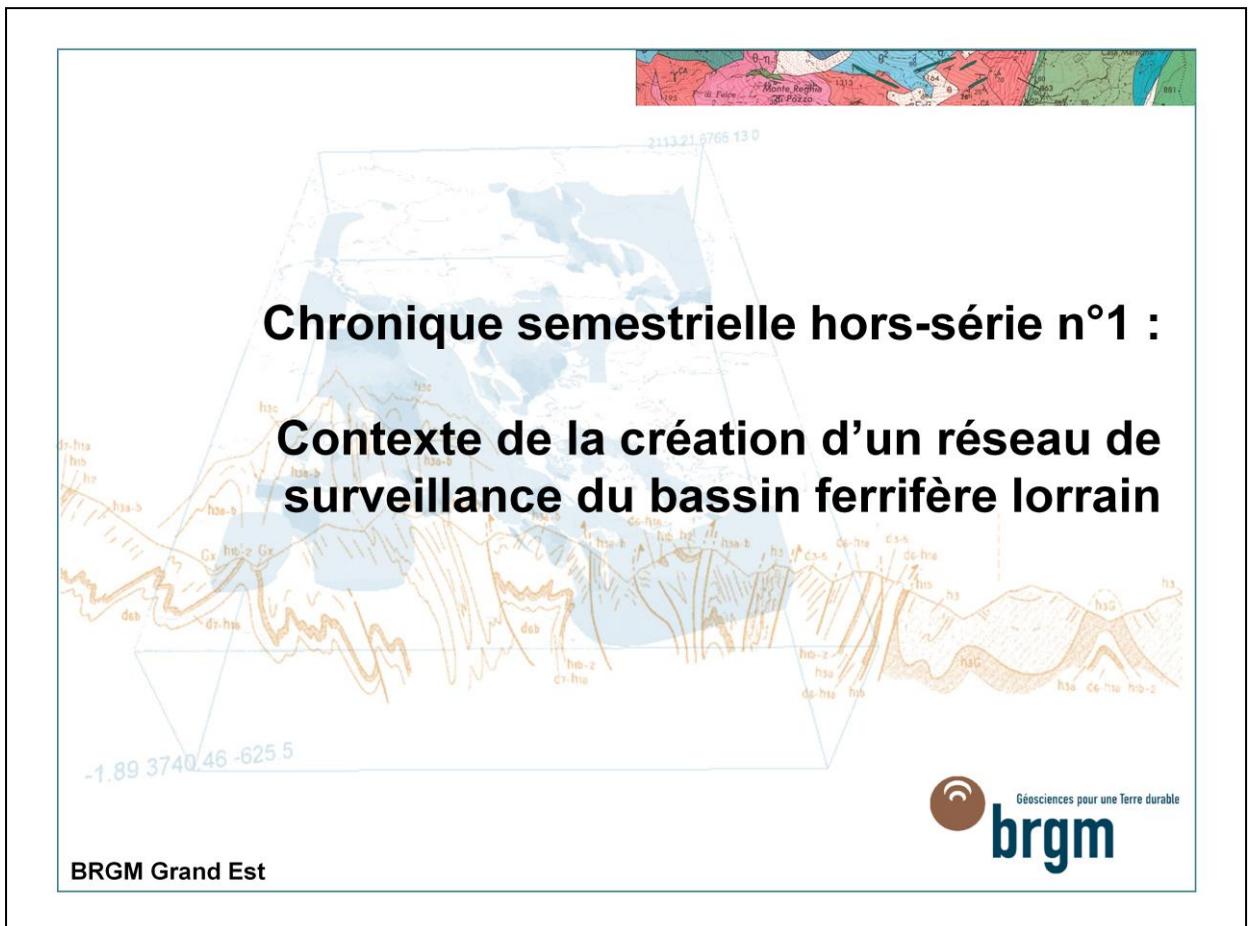
Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°1 présente le bassin ferrifère et le contexte de la création de son réseau de surveillance, dont les résultats ont permis la définition d'un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs ennoyés (hors-série n°2) et la construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (hors-série n°3).



Historique de l'exploitation

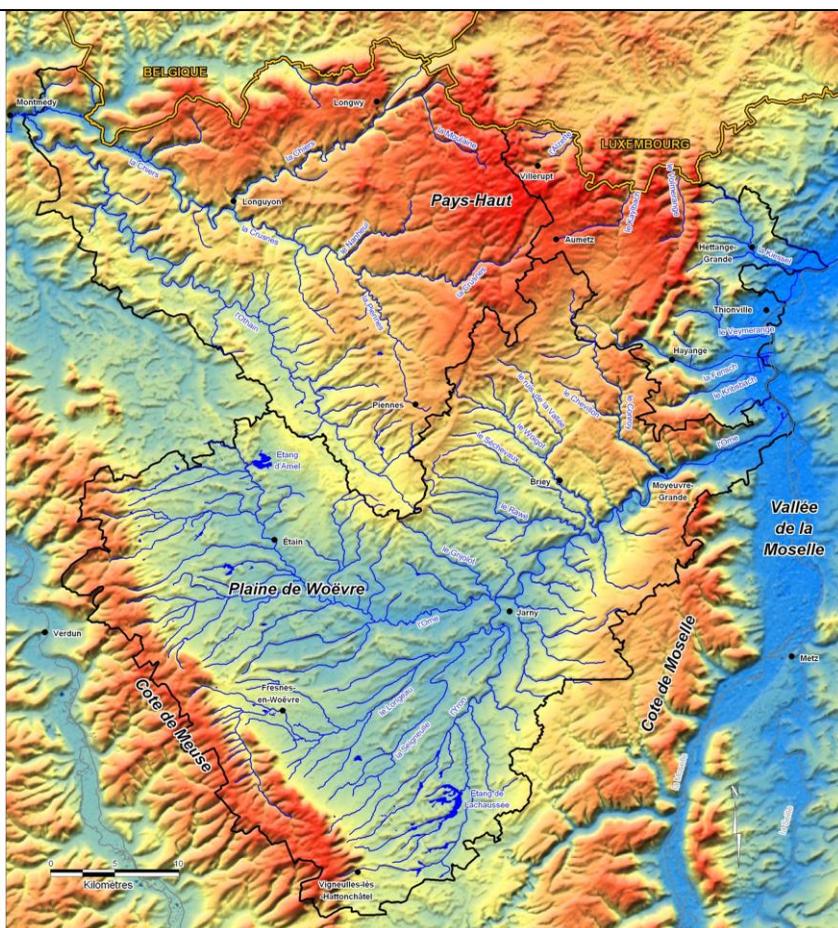
Le gisement lorrain a été exploité épisodiquement depuis le XIII^{ème} siècle, et régulièrement depuis le XVIII^{ème} siècle. Les mines de fer de Lorraine, qui produisaient un minerai assez pauvre et phosphoreux, ont été le support de la sidérurgie locale et ont connu leur heure de gloire tant que l'exploitation et le transport de minerais plus riches ne sont pas venus les concurrencer en Lorraine même. L'installation de sidérurgies portuaires, plus modernes et plus facilement approvisionnables en minerais, puis la crise générale de la sidérurgie, sont venues accélérer le déclin. Le processus de fermeture totale des mines est aujourd'hui achevé. Après avoir dépassé les 60 millions de tonnes de production annuelle de 1960 à 1962, les mines de fer ont connu un plateau de stabilisation de leur production autour de 50 millions de tonnes par an de 1968 à 1974, puis ont plongé pour descendre autour de 10 millions de tonnes par an après 1988. On estime que **trois milliards de tonnes ont été extraites** depuis l'origine.

Administrativement, le bassin a été morcelé en quelques centaines de concessions couvrant environ une centaine de km du nord au sud et une trentaine de km au maximum d'est en ouest, et s'étendant sur 3 départements (Meuse, Meurthe-et-Moselle, Moselle). Ces concessions étaient pour la plupart jointives (surtout dans le bassin Briey-Longwy), et la plupart du temps, les travaux d'une mine communiquaient avec ceux de la mine voisine. Les exploitants des différentes mines ont été multiples, au temps de la splendeur (mines marchandes, mines intégrées dans les grands groupes...). La crise de la sidérurgie les a fait disparaître ou se regrouper, et il n'en est resté finalement plus que deux : l'ARBED, qui a approvisionné la sidérurgie luxembourgeoise, et LORMINES, qui était la filiale du groupe USINOR-SACILOR ayant regroupé tous les intérêts miniers français.

Source : Rapport sur l'exhaure des mines de fer en Lorraine, Suzanne et Fournieret, 1996.

Le relief et les grandes régions naturelles

- > 2 grandes régions naturelles :
 - La plaine argileuse de la **Woëvre** (altitude : **220 à 230 m**)
 - Le plateau marno-calcaire du **Pays-Haut** (altitude : **230 à 450 m**)
- > Région limitée par les reliefs de la **côte de Meuse** à l'est, de la **côte de Moselle** à l'ouest, et la **frontière** avec la Belgique et le Luxembourg au nord



Relief et grandes régions naturelles

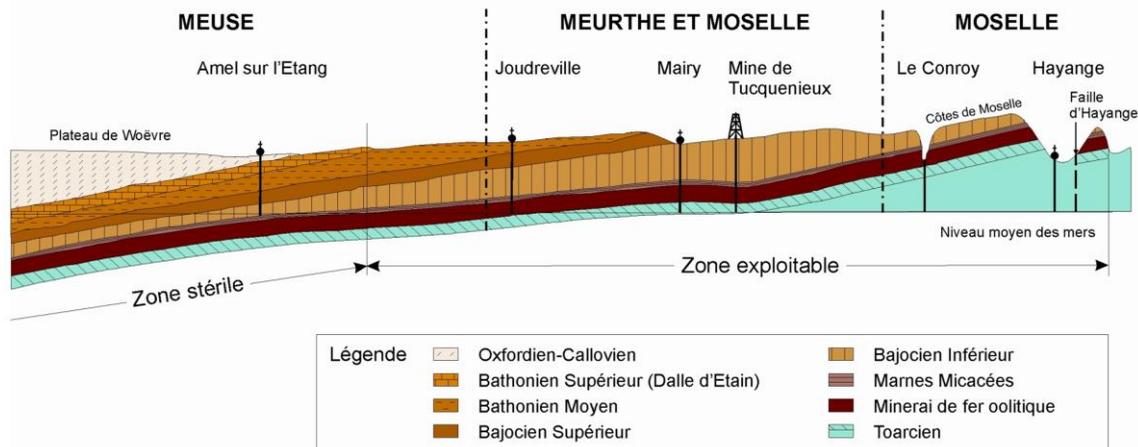
Le gisement de minerais de fer affleure le long de la côte de Moselle et s'interrompt sur près de 25 km en son centre, entre Pagny-sur-Moselle et Pont-à-Mousson. Cette discontinuité partage la région en deux zones distinctes, le bassin ferrifère de Nancy au sud (abandonné plus anciennement et non concerné par les études décrites ici) et le bassin ferrifère de Briey-Longwy au nord. Les exploitations minières se sont développées sous le plateau du revers occidental de la côte de Moselle. Le territoire du SAGE du bassin ferrifère (contour noir sur la carte ci-dessus) est situé entre les cours de la Meuse à l'ouest, et de la Moselle à l'est. Il est encadré par les grandes agglomérations de Verdun à l'ouest, Metz à l'est, Pont-à-Mousson au sud, tandis que sa limite nord est constituée par la frontière française avec la Belgique et le Luxembourg. Deux grandes régions naturelles, aux caractéristiques très différentes, peuvent être distinguées : la plaine de la Woëvre au sud du territoire, et le plateau du Pays-Haut au nord.

La plaine de la Woëvre, d'altitude comprise entre 220 et 230 mètres, occupe la plus grande partie de la moitié sud du territoire. Sur ses limites sud-ouest et sud-est, cette grande dépression

topographique s'appuie sur les reliefs calcaires des côtes de Meuse et de Moselle. La plaine de la Woëvre est constituée de terrains argileux imperméables, et caractérisée par la présence de nombreux terrains marécageux et de retenues telles que l'étang d'Amel et l'étang de Lachaussée.

Le plateau marno-calcaire du Pays-Haut, dans la partie nord du territoire, est limité à l'est par la vallée de la Moselle, à l'ouest par la confluence Chiers-Othain, au sud par la plaine de la Woëvre, tandis que sa limite nord correspond approximativement à la frontière avec la Belgique et le Luxembourg. La surface du plateau est légèrement inclinée du nord-est vers le sud-ouest, son altitude variant de 450 à 230 m. Le point culminant du Pays-Haut, situé à proximité d'Aumetz, est un point de partage des eaux vers les trois bassins versants du territoire (la Chiers, l'Orne, et les petits cours d'eau du bassin versant de la Moselle). Les cours d'eau parcourant le plateau calcaire s'y enfoncent rapidement, et coulent souvent dans des vallées encaissées.

Coupe géologique ouest-est du bassin ferrifère lorrain



- Couche du minerai de fer : âge aalénien
- Repose sur l'étage terminal du Lias : le Toarcien
- Recouverte par la série sédimentaire complète du Dogger
- Accidents tectoniques (NE-SO) : subdivision du bassin en trois sous-bassins (Nord, Centre et Sud)

Géologie et hydrogéologie

La couche de minerai de fer qui a été exploitée de manière industrielle pendant plus d'un siècle est d'âge Aalénien. Elle affleure à l'est au niveau des escarpements qui bordent la vallée de la Moselle, puis s'enfonce vers l'ouest avec un pendage moyen de l'ordre de 3 %, pour atteindre une profondeur d'environ 300 m à l'aplomb des limites de la zone exploitable et concédée (cf. coupe géologique ci-dessus).

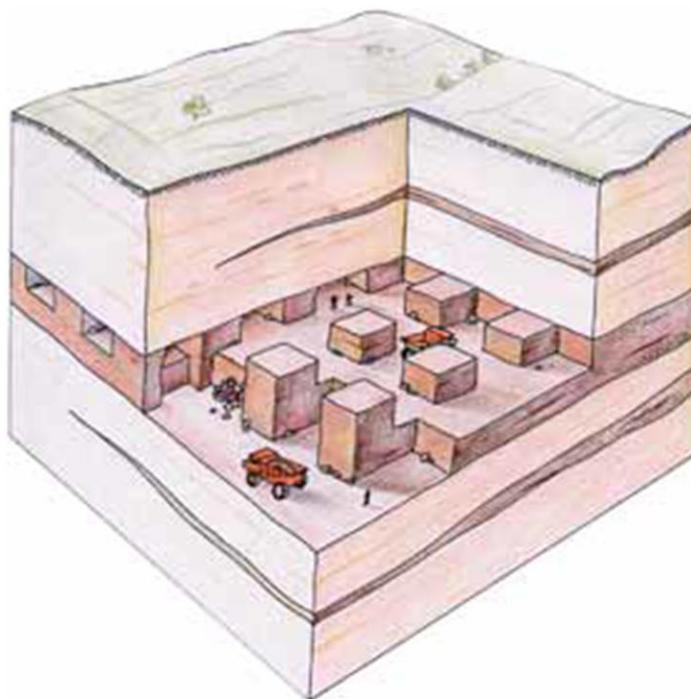
La **couche de minerai de fer** repose sur les marnes imperméables du Toarcien. Elle est progressivement recouverte d'est en ouest par la succession des formations calcaires et marneuses du Jurassique inférieur et moyen, constituant ainsi la série sédimentaire complète du Dogger. Plus à l'ouest, le Dogger est lui-même recouvert par les argiles de la Woëvre (Callovo-Oxfordien), puis par les calcaires oxfordiens formant le relief de la côte de Meuse.

D'un point de vue hydrogéologique, on peut distinguer, au droit des zones exploitées, trois ensembles aquifères superposés.

Du bas vers le haut, on trouve :

- **les nappes des réservoirs miniers**, dans la formation ferrifère : ces aquifères, modestes à l'état naturel, deviennent de véritables réservoirs d'eau souterraine artificiels, lorsqu'ils sont percés de galeries ; un réservoir peut être rempli ou non d'eau (il peut être ennoyé, partiellement ennoyé ou non ennoyé),
- **la nappe principale du Dogger** : contenue dans les calcaires à polypiers du Bajocien moyen et dans les calcaires du Bajocien inférieur,
- **plusieurs petites nappes perchées** et discontinues, les nappes des oolithes de Jaumont et de Doncourt, qui reposent sur des niveaux marneux,
- **quelques nappes alluviales** de faible importance : alluvions du Conroy, de l'Orne, de la Fensch.

Méthode d'exploitation



Source image : L'après-mine en France, BRGM, 2006



Méthode d'exploitation

Après une exploitation de type artisanale des couches minéralisées, qui s'est effectuée à partir des affleurements (du XVII^{ème} au XIX^{ème} siècle), une technique d'exploitation moderne par **chambres et piliers** est apparue en 1893, consistant à creuser dans la couche de minerai des galeries se recoupant perpendiculairement pour former un maillage carré ou rectangulaire de galeries interconnectées, en laissant en place de larges zones non exploitées (les piliers) qui soutenaient les terrains situés au-dessus. Avec cette méthode, les piliers étaient abandonnés, et on ne récupérait donc qu'une partie du gisement.

C'est pourquoi la méthode des chambres et piliers abandonnés a évolué vers la **méthode dite de traçage et dépilage**, qui s'est généralisée après la seconde guerre mondiale, et qui permettait un taux de récupération plus élevé grâce à la plus faible dimension des piliers résiduels (3 m x 3 m). Ces derniers étaient torpillés à l'explosif en fin d'exploitation, pour assurer la stabilité à long terme des terrains, entraînant l'effondrement des terrains sus-jacents.

L'exploitation se déroulait ainsi en trois phases principales :

- **phase de traçage** : après avoir divisé la zone à exploiter par le creusement de galeries principales, l'exploitant minier créait un réseau de galeries parallèles par creusement dans le minerai en place, en délimitant ainsi de longs piliers entre les galeries, donnant ainsi naissance à une « **zone tracée** » ;
- **phase de dépilage-foudroyage** : lorsque c'était possible sans risquer d'endommager des structures en surface (bâtiments, routes, voies ferrées), ces longs piliers étaient exploités par des creusements perpendiculaires successifs, jusqu'à ce que ne subsistent que de maigres piliers résiduels. Le dépilage se terminait alors par le torpillage des piliers résiduels à l'explosif, ce qui provoquait la chute du toit : c'était le foudroyage, qui donnait naissance à une « **zone dépilée** » (aussi appelée « **zone foudroyée** »). L'effondrement des terrains provoquait généralement la création d'une cuvette d'affaissement en surface.



Conséquences de l'exploitation minière

Durant plus d'un siècle d'exploitation dans le bassin ferrifère lorrain, 3 milliards de tonnes de minerai de fer ont été excavés, 40000 km de galeries ont été creusés, sur plusieurs niveaux (3 généralement). La surface des zones foudroyées (dépillées) représente en moyenne 40 à 50 % de la surface exploitée.

Les **venues d'eau d'infiltration** furent toujours un problème majeur pour l'exploitation, puisqu'il fallait sortir de 5 à 20 m³ d'eau pour une tonne de minerai extrait. Ce problème était très fortement lié à la méthode d'exploitation par traçage et dépilage. En effet, consécutivement à la pratique du foudroyage, l'écran imperméable constitué de marnes micacées sus-jacent à la formation ferrifère était fracturé sur une grande surface. Au droit des zones exploitées, la quasi-totalité de la nappe principale des calcaires du Dogger située au-dessus des travaux miniers a ainsi été drainée vers les exploitations minières par l'intermédiaire des zones foudroyées.

Le développement de l'activité minière, particulièrement depuis le milieu du XX^{ème} siècle, n'a alors pu s'effectuer que grâce à la mise en œuvre de **pompages permanents « d'exhaure minière »** destinés à maintenir les travaux miniers au sec. Des galeries de drainage et des albraques (bassins d'accumulation) ont dû être réalisés en fond de mine, ainsi que des puits d'exhaure en surface. De plus, des interconnexions hydrauliques entre les mines ont été créées au fur et à mesure des regroupements de sièges d'exploitation au sein de chaque bassin.

L'exhaure moyenne annuelle du bassin ferrifère est évaluée à 179 millions de m³ d'eau par an pour la période 1946-1993 (donc avant l'arrêt des exhaures des réservoirs Centre, Sud et Nord), pour un minimum de 70 (1946) et un maximum de 291 millions de m³/an (1981).

Une petite partie (10%) de l'eau d'exhaure était utilisée pour l'alimentation en eau potable et industrielle, tandis que l'essentiel du débit était déversé dans les cours d'eau, modifiant artificiellement le régime des cours d'eau du territoire.



L'ennoyage, après l'arrêt de l'exploitation et de l'exhaure minière

L'ennoyage des mines

Un tel prélèvement d'eau souterraine a considérablement **bouleversé les équilibres naturels**, tant pour le milieu souterrain que pour les écoulements superficiels. C'est ainsi que des sources ont disparu ou que certains tronçons de cours d'eau se sont asséchés. Inversement, le rejet massif des eaux d'exhaure dans les rivières de la région a conduit par endroits à une artificialisation du débit des cours d'eau. La prolongation de cet état de fait pendant quelques dizaines d'années a rendu possible l'installation d'un **nouvel équilibre dynamique artificiel**, auquel la population s'est habituée.

La fermeture des exploitations minières a entraîné **l'arrêt des exhaures et la remise en cause de cet équilibre dynamique**. Les pompages d'exhaure des 3 plus grands bassins ont été arrêtés à partir de 1994 : février 1994 pour le bassin Centre, mars 1995 pour le bassin Sud, décembre 2005 pour le bassin Nord. L'arrêt des pompages a eu pour conséquence **l'ennoyage progressif des travaux miniers** et la création de « réservoirs miniers ».

Par convention, un **réservoir minier** est défini comme un **aquifère artificiel** constitué de l'ensemble des vides laissés par l'homme dans la formation ferrifère. Chaque réservoir est indépendant de ses voisins au point de vue hydraulique (pas ou peu d'échanges d'eau entre réservoirs). Au sein de chaque réservoir, on distingue :

- **la zone ennoyée** (qui n'est pas toujours présente) dans laquelle les anciennes galeries minières abandonnées sont remplies d'eau, et qui déborde généralement vers un cours d'eau par un ou plusieurs exutoires aménagés spécialement (points de débordement),
- **la zone non ennoyée** qui collecte et conduit l'eau qui s'y infiltre vers la zone ennoyée et/ou vers un ou plusieurs exutoires situés à une cote supérieure à la cote d'ennoyage (si cette dernière existe).

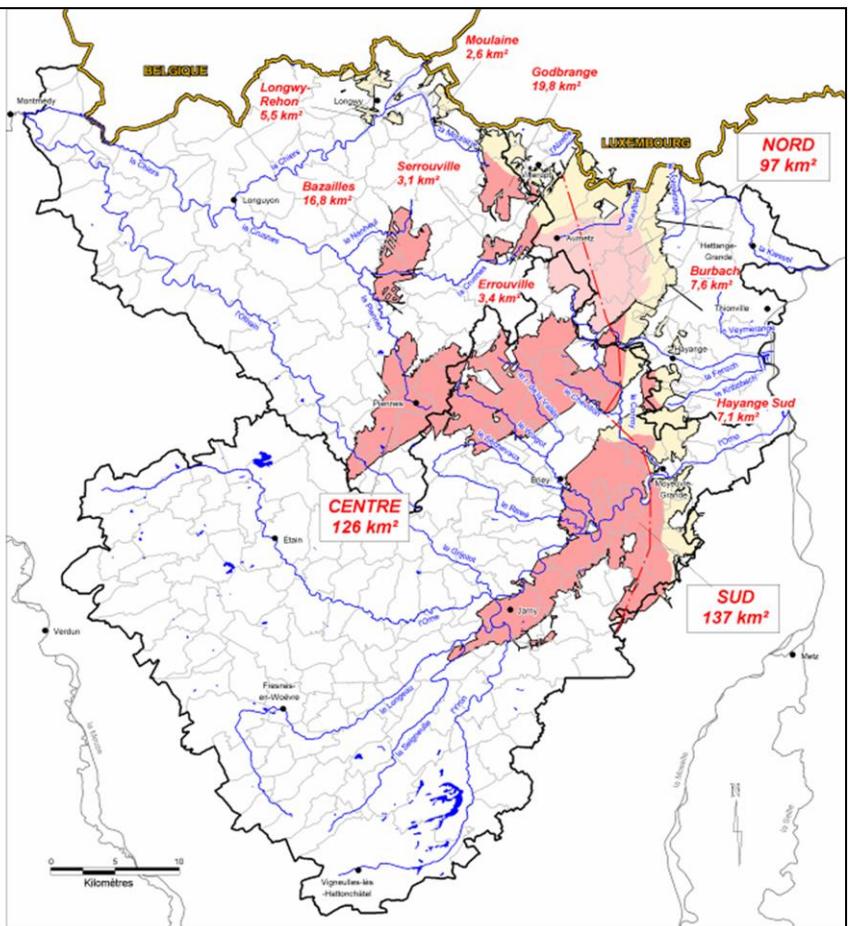
Les réservoirs miniers du Bassin ferrifère lorrain

> 11 réservoirs miniers :

- 430 km² de travaux miniers,
- ¾ de la surface est ennoyée
- Volume d'eau > 450 Mm³

> 3 grands réservoirs (< 97 km²) : Sud, Centre, Nord

> 8 petits réservoirs (> 20 km²)



Les bassins et réservoirs miniers

La formation ferrifère est affectée par de nombreuses failles orientées principalement nord-est / sud-ouest, qui subdivisent le bassin ferrifère de Briey-Longwy en 4 bassins géographiques de taille plus restreinte, au sein desquels un ou plusieurs réservoirs miniers sont individualisés.

On rappelle qu'un **réservoir minier** est défini, par convention, comme un aquifère artificiel constitué de l'ensemble des vides laissés par l'homme dans la formation ferrifère, après la fin de l'exploitation du minerai de fer, ce réservoir pouvant être ennoyé, partiellement ennoyé ou non ennoyé.

On distingue donc :

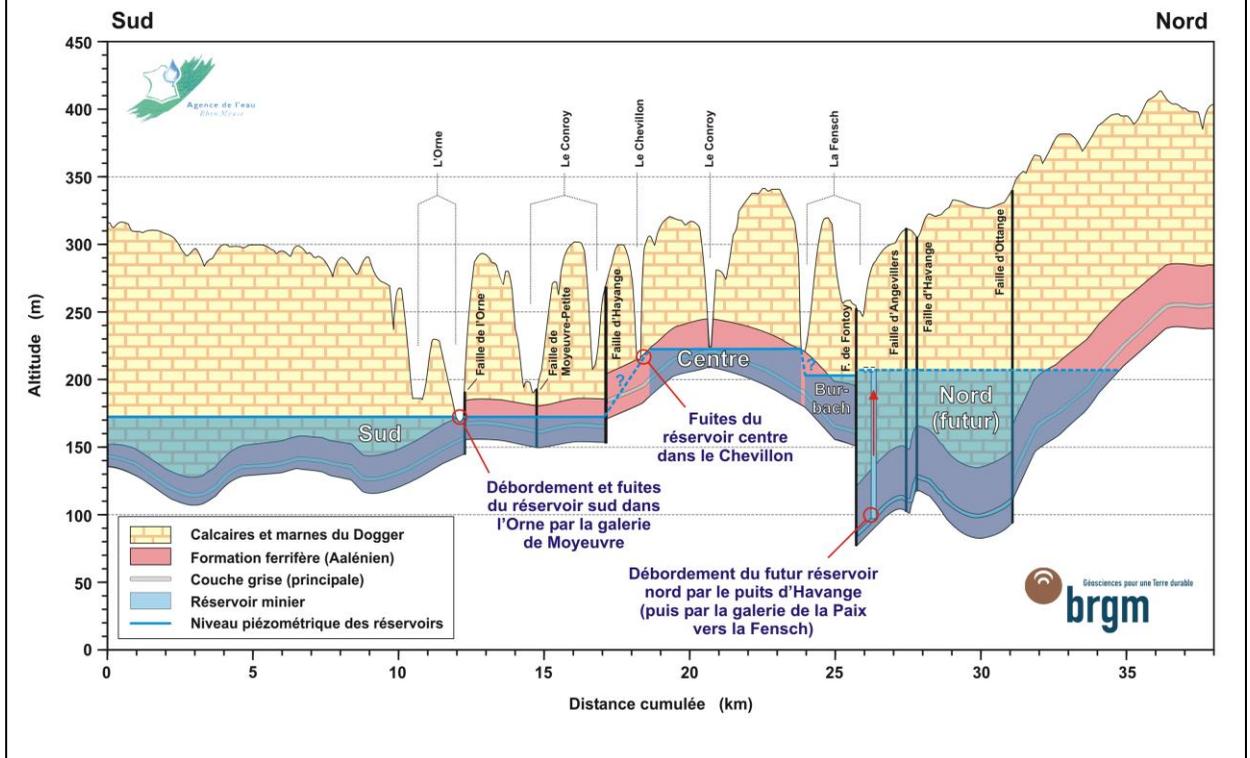
- le **bassin Sud**, avec les réservoirs Sud (137 km²) et Hayange Sud (7,1 km²), situé entre les failles d'Amanvillers au sud et d'Avril et de Hayange au nord,
- le **bassin Centre**, avec les réservoirs Centre (126 km²) et Burbach (7,6 km²), au nord-ouest des failles d'Avril et de Hayange, et au sud des failles de Fontoy et d'Ottange,

- le **bassin Nord**, avec les réservoirs Nord (97 km²) et Errouville (3,4 km²), limités au sud-est par la faille de Fontoy, et au nord-ouest par la faille de Mercy-Crusnes,
- le **bassin de Longwy**, avec les réservoirs Godbrange (19,8 km²), Bazailles (16,8 km²), Longwy-Rehon (5,5 km²), Serrouville (3,1 km²) et Moulaine (2,6 km²), situés au nord-ouest de la faille de Mercy-Crusnes.

Au total, **11 réservoirs miniers** sont donc identifiés dans le bassin ferrifère de Briey-Longwy, dont **3 grands réservoirs** de taille supérieure à 97 km² (Sud, Centre et Nord) et 8 petits réservoirs de taille inférieure à 20 km².

La surface totale de l'ensemble des travaux miniers du bassin ferrifère s'élève à près de **430 km²**, dont les ¾ sont ennoyés, ce qui représente un volume d'eau supérieur à **450 millions de m³**.

Coupe sud-nord passant par les points de débordement permanents des réservoirs miniers ennoyés



Relations entre les réservoirs miniers

La coupe hydrogéologique Sud-Nord ci-dessus passe par les principaux points de débordement permanents des réservoirs miniers ennoyés (cf. en rouge la trace de la coupe sur la carte de la page précédente). Elle permet de visualiser les réservoirs miniers Sud, Centre, Burbach et Nord (NB : coupe réalisée avant l'ennoyage du réservoir Nord, d'où la mention « futur » qui n'est plus d'actualité).

Les réservoirs miniers sont considérés comme **indépendants du point de vue hydraulique**, c'est-à-dire qu'ils n'échangent pas d'eau avec les réservoirs miniers voisins (ou suffisamment peu pour que ces échanges ne puissent pas être quantifiés). Cette indépendance hydraulique des réservoirs peut résulter de l'histoire de l'exploitation minière, qui a laissé par endroit des zones vierges de travaux entre deux réservoirs ; de la configuration géologique des terrains exploités (faille importante) ; ou encore de la mise en place de barrages souterrains dans les travaux miniers avant l'ennoyage permettant de diriger les eaux d'ennoyage vers les points de débordement choisis. La principale conséquence de cette indépendance hydraulique des réservoirs miniers est l'existence de **cotes d'ennoyage très**

différentes d'un réservoir à l'autre, même s'ils sont très proches géographiquement, puisque la cote d'ennoyage d'un réservoir est contrôlée par son point de débordement le plus bas. La coupe hydrogéologique simplifiée ci-dessus permet d'apprécier les différences significatives de niveau d'ennoyage des réservoirs : près de 53 m séparent les cotes d'ennoyage des réservoirs Sud et Centre, et plus de 15 m celles des réservoirs Nord et Centre.

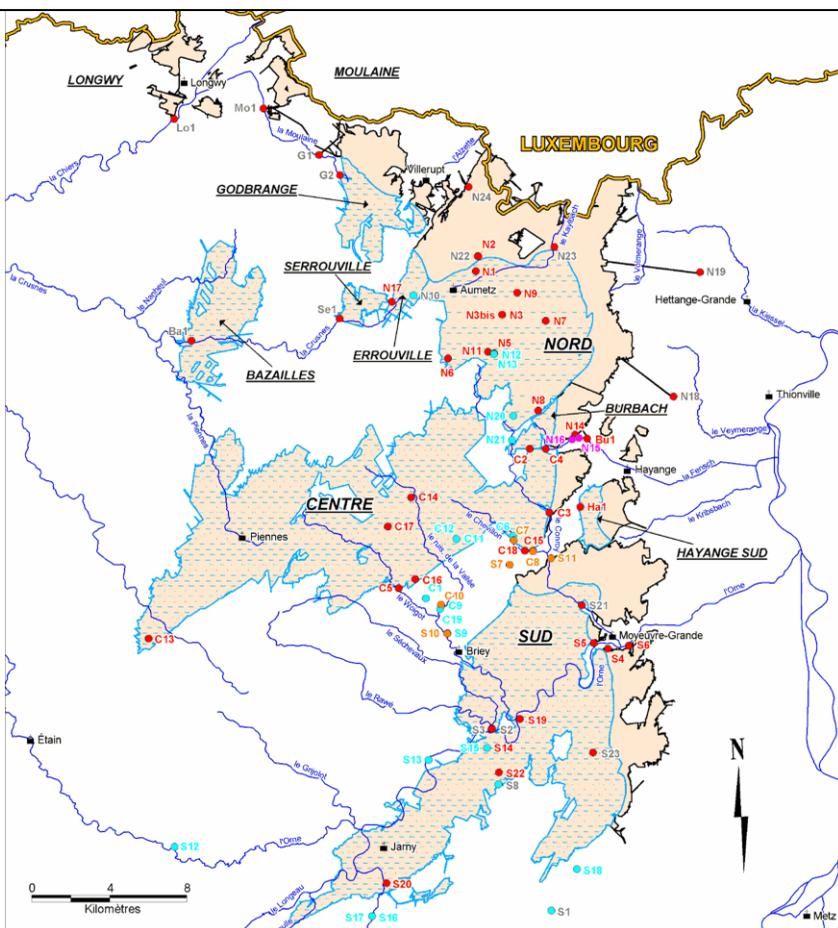
Ces différences d'altitude des niveaux d'ennoyage posent la question des transferts d'eau souterraine entre réservoirs (cf. les « ? » sur la coupe ci-dessus). A ce jour, **aucune donnée** concernant les niveaux piézométriques ou la qualité des eaux souterraines **n'indique l'existence de transferts d'eau** entre le réservoir Centre et ses voisins. Les seules relations hydrauliques entre réservoirs adjacents sont celles existant entre les réservoirs Errouville et Nord, à travers une zone foudroyée, ces deux réservoirs ne faisant plus qu'un depuis la fin de l'ennoyage du réservoir Nord.

Le réseau de surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère

> Depuis 1995, un réseau en constante évolution (41 points en 2017 + points appartenant à d'autres réseaux) pour surveiller :

- les réservoirs miniers,
- les nappes des calcaires du Dogger
- la formation ferrifère non exploitée
- certaines nappes alluviales

> Le réseau permet de surveiller les niveaux, les débits de débordement des réservoirs et la qualité de l'eau



La surveillance des eaux souterraines

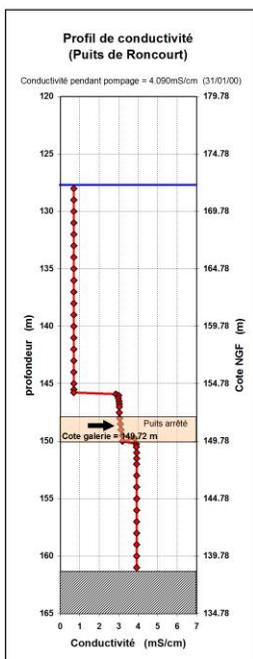
La surveillance de la quantité (niveaux, débits) et de la qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain a pour premier objectif de **mieux comprendre le fonctionnement** de ce système, et notamment les relations entre les réservoirs miniers et les aquifères adjacents, ainsi que les éventuelles communications entre réservoirs miniers. Il s'agit en second lieu de **constituer un ensemble de bases de données** (géographiques, géologiques, minières, hydrodynamiques, chimiques) destinées à alimenter des modèles numériques de prévision et de gestion.

Un **réseau de surveillance** a ainsi été progressivement constitué depuis 1993, il comprend **41 points en 2017**. Les résultats de la surveillance sont présentés par des rapports publics téléchargeables sur le site du BRGM (www.brgm.fr), ainsi que par le biais de chroniques périodiques. Par ailleurs, les données de surveillance sont bancarisées dans la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines : www.ades.eaufrance.fr) où elles

peuvent être consultées et téléchargées. Le **Système d'information pour la gestion des eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (SIGES)** fournit un accès simplifié à ces données ainsi qu'à un grand nombre de d'autres données relatives aux eaux souterraines du bassin Rhin-Meuse (sigesrm.brgm.fr).

Les **niveaux piézométriques et les débits de débordement** des réservoirs sont mesurés en continu par des centrales d'acquisition. Les **échantillonnages et les analyses** sont effectués à des fréquences mensuelles à annuelles, et concernent les éléments majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium, sulfate, chlorure, bicarbonate), les composés azotés (ammonium, nitrite, nitrate), certains éléments caractéristiques de l'eau d'ennoyage des réservoirs miniers (strontium, fer, manganèse, bore), et les certains polluants potentiellement présents dans l'eau des réservoirs miniers (nickel, hydrocarbures totaux, indice phénol).

Conception d'un échantillonneur adapté aux contraintes des puits miniers, notamment en cours d'envoyage (BRGM)



Echantillonnage dans les puits miniers

Des profils de température et de conductivité électrique de l'eau réalisés dans tous les puits de grand diamètre (5 à 7 m) du bassin ferrifère permettent de constater l'existence dans les puits d'une tranche d'eau supérieure peu minéralisée de composition proche de celle de l'eau des calcaires du Dogger, séparée par un palier très abrupt d'une tranche d'eau inférieure minéralisée représentative de l'eau d'envoyage des mines.

Il a été démontré qu'un échantillon représentatif de l'eau circulant dans le réseau de galeries du réservoir minier ne peut être obtenu que par prélèvement dans la tranche inférieure d'eau minéralisée, et de préférence à la profondeur du débouché de la galerie dans le puits.

L'échantillonnage correct de l'eau des puits et des piézomètres d'un réservoir minier exige donc de mettre en œuvre des techniques adaptées aux profondeurs importantes en jeu (jusqu'à 260 m) et à l'absence de moyens de pompage dans la plupart des cas.

Pour répondre à l'ensemble de ces contraintes, le BRGM a conçu un système d'échantillonnage fixe « pneumatique » sans purge préalable qui a été installé dans un grand nombre de puits à partir de 2005.

Ce système d'échantillonnage fonctionne par l'application de cycles successifs de compression et de décompression d'azote gazeux dans un tube double au bout duquel se trouve un système de deux clapets anti-retour. Le jeu de ces clapets permet alternativement le prélèvement d'eau souterraine (phase de décompression) puis sa circulation vers le haut (phase de compression).

La rusticité et le coût relativement modeste de ce système a permis de le mettre en place à demeure dans tous les ouvrages qui le nécessitaient, à la profondeur requise pour prélever de l'eau représentative de chaque réservoir minier, c'est-à-dire en face des ouvertures de galeries (puits miniers) ou des crépines (piézomètres).



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°2 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité : il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage.

Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°2 présente le modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés qui a été défini sur la base des résultats de la surveillance des eaux souterraines (hors-série n°1) et qui a permis la construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (hors-série n°3).

Chronique semestrielle hors-série n°2 :

Définition d'un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés

BRGM Grand Est

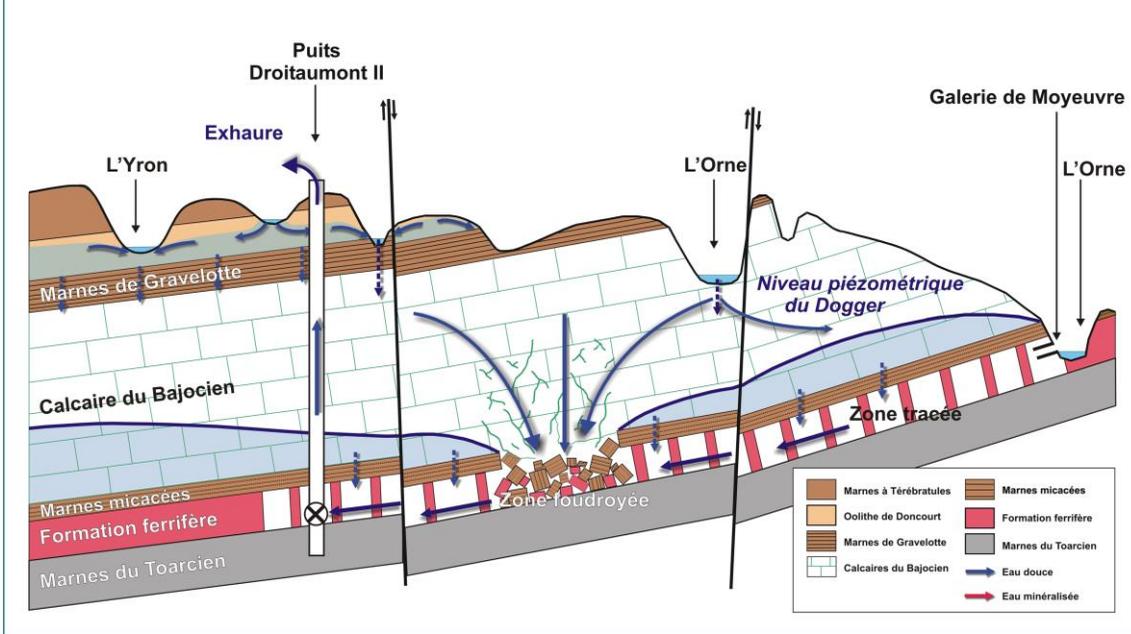


Pourquoi un modèle conceptuel ?

L'interprétation et la synthèse des résultats de mesure acquis depuis 1995 dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère, complétée par les résultats des expériences de laboratoire menés par le BRGM dans le cadre du GISOS, ont permis de décrire la structure et le fonctionnement hydrogéologique des réservoirs miniers, leurs relations hydrauliques avec la nappe des calcaires du Dogger sus-jacente, ainsi que les mécanismes géochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation de de l'eau lors de leur ennoyage.

Les schémas de synthèse commentés présentés dans les pages suivantes condensent l'information disponible sous une forme graphique. Accompagnés des données de surveillance interprétées qui ont servi à les élaborer, ces schémas constituent ce que l'on appelle un modèle conceptuel. Un modèle conceptuel peut servir de base à l'interprétation de nouvelles données de surveillance, mais aussi et surtout à l'élaboration d'un modèle numérique permettant des prévisions.

Fonctionnement hydrogéologique pendant l'exploitation (exemple du bassin Sud)



Fonctionnement hydrogéologique pendant l'exploitation minière (exemple du réservoir Sud)

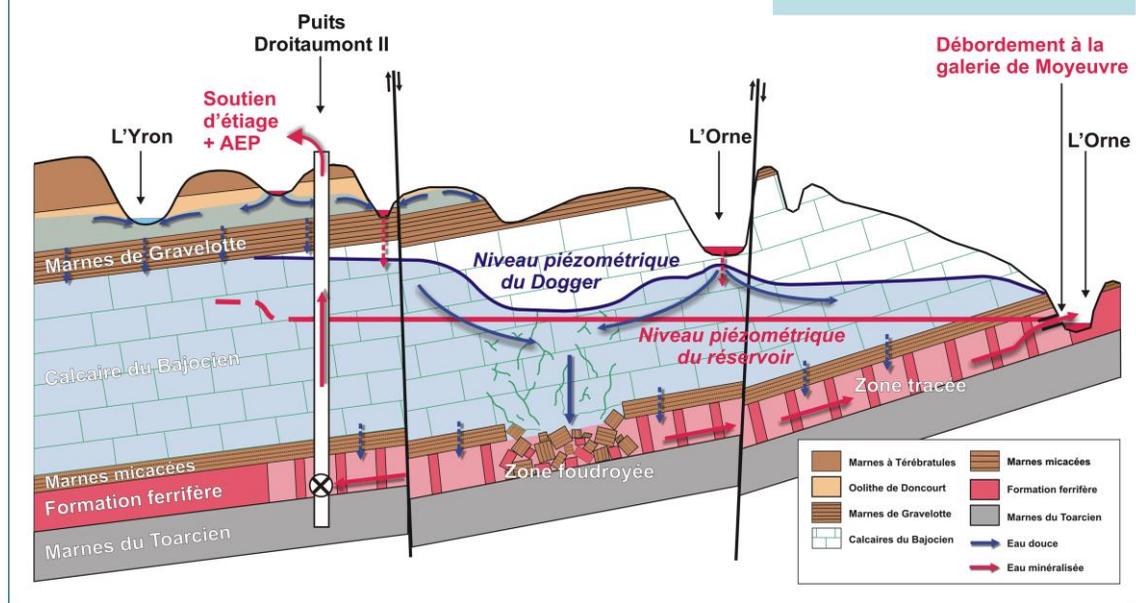
Pendant la période d'exploitation minière, au fur et à mesure que s'étendaient les travaux miniers, les foudroyages réalisés – ils concernent en moyenne 40 à 50 % de la surface des travaux miniers – provoquent la rupture de l'écran imperméable des marnes micacées qui supportait la nappe des calcaires du Dogger. L'eau de la nappe s'est alors infiltrée en grande quantité dans les galeries minières (à certaines périodes, jusqu'à près de 300 millions de m³ par an sur l'ensemble du bassin ferrifère), obligeant les exploitants miniers à mettre en place des systèmes de collecte (rigoles et galeries de drainage), de stockage (bassins de stockage temporaires, appelés albraques) et de pompage des eaux d'infiltration : c'était l'exhaure minière.

Au-dessus des travaux miniers, la nappe des calcaires du Dogger était généralement réduite à l'état de lambeaux, lorsqu'elle n'avait pas complètement disparu, au droit des zones foudroyées notamment. L'abaissement généralisé du niveau de la nappe au droit des travaux s'est propagé à plusieurs km à l'extérieur des limites des exploitations, constituant un cône de rabattement de la nappe de grande ampleur.

Fonctionnement hydrogéologique après l'ennoyage (exemple du bassin Sud)

Arrêt des exhaures minières :

- * Mai 1985 : Godbrange
- * Février 1994 : bassin Centre
- * Mars 1995 : bassin Sud
- * Décembre 2005 : bassin Nord



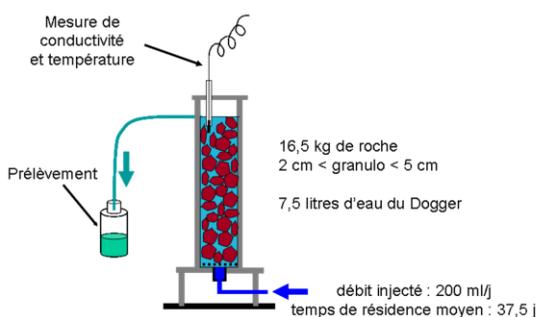
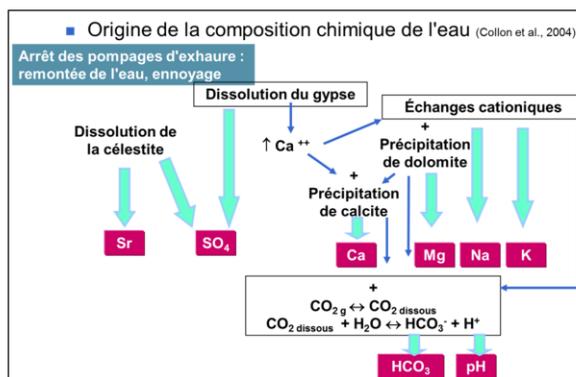
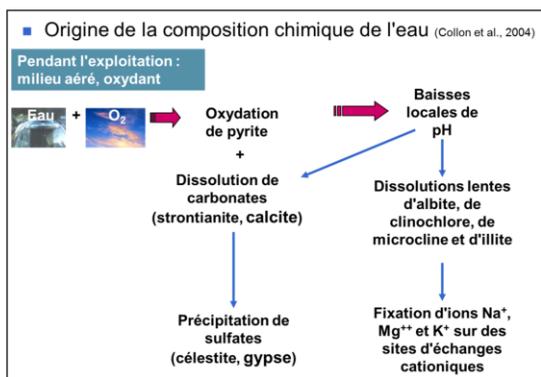
Fonctionnement hydrogéologique après l'ennoyage (exemple du réservoir Sud)

Après l'arrêt des exhaures, l'eau d'ennoyage a rempli les vides artificiels laissés par l'activité minière : les plus grands vides sont ainsi constitués par le réseau de galeries interconnectées ; les plus petits sont les pores de dimension variée se trouvant dans les amas rocheux des zones foudroyées. La remontée du niveau d'ennoyage des différents réservoirs a été limitée par la présence d'un ou plusieurs points de débordement, qui jouent le rôle de déversoirs des eaux d'ennoyage vers les cours d'eau. **Généralement, le niveau d'un réservoir ne peut pas dépasser de beaucoup la cote du seuil de son point de débordement le plus bas**, même en période de hautes eaux. En effet, la plupart des points de débordement sont aménagés pour laisser passer des débits de crue très importants, ce qui limite la possibilité d'élévation du niveau du réservoir. **La «nappe» d'un réservoir minier présente une autre particularité hydrogéologique : son niveau piézométrique est pratiquement identique en tout point du réservoir.** Le très faible gradient piézométrique du réservoir (c'est-à-dire la très faible «pente» du niveau de l'eau dans le réservoir) résulte de la très faible résistance à l'écoulement de l'eau dans le réseau de galerie :

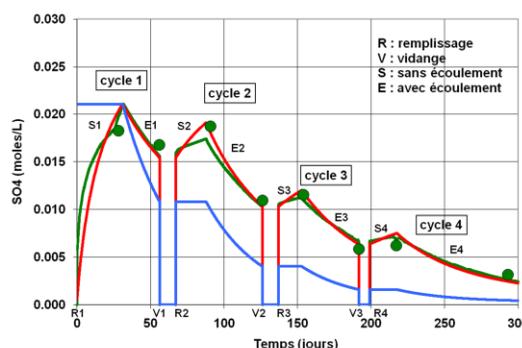
autrement dit, l'eau en mouvement dans les galeries n'est pas suffisamment «freinée» par les frottements sur les parois pour acquérir une «pente» importante (les pertes de charge à l'écoulement sont très faibles).

Lors de l'ennoyage, la remontée du niveau dans les réservoirs s'est accompagnée de la reconstitution de la nappe des calcaires du Dogger. Toutefois, cette reconstitution n'a été que partielle, puisque la remontée du niveau d'un réservoir est limitée par l'existence des points de débordement. D'autre part, la nappe des calcaires du Dogger continue à être en très forte relation avec les réservoirs miniers, par l'intermédiaire des zones foudroyées. **Le réservoir minier ennoyé conserve donc son rôle de drainage général de la nappe du Dogger.** Au-dessus des travaux miniers, la surface piézométrique de la nappe principale des calcaires du Dogger est déprimée, et présente un relief «bosselé» : les «creux» piézométriques correspondent aux zones où le drainage vers le réservoir minier sous-jacent est important (zones foudroyées ou fracturées), les «bosses» correspondent aux zones de drainage moindre (zones non foudroyées ou de perméabilité verticale plus faible).

Processus géochimiques de minéralisation de l'eau des réservoirs lors de leur ennoyage (travaux GISOS)



Source : Thèse P. Collon, ENSG, 2003



Les processus géochimiques de minéralisation de l'eau lors de l'ennoyage des réservoirs miniers

Lors de l'ennoyage des réservoirs miniers, **l'eau qui a rempli les galeries des anciennes mines de fer s'est minéralisée** en se chargeant très rapidement en sulfate, magnésium, sodium, calcium, potassium et bore, et, dans une moindre mesure, en strontium, manganèse, et chlorure. Son pH est resté compris entre 7 et 8. Si cette augmentation des concentrations a généralement rendu l'eau impropre à la consommation humaine au regard des concentrations maximales admissibles, ces éléments présents en excès ne sont, néanmoins, pas toxiques pour l'homme. De plus, dans le bassin ferrifère, le drainage minier est neutre. Ceci est un avantage puisque lorsque le drainage minier est acide (c'est le cas général de beaucoup de mines dans le monde), le phénomène se traduit par un pH bas qui favorise la mise en solution de métaux lourds toxiques pour l'homme et l'environnement.

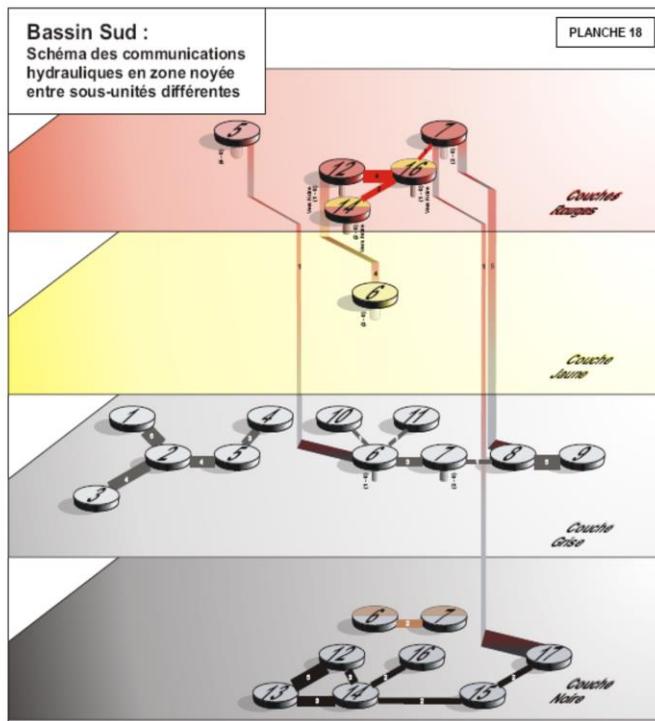
Les éléments chimiques en excès dans l'eau des réservoirs miniers du bassin ferrifère proviennent des réactions de mise en solution des sels minéraux (gypse notamment) issus de l'oxydation de la pyrite contenue dans les inter-bancs

marneux de la formation ferrifère (cf. les observations et expériences de laboratoire décrites en 2003 dans la thèse de doctorat de P. Collon et dans les publications associées, et illustrées ci-dessus). Ces sels se sont formés lors de l'exploitation minière, lorsque la pyrite a été mise en contact avec l'oxygène de l'air apporté par l'aération des mines. Ils sont dissous totalement quelques dizaines de jours après le début de l'ennoyage, et ce stock d'éléments pouvant être dissous ne se renouvelle pas en milieu insuffisamment oxygéné, tel qu'un réservoir ennoyé.

Ainsi, **cette situation est transitoire, jusqu'à ce que le stock d'eau minéralisée initial qui s'est formé lors de l'ennoyage soit évacué** par le jeu normal des circulations souterraines. Le temps nécessaire au renouvellement de l'eau du réservoir peut aller de quelques années à quelques dizaines d'années, si le temps de résidence de l'eau dans le réservoir est long.

Structure d'un réservoir ennoyé (exemple du réservoir Sud)

- > **L'analyse des plans miniers a permis de définir une structure simplifiée de chaque réservoir (sous-unités hydrogéologiques reliées par des galeries).**
- > **Ces sous-unités ont été regroupées en secteurs moins nombreux possédant au moins un point de surveillance.**
- > **Les secteurs peuvent ainsi être caractérisés par une tendance d'évolution de la concentration en sulfates.**



Structure des réservoirs et sectorisation

A partir de l'analyse cartographique des plans miniers, un modèle conceptuel détaillé de la structure de chaque réservoir minier ennoyé a été élaboré. L'analyse cartographique s'est déroulée en deux temps : dans un premier temps, l'analyse des plans d'exploitation de chaque couche a permis de délimiter des « sous-unités hydrogéologiques » dans la zone ennoyée des réservoirs, et de dénombrer les galeries de jonction entre sous-unités ; dans un deuxième temps, les communications verticales entre couches au sein d'une même sous-unité et entre les sous-unités ont été dénombrées aussi, afin de tenir compte de la configuration multicouche des exploitations minières. Les documents cartographiques produits permettent de visualiser l'ensemble des informations recueillies et analysées sous forme de cartes de synthèse (rapport BRGM RP53277-FR). A l'aide de ces informations, des schémas de synthèse ont été élaborés (cf. image ci-dessus) permettant la visualisation directe des communications

hydrauliques en trois dimensions. Ces schémas sont des outils précieux dans la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de chaque réservoir, ainsi que dans l'analyse comparée de leurs fonctionnements.

Sur la base de ce travail de détail sur la structure des réservoirs, et afin de préparer le travail de modélisation ultérieur (cf. chronique hors-série n°3), un travail de simplification de la structure a été mené sur chacun des réservoirs Sud, Centre et Nord, de manière à identifier des secteurs plus grands possédant chacun au moins un point de surveillance. C'est ainsi que 4 à 6 secteurs représentatifs des évolutions observées des concentrations en sulfates ont été identifiés au sein de chaque grand réservoir. Chaque secteur est relié à un certain nombre de secteurs voisins par un nombre restreint de galeries de jonction, l'ensemble constituant un « réseau » de secteurs.



Chroniques semestrielles hors-série 2014-2015

Mines ennoyées du bassin ferrifère lorrain : du réseau de surveillance... ...au modèle numérique de prévision

Hors-série n°1 : Contexte de la création d'un réseau de surveillance

Hors-série n°2 : Définition d'un modèle conceptuel

Hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision

BRGM Grand Est – Mise à jour 2017



Chronique hors-série n°3 : introduction

L'arrêt progressif de l'exploitation minière dans le bassin ferrifère à partir des années 1990 a conduit à des modifications du régime des eaux souterraines et superficielles, ainsi qu'à l'altération de leur qualité : il en a résulté des impacts lourds vis-à-vis des usages (alimentation en eau), des risques naturels (variation du débit des cours d'eau) et des conditions d'alimentation des cours d'eau en période d'étiage.

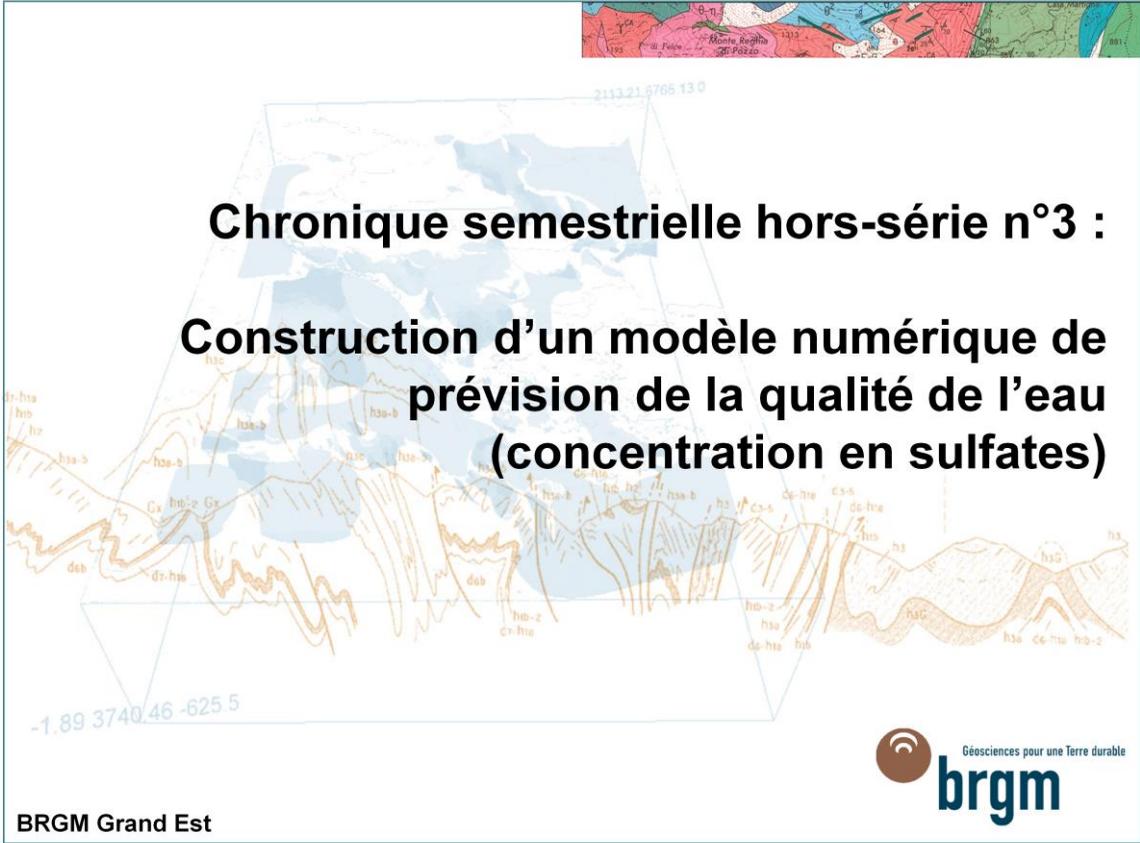
Ce constat a conduit les pouvoirs publics à initier en 2004 l'élaboration d'un SAGE du bassin ferrifère (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. En 2005, le BRGM a été chargé par le Conseil Régional Lorrain, structure porteuse du SAGE du Bassin Ferrifère, de réaliser les deux premiers documents constitutifs de l'élaboration du SAGE : l'état des lieux et le diagnostic du SAGE du bassin ferrifère. Au terme de plus de 10 ans de travaux menés par la Commission Locale de l'Eau (CLE) du SAGE, ce dernier a été adopté en 2016 : il constitue désormais un fil conducteur pour toutes les actions menées sur le bassin pour la préservation de l'eau et des milieux aquatiques.

En parallèle, à partir de 1995, d'abord en complément puis en substitution de la surveillance prescrite aux anciens exploitants pendant une durée limitée, le BRGM, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Lorrain et la

DREAL Lorraine, ont engagé des actions de connaissance et de protection de la ressource. Le BRGM assure depuis cette date la surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, dans le cadre de ses activités de service public. En 2017, le réseau de surveillance est devenu un observatoire sous maîtrise d'ouvrage du BRGM, cofinancé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Grand Est et le BRGM.

Par ailleurs, le BRGM a contribué aux travaux de recherche du GISOS, Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, qui a eu pour objectifs entre 1999 et 2015 d'anticiper et de contribuer à résoudre les problèmes posés dans le cadre de l'après-mine en France. Les travaux menés par le BRGM dans le cadre du GISOS ont contribué au développement d'un modèle numérique de prévision.

Cette chronique hors-série n°3 présente le modèle numérique de prévision de l'évolution de la qualité de l'eau qui a été construit sur la base des résultats de la surveillance des eaux souterraines (hors-série n°1) et du modèle conceptuel de structure et de fonctionnement des réservoirs miniers ennoyés (hors-série n°2).



Chronique semestrielle hors-série n°3 : Construction d'un modèle numérique de prévision de la qualité de l'eau (concentration en sulfates)

BRGM Grand Est



Pourquoi un modèle numérique de prévision ?

La seule surveillance des eaux souterraines (cf. chronique hors-série n°1) et des eaux de surface n'est pas un objectif en soi : les mesures ne sont utiles que pour permettre dans un premier temps la compréhension et la description des phénomènes sous la forme d'un modèle conceptuel (cf. chronique hors-série n°2), puis dans un deuxième temps pour alimenter des modèles numériques de comportement des réservoirs. Ces outils numériques sont des outils extrêmement utiles pour aider à la gestion de la ressource en eau.

Les ressources en eau souterraines du bassin ferrifère lorrain, évaluées à environ 450 millions de m³, constituent un enjeu important pour le nouveau développement de cette région. Or, tant que le retour à une qualité de l'eau suffisamment bonne n'est pas réalisé, elles restent difficilement exploitables. La question principale est donc la suivante : à quelle date peut-on estimer que la concentration en sulfates s'approchera de la limite de potabilité de 250 mg/L ? Lorsque ce sera le cas, la minéralisation de l'eau, très corrélée à la concentration en sulfates, sera compatible avec l'exploitation habituelle des eaux souterraines.

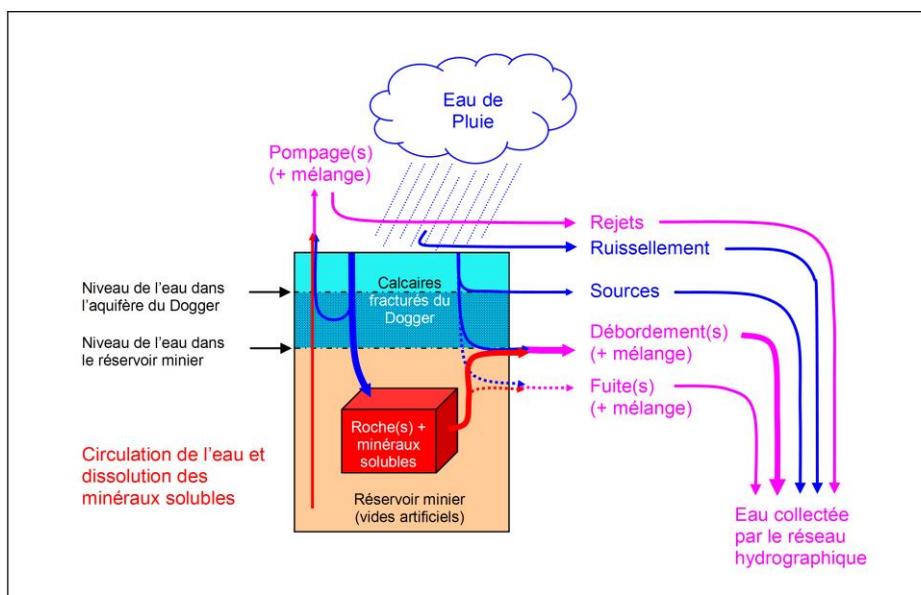
Suite aux travaux de modélisation réalisés par le BRGM entre 2000 et 2008 dans le cadre des travaux de recherche et développement du GISOS, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional de Lorraine et le BRGM ont décidé de la construction et de la mise en œuvre d'un simulateur hydrogéologique et chimique des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain (rapport BRGM RP-62998-FR).

La finalité de l'étude était de disposer d'un outil opérationnel de gestion des ressources en eau souterraines du bassin ferrifère. Cet outil intégré devait permettre de prévoir notamment :

- les débits des points de débordement et de fuites des réservoirs ;
- les niveaux piézométriques des réservoirs ;
- l'évolution de la concentration en sulfate aux principaux points de prélèvement et de débordement des réservoirs.

Cette chronique hors-série n°3 présente la méthodologie de modélisation retenue, puis les résultats de la modélisation des 3 grands réservoirs Sud, Centre et Nord.

Approche de modélisation globale retenue pour chaque secteur de réservoir ennoyé : le « réacteur parfait »



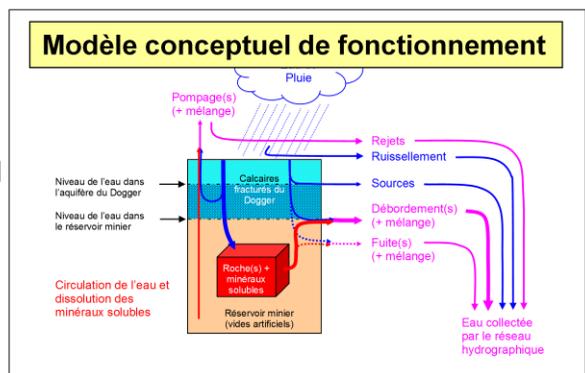
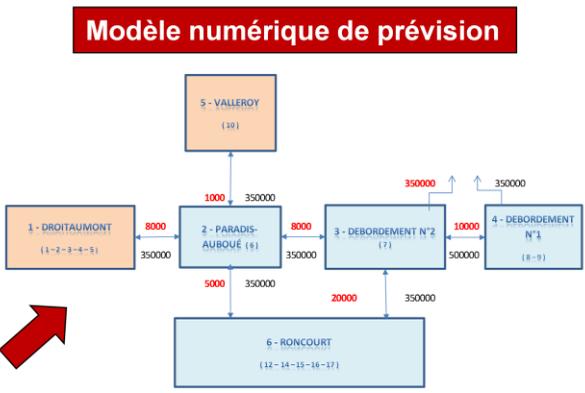
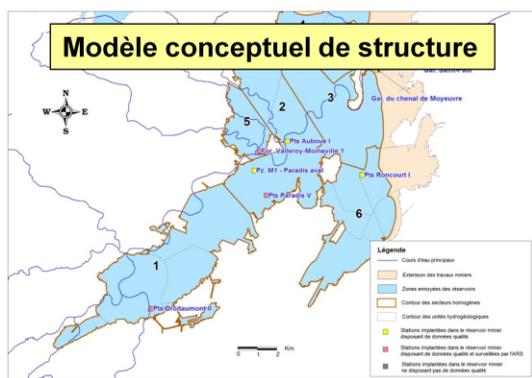
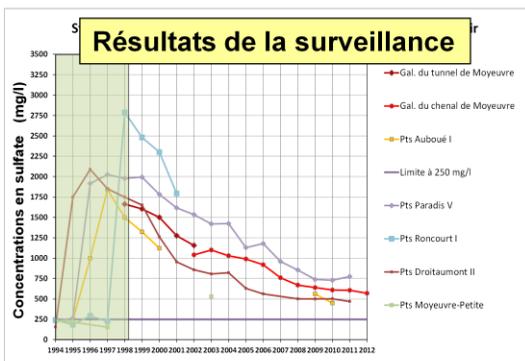
Approche de modélisation : le « réacteur parfait »

On rappelle que le bassin ferrifère lorrain a été exploité par la méthode de chambre et piliers, suivie fréquemment par le foudroyage des piliers résiduels sur environ 50% de la surface des travaux miniers. Le bassin ferrifère Lorrain est aujourd'hui constitué de 3 grands réservoirs hydrauliquement indépendants, les réservoirs Sud, Centre et Nord. Chacun des 3 grands réservoirs miniers est ainsi un « patchwork » de zones foudroyées et de zones de galeries. Lors de l'ennoyage d'un réservoir, l'eau de recharge alimente d'abord l'aquifère calcaire du Dogger sus-jacent, puis s'infiltré dans les vides miniers essentiellement par l'intermédiaire des zones foudroyées, et remplit enfin progressivement les vides laissés par l'homme dans les réservoirs miniers. On sait aussi grâce aux travaux de recherche et développement du GISOS que les zones foudroyées sont le siège des réactions géochimiques de dissolution du gypse qui libèrent notamment des sulfates dans l'eau du réservoir. Les zones de galeries assurent ensuite la dilution des eaux devenues minéralisées.

La complexité de la structure du système hydrologique à modéliser, ainsi que l'absence de

données spatialisées impose la mise en œuvre d'une approche de modélisation « globale », basée sur l'analyse des séries de données disponibles au démarrage de l'étude. Dans cette approche (cf. schéma ci-dessus), un secteur d'un réservoir minier ennoyé est considéré comme un « réacteur » au fond étanche, dans lequel l'eau de recharge pénètre par la limite supérieure perméable du réservoir, après avoir traversé l'aquifère des calcaires fissurés du Dogger. Lorsque l'eau de recharge pénètre dans le réacteur, elle entre en contact avec des roches contenant une masse de sulfate cristallisé sous forme de gypse soluble, qu'elle peut dissoudre. Le réacteur se comporte comme un « mélangeur parfait » du point de vue des concentrations : tout changement de concentration se répercute instantanément dans le tout le volume du secteur de réservoir. L'eau qui est entrée dans le secteur peut y être stockée ou ressortir par débordement(s), fuite(s), pompage(s) ou échange avec les secteurs voisins, en transportant avec elle hors du secteur le sulfate qu'elle a dissous. Par cette approche, un réservoir minier entier peut être modélisé sous la forme d'un « réseau de réacteurs ».

Construction des modèles numériques (« simulateurs »)



Construction des modèles numériques (« simulateurs »)

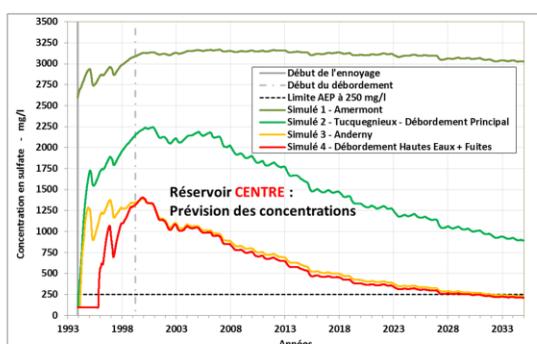
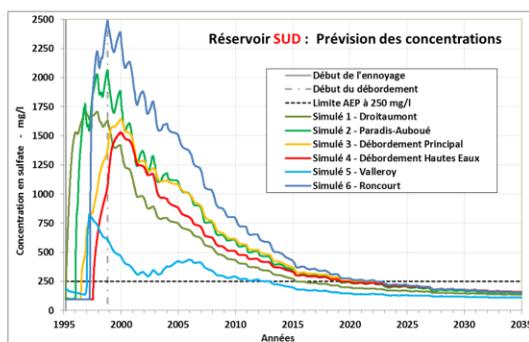
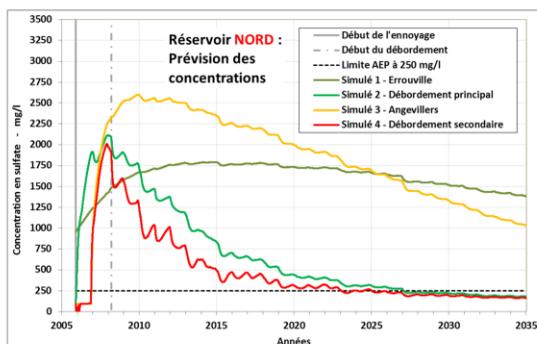
Trois modèles numériques de fonctionnement hydrologique et chimique (désignés par le terme « simulateurs » dans la suite) des trois grands réservoirs miniers envasés du bassin ferrifère lorrain (Sud, Centre, et Nord) ont été construits à partir des données disponibles entre 1993 et 2011 (rapport BRGM RP-62998-FR). Ces simulateurs sont basés sur l'approche globale de réacteurs en réseaux décrite précédemment, chaque réacteur représentant un secteur d'un réservoir minier envasé.

Le modèle numérique de prévision d'un réservoir est ainsi construit à l'aide des résultats de la surveillance, du modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéochimique du réservoir, ainsi que de son modèle conceptuel de structure, ce que traduit en images l'illustration ci-dessus.

Les résultats du calage des 3 « simulateurs » de réservoirs sont présentés sur la page suivante. Le calage d'un modèle numérique consiste à reproduire avec le maximum de fidélité les observations disponibles. Lorsque cet objectif est atteint (avec une marge d'incertitude résiduelle inévitable), le modèle est considéré comme « calé » et apte à fournir des prévisions : il suffit d'alimenter le modèle avec des données estimées selon différents scénarios futurs (évolution future de l'infiltration d'eau de pluie et des débits de pompage par exemple) pour obtenir des prévisions.

Les graphiques présentés sur la carte page suivante permettent de visualiser sur la période 1993-2015 les concentrations mesurées (en rouge) dans les ouvrages représentatifs des différents secteurs, et de les comparer aux concentrations calculées (en noir) par les simulateurs sur la même période. On peut constater sur les graphiques que les nouvelles données acquises entre 2012 et 2015 valident les tendances prévues par les simulateurs sur l'ensemble des points de mesure.

Prévisions d'évolution de la concentration



Réservoir	Sud	Centre	Nord
Scénario Moyen (calage 1993-2011)	2015-2022	2030-2032	2025-2027



Résultats des prévisions

Les simulateurs ont été utilisés à titre prédictif afin d'estimer la date à partir de laquelle la concentration en sulfates dans chaque secteur des réservoirs pourrait être inférieure à la limite de potabilité de 250 mg/l.

En 2013, on prévoyait ainsi que selon un scénario moyen d'infiltration d'eau de pluie, cette limite serait atteinte entre 2015 et 2022 selon les secteurs pour le réservoir Sud ; entre 2030 et 2032 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Centre ; et entre 2025 et 2027 pour les 2 secteurs les mieux renouvelés en eau du réservoir Nord.

La marge d'erreur évaluée en 2013 était de +/- 4 ans sur la date. Ces dates pourront être réévaluées pour prendre en compte l'infiltration d'eau de pluie réelle depuis 2012.

Les simulateurs peuvent aussi être utilisés pour connaître l'impact de nouveaux pompages sur les débits, les niveaux et l'évolution des concentrations en sulfate.

Enfin, ces simulateurs sont modulables, il est possible de modifier la configuration du réseau de réacteurs afin de prendre en compte de nouvelles connaissances concernant les écoulements ou les concentrations à l'intérieur de chaque réservoir.

Conclusion générale des chroniques hors-série n°1, 2 et 3

- > **Arrêt de l'activité minière** et des exhaures dans le Bassin Ferrifère Lorrain
- > **Mauvaise qualité des ressources en eau** qui ne sont plus exploitables : **comment les gérer et les valoriser ?**
 - **Surveiller l'évolution** de la quantité et de la qualité des eaux souterraines = **réseau de surveillance**
 - **Décrire le territoire** du bassin ferrifère : caractéristiques, fonctionnement hydrogéologique = **modèle conceptuel**
 - **Evaluer les tendances d'évolution** dans le futur, donc disposer d'un outil de prévision = **modèle numérique**



Conclusion

Depuis 1995, le BRGM a mené de nombreuses études et travaux sur le bassin ferrifère lorrain, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, le Conseil Régional Grand Est et la DREAL Grand Est.

Les objectifs de ces travaux étaient de :

- mettre en place un réseau de surveillance des eaux souterraines en définissant des méthodes d'échantillonnage adaptées ;
- définir un modèle conceptuel de structure et de fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique, en s'appuyant notamment sur l'interprétation des données de surveillance ;
- sur la base du modèle conceptuel et des données de surveillance, construire un modèle numérique de prévision des niveaux piézométriques, des débits de débordement et de la qualité de l'eau (par le biais d'un indicateur représentatif : la concentration en sulfates).

L'effort de connaissance de ce milieu très complexe aura ainsi permis de disposer d'un outil de protection et de gestion de cette ressource aujourd'hui peu exploitée en raison de sa qualité insuffisante, mais qui sera précieuse à l'avenir.

La surveillance des eaux souterraines va se poursuivre pour que les parties prenantes puissent continuer de répondre aux enjeux du SAGE du Bassin Ferrifère et de la Directive Cadre européenne sur l'Eau.

Annexe 2 : Température et caractéristiques des points d'accès à la ressource géothermique du bassin ferrifère lorrain

Cette annexe 2 contient 4 tableaux relatifs aux points d'accès existants à la ressource géothermique du bassin ferrifère lorrain :

- températures mesurées lors des deux campagnes de mesure complémentaires de 2014 et 2015 pour les points d'accès à l'eau des réservoirs miniers et des aquifères voisins,
- températures mesurées et écarts à la température théorique liée à la profondeur (gradient géothermique) pour les points d'accès à l'eau des réservoirs miniers,
- statistiques sur les températures mesurées, sur l'écart à la température théorique et sur le % de baisse de la concentration en sulfates depuis 2009, par type de point d'accès à l'eau des réservoirs miniers.
- principales caractéristiques de la ressource géothermique au niveau des points d'accès à l'eau des réservoirs miniers.

Points d'accès à l'eau des réservoirs miniers et des aquifères voisins : températures mesurées

Code BSS	Bassin	Numéro Point Surveillance	Secteur Réservoir Minier	Nom Point	Aquifère	Campagnes Mesure Température 2014-2015				Statistiques Réseau Surveillance				Raison de la mise à l'écart des statistiques de la surveillance
						Type mesure	T° moy	T° min	T° max	Dernière Mesure	T° médiane	T° 1er Quartile	T° 3ème Quartile	
01138X0185/PZ-15	NORD	N15		Piézomètre Fensch aval 1	Alluvions					12/12/2013	10,90	10,03	13,08	
01137X0174/PZ-16	NORD	N16		Piézomètre Fensch amont 2	Alluvions					12/12/2013	11,85	11,10	13,35	
01374X0229/PZ1	SUD			Piézomètre Pz1 - Moyeuve	Alluvions					26/03/2003	12,65	12,50	12,95	Date + Ouvrage rebouché
01372X0206/F	CENTRE	C01		Forage Ferme de Mance	Calcaires du Dogger					13/09/2013	13,00	11,50	14,30	
01373X0131/A15	CENTRE	C06		Piézomètre A15 - Avril amont	Calcaires du Dogger					13/09/2013	9,20	9,00	9,40	
01372X0204/M52	CENTRE	C09		Piézomètre M52 - Mance	Calcaires du Dogger					17/09/2004	11,05	11,00	11,28	Date
01373X0132/P01	CENTRE	C11	SC2	Piézomètre P1 - St Pierremont	Calcaires du Dogger	Profil vertical	12,28	10,97	12,75	20/09/2013	12,90	12,45	13,00	
01373X0133/P02	CENTRE	C12		Piézomètre P2 - St Pierremont	Calcaires du Dogger					20/09/2013	12,05	11,70	13,00	
01372X0207/SCE	CENTRE	C19		Source Mance	Calcaires du Dogger					28/09/2007	10,40	9,60	11,30	Date
01137X0173/PZ-12	NORD	N12	SN2	Piézomètre Cheminée Sud Dogger inf.	Calcaires du Dogger	Profil vertical	12,08	10,45	12,60	12/12/2013	10,90	8,50	12,30	
01137X0172/PZ-13	NORD	N13		Piézomètre Cheminée Sud Dogger sup.	Calcaires du Dogger					12/12/2013	10,40	7,95	12,60	
01137X0160/F	NORD	N20		Piézomètre Fontoy nord	Calcaires du Dogger					20/09/2013	12,00	12,00	12,00	
01137X0159/F	NORD	N21		Piézomètre Fontoy sud	Calcaires du Dogger					20/09/2013	10,00	10,00	10,20	
01377X0209/PZB1	SUD	S08		Piézomètre B1 - Paradis amont	Calcaires du Dogger					21/09/1999	12,60	12,55	12,75	Date
01372X0210/BRIEYA	SUD	S09		Piézomètre Briey A	Calcaires du Dogger					20/09/2013	10,40	10,10	10,65	
01368X0008/KG	SUD	S12		Piézomètre St-Jean-les-Busy	Calcaires du Dogger					13/09/2013	15,00	14,55	15,35	
01376X0149/H01	SUD	S13		Piézomètre H1 - Hatrizé	Calcaires du Dogger					13/09/2013	10,70	10,60	11,00	
01377X0211/M01	SUD	S14	SS2	Piézomètre M1 - Paradis aval	Calcaires du Dogger	Profil vertical	11,85	11,26	12,28	27/09/2013	12,95	12,60	13,23	
01377X0212/M02	SUD	S15	SS2	Piézomètre M2 - Paradis aval	Calcaires du Dogger	Profil vertical	11,83	11,34	12,24	27/09/2013	13,30	13,10	13,90	
01632X0070/V105	SUD	S16		Piézomètre V105 - Ville/Yron	Calcaires du Dogger					24/09/2002	13,30	12,83	13,63	Date
01632X0071/V19	SUD	S17		Piézomètre V19 - Ville/Yron	Calcaires du Dogger					13/09/2013	11,80	11,70	12,00	
01373X0056/F	SUD	S99	SS3	Haropré	Calcaires du Dogger	Ponctuelle	11,86	11,84	11,87					
01373X0175/PREL	CENTRE	C20		Conroy - confluence Chevillon	Cours d'eau					04/02/2008	10,95	8,70	12,90	Date + Mélange
01373X0176/PREL	CENTRE	C21		Conroy - station hydrométrique	Cours d'eau					04/07/2016	10,90	8,43	12,80	Date + Mélange
01373X0027/SCE	CENTRE	C18		Source Chapelle (fuites Centre)	Dogger + Réservoir minier					26/09/2008	12,45	10,70	13,48	Date + Mélange
01373X0158/PZ	CENTRE	C08	SC4	Piézomètre Chevillon artésien	Formation ferrifère non exploitée	Ponctuelle	11,07	11,07	11,07	13/09/2013	12,00	11,90	12,00	
01372X0211/PZBIS	CENTRE	C10		Piézomètre Mance bis	Formation ferrifère non exploitée					20/09/2013	13,90	13,35	14,00	
01373X0157/PZFF	SUD	S07		Piézomètre Avril FF	Formation ferrifère non exploitée					26/09/2009	11,30	11,10	12,65	Date + Ouvrage rebouché
01372X0209/BRIEYB	SUD	S10		Piézomètre Briey B	Formation ferrifère non exploitée					20/09/2013	11,00	11,00	11,35	
01373X0160/PZAAVAL	SUD	S11		Piézomètre Conroy aval	Formation ferrifère non exploitée					20/09/2013	11,10	10,90	12,00	
01373X0130/A25	CENTRE	C07		Piézomètre A25 - Avril aval	Formation ferrifère non exploitée - Dogger					13/09/2013	9,60	9,40	9,90	
01138X0172/BURBAC	BURBACH	Bu1		Galerie de Burbach	Réservoir minier					03/01/2014	11,40	11,00	11,90	
01137X0157/PUITS	CENTRE	C02	SC4	Forage Route Blanche	Réservoir minier	Profil vertical	10,71	10,37	11,41	09/09/2015	12,00	11,93	12,10	
01373X0134/EXHAUR	CENTRE	C03		Galerie de bois d'Avril	Réservoir minier	Ponctuelle				04/07/2016	10,60	10,25	11,10	
01137X0151/S	CENTRE	C04		Galerie de Fontoy	Réservoir minier					28/09/2007	12,10	11,45	12,85	Date
01372X0197/EX	CENTRE	C05		Galerie du Woigot	Réservoir minier	Ponctuelle				04/07/2016	13,20	12,40	13,60	
01364X0042/P3	CENTRE	C13	SC1	Puits Amermont III	Réservoir minier	Profil vertical	14,77	13,91	16,58	09/09/2015	15,60	15,13	15,98	
01136X0148/P	CENTRE	C14	SC3	Puits Anderny II	Réservoir minier	Profil vertical	11,96	10,53	12,81	09/09/2015	13,00	12,50	13,33	
01373X0136/P	CENTRE	C15		Puits Chevillon	Réservoir minier					20/01/1999	11,30	11,00	11,60	Date + Ouvrage rebouché
01372X0198/P2	CENTRE	C16	SC2	Puits St-Pierremont II	Réservoir minier	Profil vertical	13,29	13,22	13,64					
01372X0196/EX	CENTRE	C17		Puits Tucquegnieux I	Réservoir minier					25/09/2012	13,80	13,05	14,40	
01132X4002/GT	GODBRANGE	G01	G	Gal. de Godbrange	Réservoir minier	Ponctuelle	10,70	10,70	10,70					
01374X0268/S	HAYANGE SUD	Ha1	H	Piézomètre Hayange Sud	Réservoir minier	Profil vertical	10,45	10,44	10,47	13/09/2013	11,40	11,15	13,00	
01133X0094/SR2	NORD	N02	SN2	Piézomètre François Brune	Réservoir minier	Profil vertical	11,31	10,91	11,79	12/12/2013	11,80	10,40	13,90	
01137X0143/S	NORD	N03	SN2	Puits Ferdinand Grise	Réservoir minier	Profil vertical	13,21	12,04	13,51	09/09/2015	10,85	8,08	13,13	
01137X0175/PTS-5	NORD	N05	SN2	Puits Cheminée Sud Grise	Réservoir minier	Profil vertical	12,82	12,54	13,21	09/09/2015	11,30	7,80	13,70	
01137X0099/P1	NORD	N06	SN2	Puits Boulange Grise	Réservoir minier	Profil vertical	11,01	10,36	11,65	09/09/2015	10,20	6,55	13,75	
01137X0169/PZ-7	NORD	N07		Piézomètre Angevillers Grise	Réservoir minier					09/09/2015	11,00	7,50	12,30	
01133X0052/P1	NORD	N09		Puits Bure Jaune Sauvage	Réservoir minier					12/12/2013	10,30	7,05	13,05	
01137X0171/PZ-11	NORD	N11	SN2	Piézomètre Cheminée Sud	Réservoir minier	Profil vertical	14,39	11,97	14,68	12/12/2013	11,70	9,65	13,10	
01138X0184/G14BIS	NORD	N14b		Galerie des eaux de Knutange (La Paix)	Réservoir minier	Ponctuelle				04/07/2016	13,40	12,58	13,80	
01132X0164/PUITS	ERROUVILLE	N17	SN1	Puits Errouville III	Réservoir minier	Profil vertical	13,09	12,18	13,35	09/09/2015	11,00	7,35	14,05	
01138X0147/P	NORD	N18		Galerie de Metzange (Charles)	Réservoir minier	Ponctuelle				03/01/2014	12,70	12,00	13,60	
01137X0182/N3BIS	NORD	N3BIS		Puits Ferdinand Jaune	Réservoir minier					09/09/2015	11,75	7,38	13,95	
01374X0273/G	SUD	S04		Galerie du chenal de Moyeuve	Réservoir minier	Ponctuelle				04/04/2016	12,50	12,00	13,10	
01374X0234/TUNNEL	SUD	S05		Galerie du tunnel de Moyeuve	Réservoir minier					25/07/2002	12,20	11,80	13,00	Date + Inactif
01374X0176/P	SUD	S06		Galerie St Paul (AEP)	Réservoir minier					09/04/1997	11,25	11,13	11,38	Date + Non Ennoyé
01377X0099/FM	SUD	S19	SS2	Puits Auboué I (AEP)	Réservoir minier	Profil vertical	12,24	12,07	12,35	22/11/2000	13,40	12,20	14,20	Date
01376X0148/P2	SUD	S20	SS1	Puits Droitaumont II (AEP)	Réservoir minier	Profil vertical	13,93	13,27	14,65	15/12/1998	13,50	11,10	14,40	Date
01373X0129/PREL-7	SUD	S21	SS4	Puits Moyeuve-Petite (AEP)	Réservoir minier	Profil vertical	11,00	11,00	11,00	10/02/1997	10,00	9,25	11,00	Date
01377X0213/P5	SUD	S22	SS2	Puits Paradis V (AEP)	Réservoir minier	Profil vertical	12,87	12,71	12,99	17/12/1998	12,50	10,75	13,45	Date
01378X0121/RC1	SUD	S23	SS6	Puits Roncourt I (AEP)	Réservoir minier	Profil vertical	12,06	11,56	12,41	10/09/2015	12,00	10,45	12,38	
01136X0150/EXHAUR	SERROUVILLE	Se1	SE	Pts Serrouville	Réservoir minier	Profil vertical	9,64	9,60	9,72					
01377X0210/FR2	SUD			Forage Valleroy (AEP)	Réservoir minier					18/09/2000	11,50	11,40	11,60	Date
01377X0217/F-AEP	SUD			Forage Valleroy (AEP)	Réservoir minier					31/01/2000	11,50	11,00	11,70	Date

Points d'accès à l'eau des réservoirs miniers : température mesurée, écart à la température théorique, statistiques

Nom_Point	Type_Point	N°	CODE_BSS	Bassin	Secteur	X_L93_m	Y_L93_m	T_Mesurée_°C	Profondeur_m	T_theorique_°C	Ecart_T_°C	Baisse_[SO4]_%
Forage Route Blanche	Forage sur galerie	C02	01137X0157/PUITS	CENTRE	SC4	917 539	6 919 838	11,41	158,00	13,43	-2,02	-2,91
Gal. de Bois d'Avril	Galerie de débordement	C03	01373X0134/EXHAUR	CENTRE	SC4	918 532	6 916 524	12,00	45,00	10,20	1,80	-2,05
Gal. du Woigot	Galerie de débordement	C05	01372X0197/EX	CENTRE	SC2	910 703	6 912 580	13,20	210,00	14,92	-1,72	-2,94
Piézomètre Chevillon artésien	Forage sur zone non exploitée	C08	01373X0158/PZ	CENTRE	SC4	917 671	6 914 513	11,07	30,00	9,77	1,30	-4,94
Puits Amermont III	Puits minier	C13	01364X0042/P3	CENTRE	SC1	897 778	6 910 125	16,58	287,20	17,13	-0,55	0,00
Puits Anderny II	Puits minier	C14	01136X0148/P	CENTRE	SC3	911 438	6 917 349	12,81	210,00	14,92	-2,11	-5,41
Puits St-Pierremont II	Puits minier	C16	01372X0198/P2	CENTRE	SC2	911 624	6 913 155	13,64	210,00	14,92	-1,28	-
Gal. de Godbrange	Galerie de débordement	G01	01132X4002/GT	GODBRANGE	G	906 784	6 935 187	10,70	161,00	13,52	-2,82	-
Piézomètre Hayange Sud	Forage sur galerie	Ha01	01374X0268/S	HAYANGE SUD	H	920 126	6 916 797	10,47	142,00	12,98	-2,51	-17,08
Piézomètre François Brune	Forage sur galerie	N02	01133X0094/SR2	NORD	SN2	914 949	6 929 867	11,79	198,00	14,58	-2,79	-8,24
Puits Ferdinand Grise	Puits minier	N03	01137X0143/S	NORD	SN2	916 172	6 926 819	13,51	279,22	16,90	-3,39	-7,73
Puits Cheminée Sud Grise	Puits minier	N05	01137X0175/PTS-5	NORD	SN2	915 748	6 924 807	13,21	257,48	16,28	-3,07	-6,01
Puits Boulange Grise	Puits minier	N06	01137X0099/P1	NORD	SN2	913 360	6 924 575	11,65	222,00	15,26	-3,61	-9,76
Piézomètre Cheminée Sud	Forage sur zone foudroyée	N11	01137X0171/PZ-11	NORD	SN2	915 440	6 924 894	14,68	260,00	16,35	-1,67	-8,72
Gal. des eaux de Knutange (La Paix)	Galerie de débordement	N14b (=N8)	01138X0184/G14BIS	NORD	SN2	920 092	6 920 393	13,22	176,00	13,95	-0,73	-9,32
Puits Errouville III	Puits minier	N17	01132X0164/PUITS	NORD	SN1	910 501	6 927 539	13,35	213,50	15,02	-1,67	-3,51
Gal. de Metzange (Charles)	Galerie de débordement	N18	01138X0147/P	NORD	SN4	924 998	6 922 477	12,30	41,00	10,09	2,21	-17,17
Pts Serrouville	Puits minier	Se01	01136X0150/EXHAUR	SERROUVILLE	SE	907 778	6 926 687	9,72	64,74	10,77	-1,05	-1,43
Gal. du chenal de Moyeuve	Galerie de débordement	S04	01374X0273/G	SUD	SS3	921 502	6 909 405	12,21	48,00	10,29	1,92	-5,31
Puits Auboué I (AEP)	Puits minier	S19	01377X0099/FM	SUD	SS2	916 942	6 905 802	12,35	136,20	12,81	-0,46	-7,84
Puits Droitaumont II (AEP)	Puits minier	S20	01376X0148/P2	SUD	SS1	909 918	6 897 324	14,65	231,37	15,53	-0,88	-4,27
Puits Paradis V (AEP)	Puits minier	S22	01377X0213/P5	SUD	SS2	915 768	6 903 058	12,99	242,00	15,84	-2,85	-5,25
Puits Roncourt I (AEP)	Puits minier	S23	01378X0121/RC1	SUD	SS6	920 680	6 904 046	12,41	163,56	13,59	-1,18	-

Température mesurée et écart à la température théorique des points d'accès à l'eau des réservoirs miniers.

Type de point d'accès aux réservoirs	Nombre de points d'accès mesurés	Statistiques sur la température mesurée (°C)
Galerie de débordement	6	12,3 +/- 0,9
Puits minier	12	13,1 +/- 1,4
Forage sur galerie	3	11,4 +/- 0,5
Autre forage	2	12,9 +/- 1,4
Tous points	23	12,4 +/- 1,8

Type de point d'accès aux réservoirs	Nombre de points d'accès mesurés	Statistiques sur les écarts de température théorique - mesurée (°C)
Galerie de débordement	6	0,5 +/- 2,2
Puits minier	12	-1,5 +/- 1,4
Forage sur galerie	3	-2,5 +/- 0,3
Autre forage	2	-0,2 +/- 1,2
Tous points	23	-1,7 +/- 2,4

Statistiques (médiane avec intervalle incluant 80% des données) relatives à la température mesurée et à l'écart à la température théorique des points d'accès à l'eau des réservoirs miniers.

Points d'accès à l'eau des réservoirs miniers : principales caractéristiques par type d'accès

Caractéristiques du point de captage	Galerie de débordement (existante)	Ancien puits minier (existant)	Forage sur galerie (existant)	Forage sur galerie (à créer)	Forage sur zone foudroyée (à créer)
Température mesurée	12,3 +/- 0,9 °C	13,1 +/- 1,4 °C	11,4 +/- 0,5 °C	-	-
Température possible	-	-	-	Selon profondeur travaux : $T = 0,0286 \times \text{Prof.} + 8,91$ avec correction incertitude -1,7 +/- 2,4 °C	Selon profondeur travaux : $T = 0,0286 \times \text{Prof.} + 8,91$ avec correction incertitude -1,7 +/- 2,4 °C
Gamme de débit possible	Débordement gravitaire utilisable variable selon galerie : de 0 L/s en étiage pour les débordements intermittents à > 1000 L/s toute l'année pour les galeries les plus productives	Pompage >>> 100 m3/h	Pompage >>> 100 m3/h	Pompage >>> 100 m3/h	Pompage > 100 m3/h
Profondeur de l'eau	Proche surface	21 à 159 m Eau du réservoir à pomper en fond de puits au niveau de l'ouverture de galeries en raison de la stratification des masses d'eau Dogger et réservoir minier dans les puits	90 à 195 m	Variable selon localisation et choix technico-économique < 195 m	Variable selon localisation et choix technico-économique < 195 m
Caractéristiques techniques	- Profondeur travaux : proche surface - Diamètre : quelques mètres	- Profondeur travaux : 67 à 287 m - Diamètre : quelques mètres	- Profondeur travaux : 158 à 198 m - Diamètre standard piézomètre ou forage (10 à 15 cm)	Variable selon localisation et choix technico-économique - Profondeur travaux : < 309 m	Variable selon localisation et choix technico-économique - Profondeur travaux : < 309 m
Qualité de l'eau	Conductivité électrique jusqu'à 5000 µS/cm, pH neutre, eau proche de l'équilibre chimique	Conductivité électrique jusqu'à 5000 µS/cm, pH neutre, eau proche de l'équilibre chimique	Conductivité électrique jusqu'à 5000 µS/cm, pH neutre, eau proche de l'équilibre chimique	Conductivité électrique jusqu'à 5000 µS/cm, pH neutre, eau proche de l'équilibre chimique	Conductivité électrique jusqu'à 5000 µS/cm, pH neutre, eau proche de l'équilibre chimique

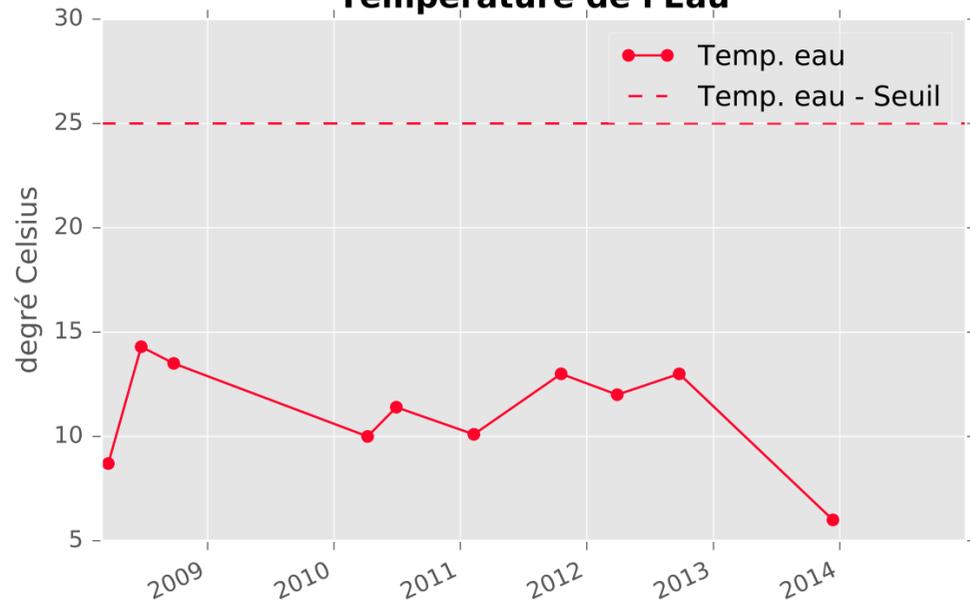
Principales caractéristiques des points de captage potentiels de la ressource géothermique du bassin ferrifère lorrain.

Annexe 3 : Graphiques d'évolution des paramètres chimiques par point

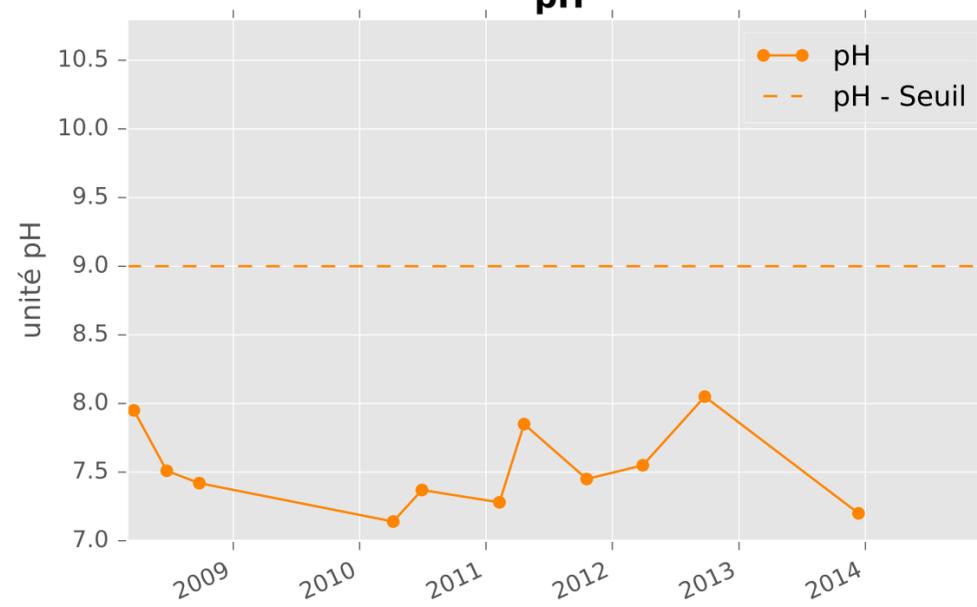
Cette annexe 3 présente l'évolution temporelle de 9 paramètres chimiques pour chaque point disposant de données sur la période mars 2008 - décembre 2015. La date de début de période choisie pour les graphiques correspond à la fin de l'envoyage de tous les réservoirs miniers du bassin ferrifère. La liste des points est donnée en annexe 2, et l'emplacement géographique des points de mesure est indiqué sur les cartes de l'illustration 5 et de l'illustration 6 du corps du rapport, ainsi que sur les cartes des annexe 4 et 5.

ALLUVIONS DE LA FENSCH NORD - 01138X0185 - N15 - Piézomètre Fensch aval 1

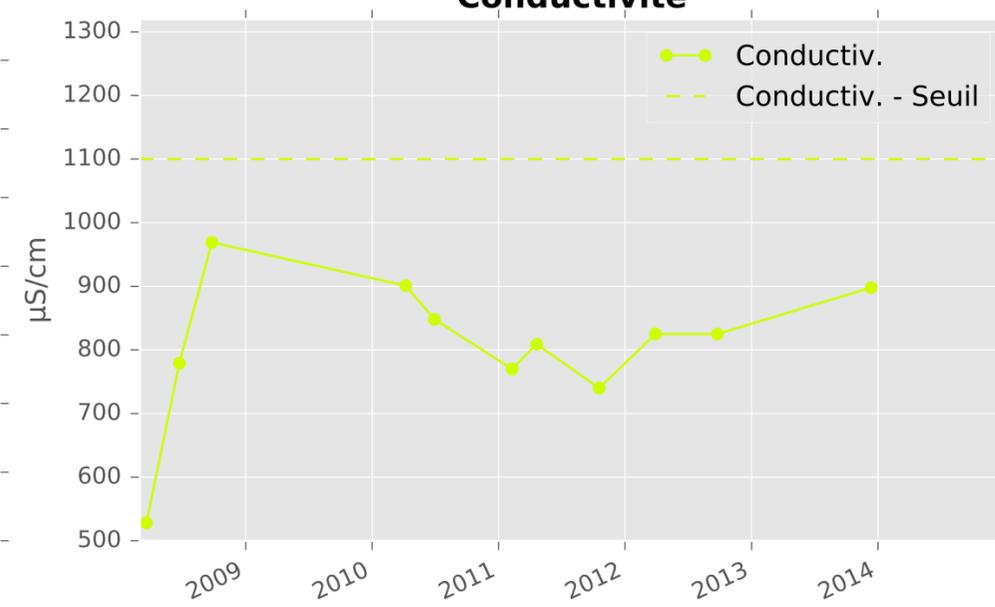
Température de l'Eau



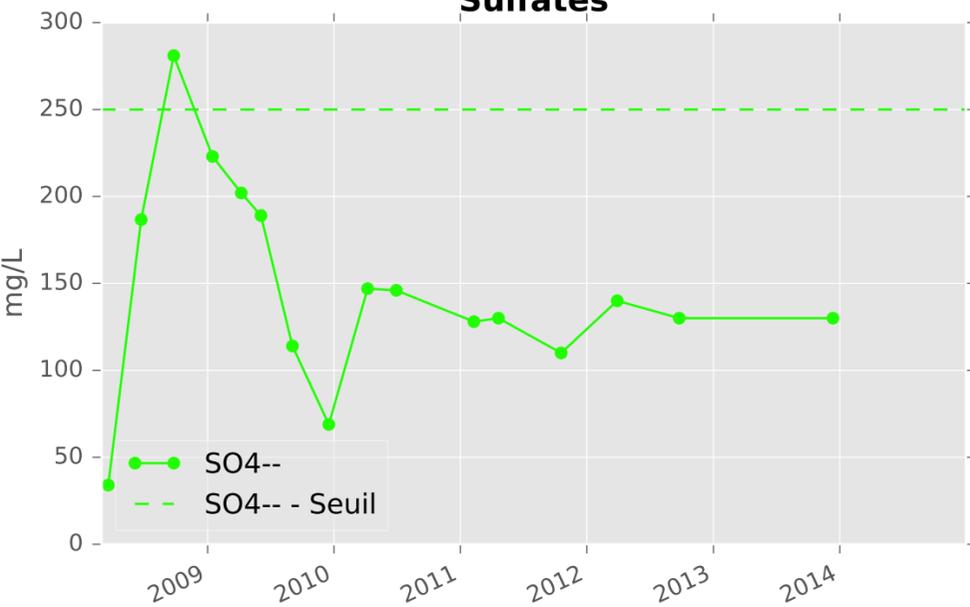
pH



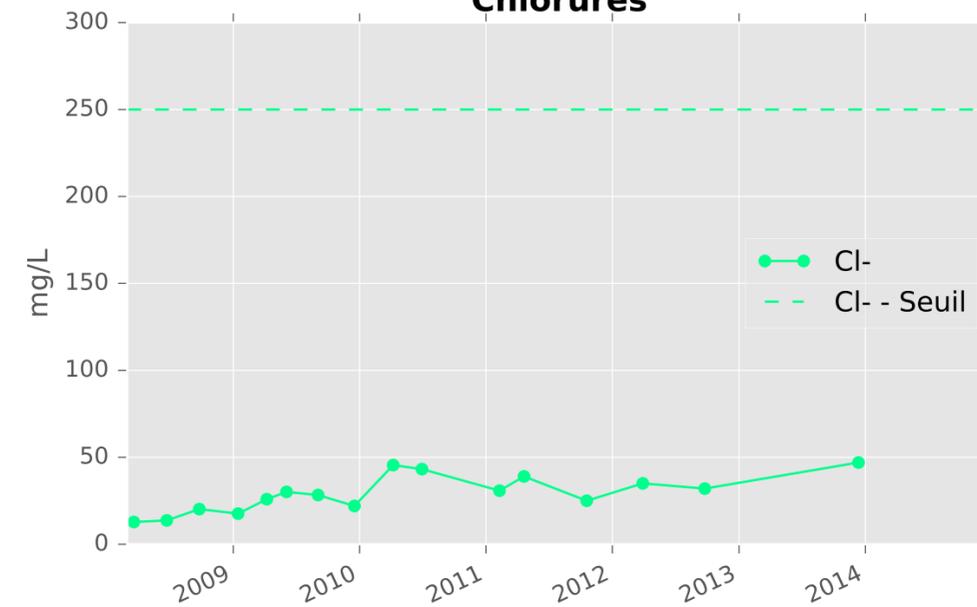
Conductivité



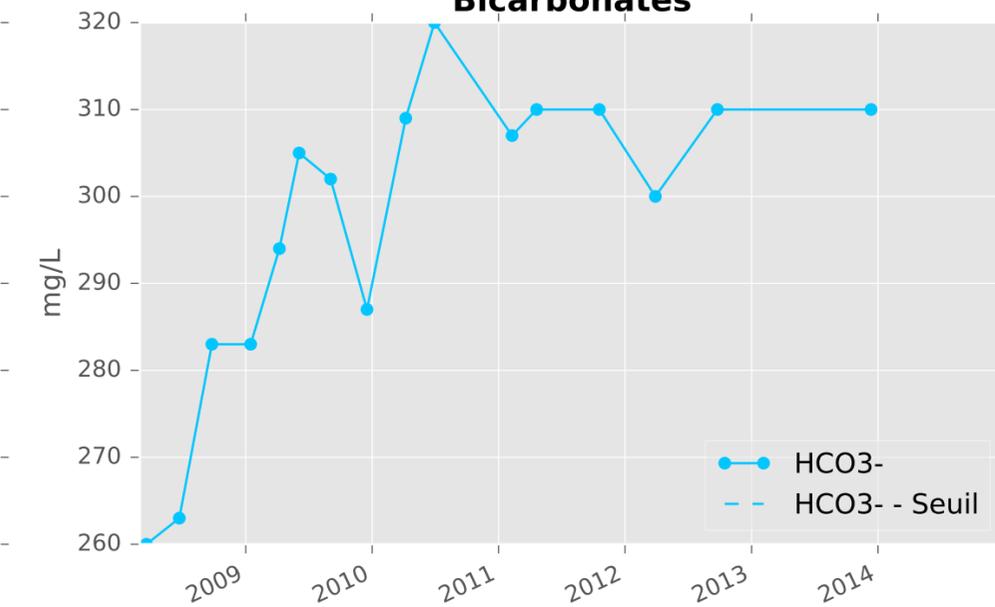
Sulfates



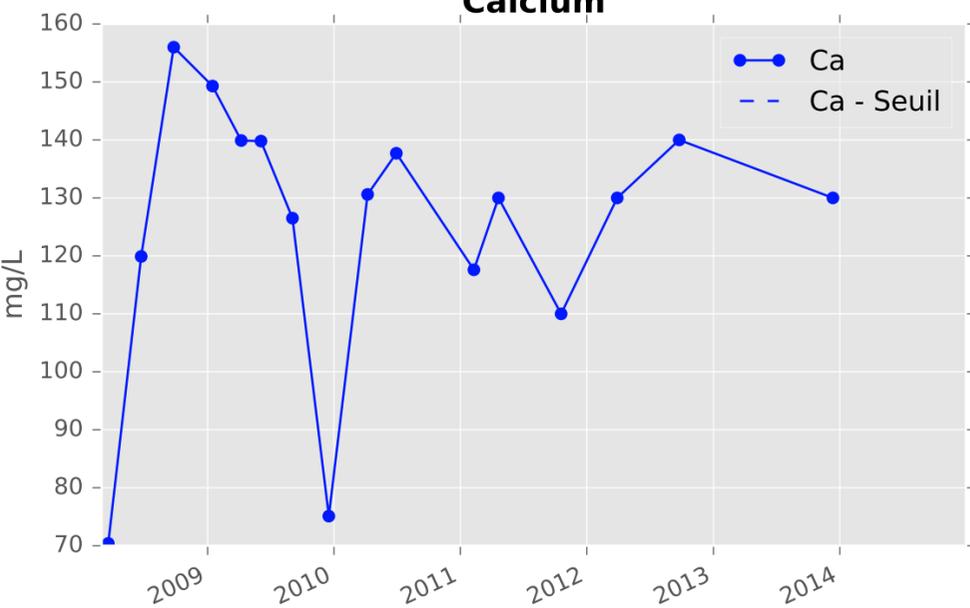
Chlorures



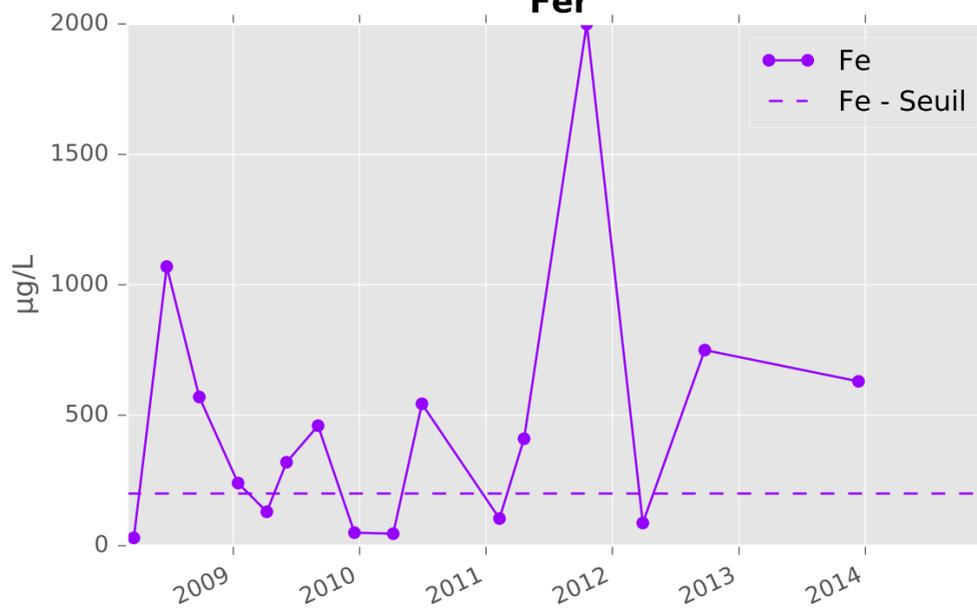
Bicarbonates



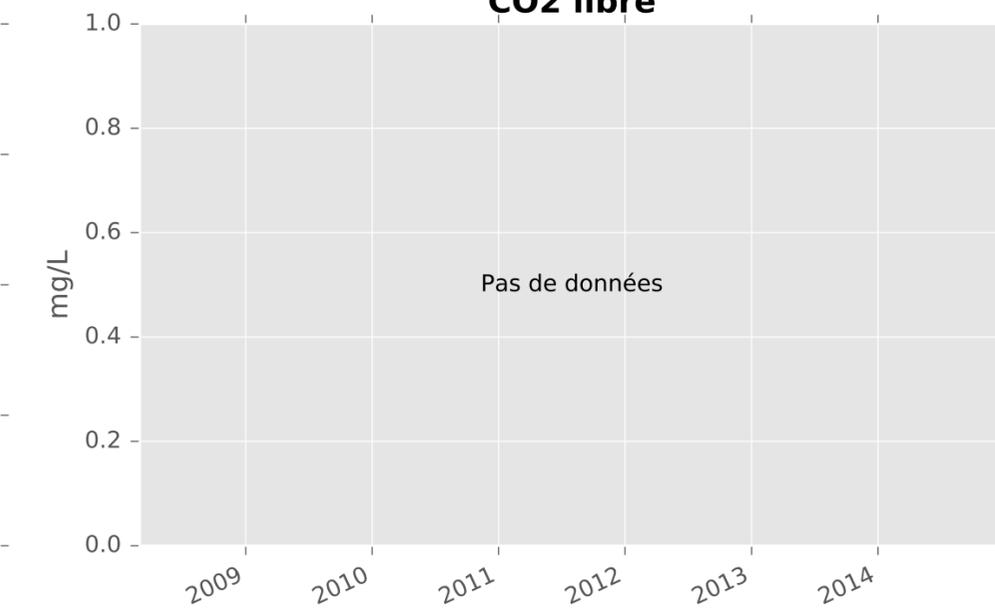
Calcium



Fer

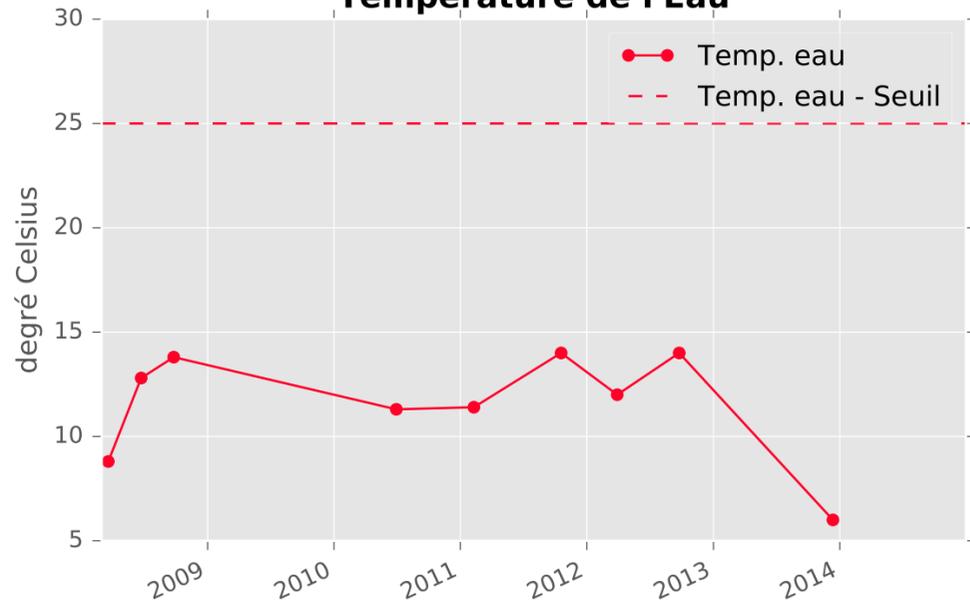


CO2 libre

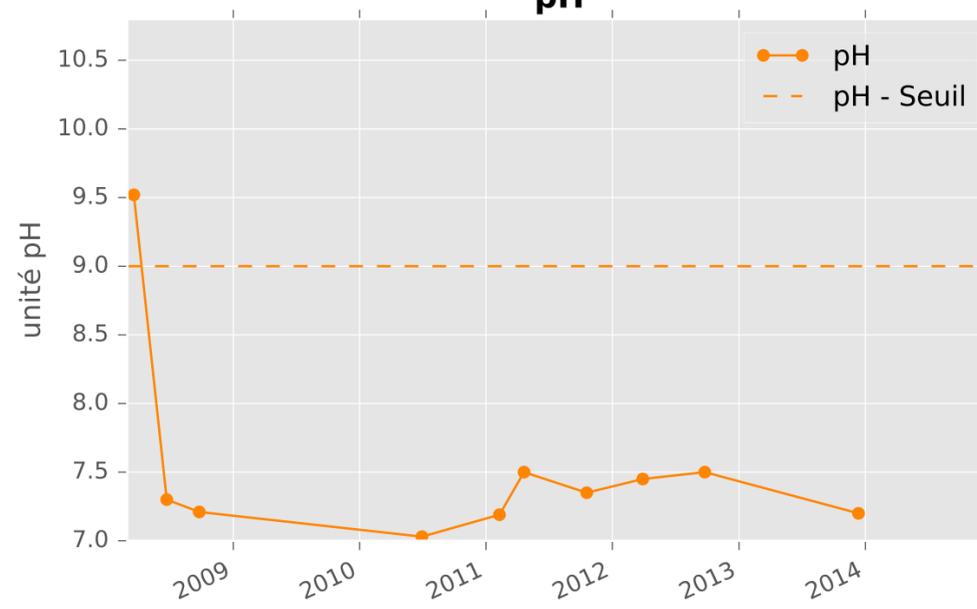


ALLUVIONS DE LA FENSCH NORD - 01137X0174 - N16 - Piézomètre Fensch amont 2

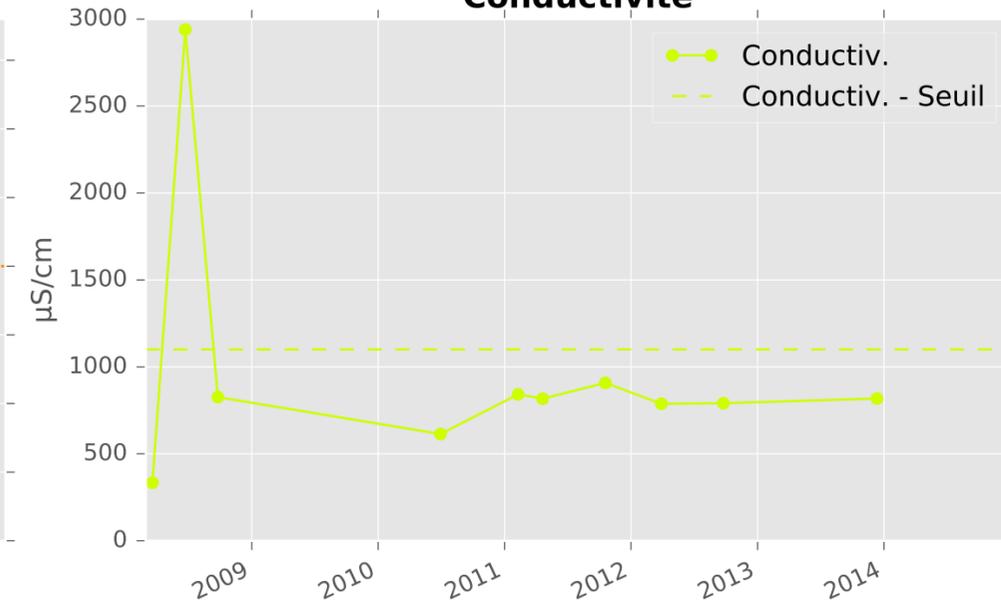
Température de l'Eau



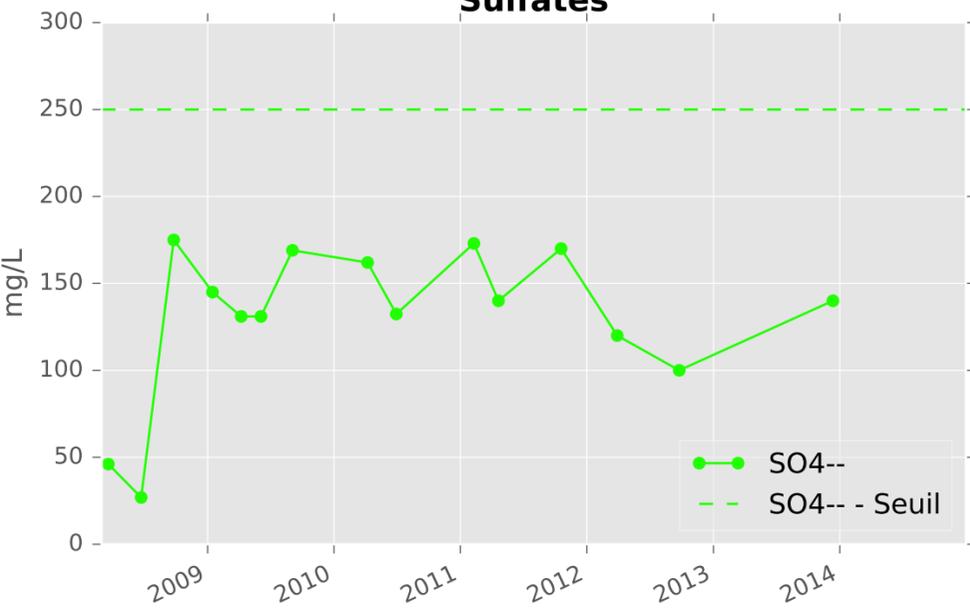
pH



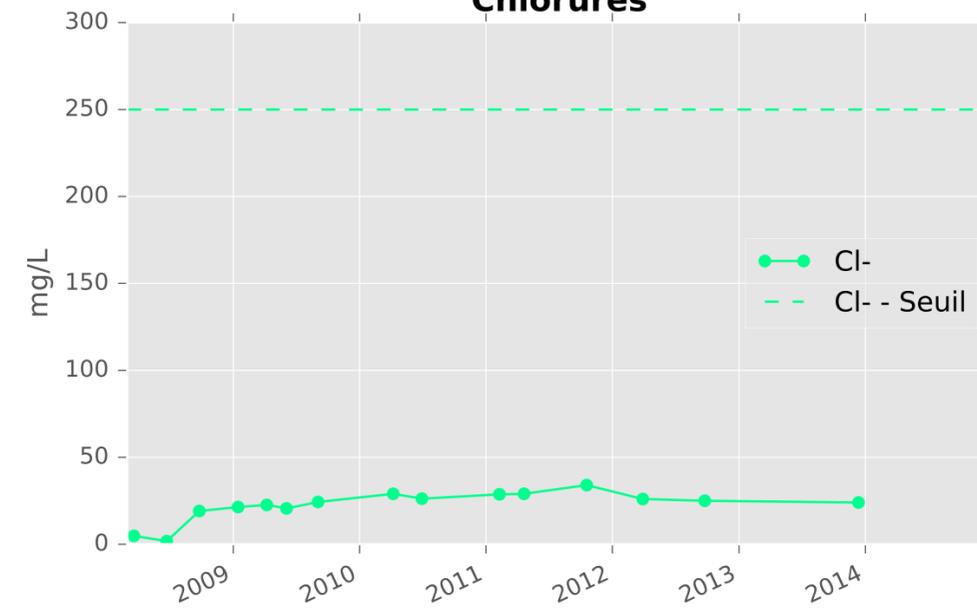
Conductivité



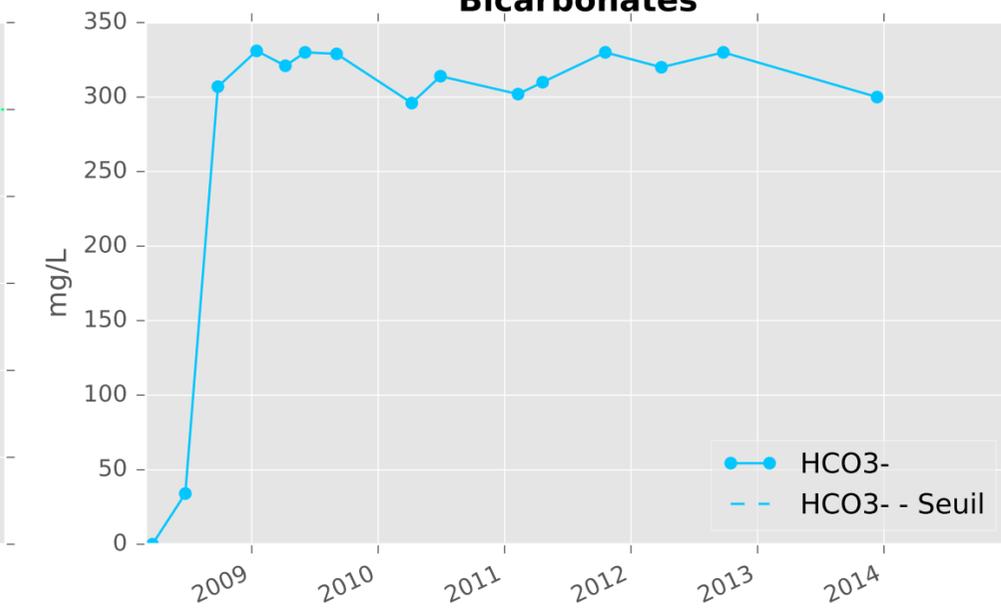
Sulfates



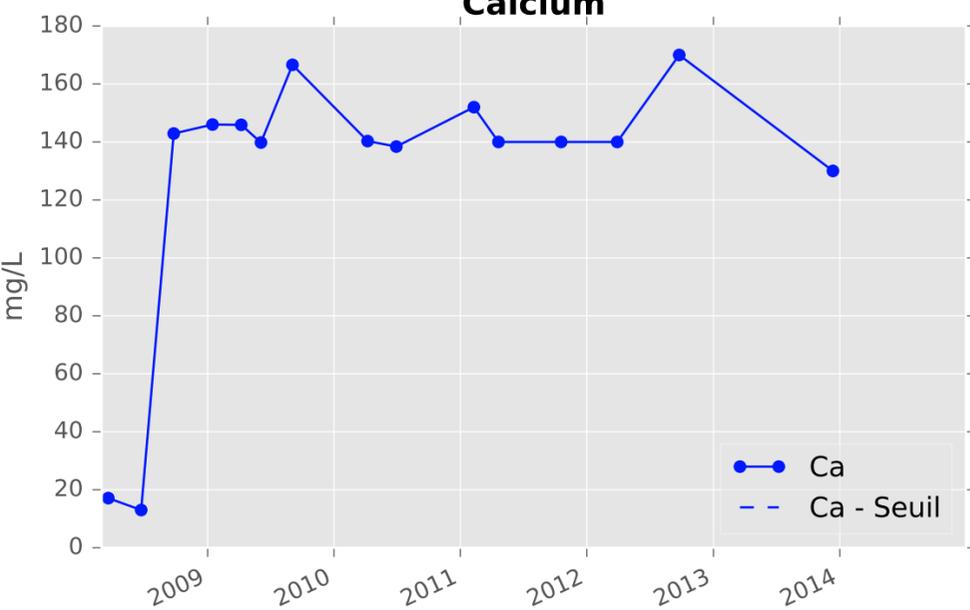
Chlorures



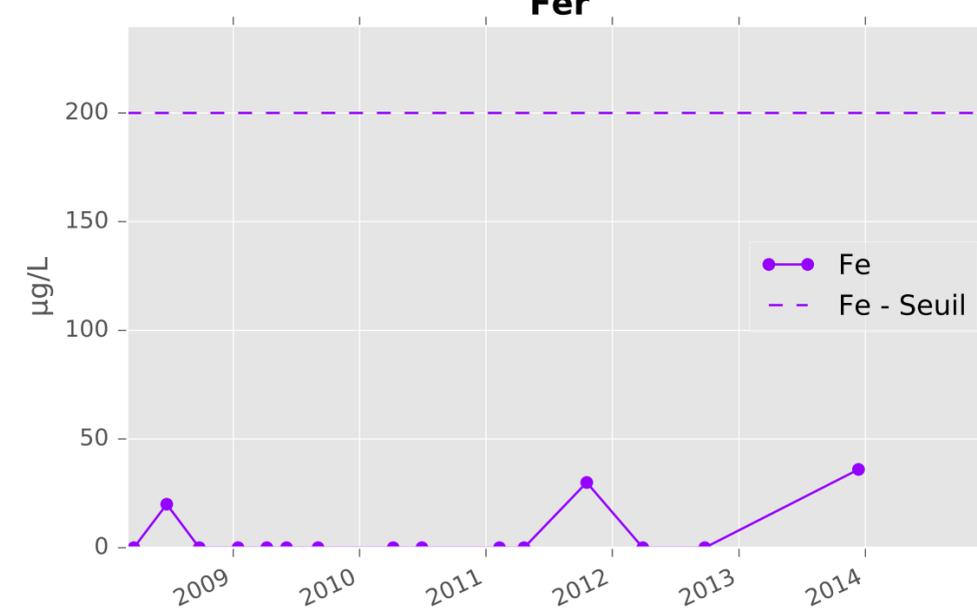
Bicarbonates



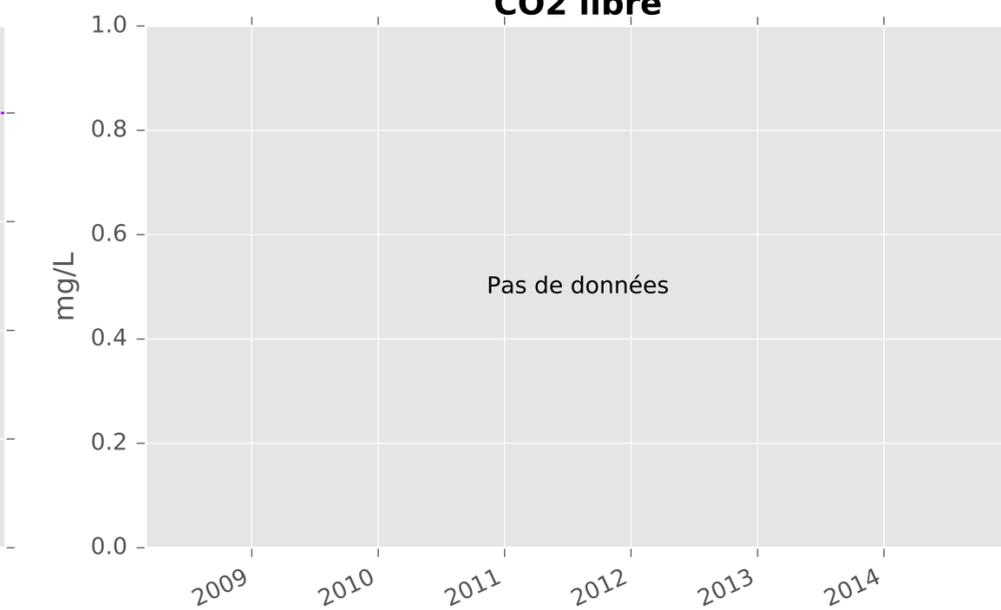
Calcium



Fer

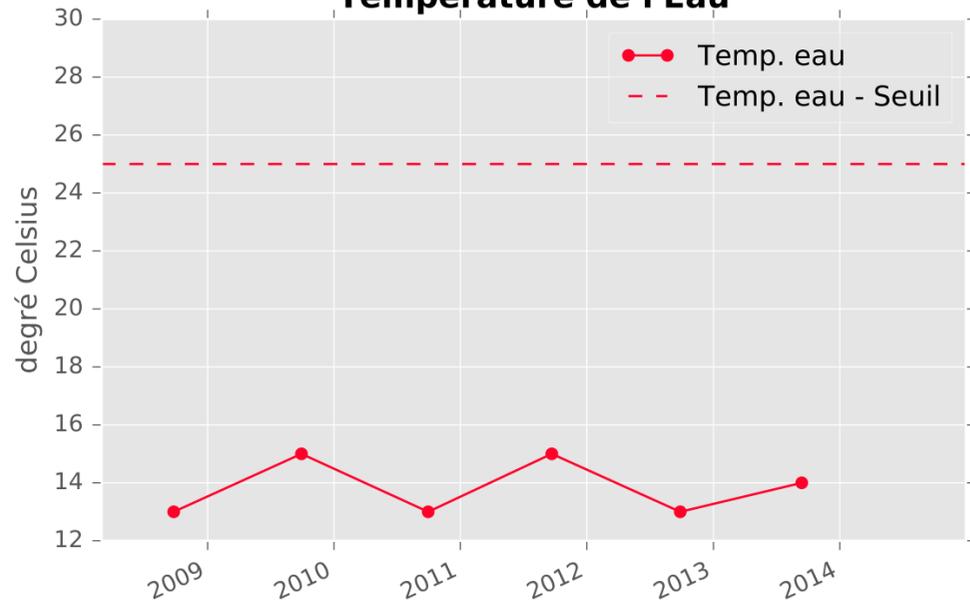


CO2 libre

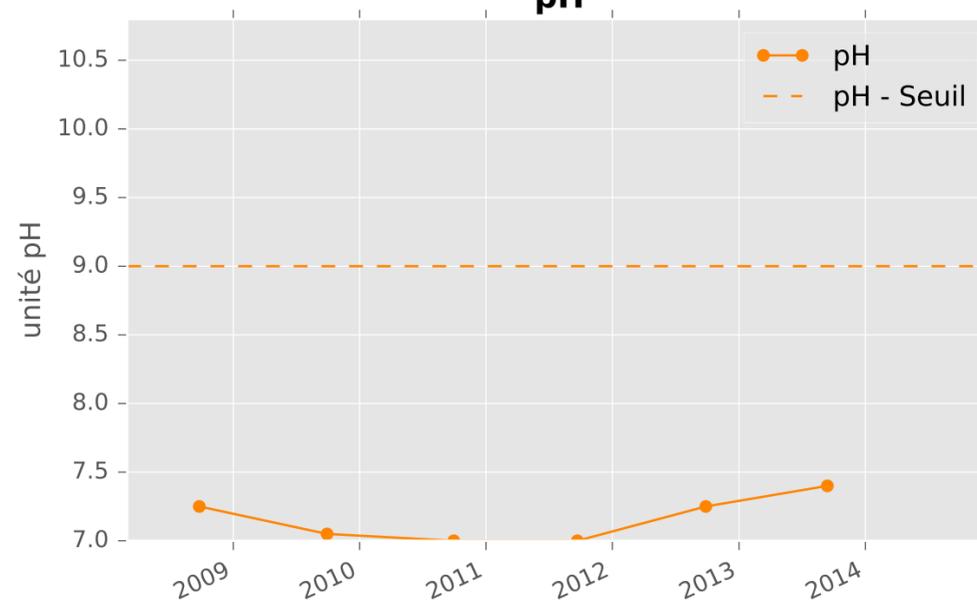


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01372X0206 - C1 - Forage Ferme de Mance

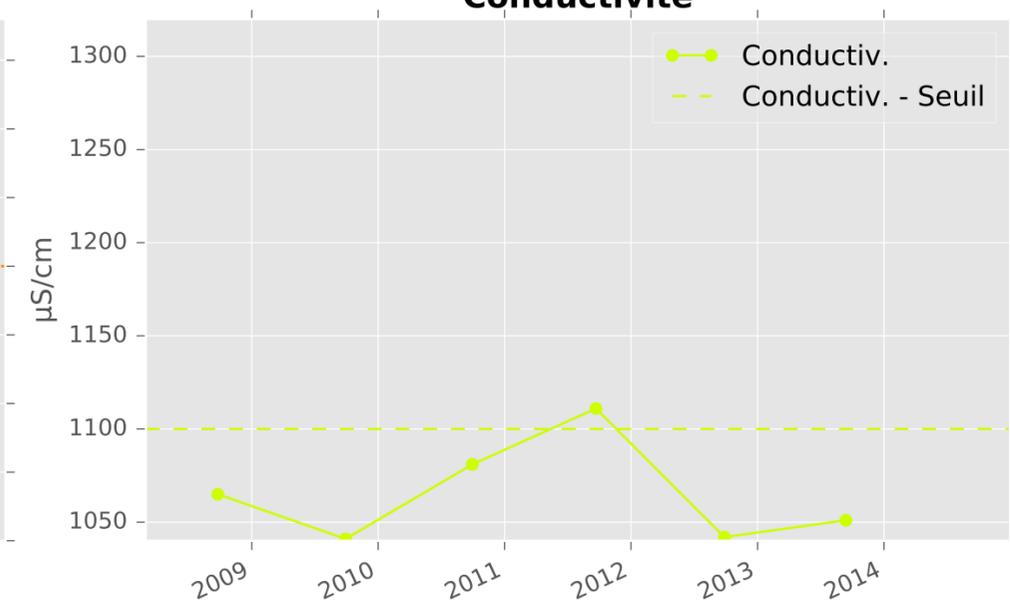
Température de l'Eau



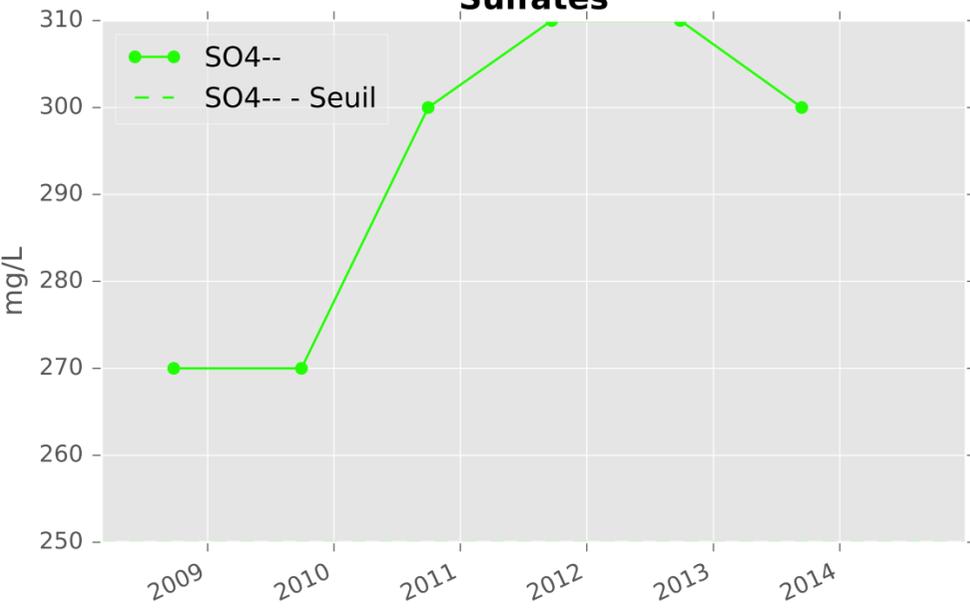
pH



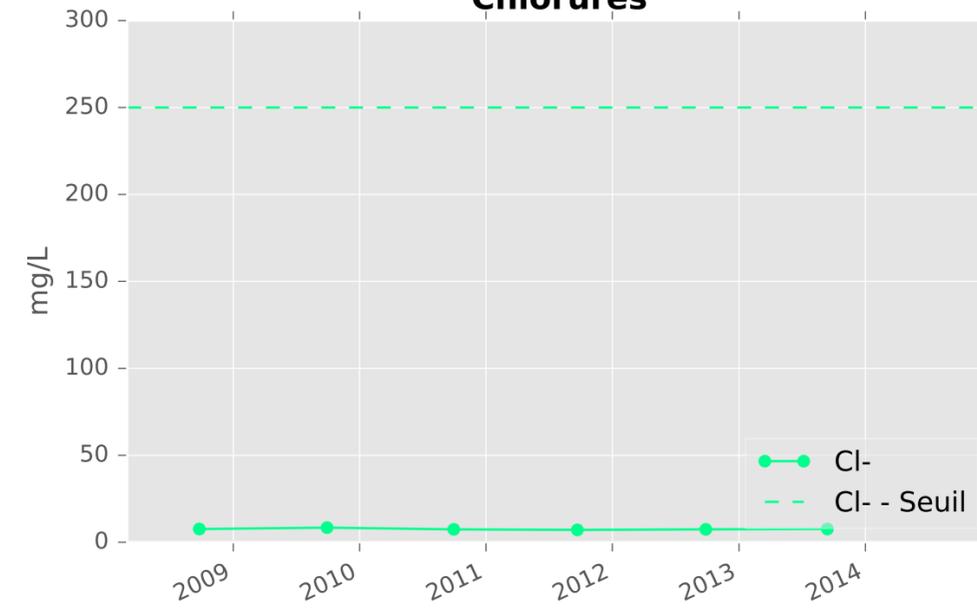
Conductivité



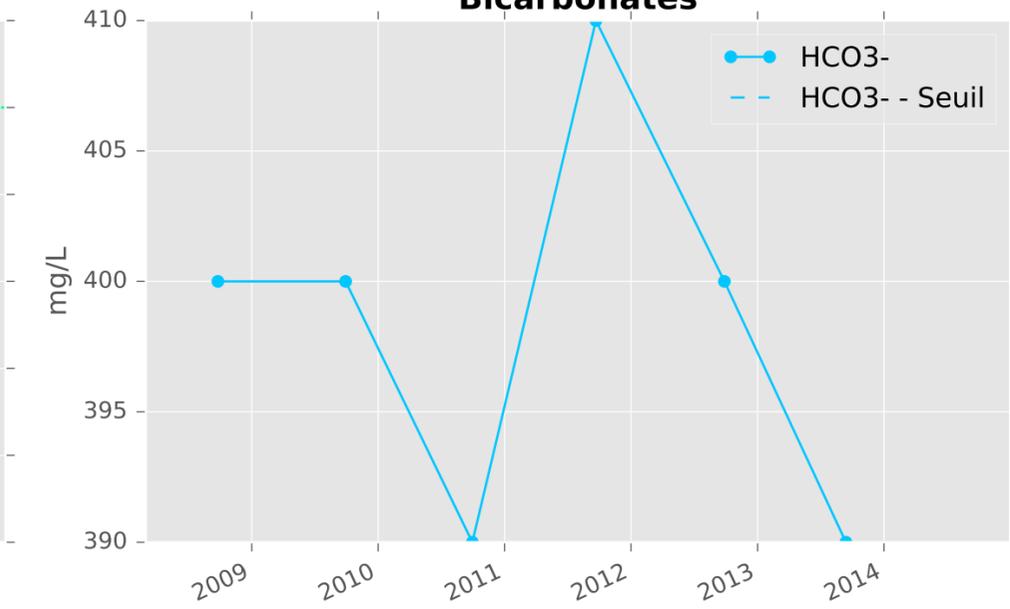
Sulfates



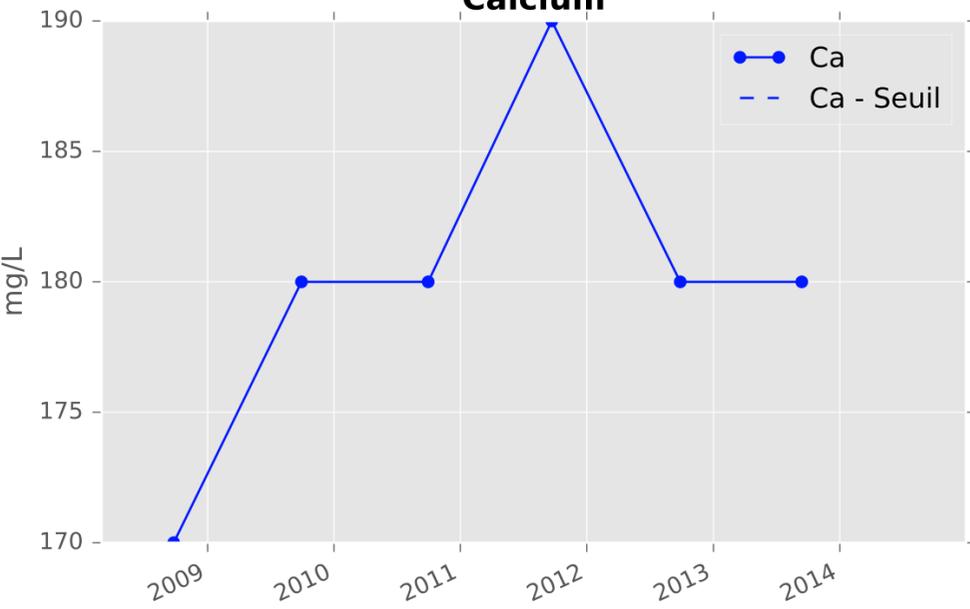
Chlorures



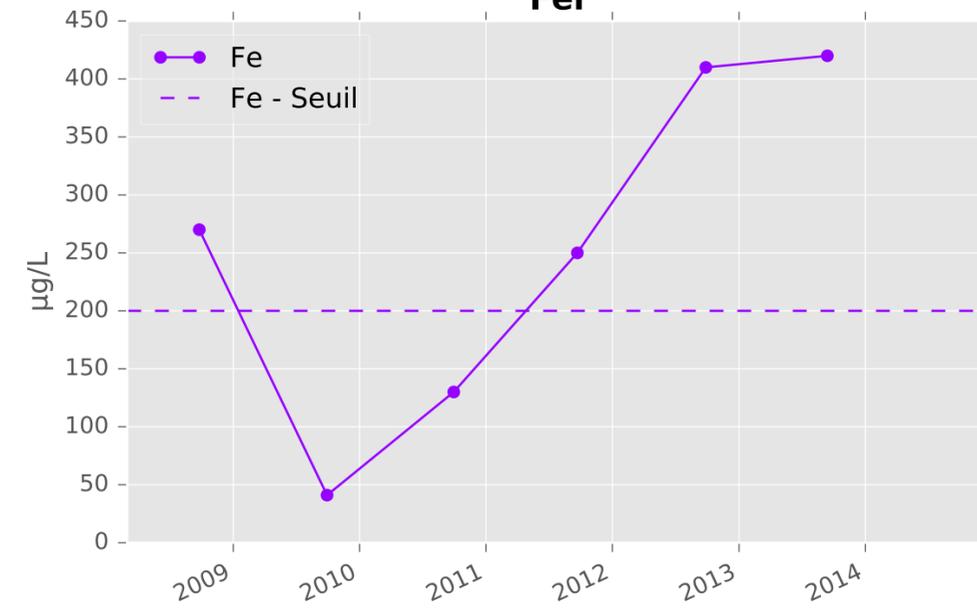
Bicarbonates



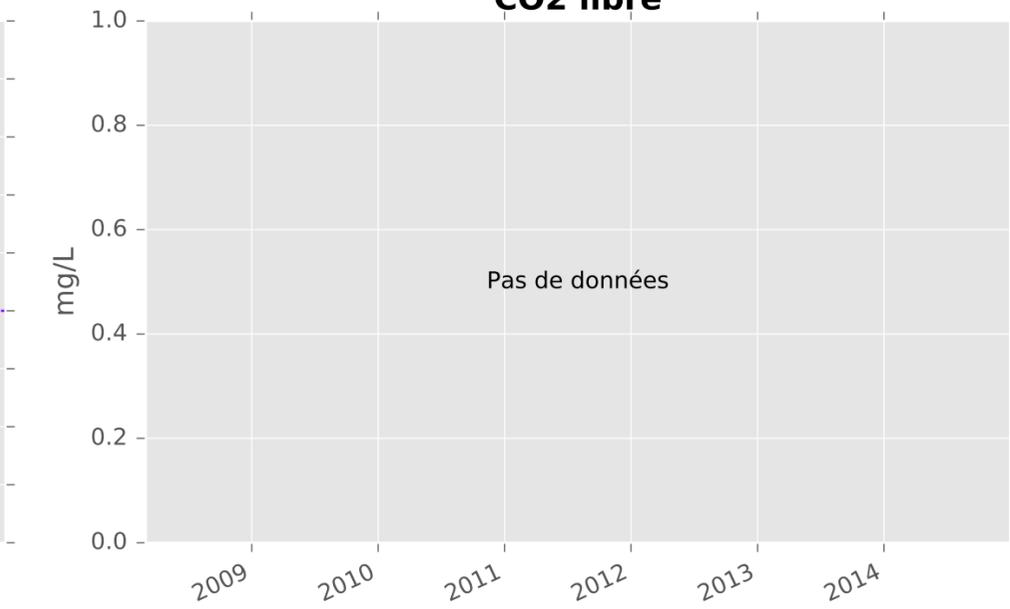
Calcium



Fer

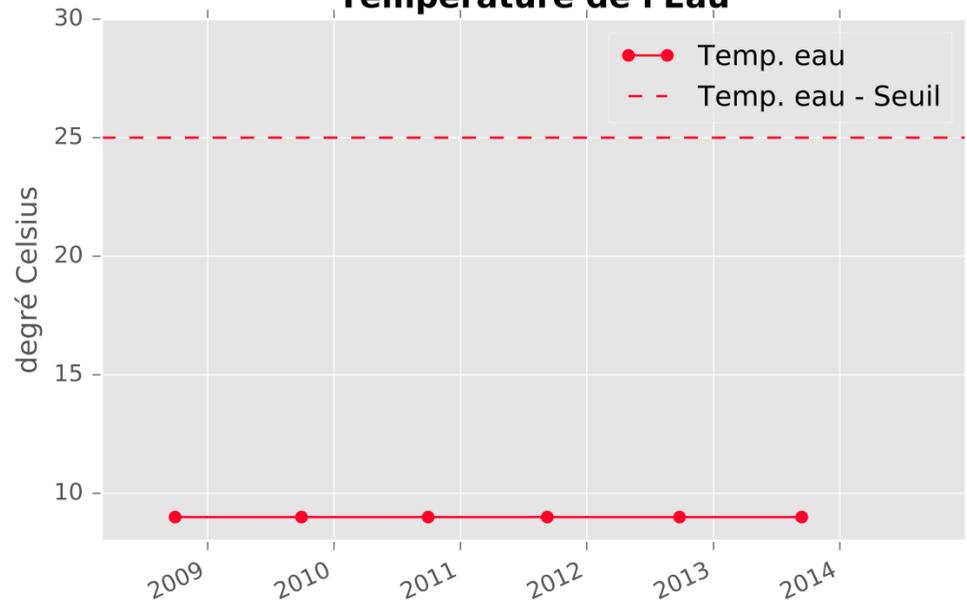


CO2 libre

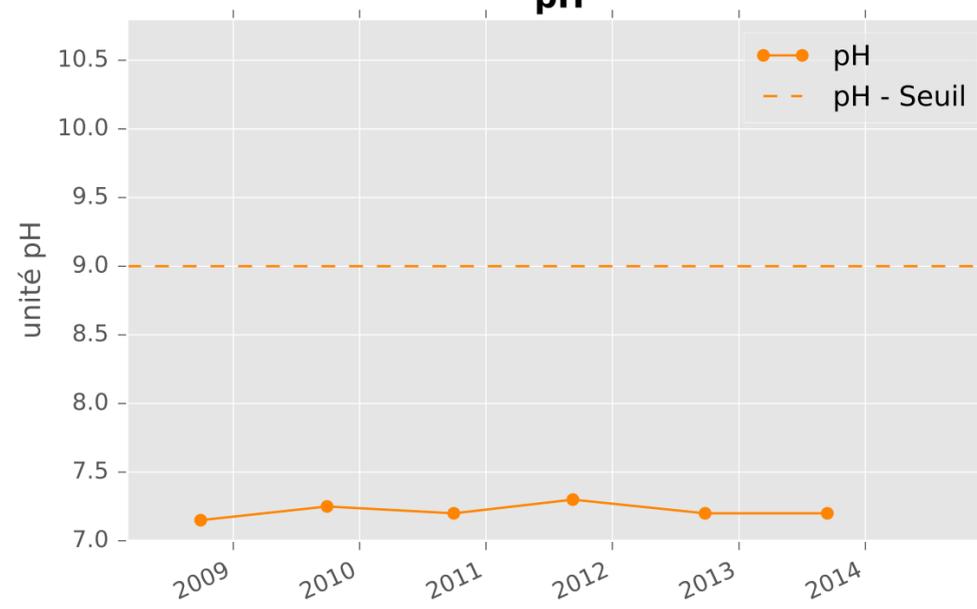


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0131 - C6 - Piézomètre A15 Avril amont

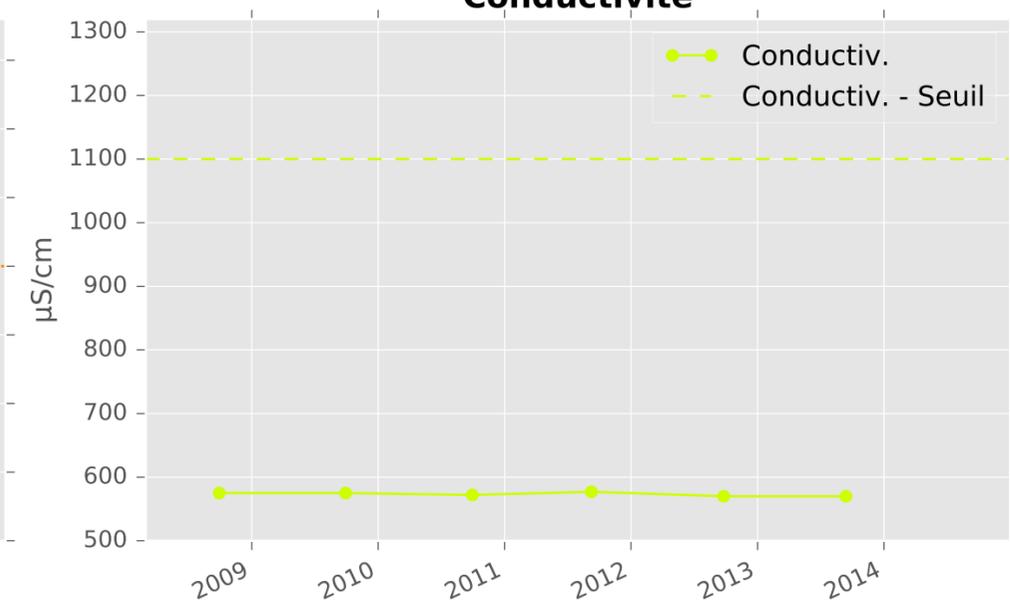
Température de l'Eau



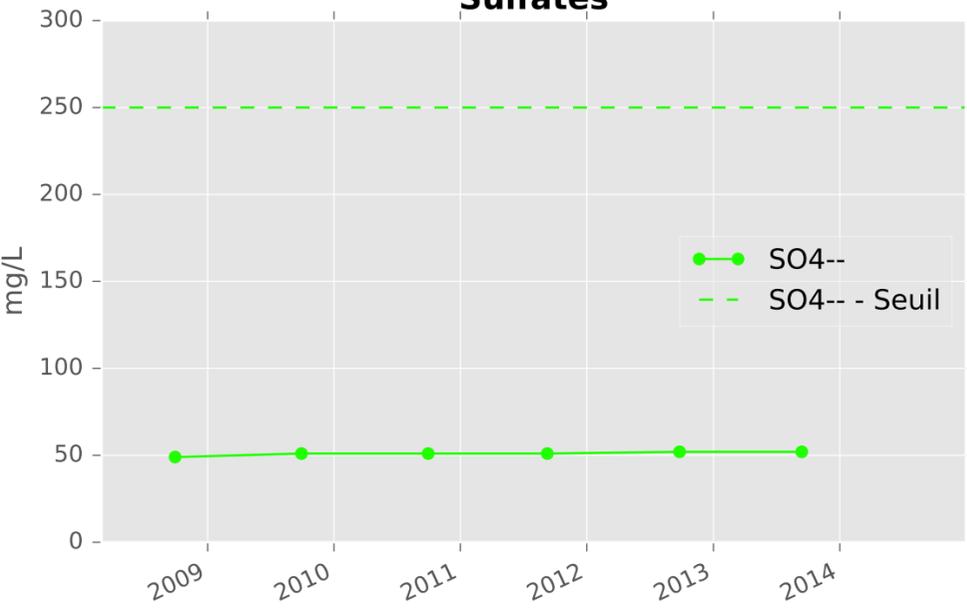
pH



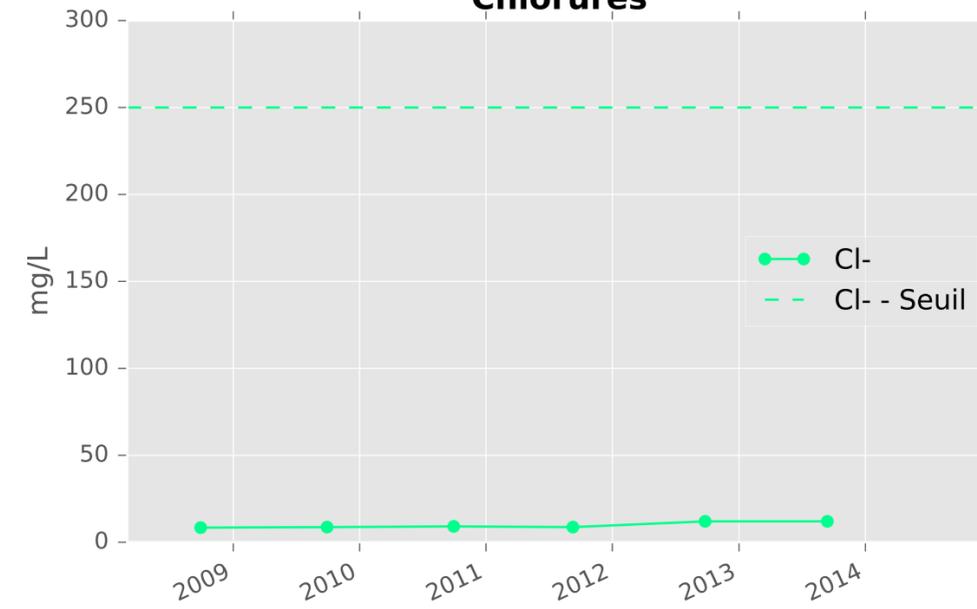
Conductivité



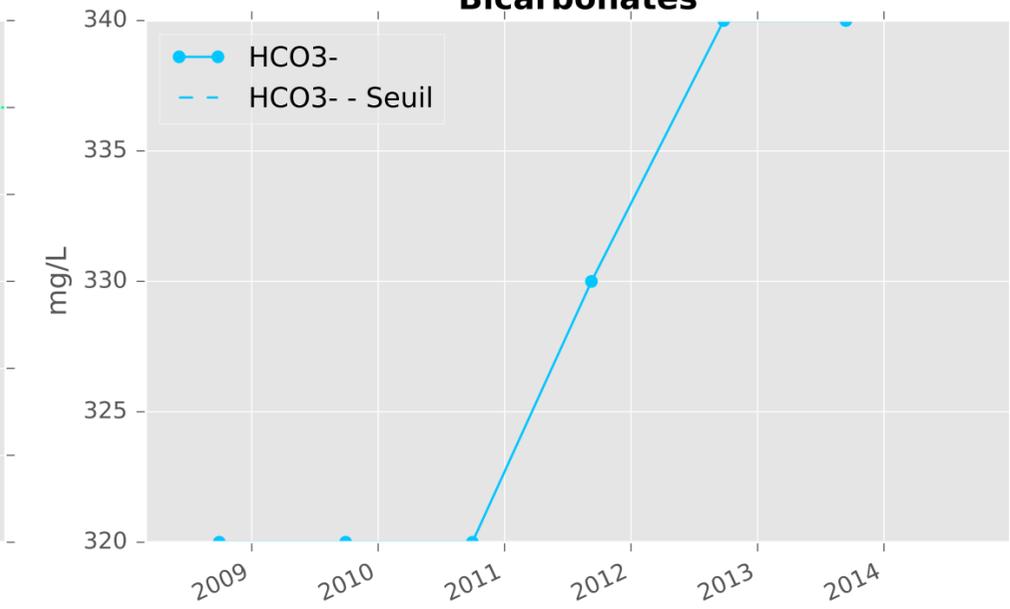
Sulfates



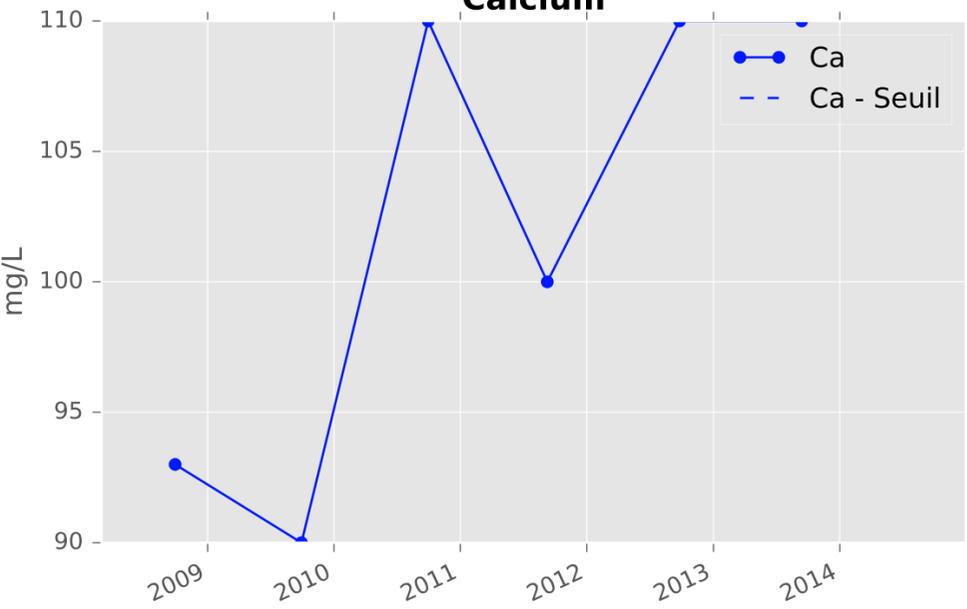
Chlorures



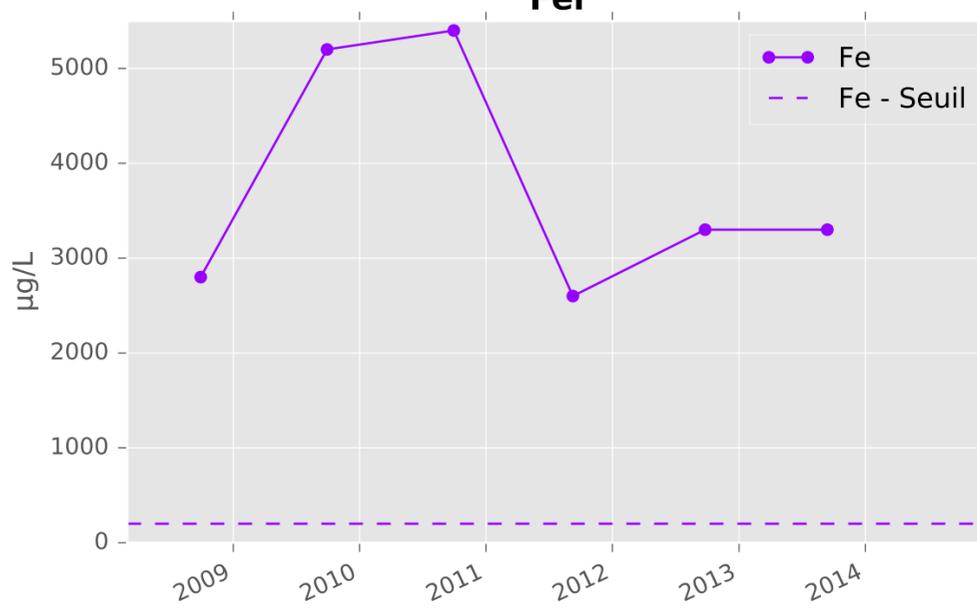
Bicarbonates



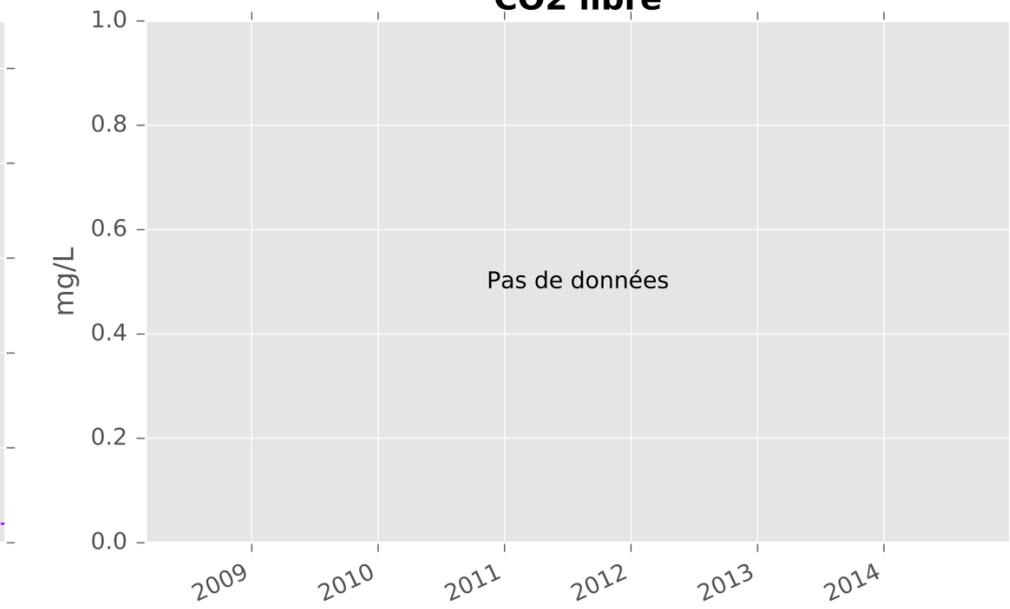
Calcium



Fer

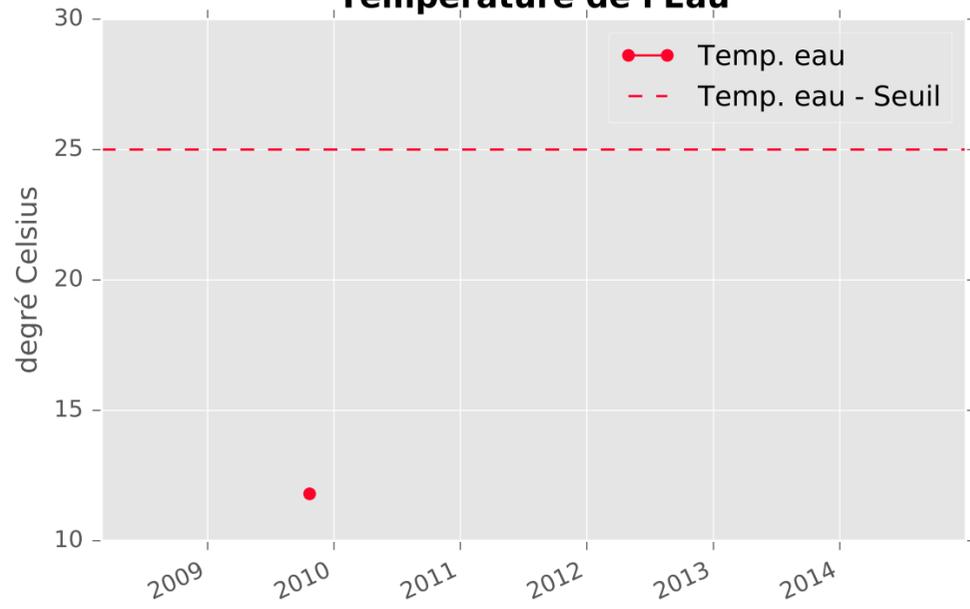


CO2 libre

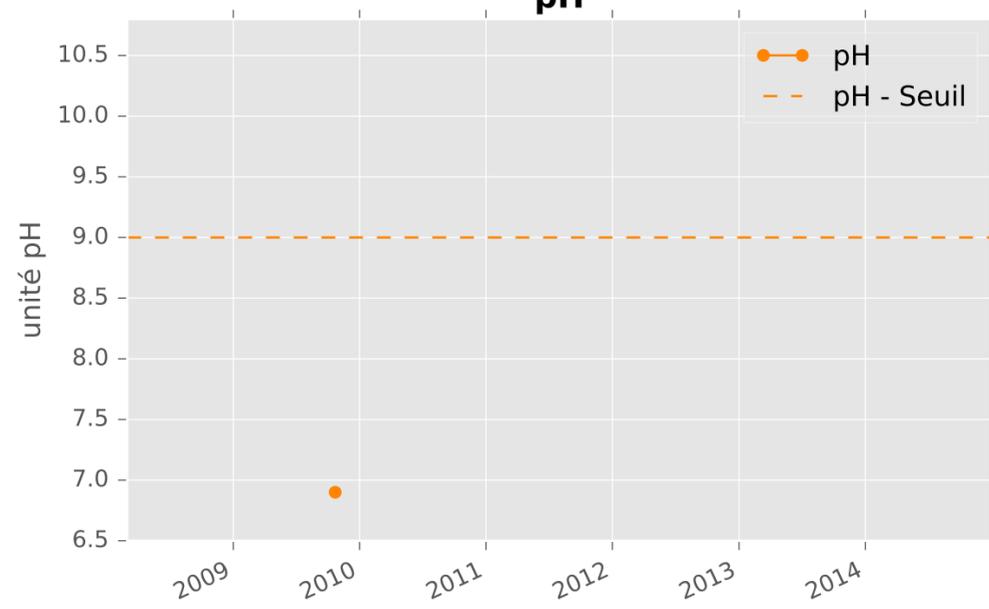


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01372X0204 - C9 - Piézomètre M52 Mance

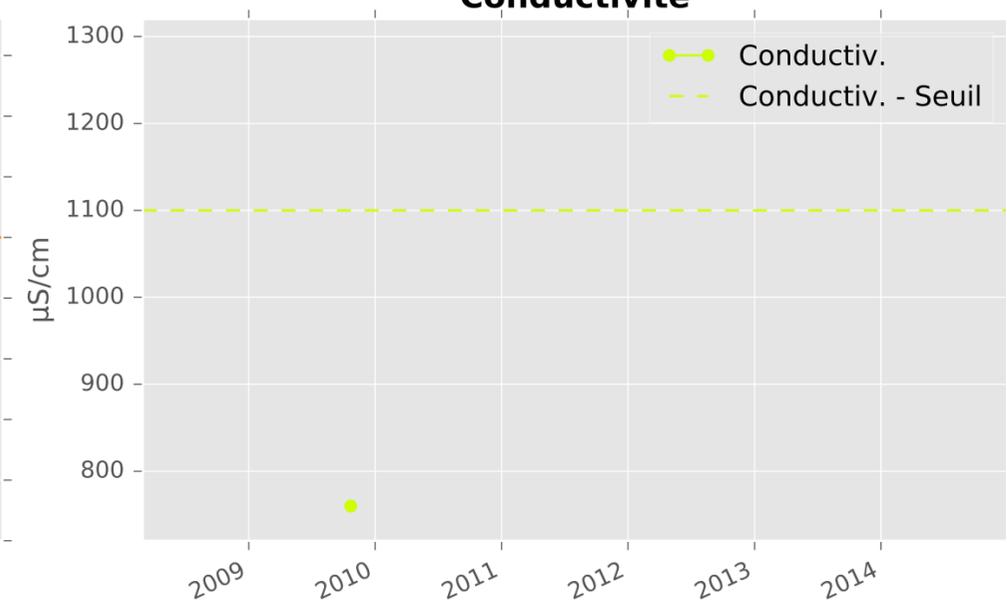
Température de l'Eau



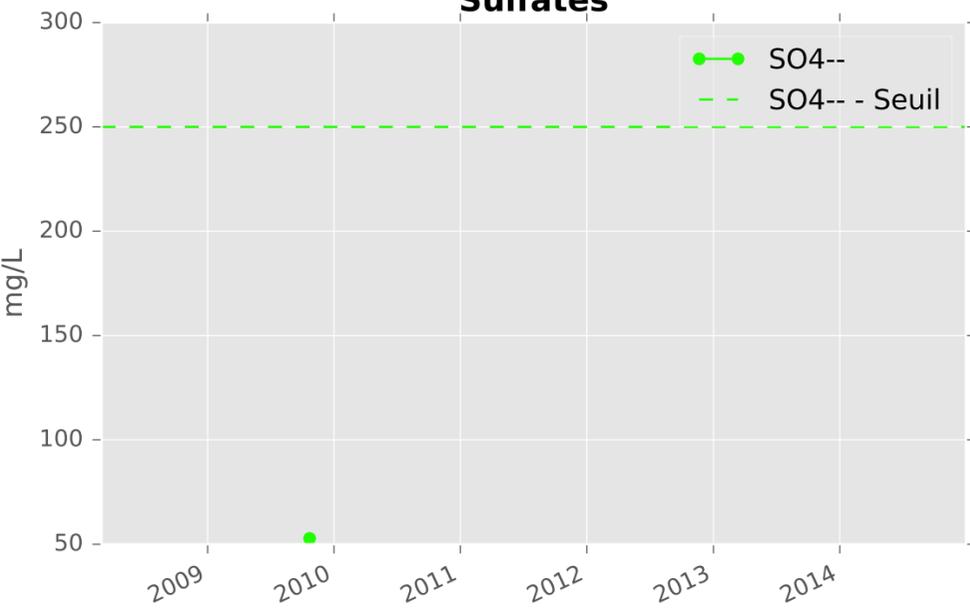
pH



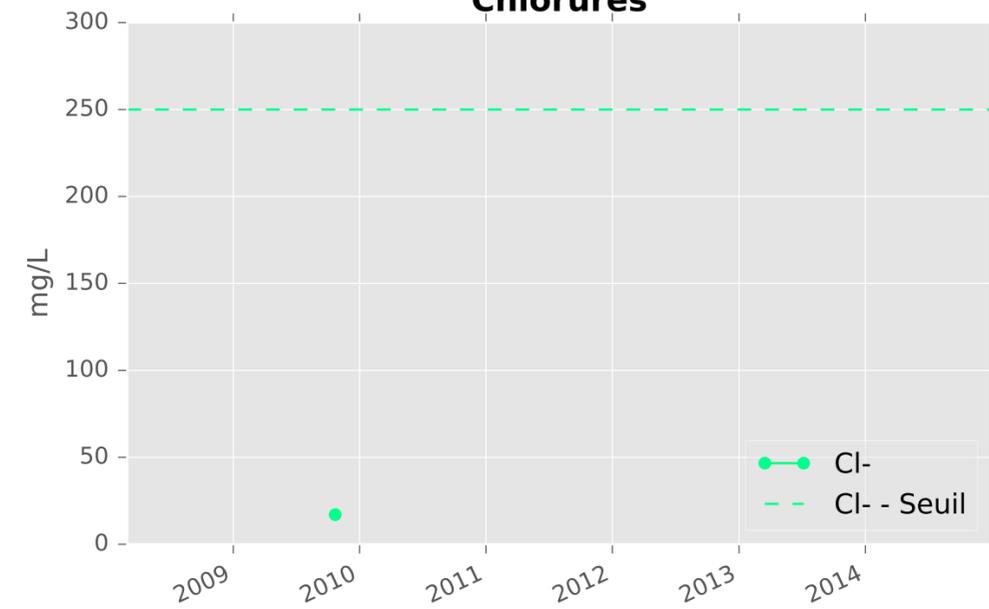
Conductivité



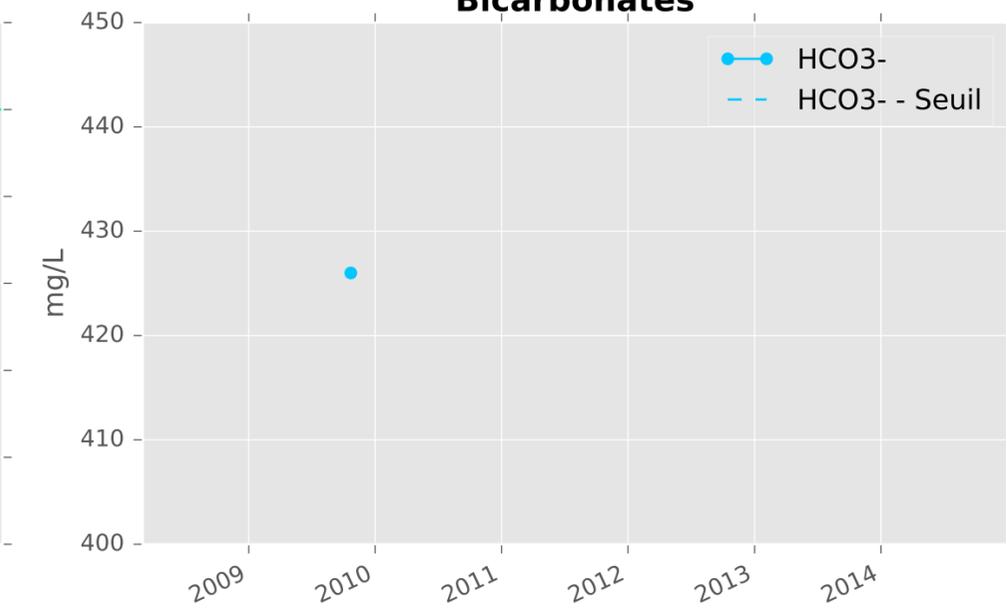
Sulfates



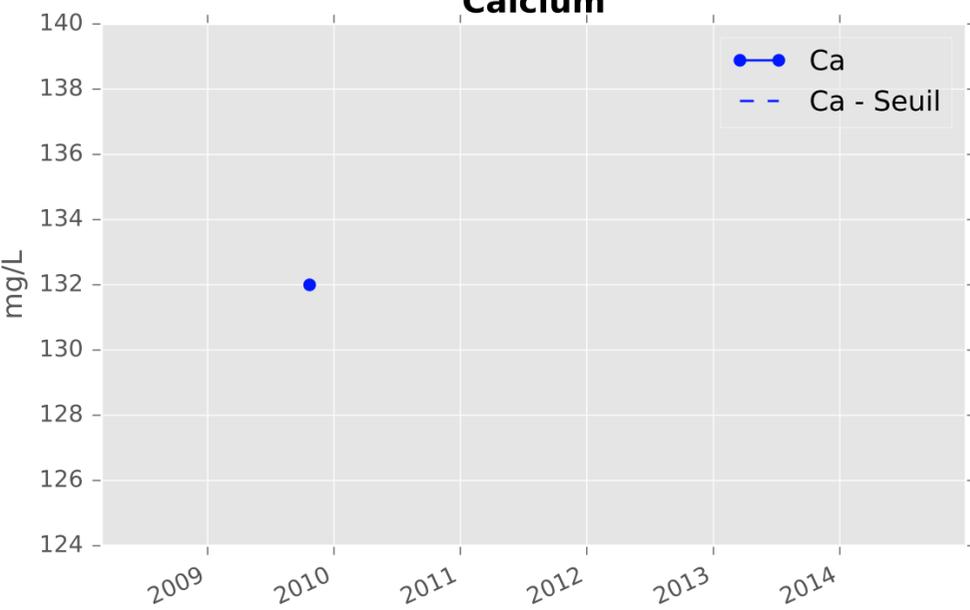
Chlorures



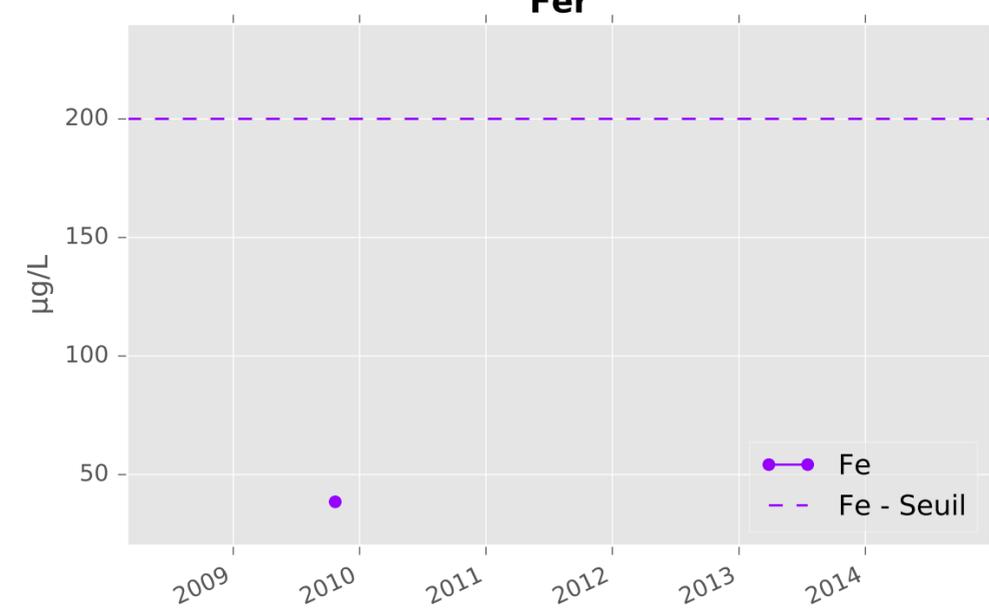
Bicarbonates



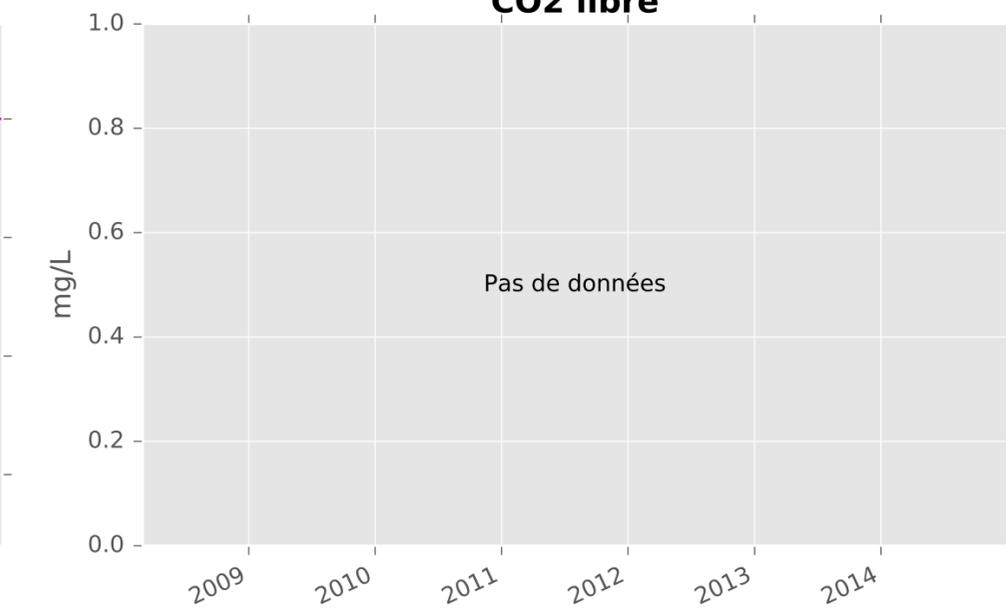
Calcium



Fer

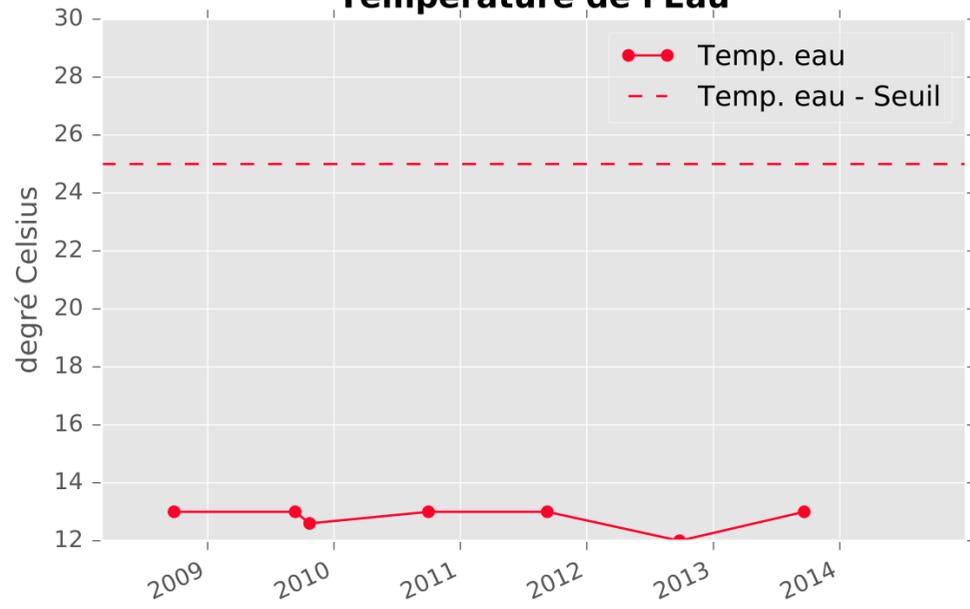


CO2 libre

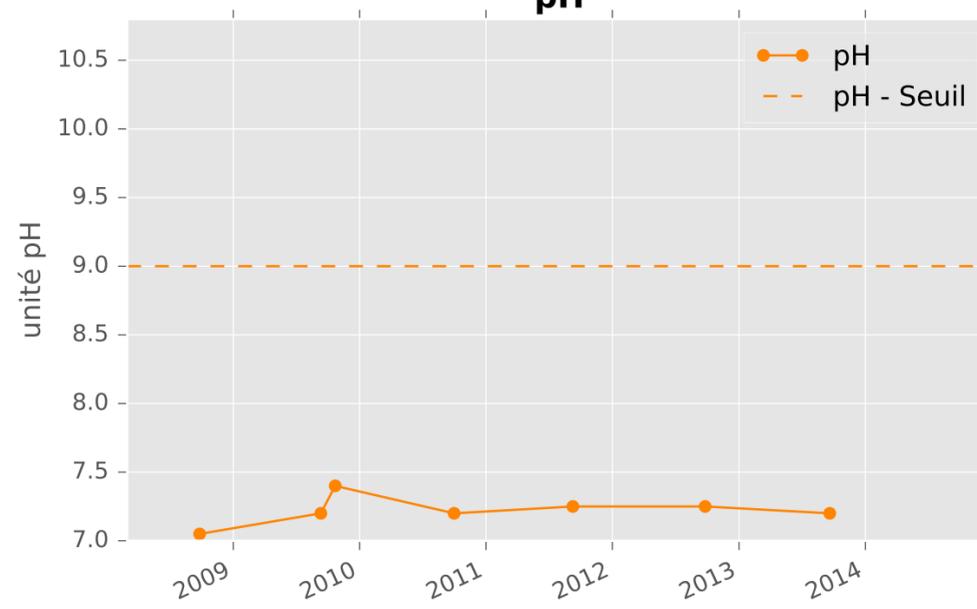


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0132 - C11 - Piézomètre P1 St Pierremont

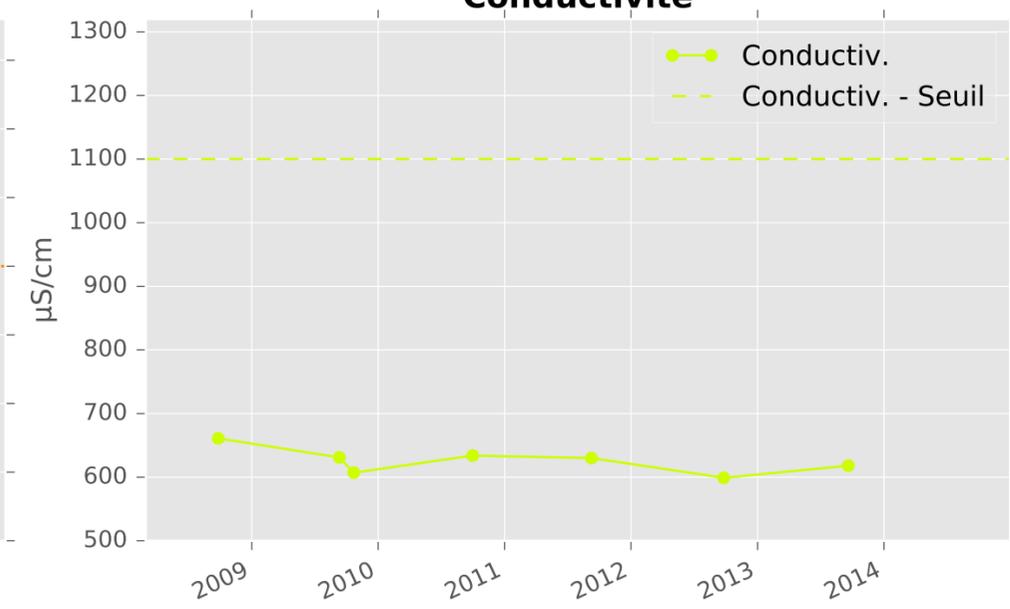
Température de l'Eau



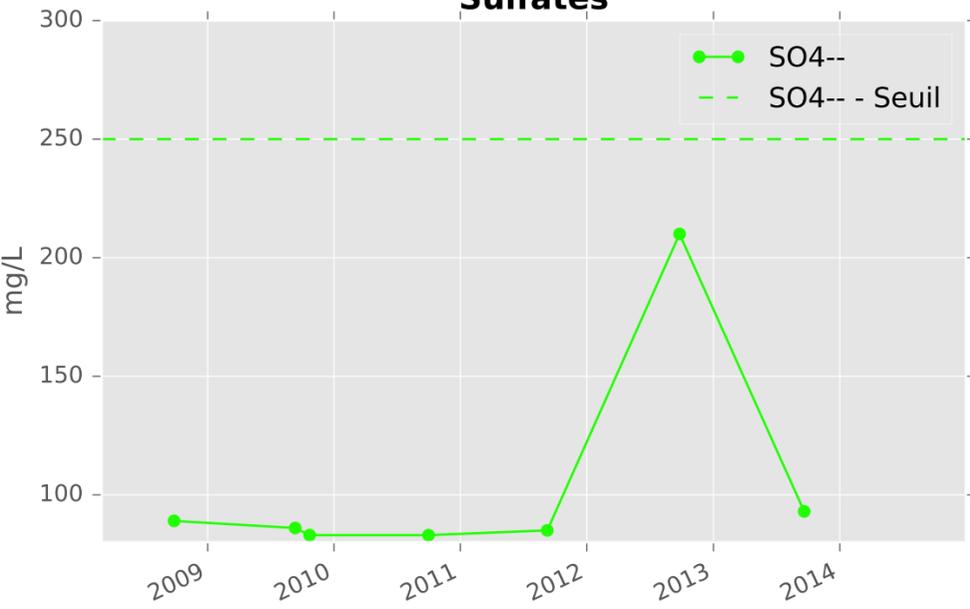
pH



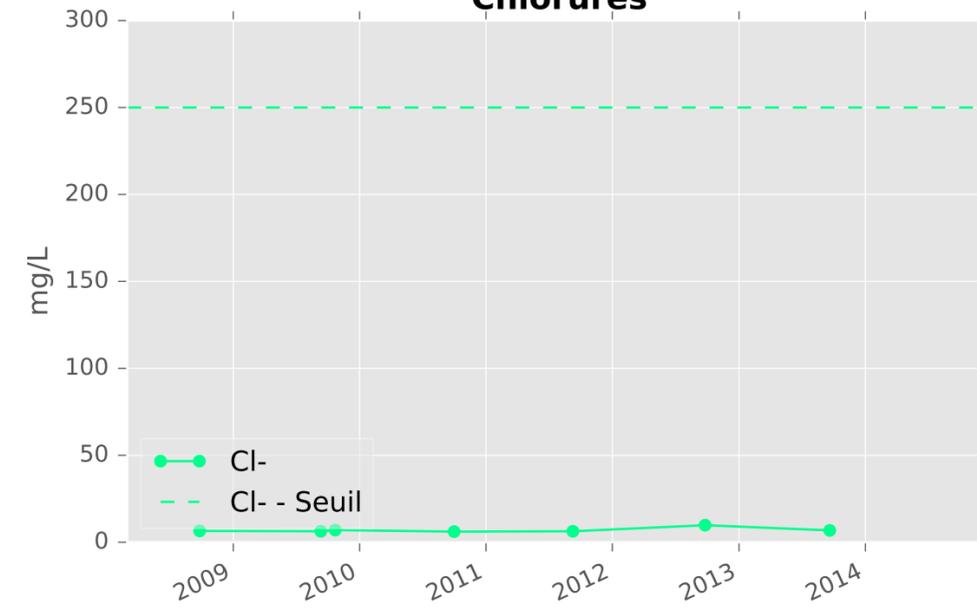
Conductivité



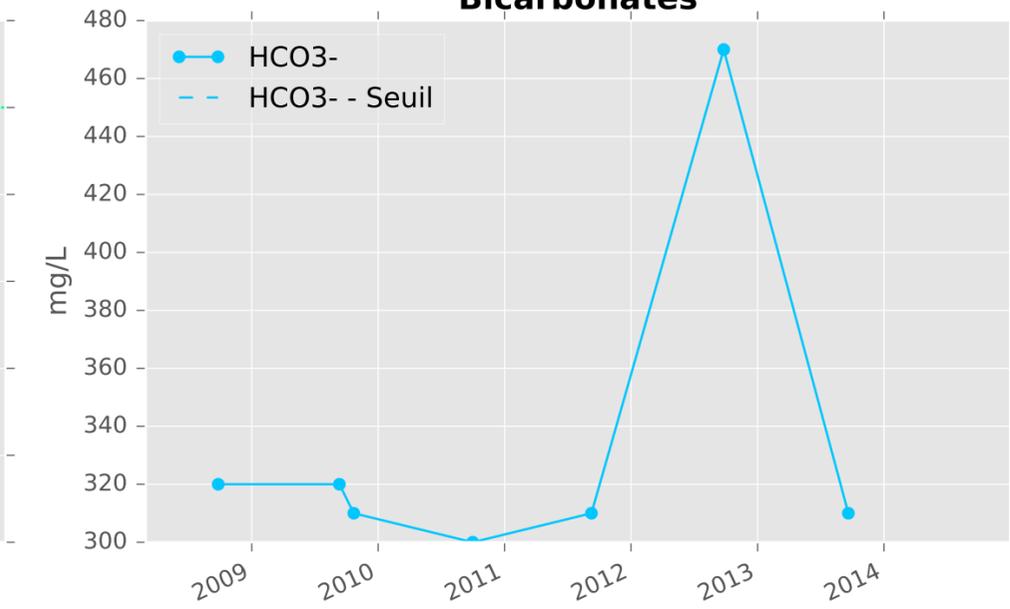
Sulfates



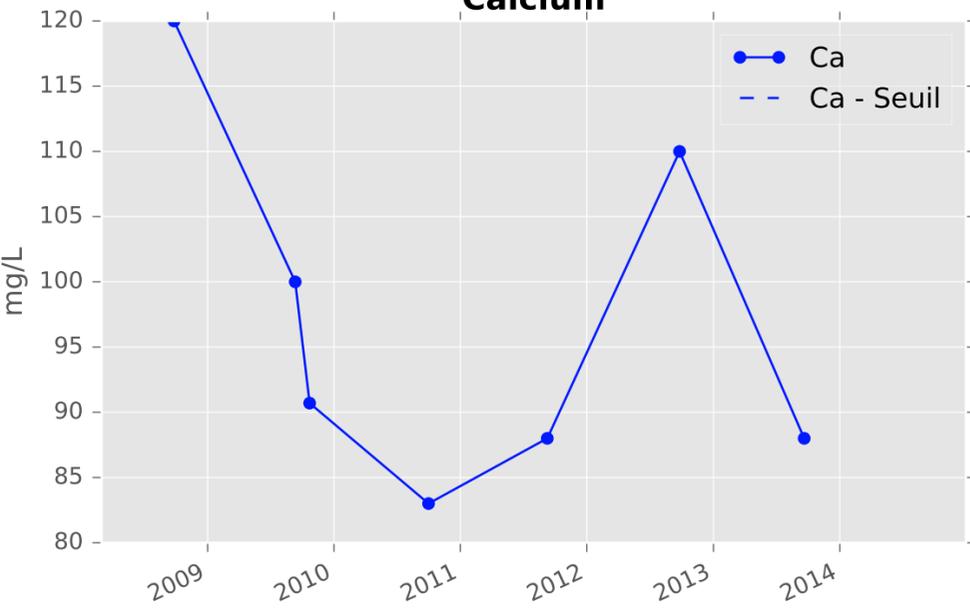
Chlorures



Bicarbonates



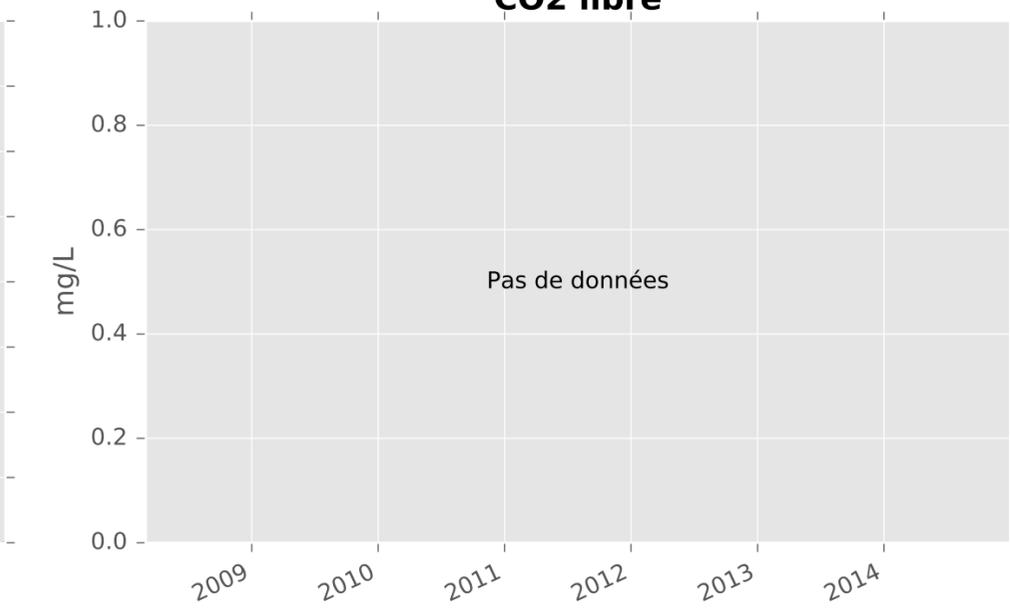
Calcium



Fer

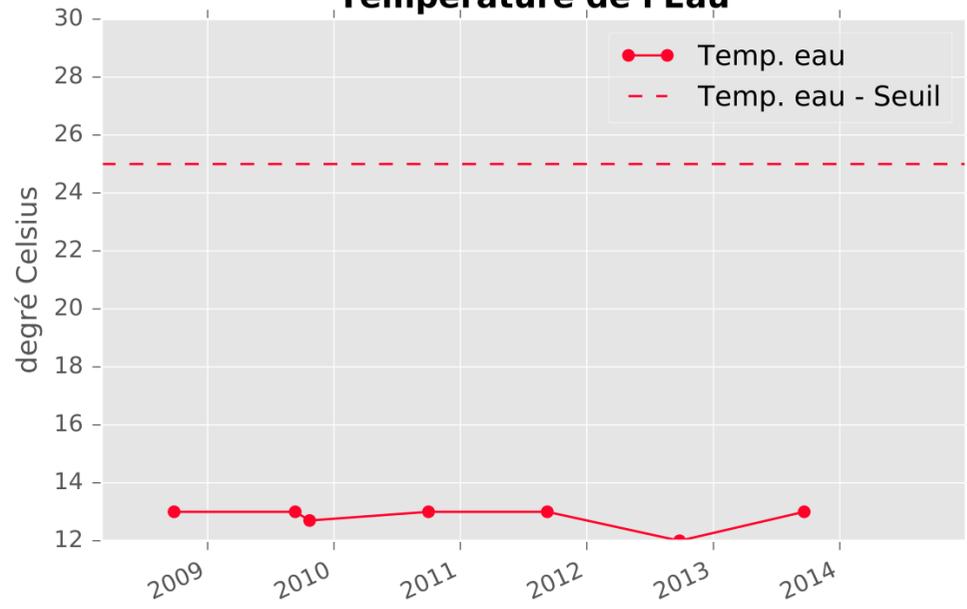


CO2 libre

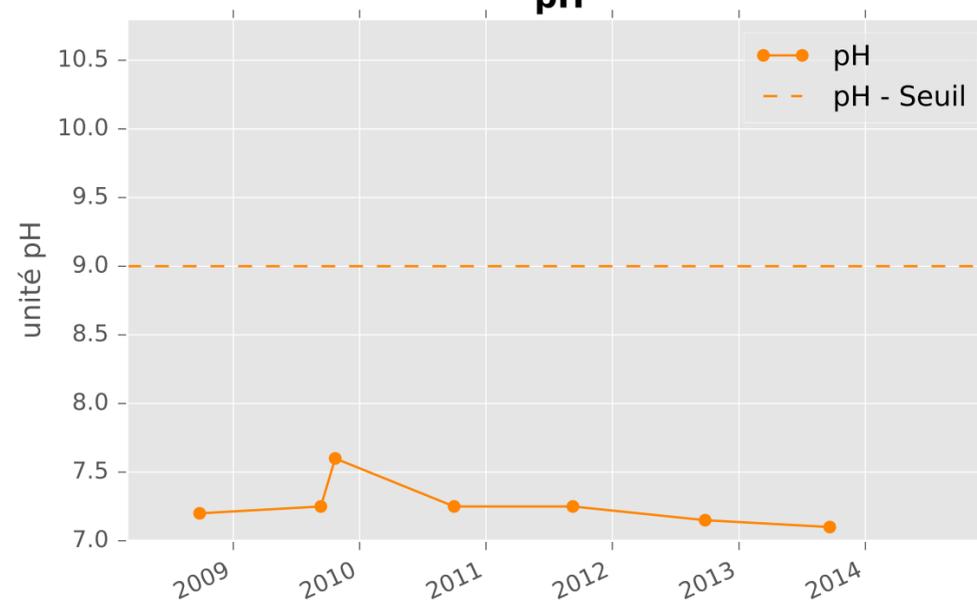


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0133 - C12 - Piézomètre P2 St Pierremont

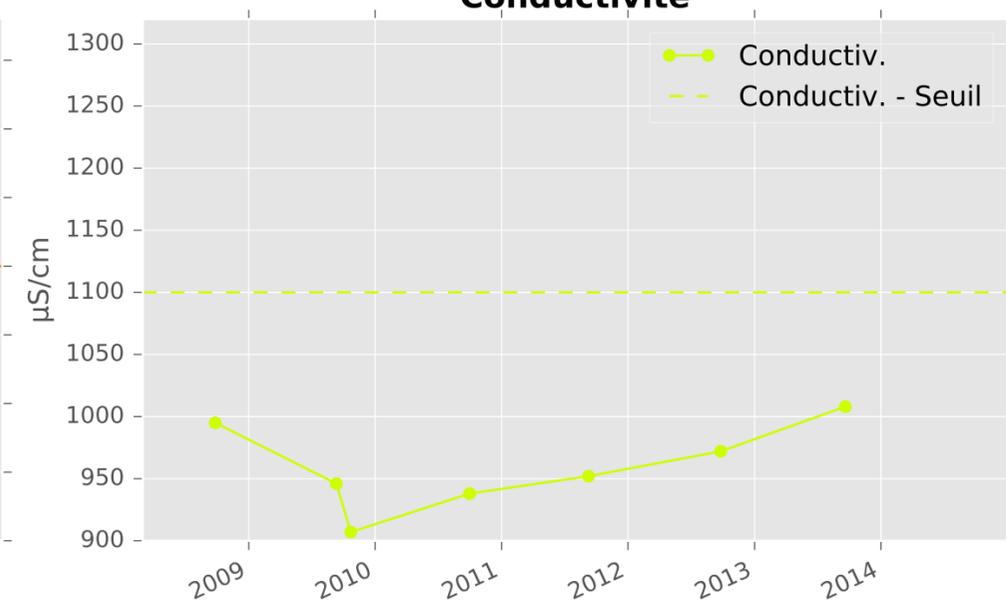
Température de l'Eau



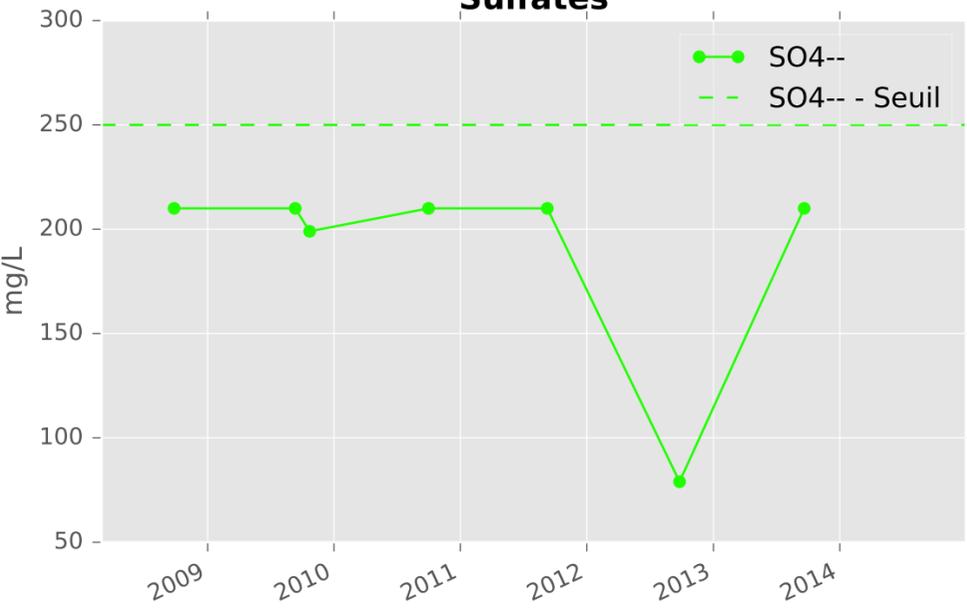
pH



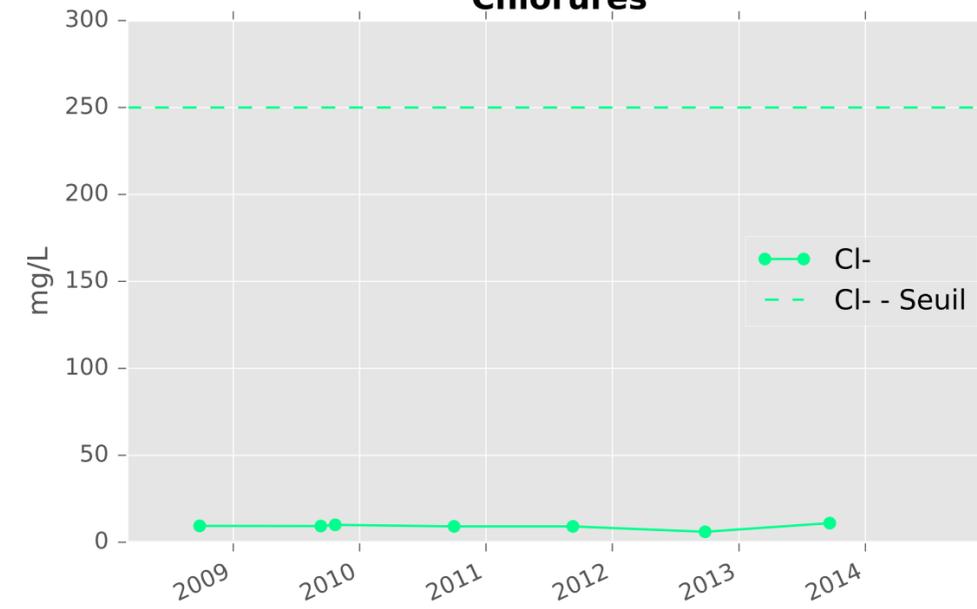
Conductivité



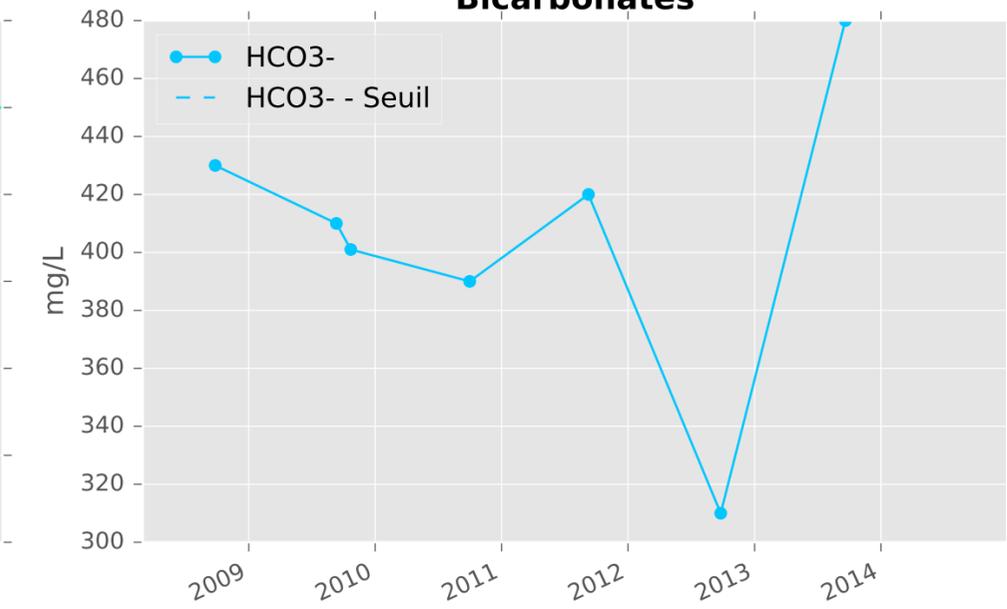
Sulfates



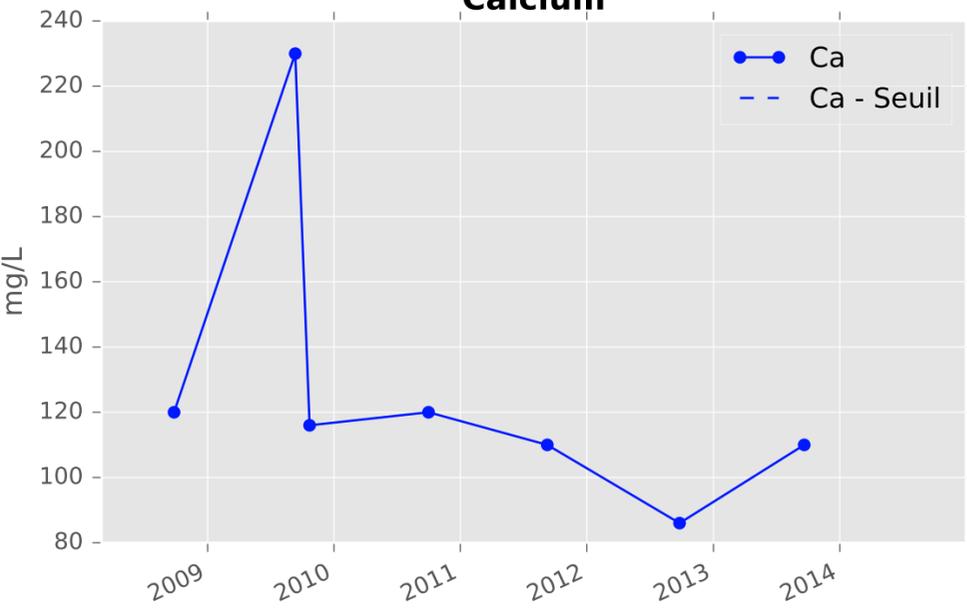
Chlorures



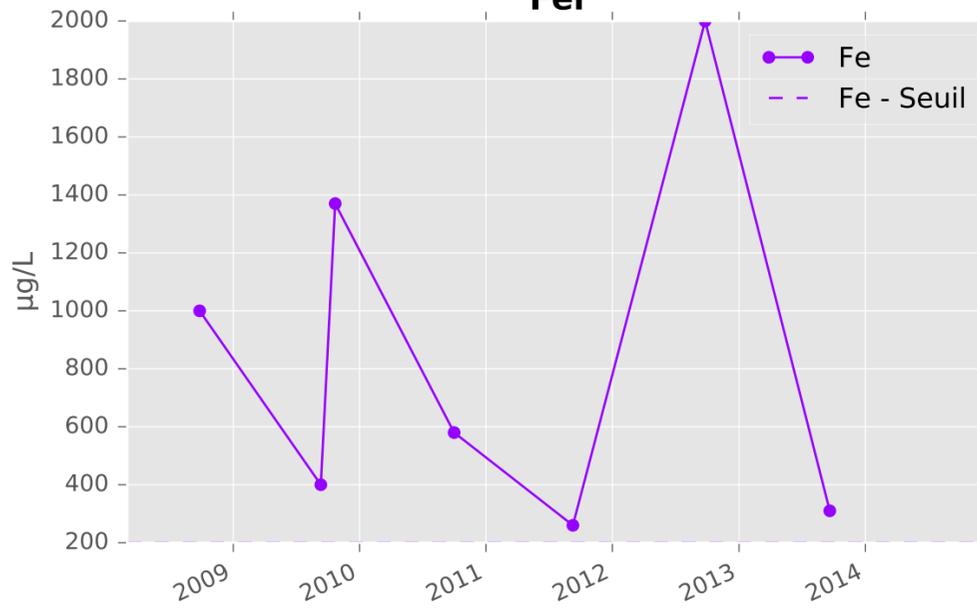
Bicarbonates



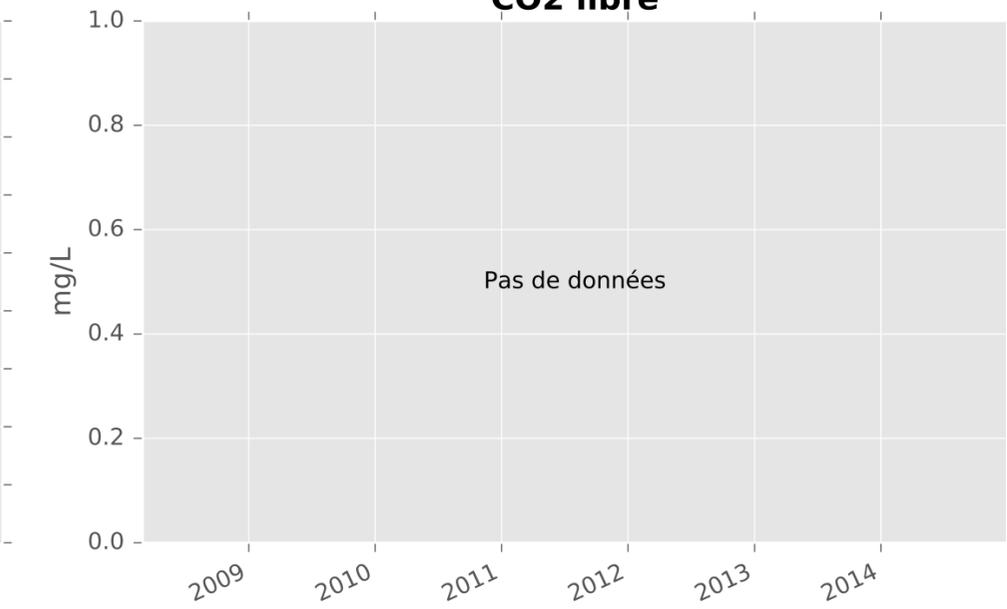
Calcium



Fer

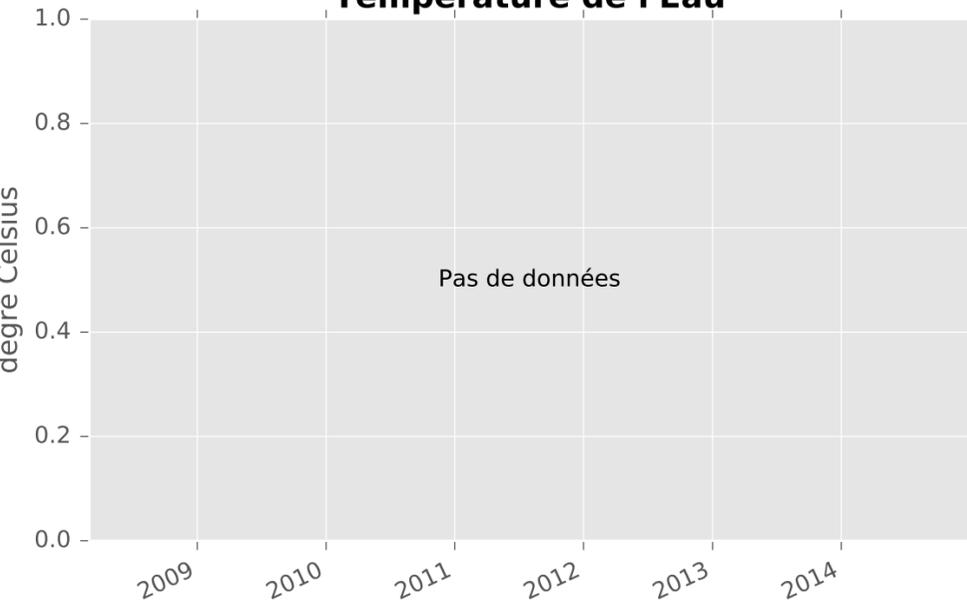


CO2 libre

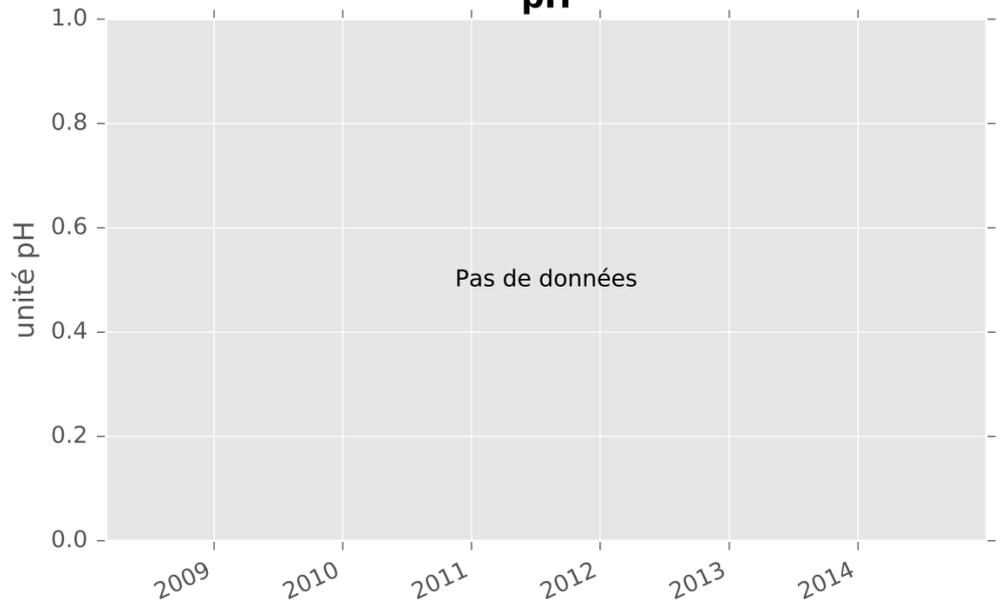


CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01372X0207 - C19 - Source Mance

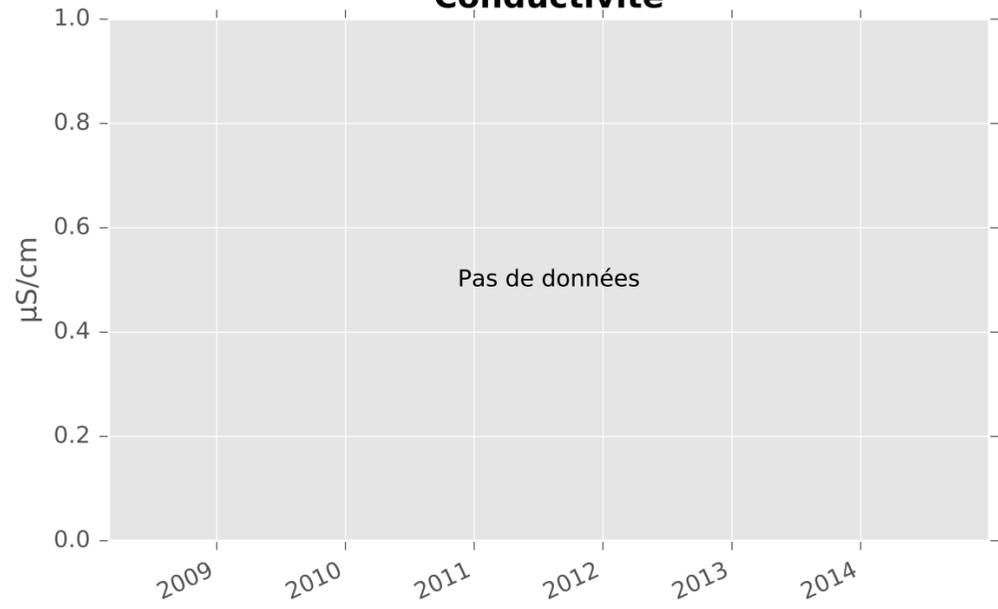
Température de l'Eau



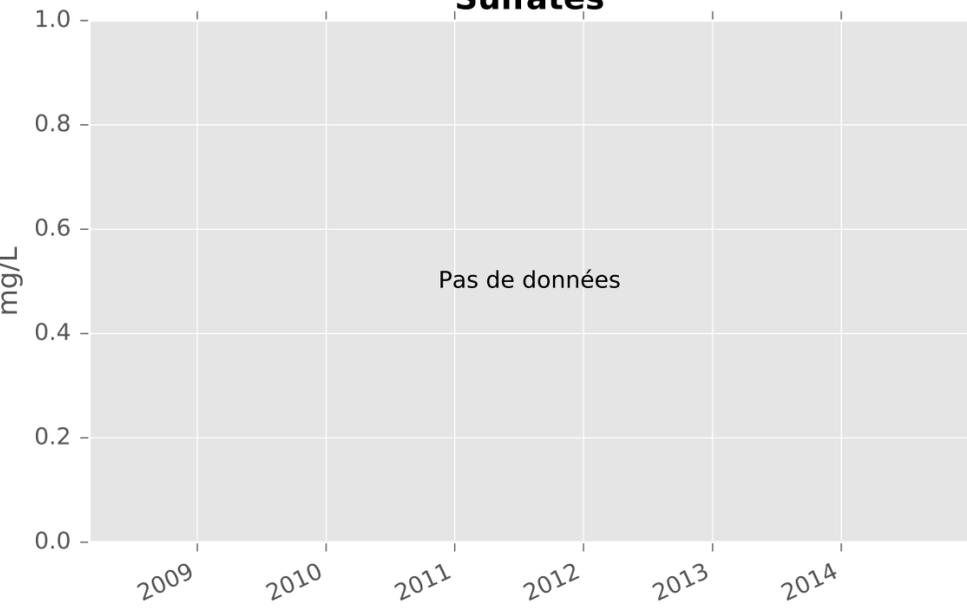
pH



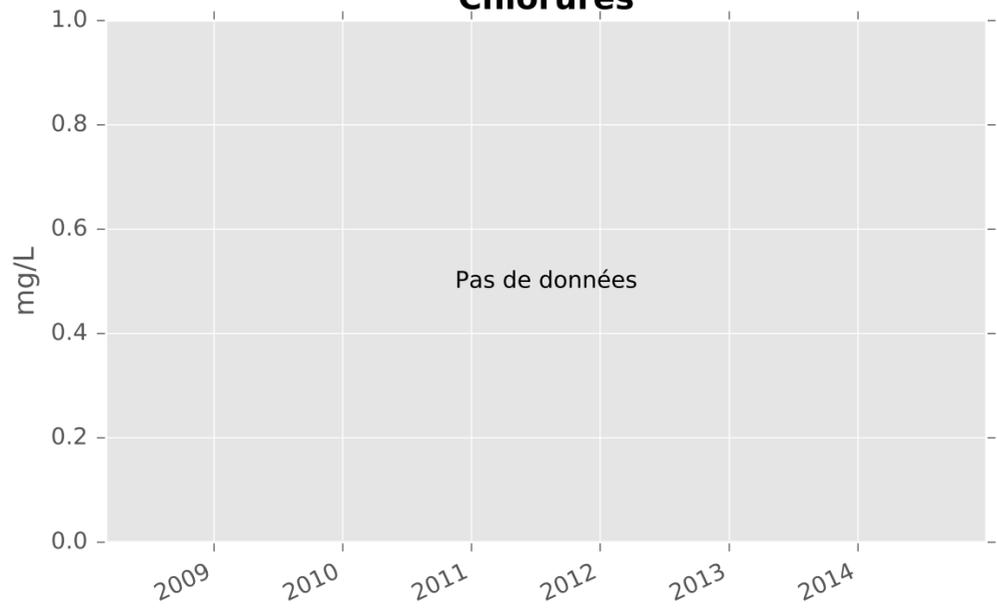
Conductivité



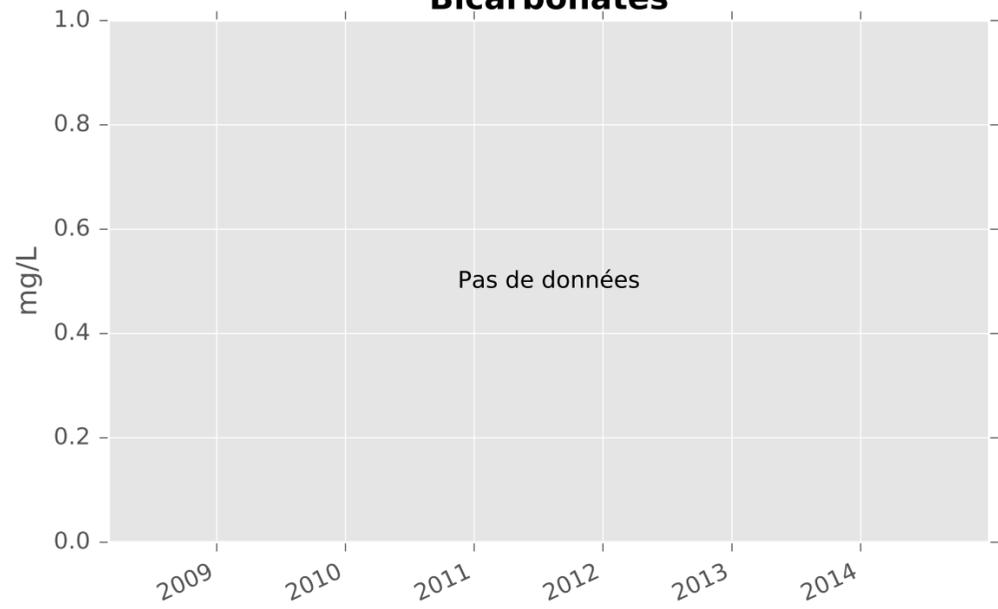
Sulfates



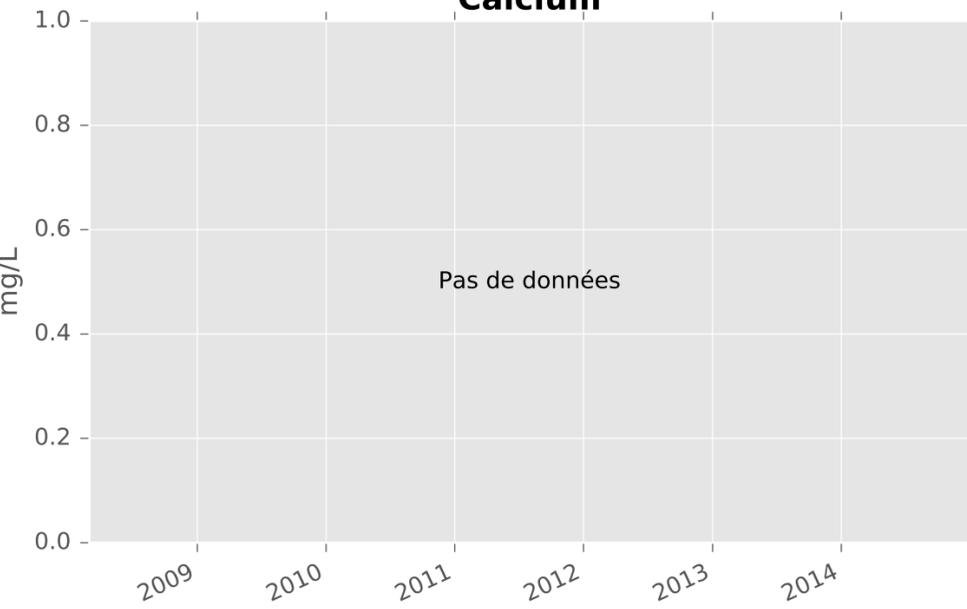
Chlorures



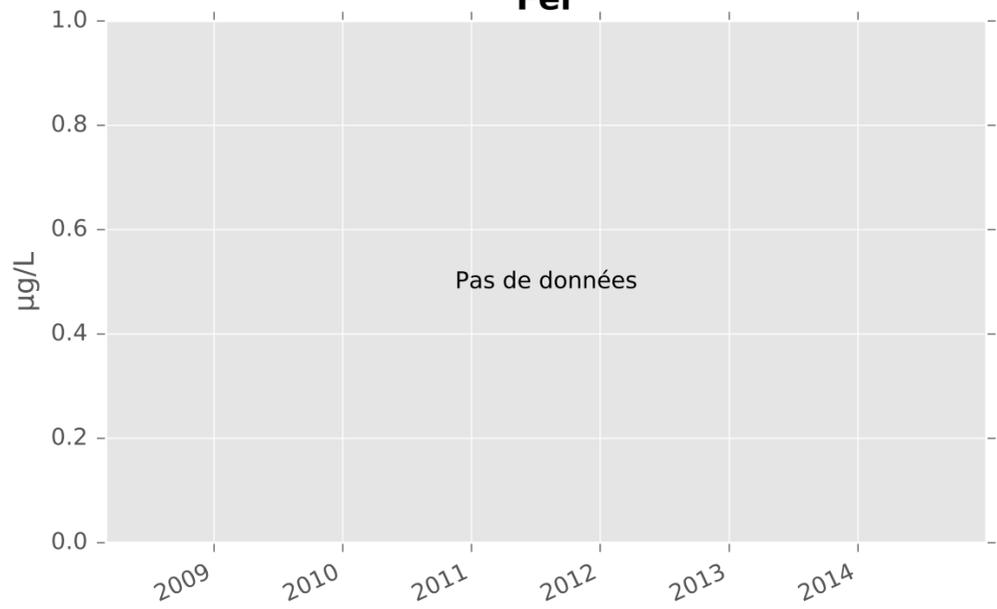
Bicarbonates



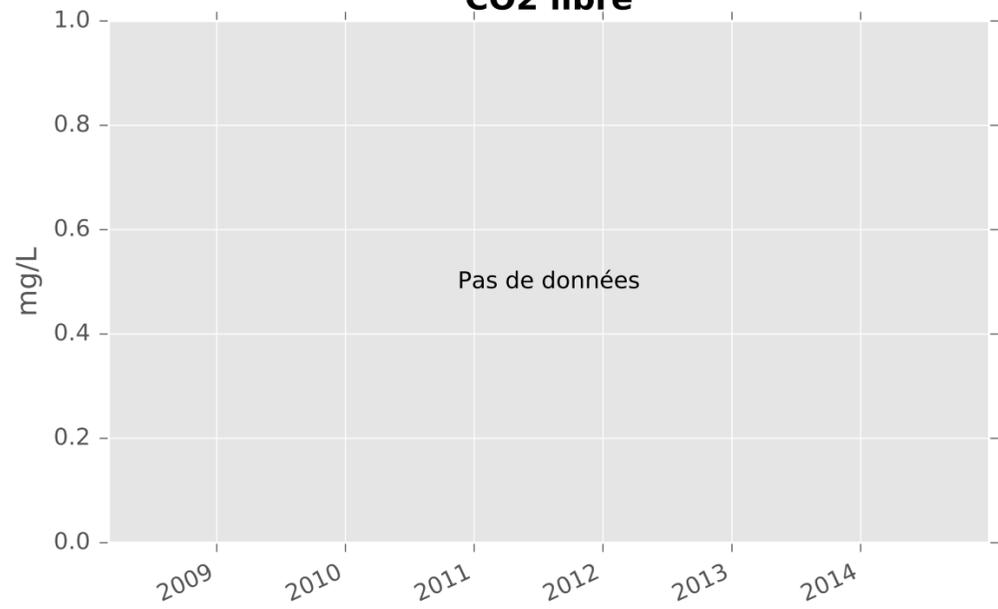
Calcium



Fer

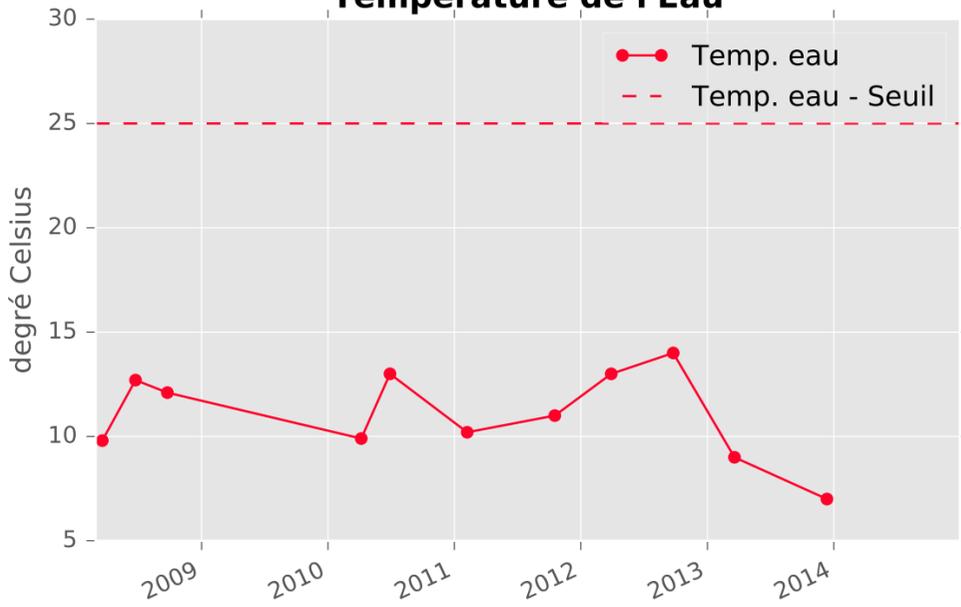


CO2 libre

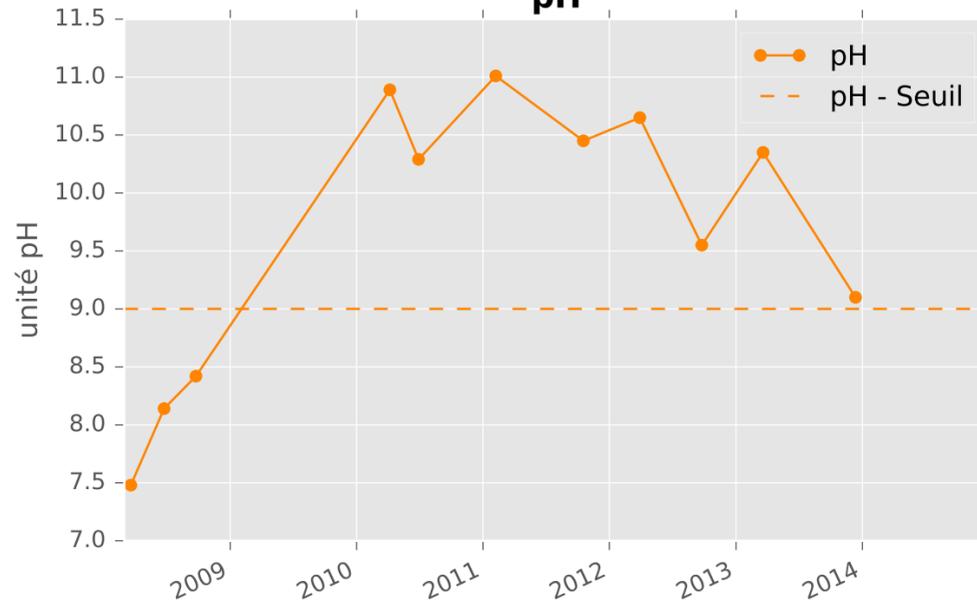


CALCAIRES DU DOGGER NORD - 01137X0173 - N12 - Piézomètre Cheminée Sud Dogger inférieur

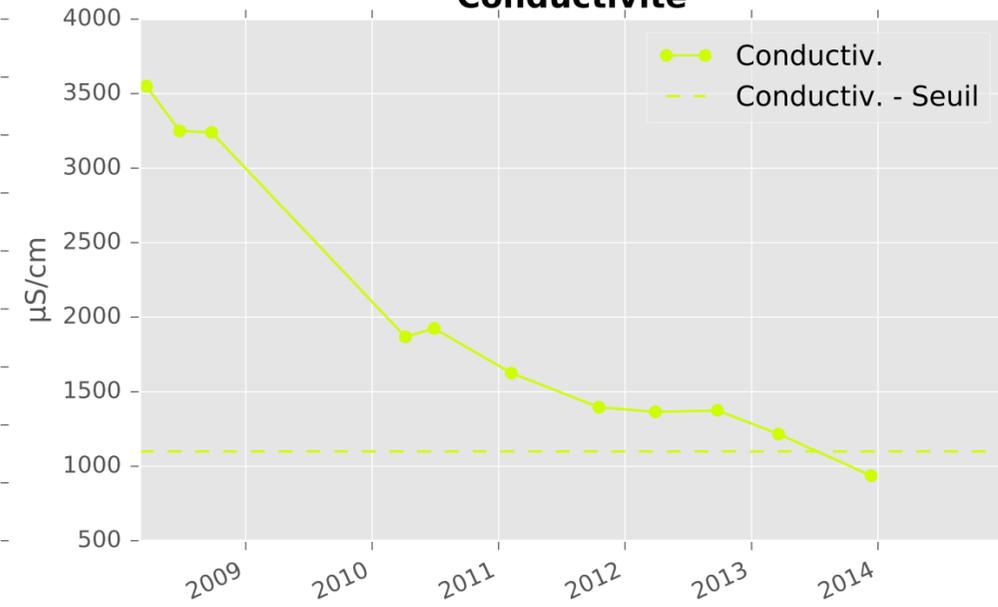
Température de l'Eau



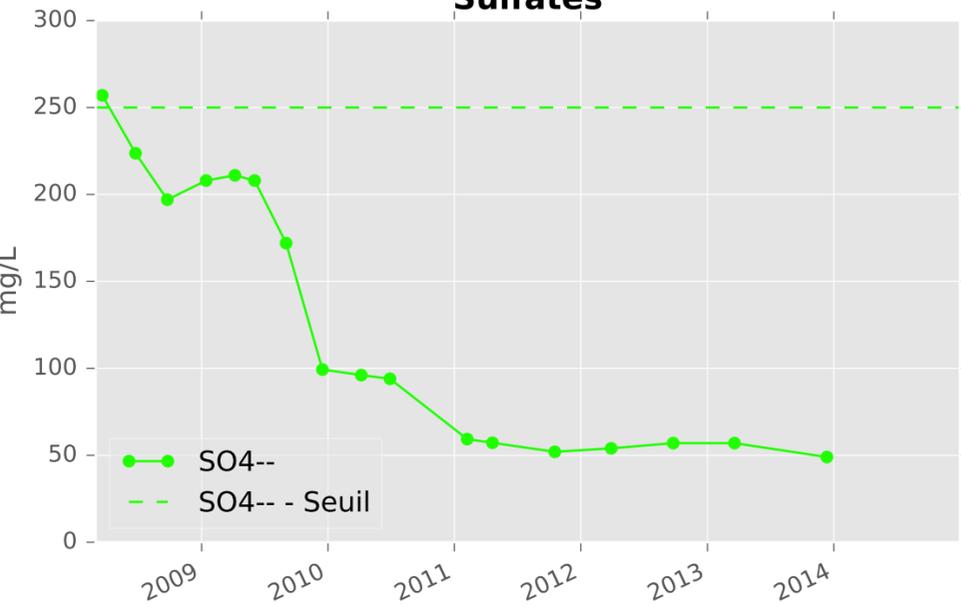
pH



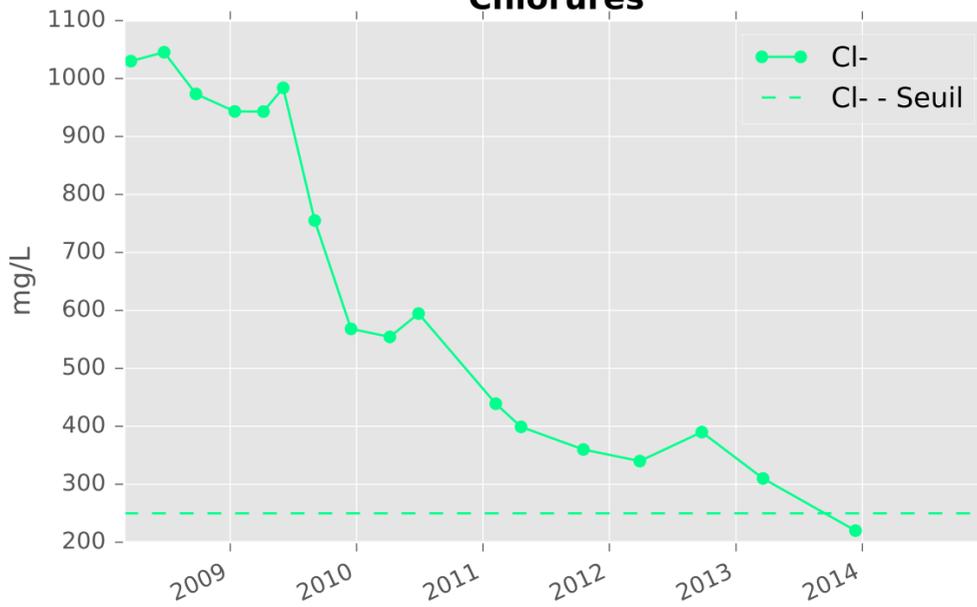
Conductivité



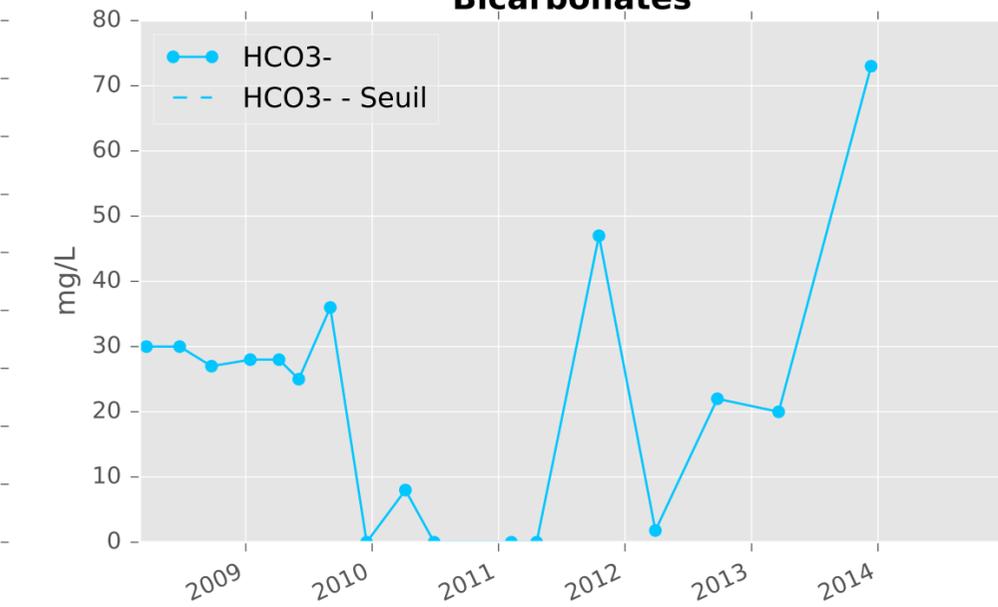
Sulfates



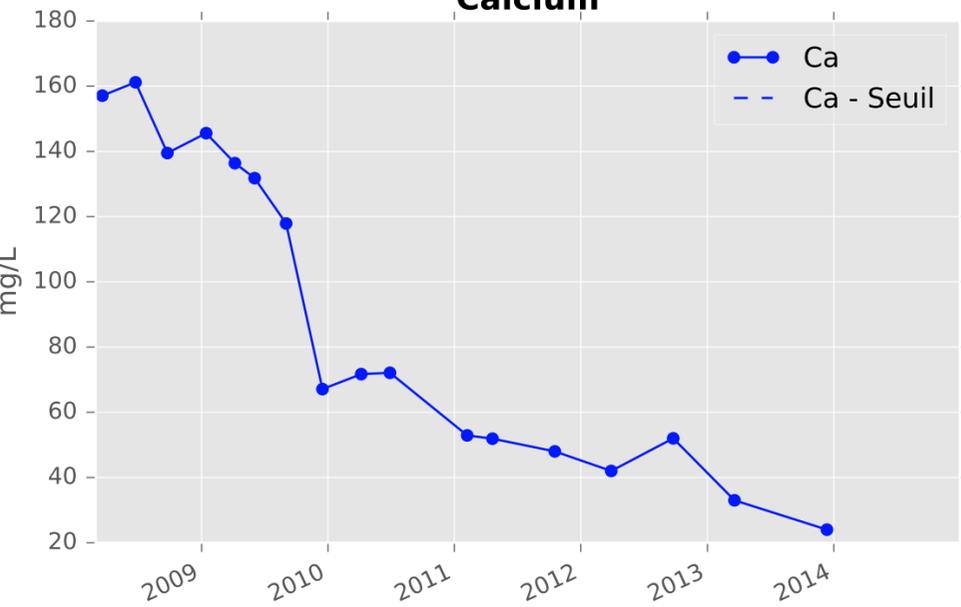
Chlorures



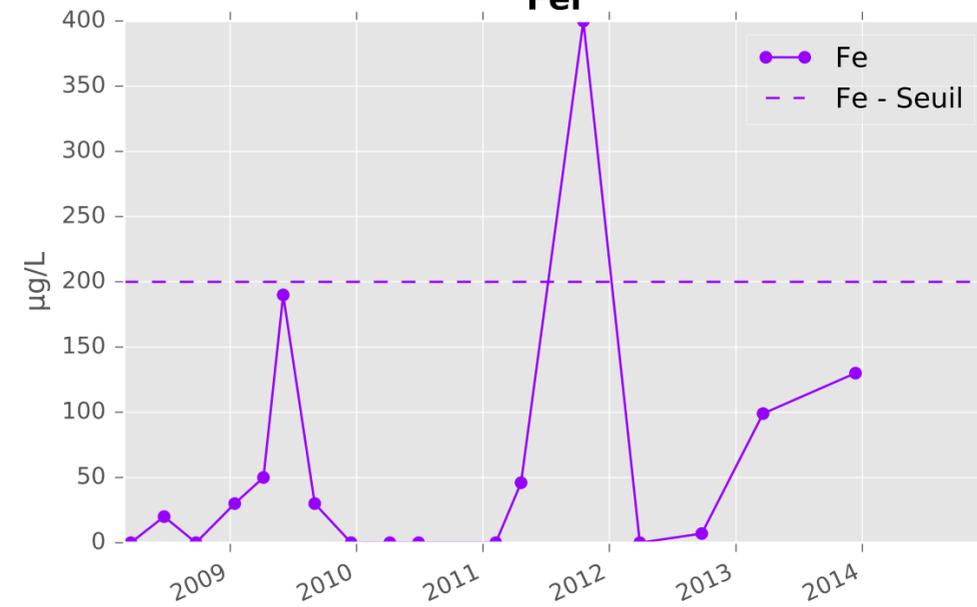
Bicarbonates



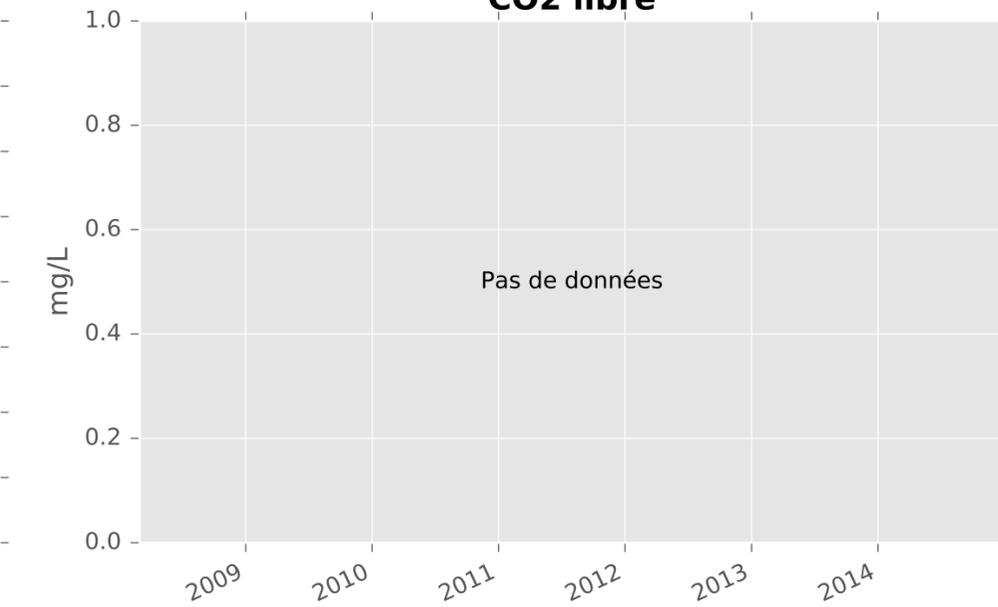
Calcium



Fer

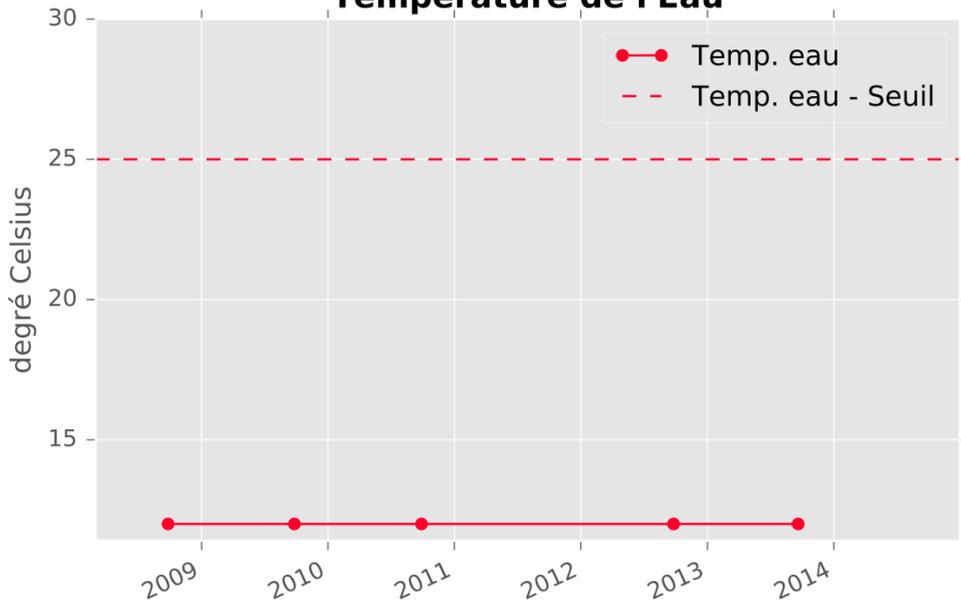


CO2 libre



CALCAIRES DU DOGGER NORD - 01137X0160 - N20 - Piézomètre Fontoy nord

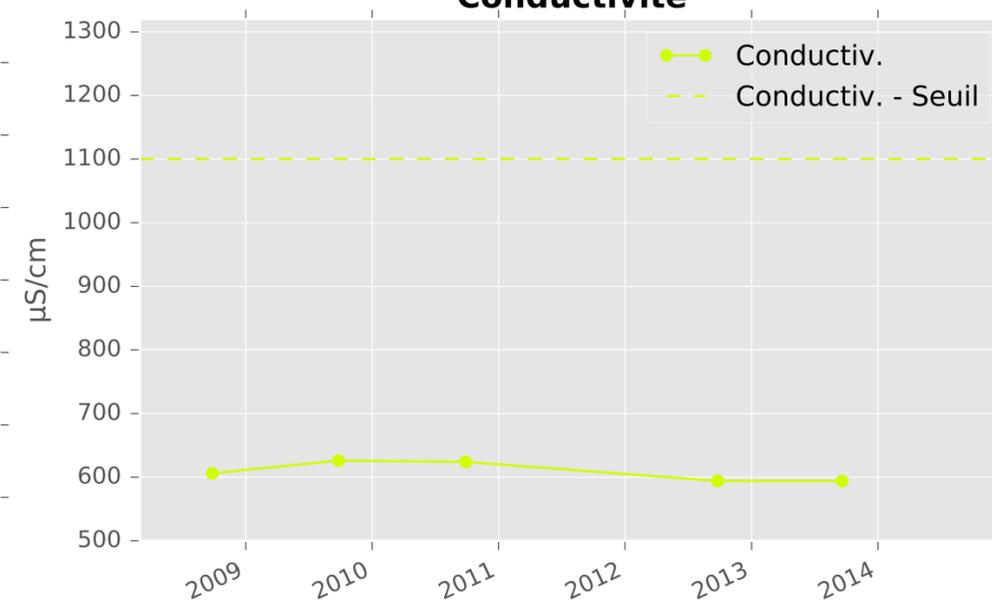
Température de l'Eau



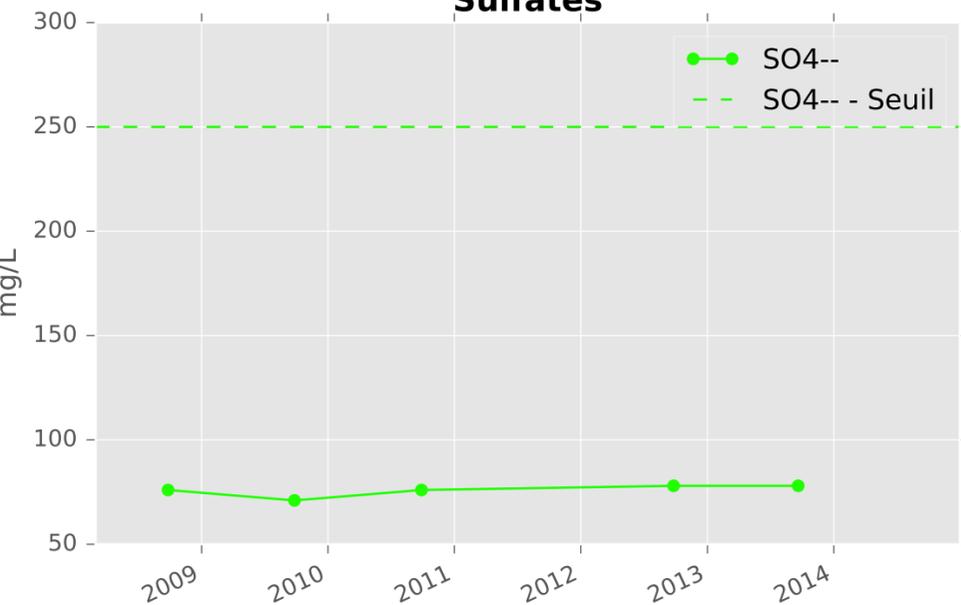
pH



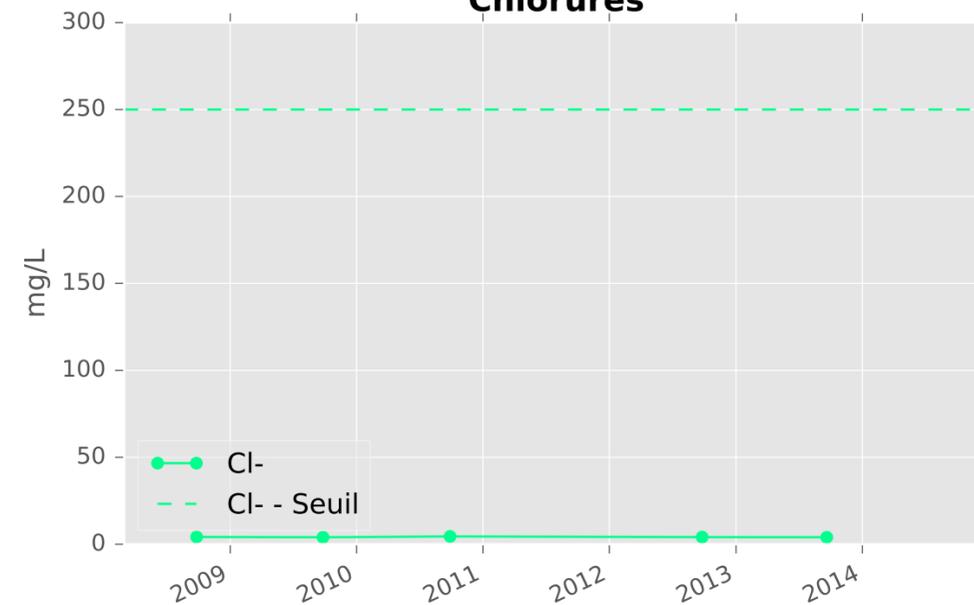
Conductivité



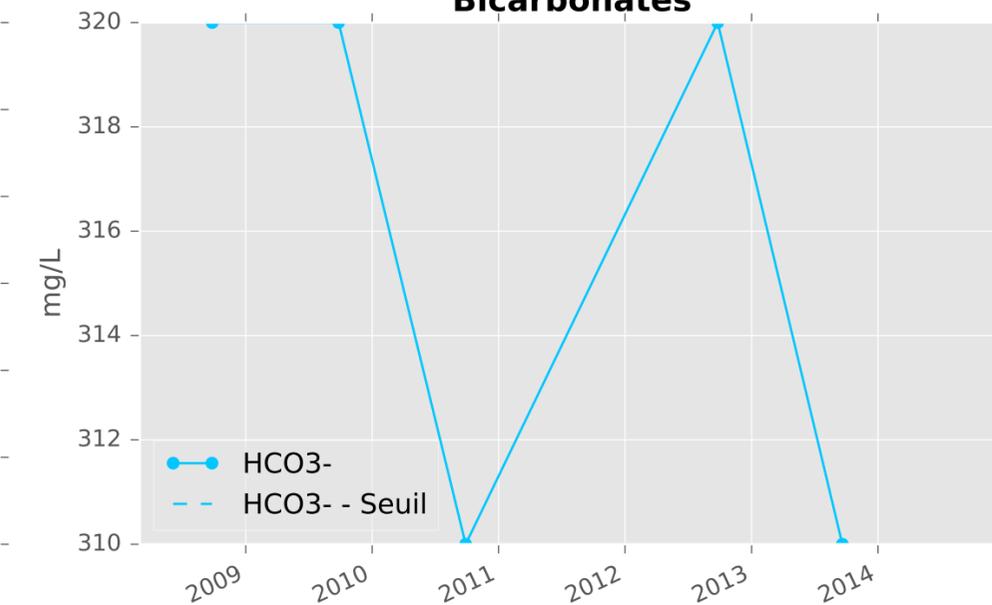
Sulfates



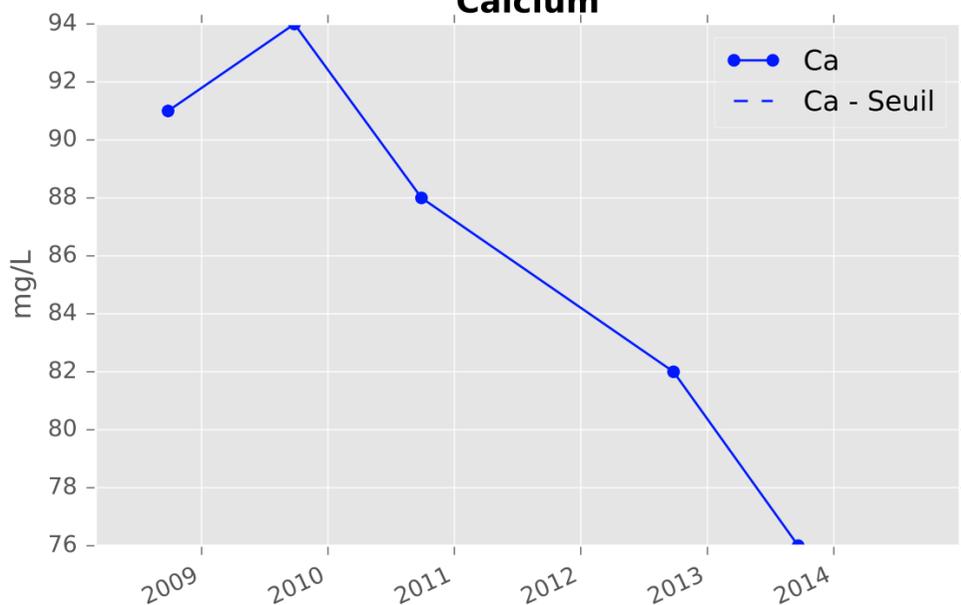
Chlorures



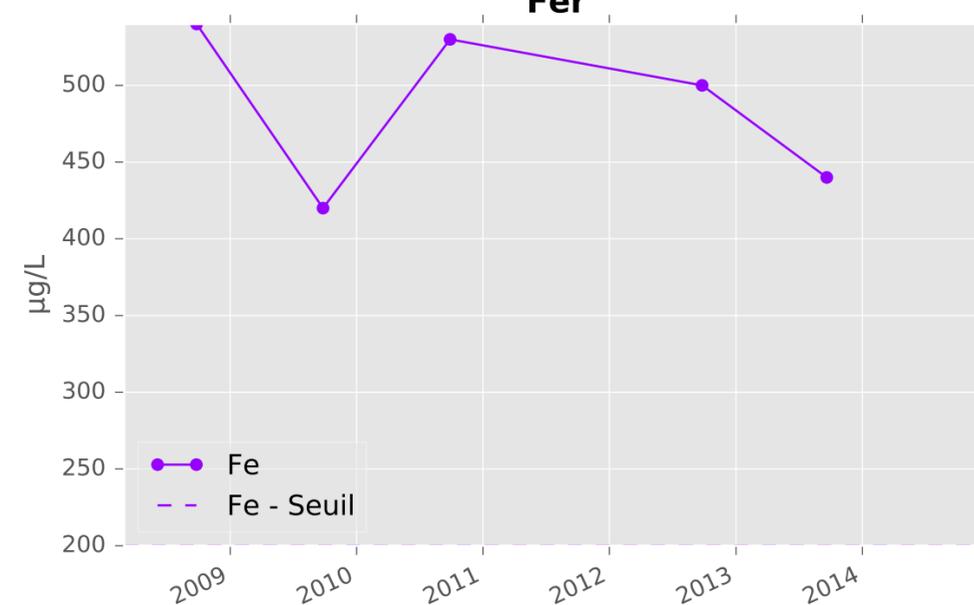
Bicarbonates



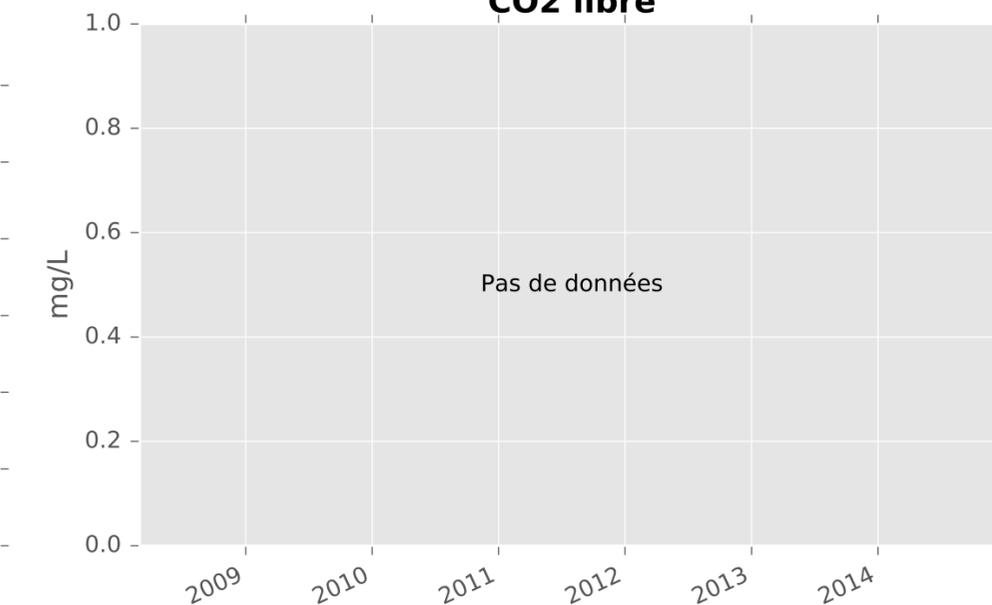
Calcium



Fer

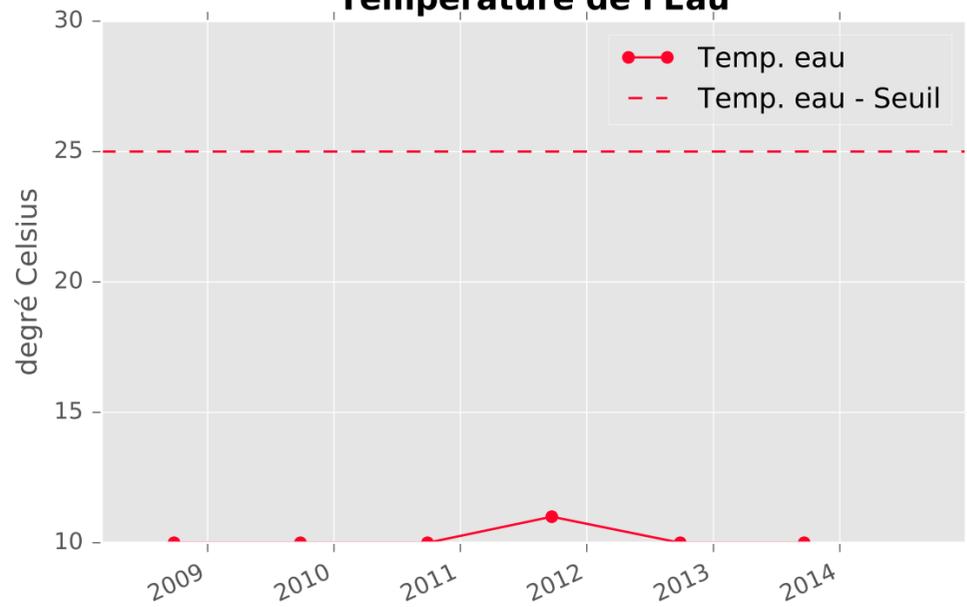


CO2 libre

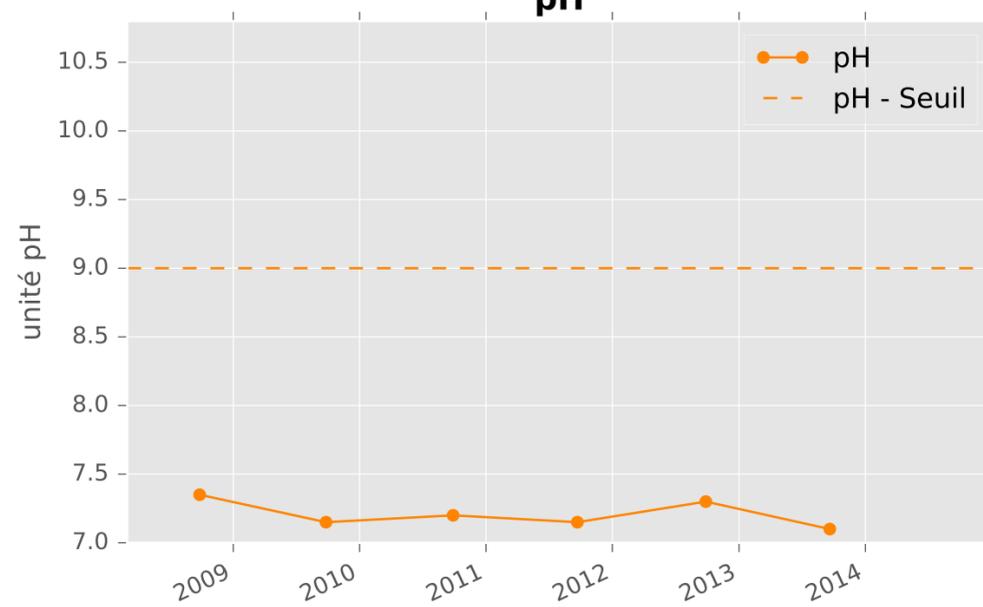


CALCAIRES DU DOGGER NORD - 01137X0159 - N21 - Piézomètre Fontoy sud

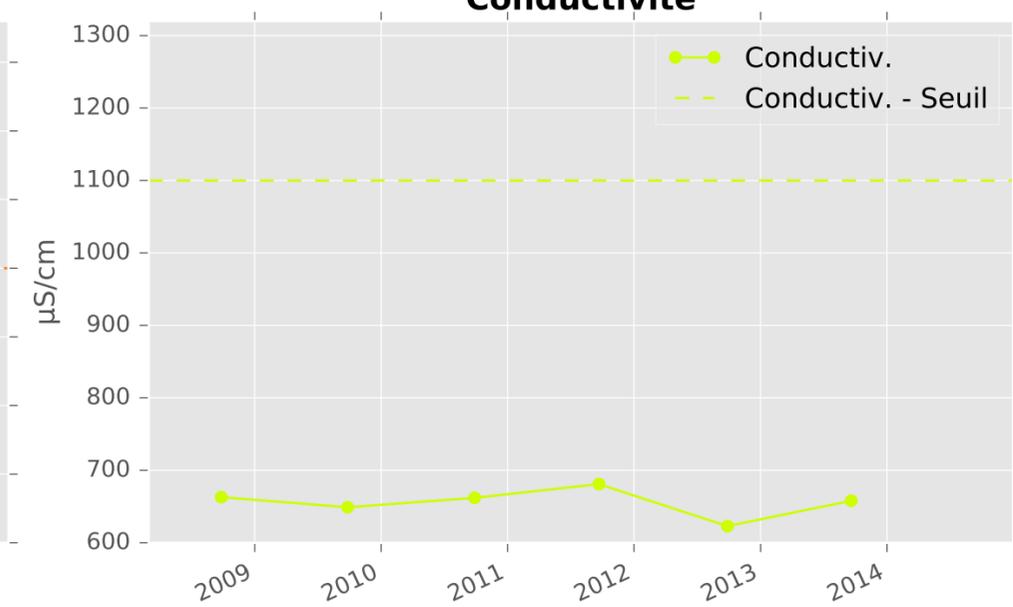
Température de l'Eau



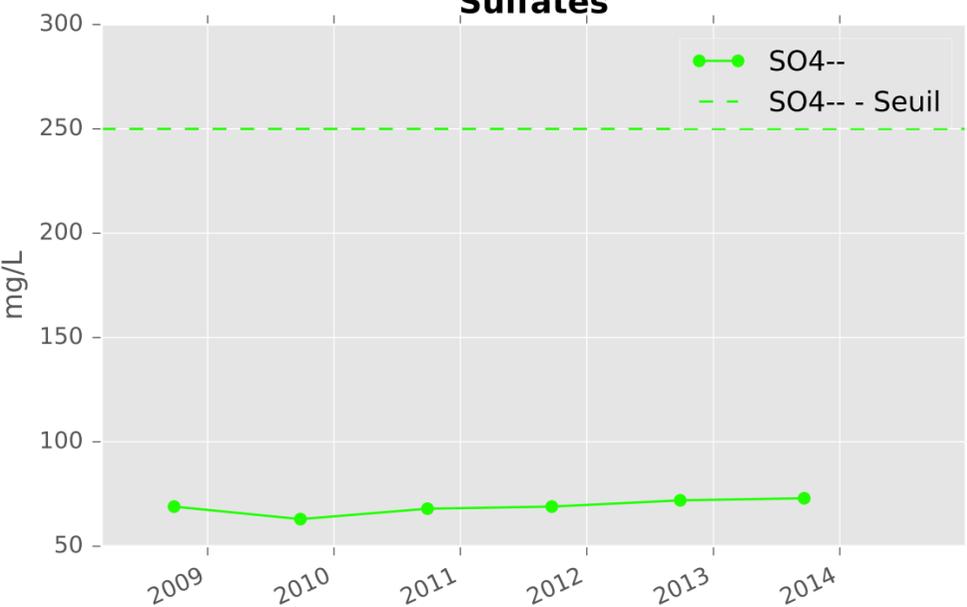
pH



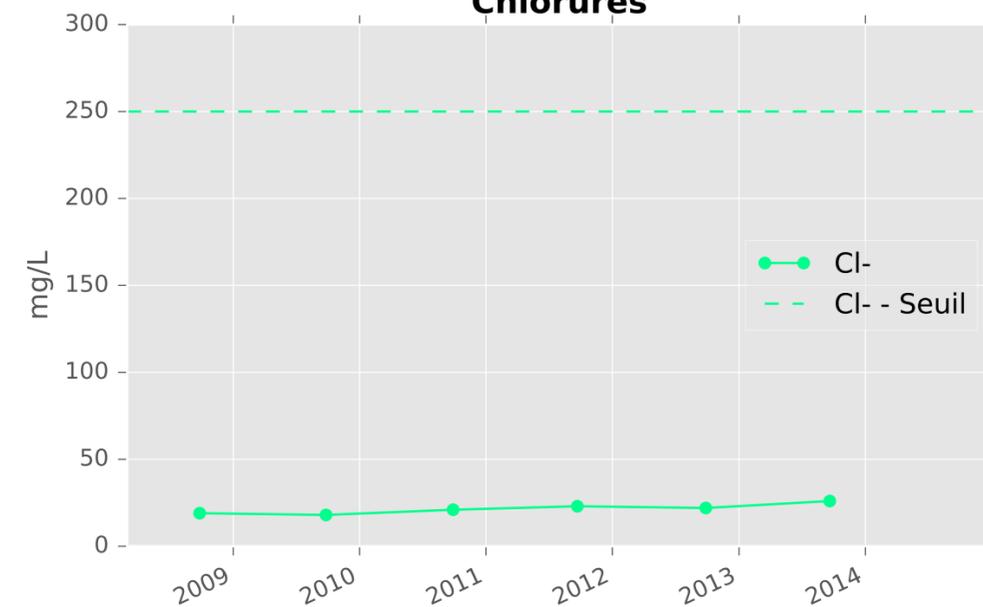
Conductivité



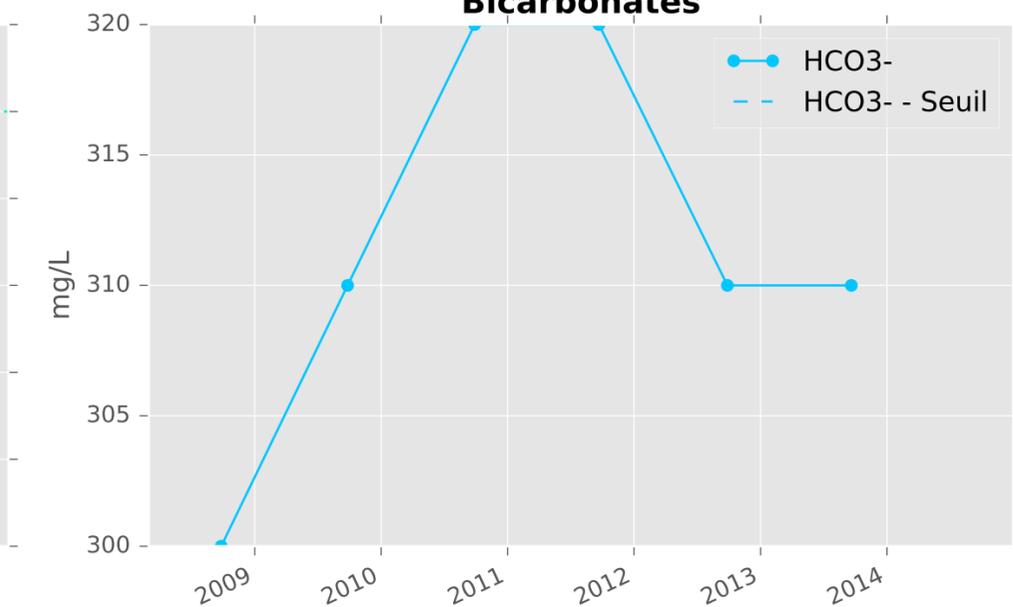
Sulfates



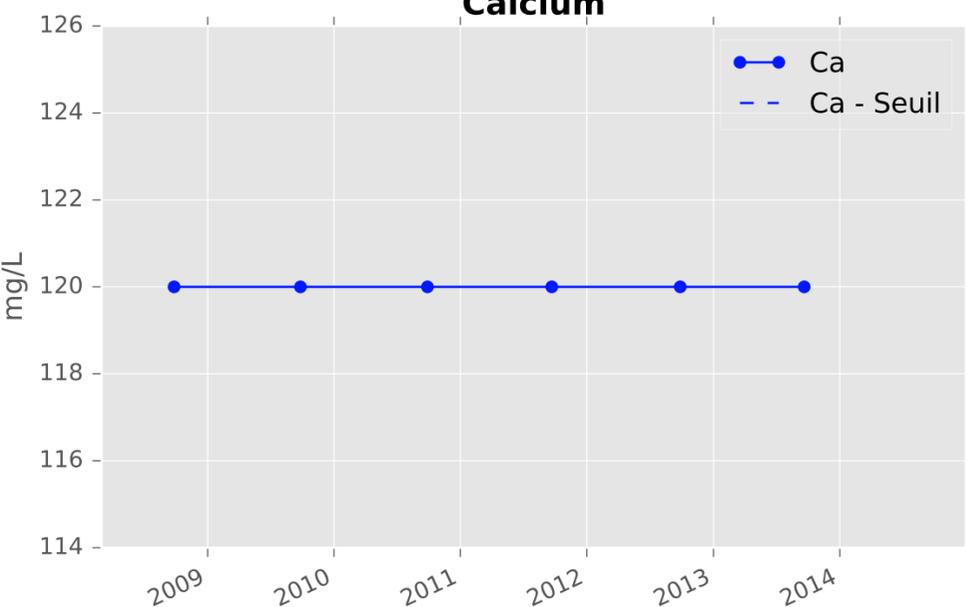
Chlorures



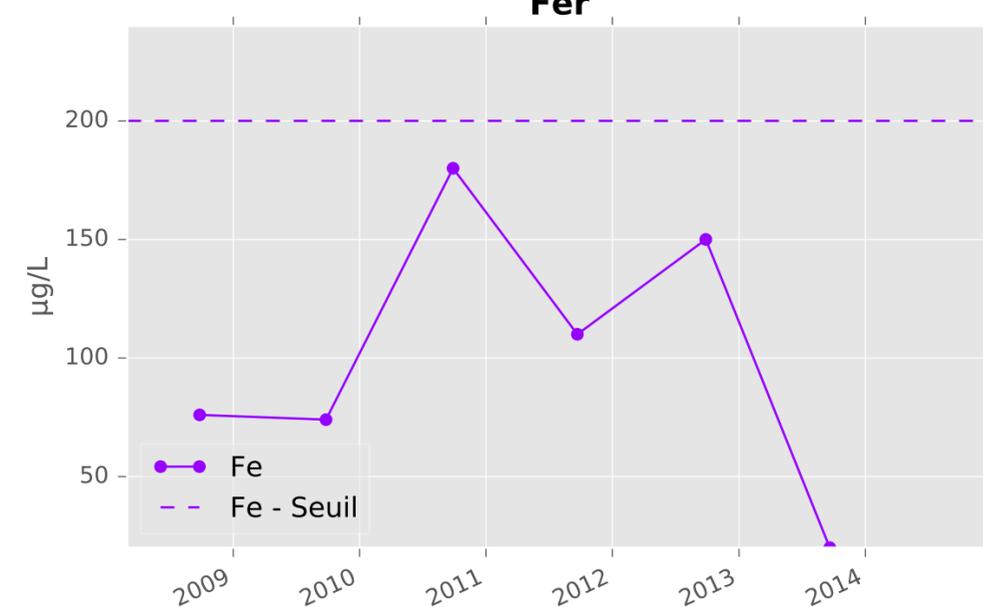
Bicarbonates



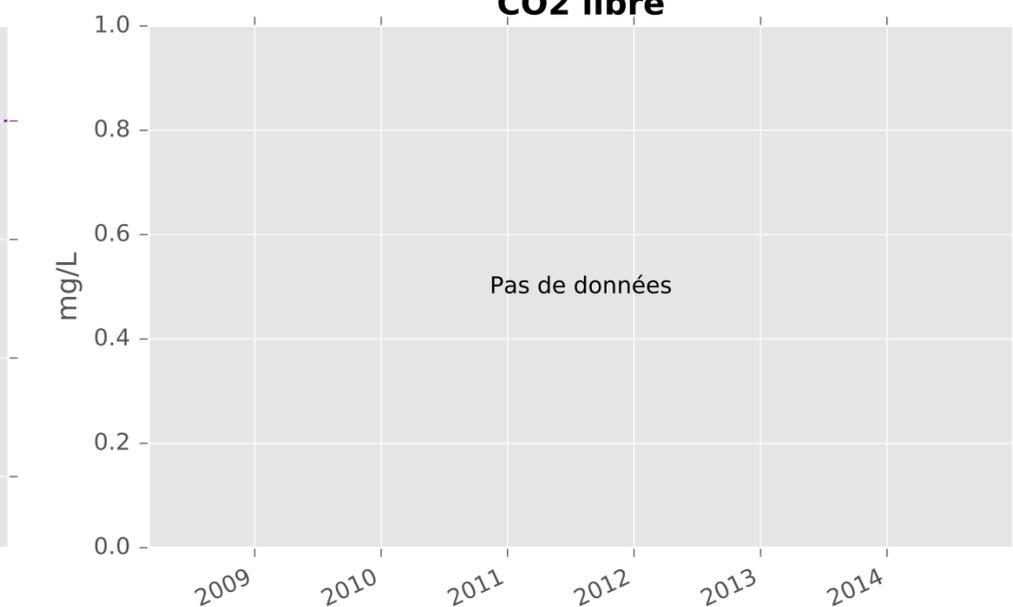
Calcium



Fer

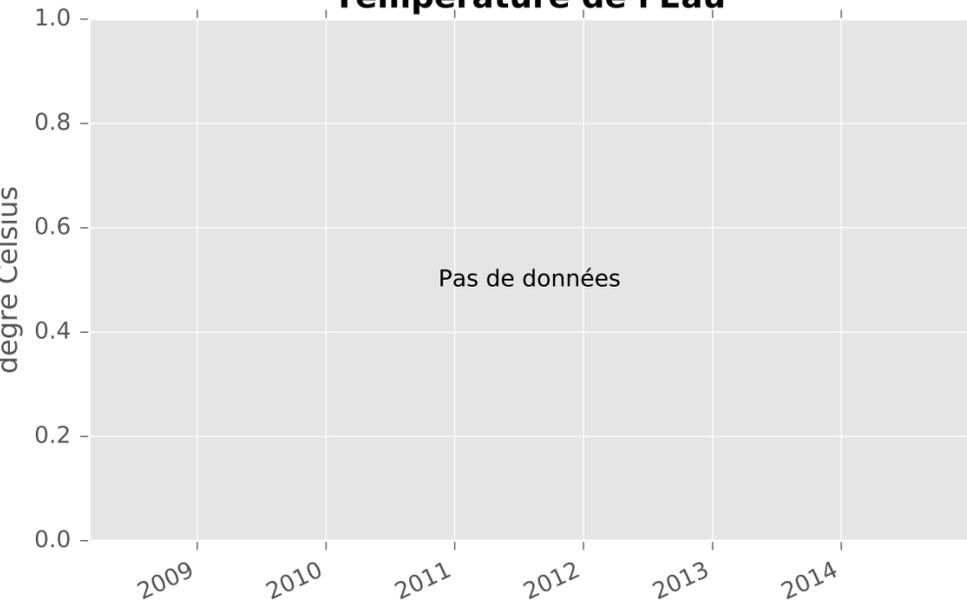


CO2 libre

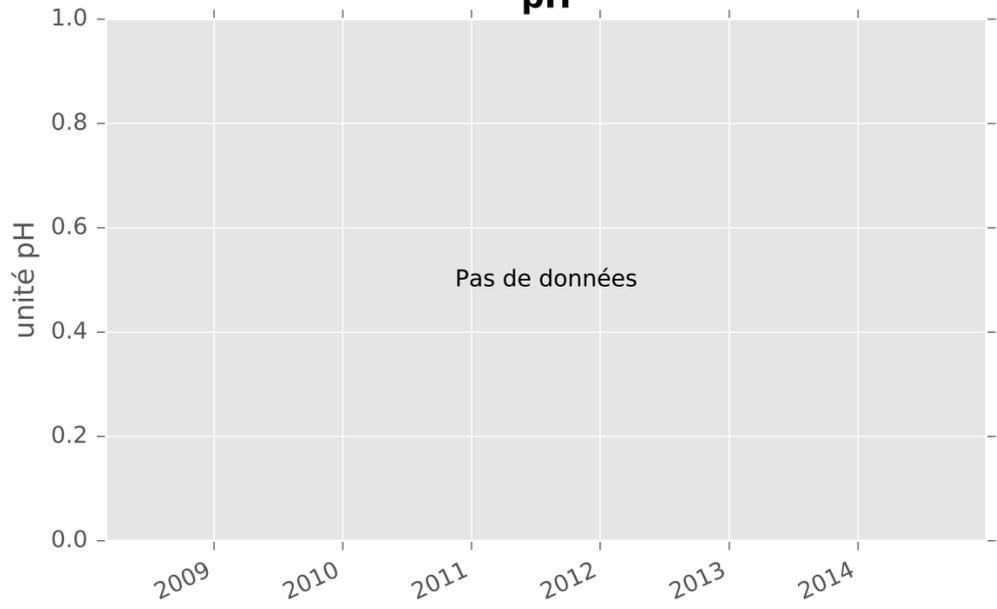


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01377X0209 - S8 - Piézomètre B1 Paradis amont

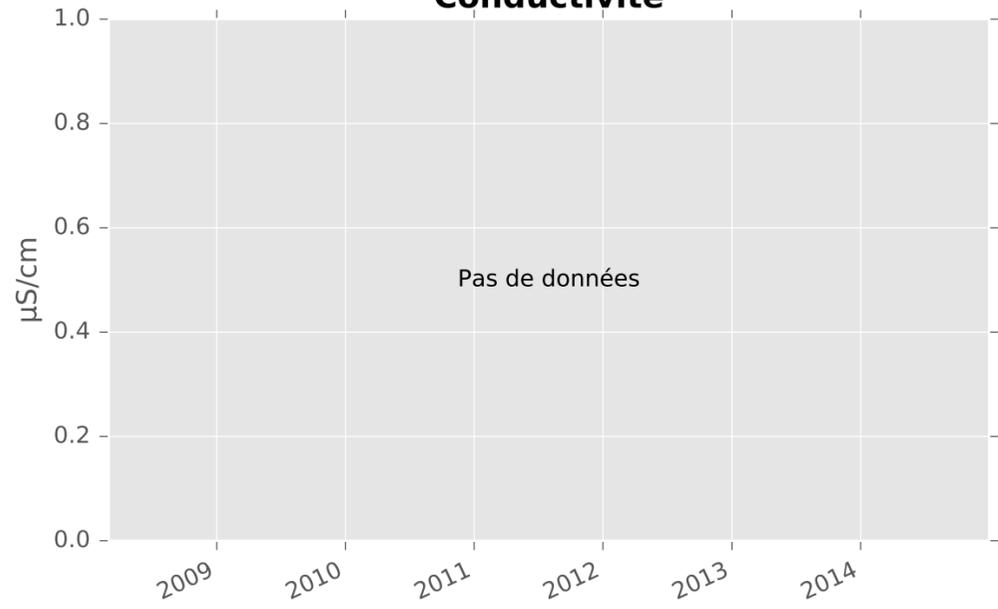
Température de l'Eau



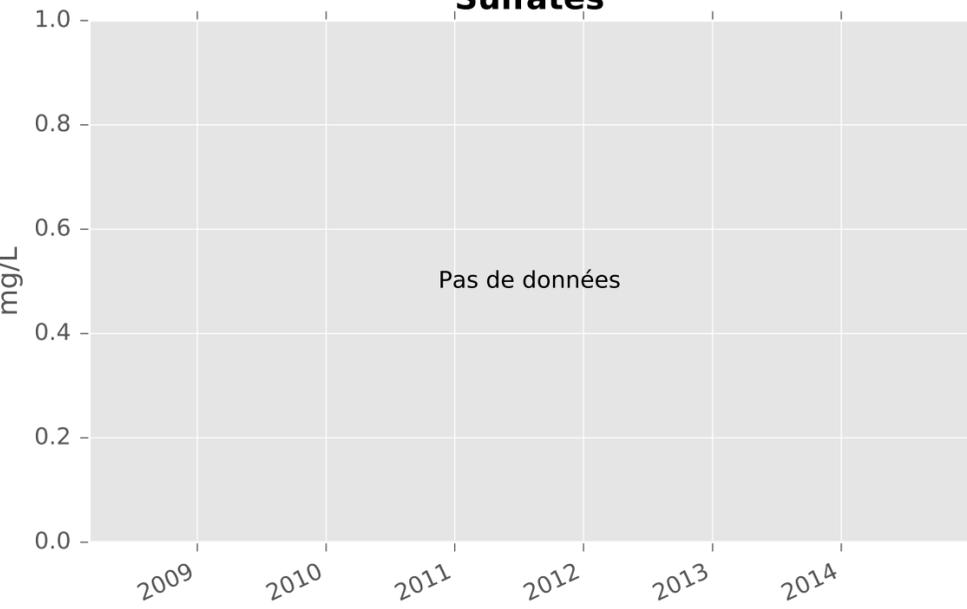
pH



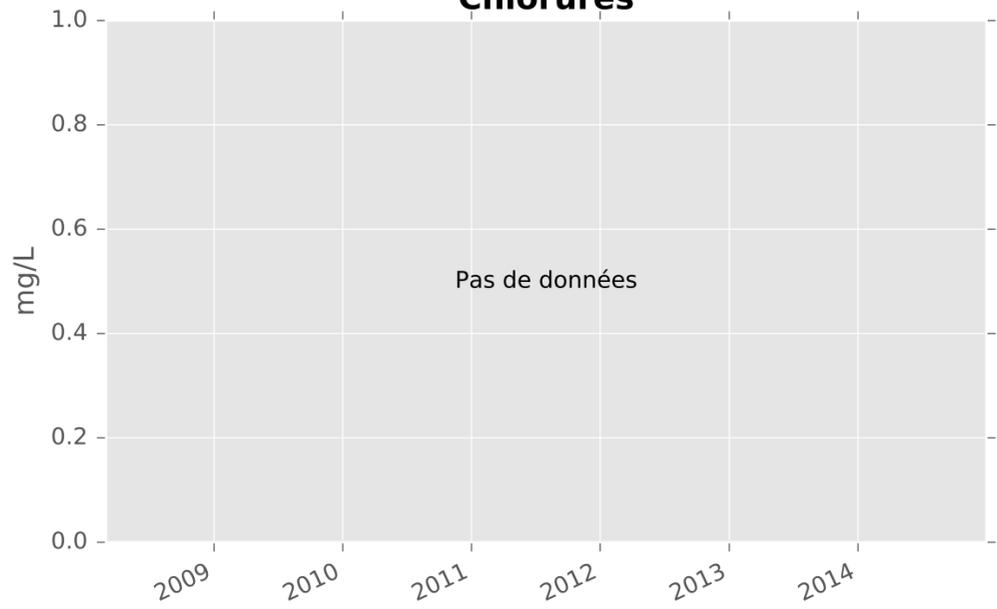
Conductivité



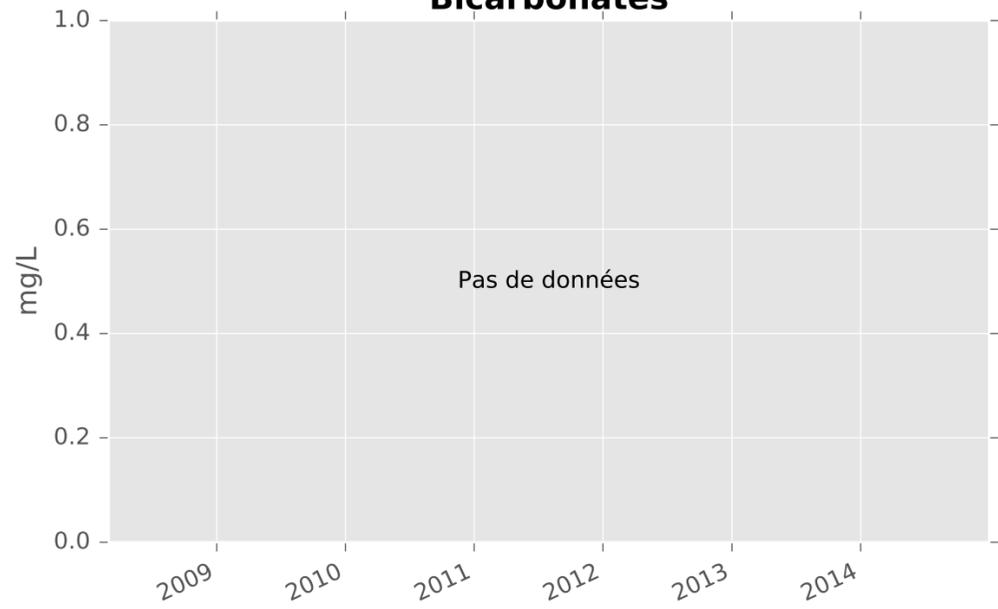
Sulfates



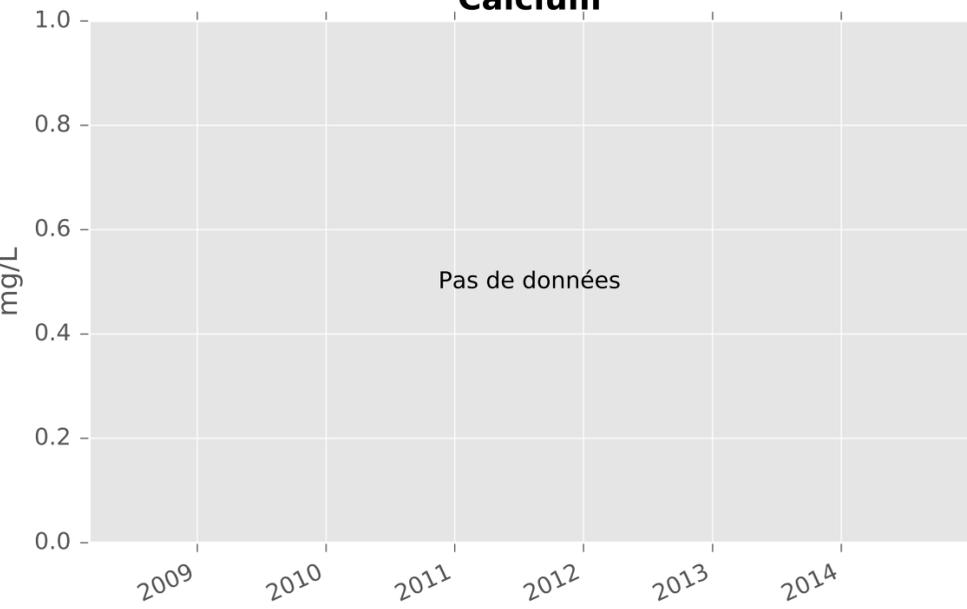
Chlorures



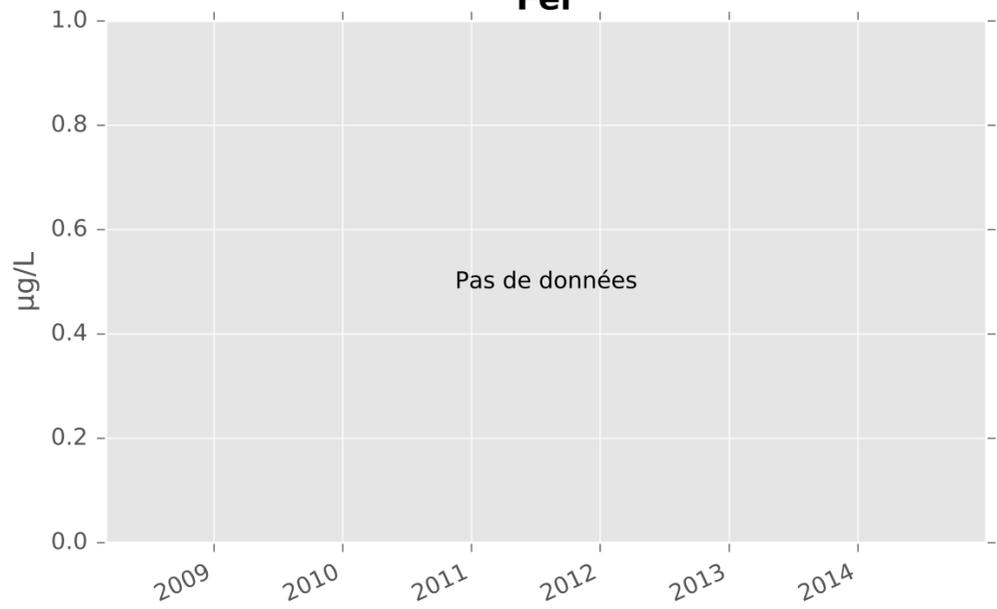
Bicarbonates



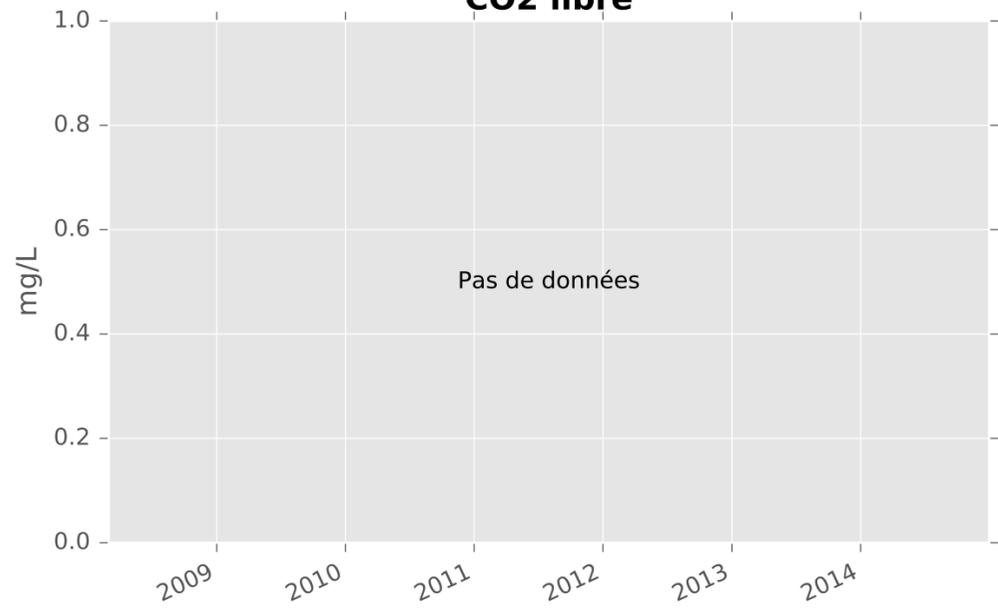
Calcium



Fer

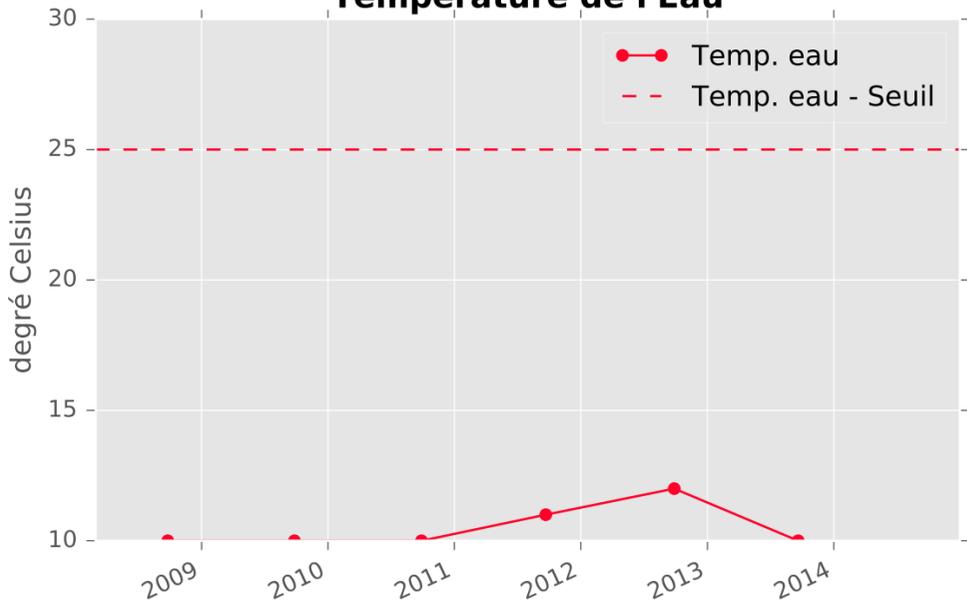


CO2 libre

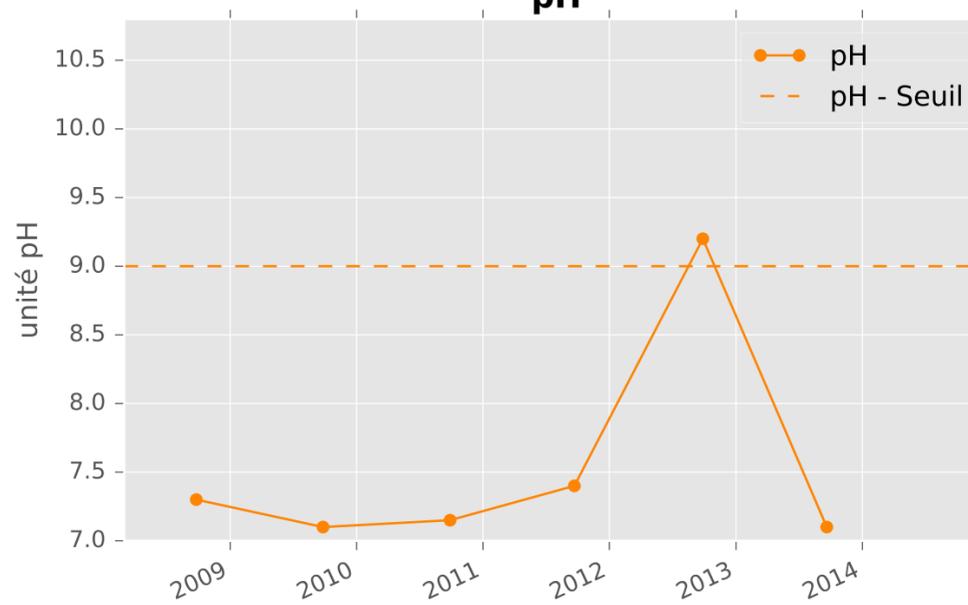


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01372X0210 - S9 - Piézomètre Briey A

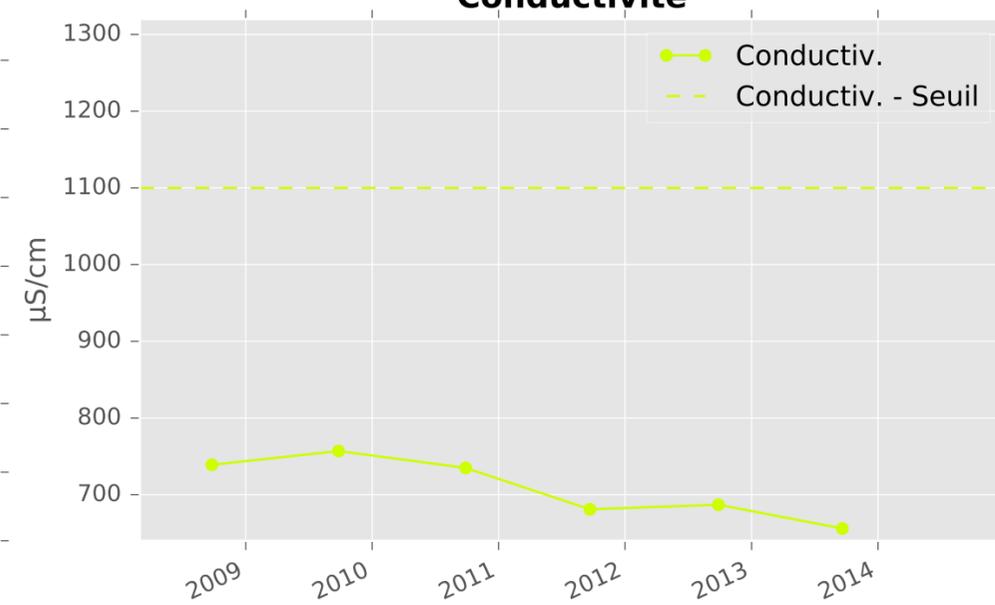
Température de l'Eau



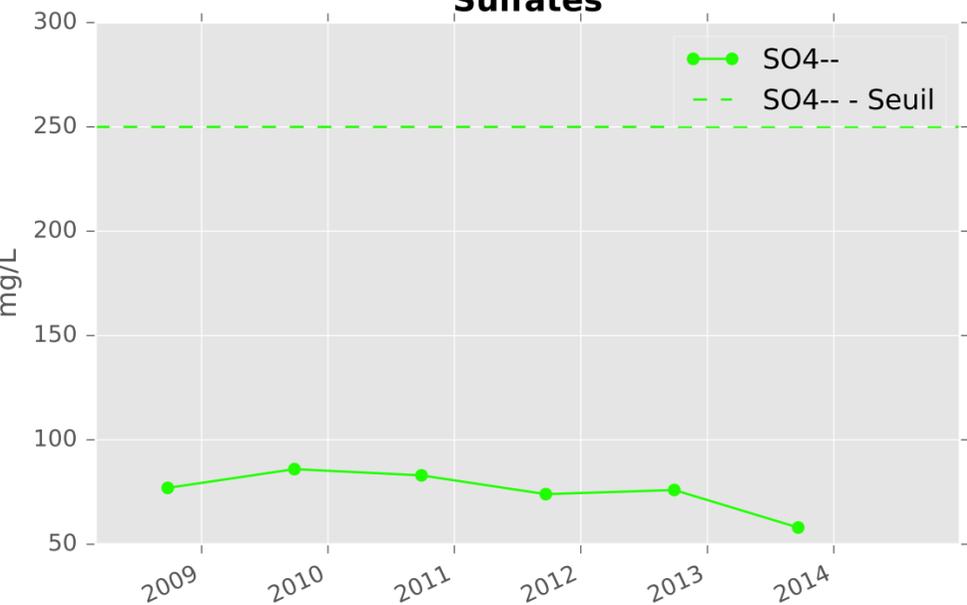
pH



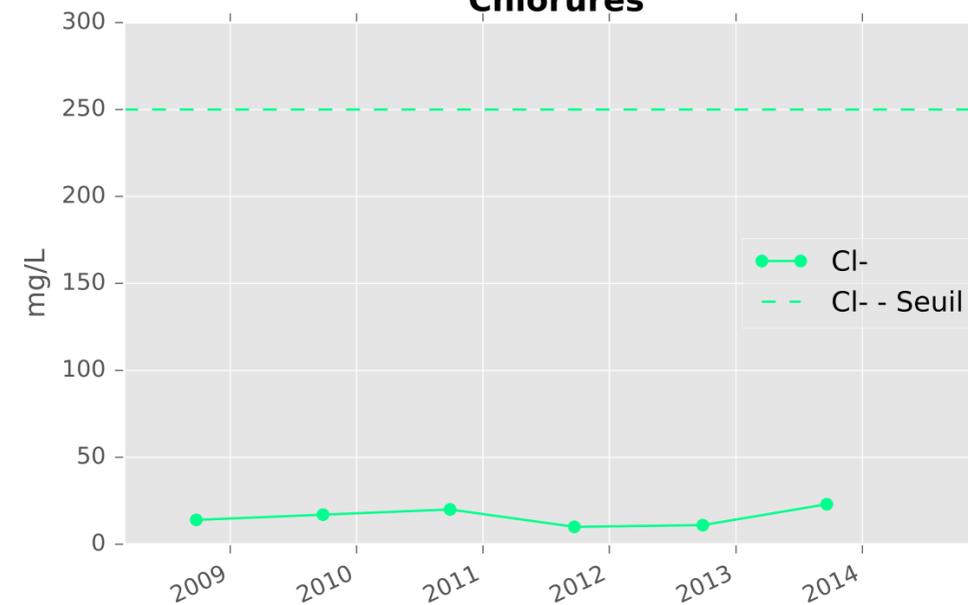
Conductivité



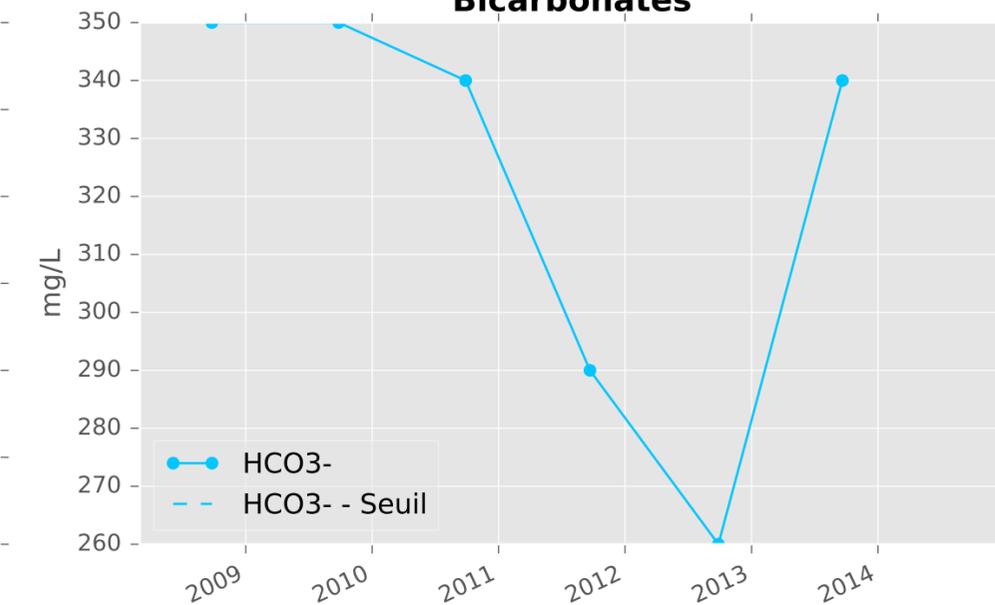
Sulfates



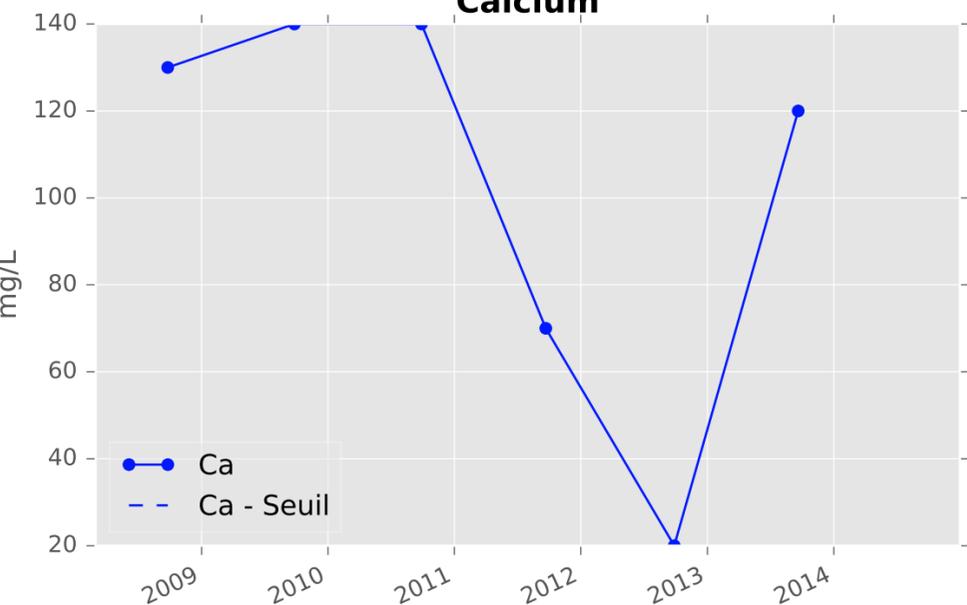
Chlorures



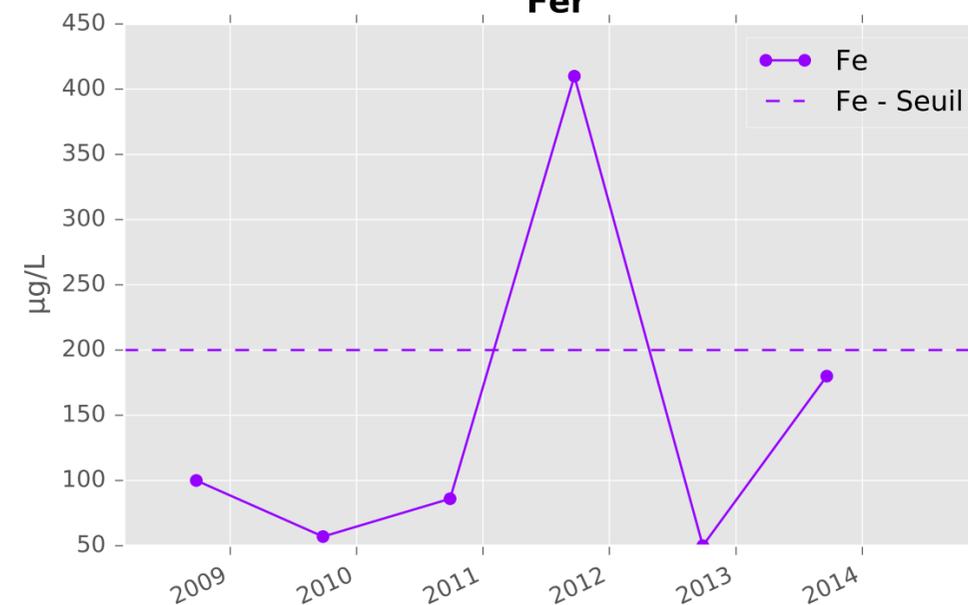
Bicarbonates



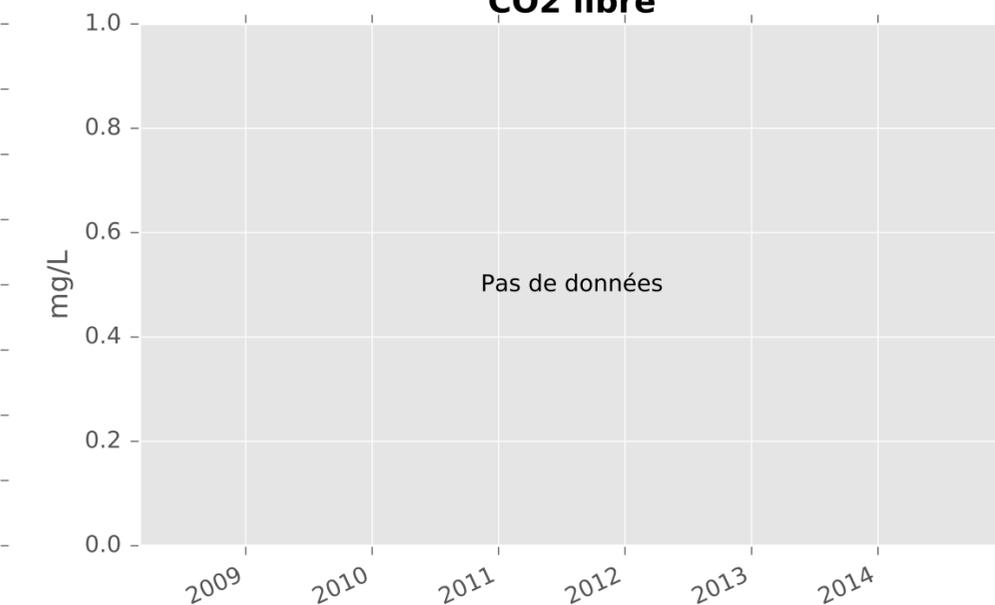
Calcium



Fer

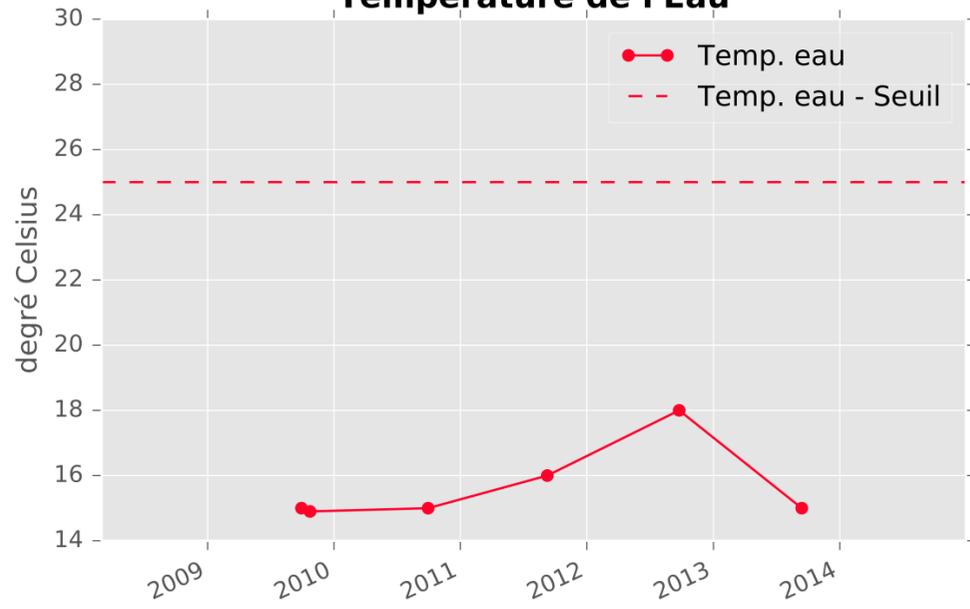


CO2 libre

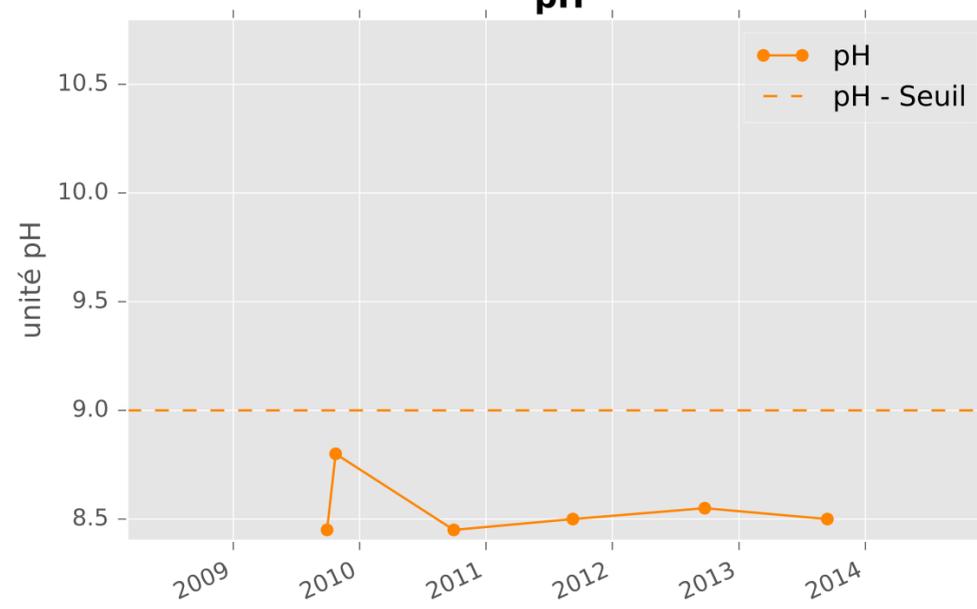


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01368X0008 - S12 - Piézomètre St Jean les Busy

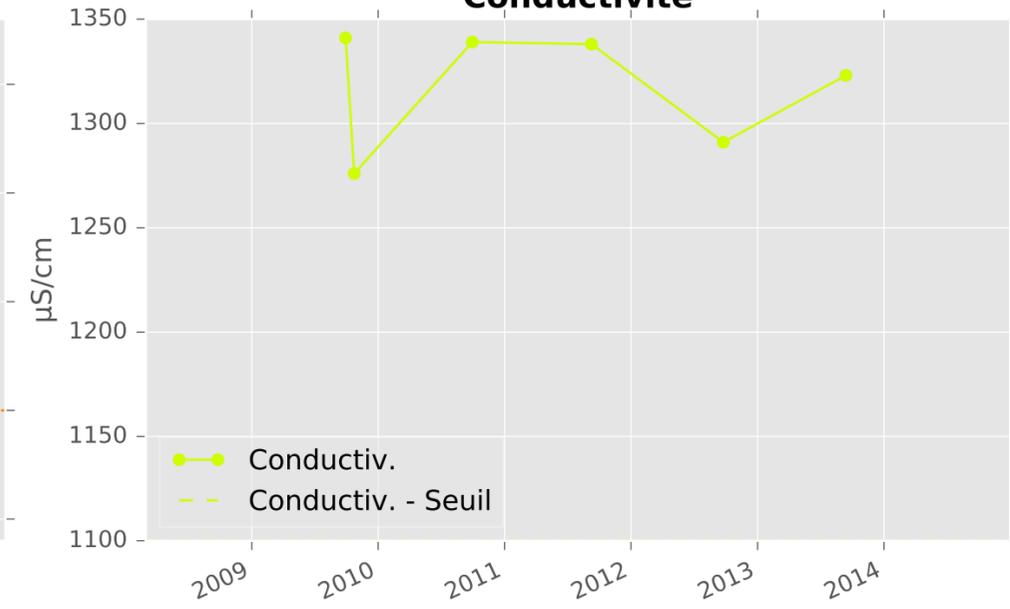
Température de l'Eau



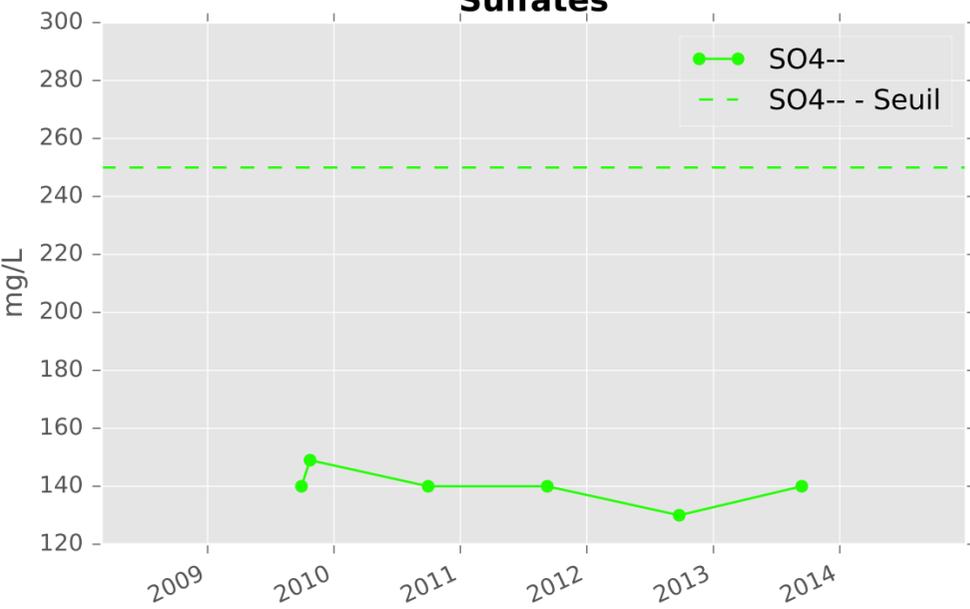
pH



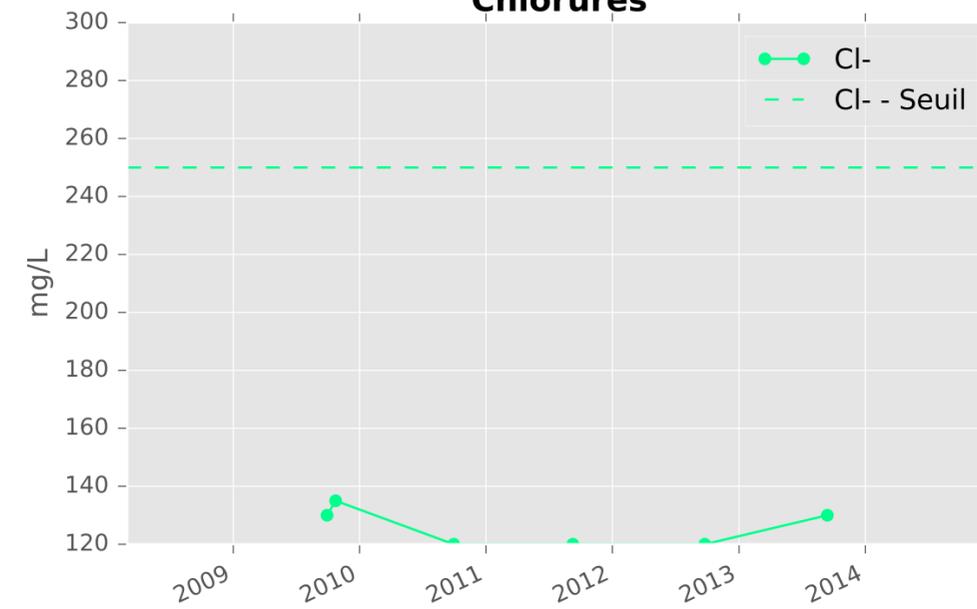
Conductivité



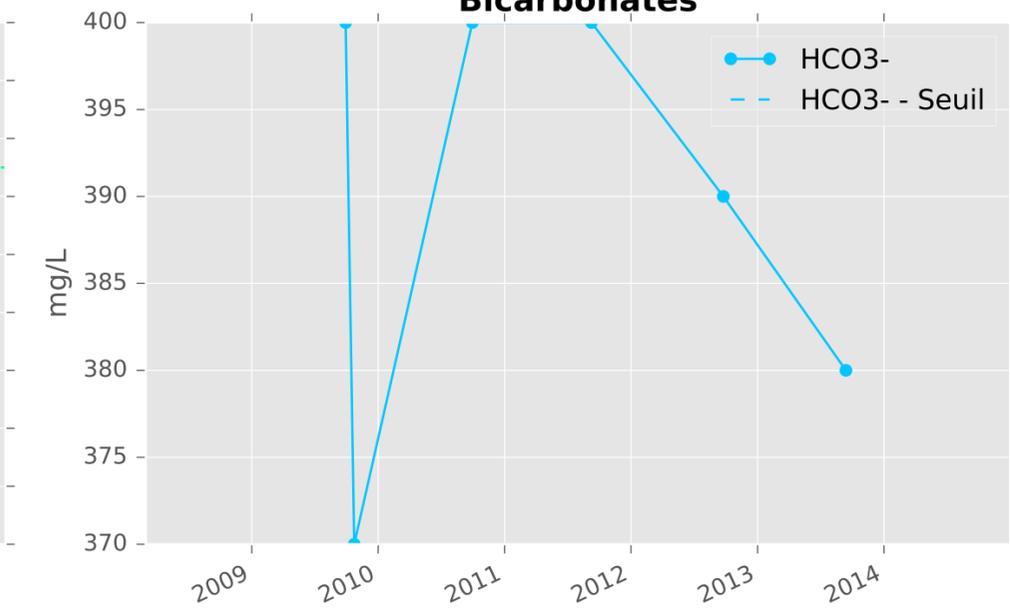
Sulfates



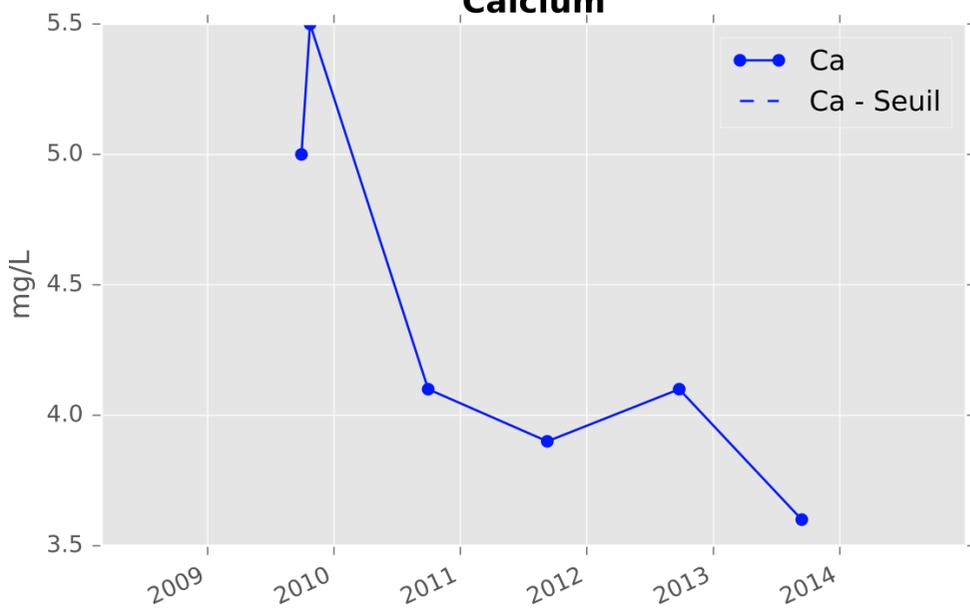
Chlorures



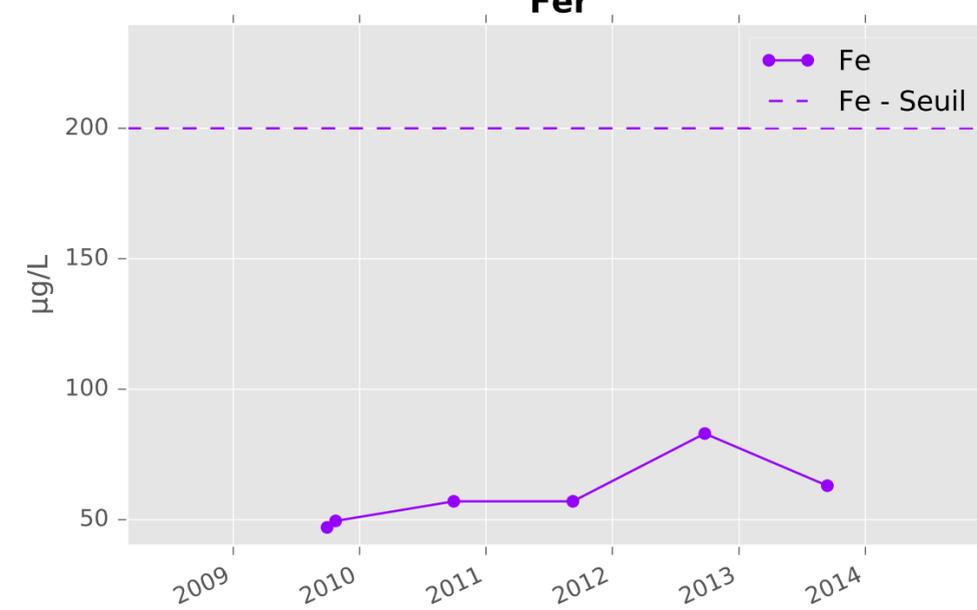
Bicarbonates



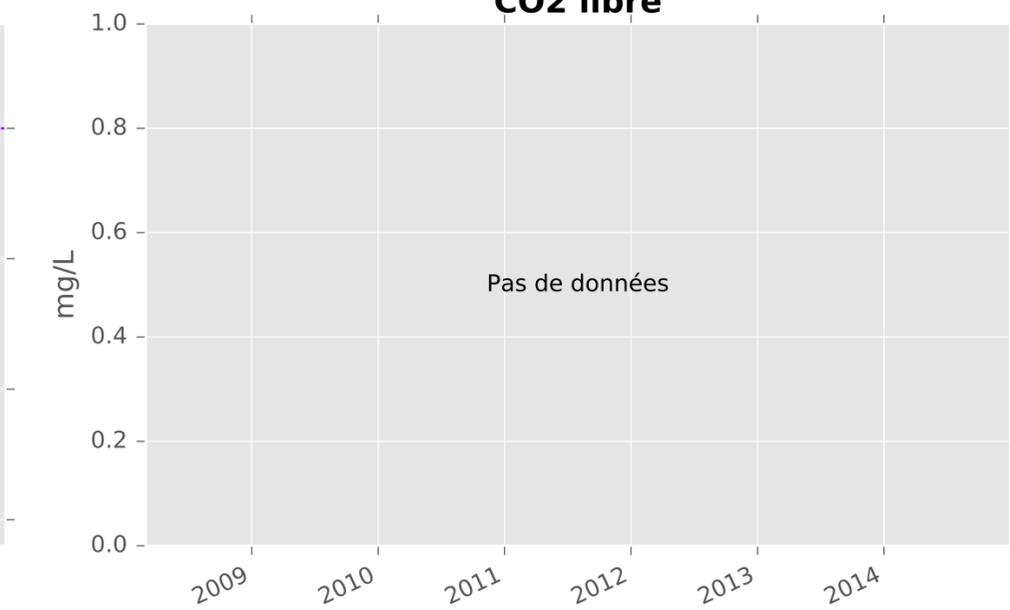
Calcium



Fer

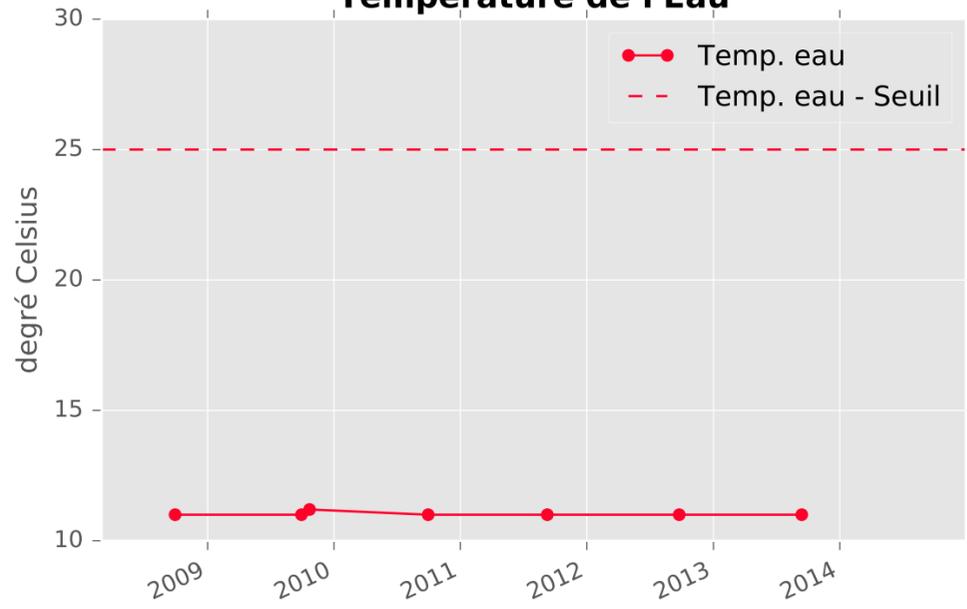


CO2 libre

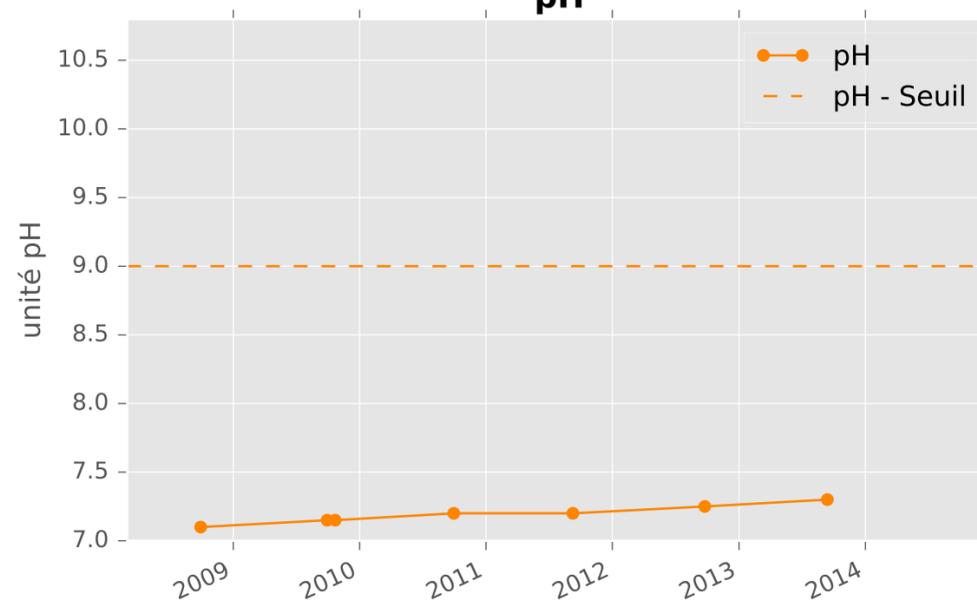


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01376X0149 - S13 - Piézomètre H1 Hatrize

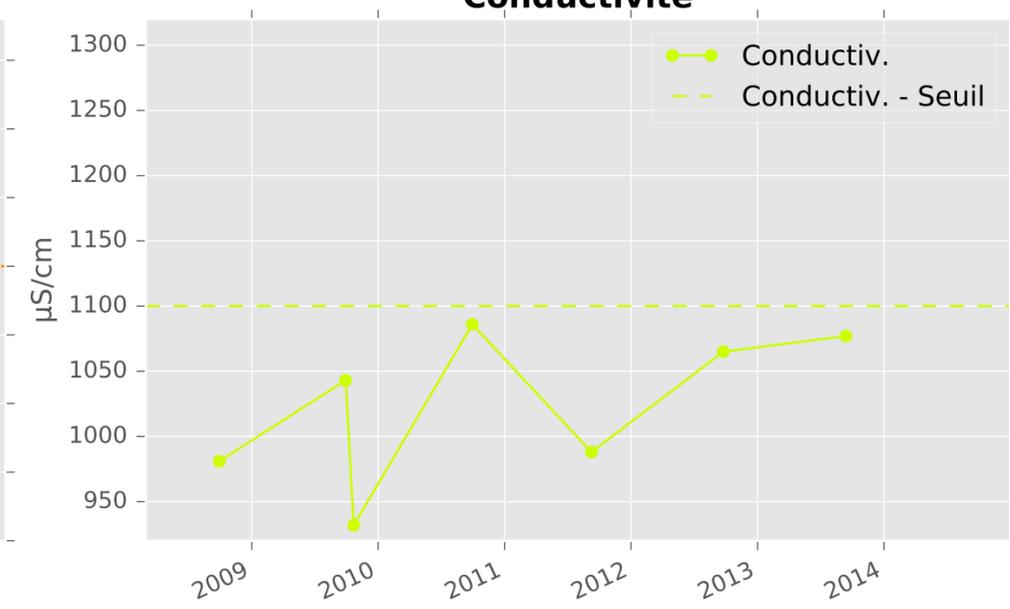
Température de l'Eau



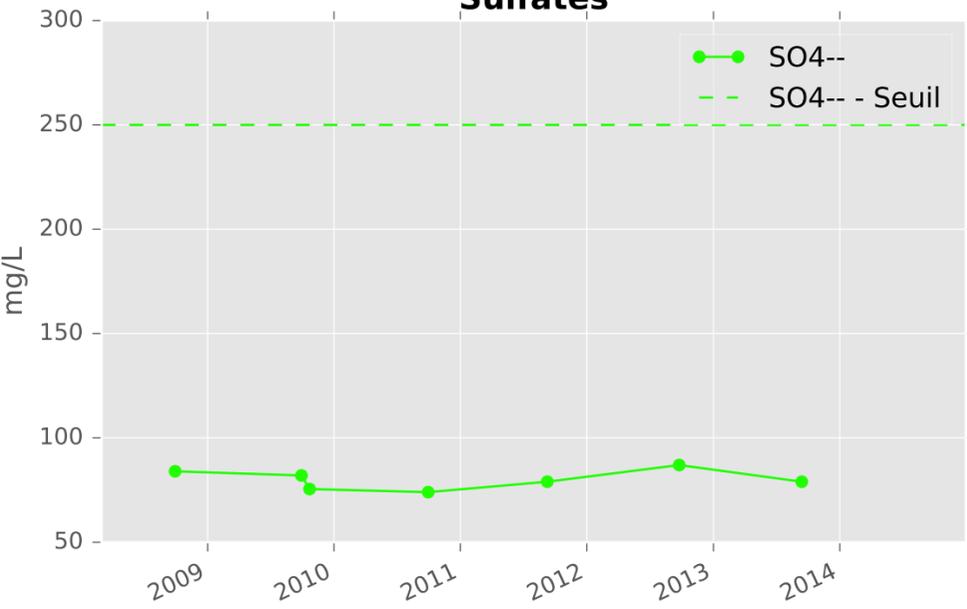
pH



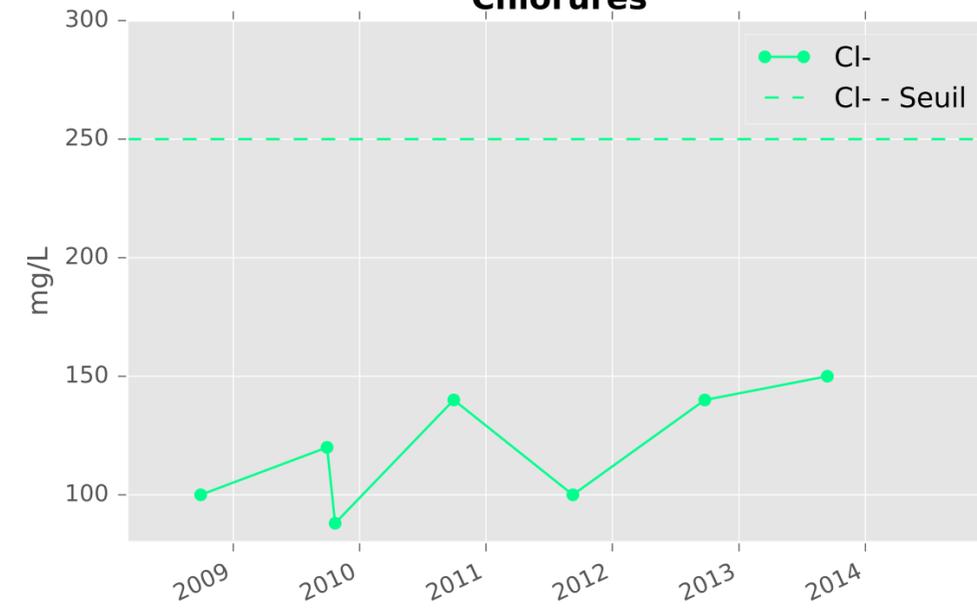
Conductivité



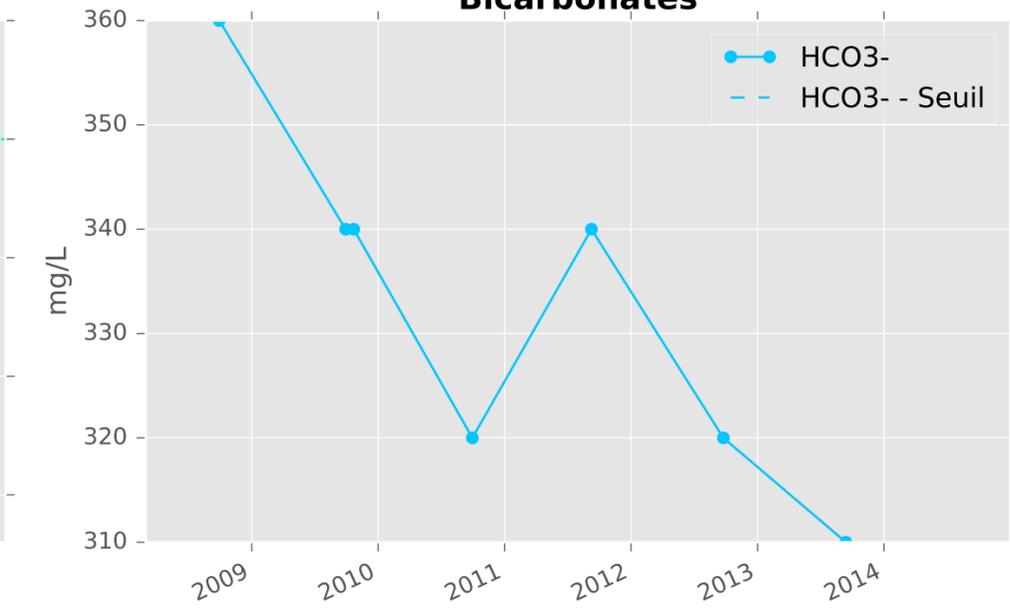
Sulfates



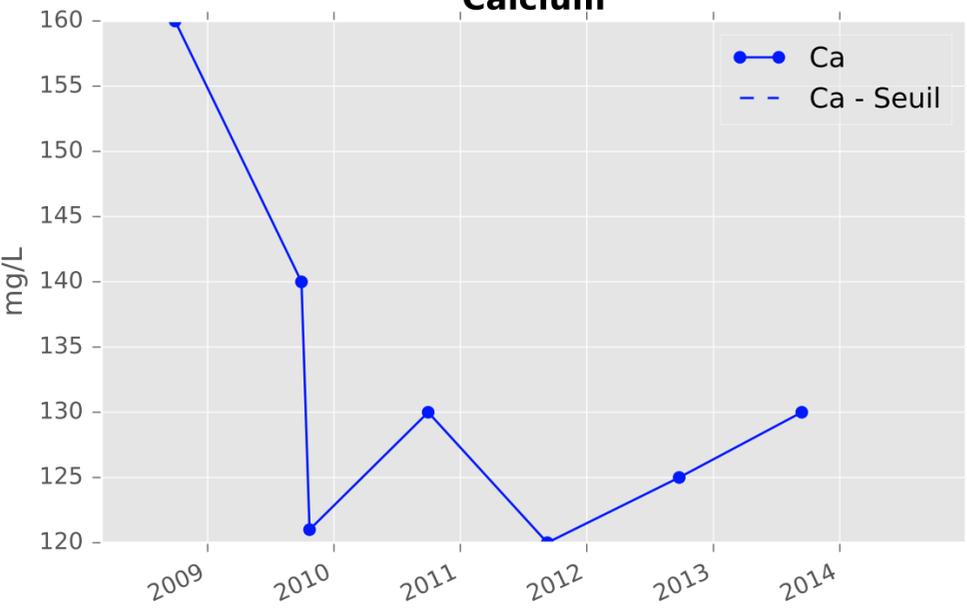
Chlorures



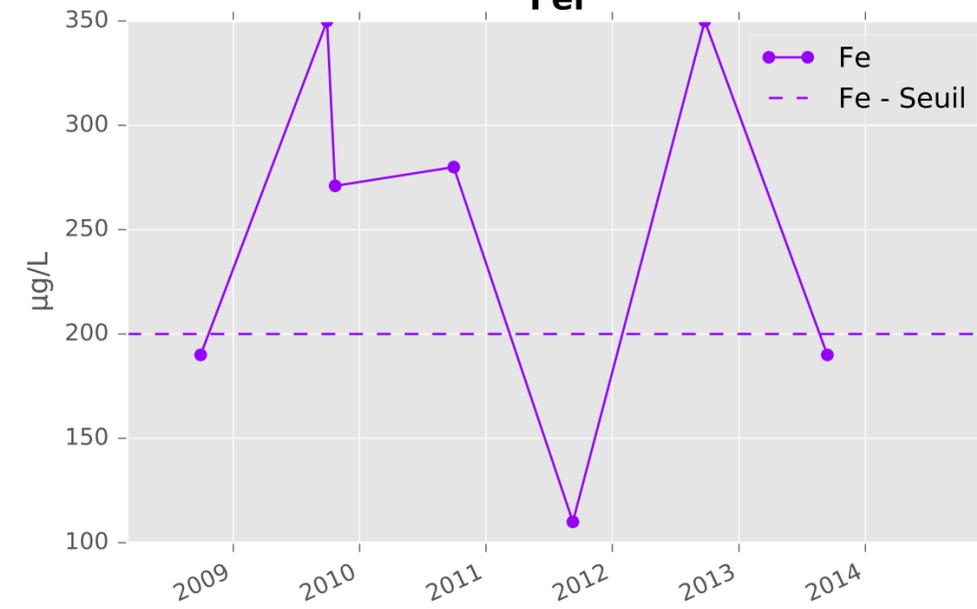
Bicarbonates



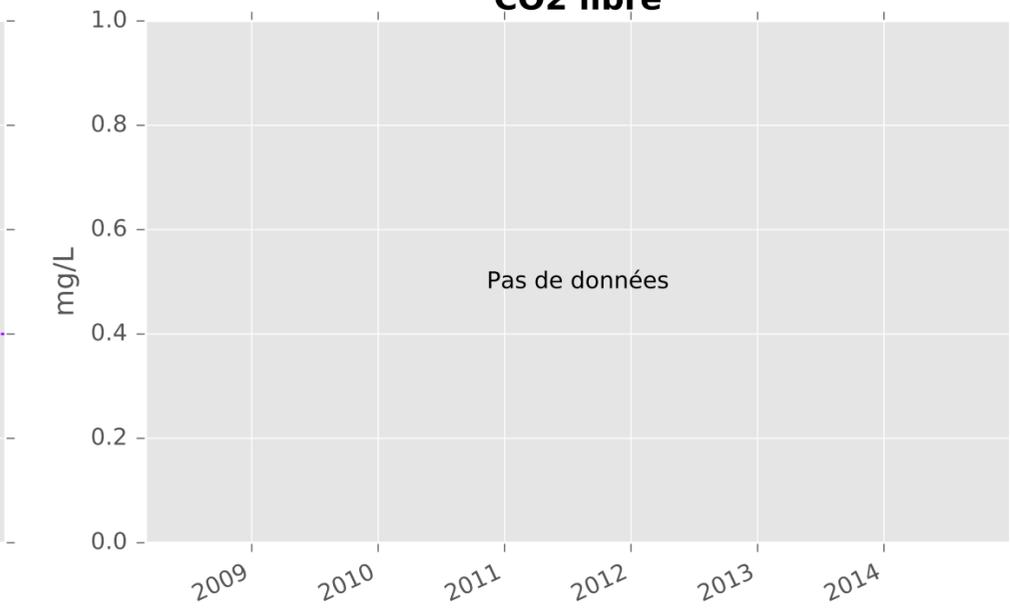
Calcium



Fer

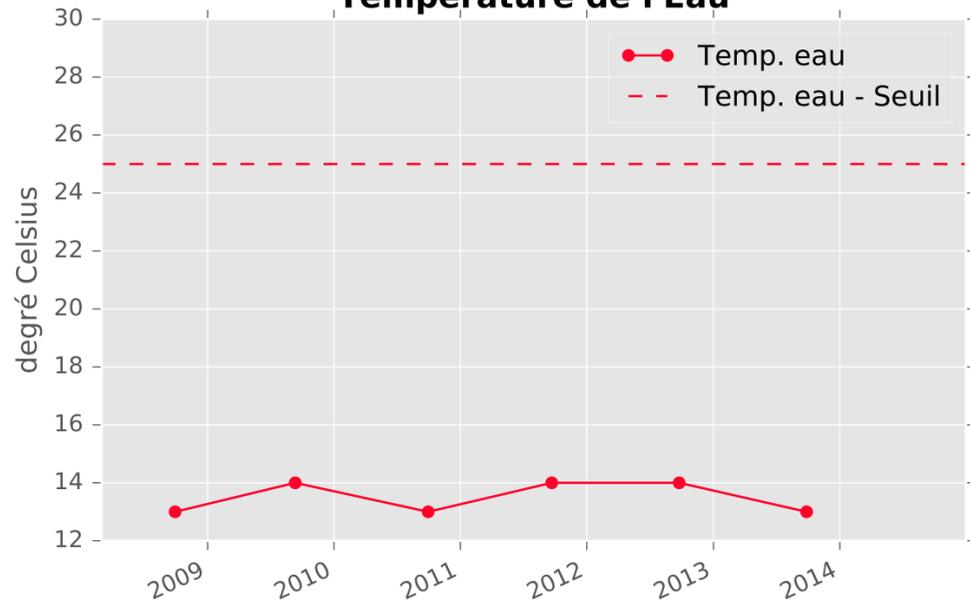


CO2 libre

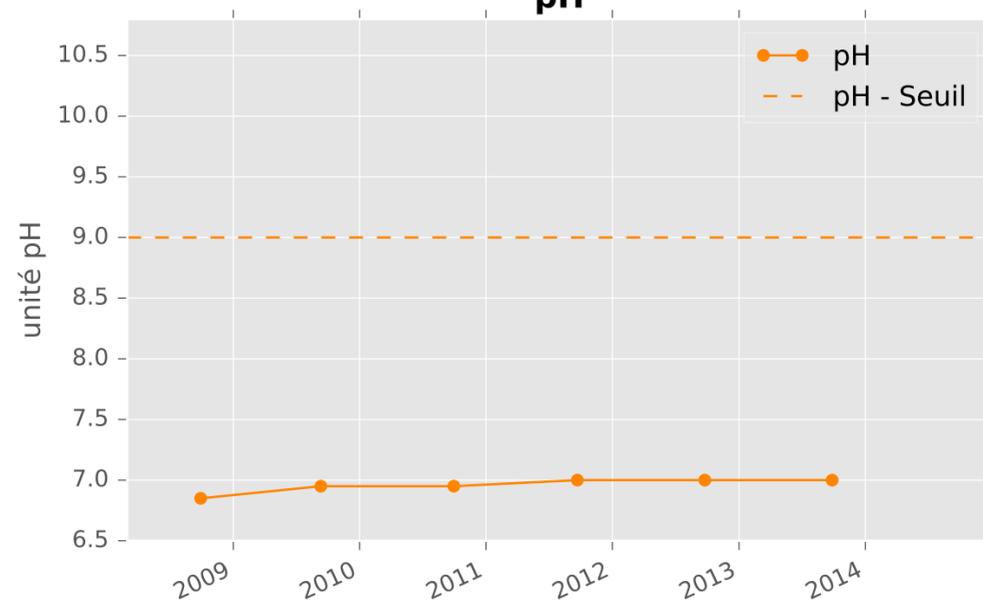


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01377X0212 - S15 - Piézomètre M2 Paradis aval

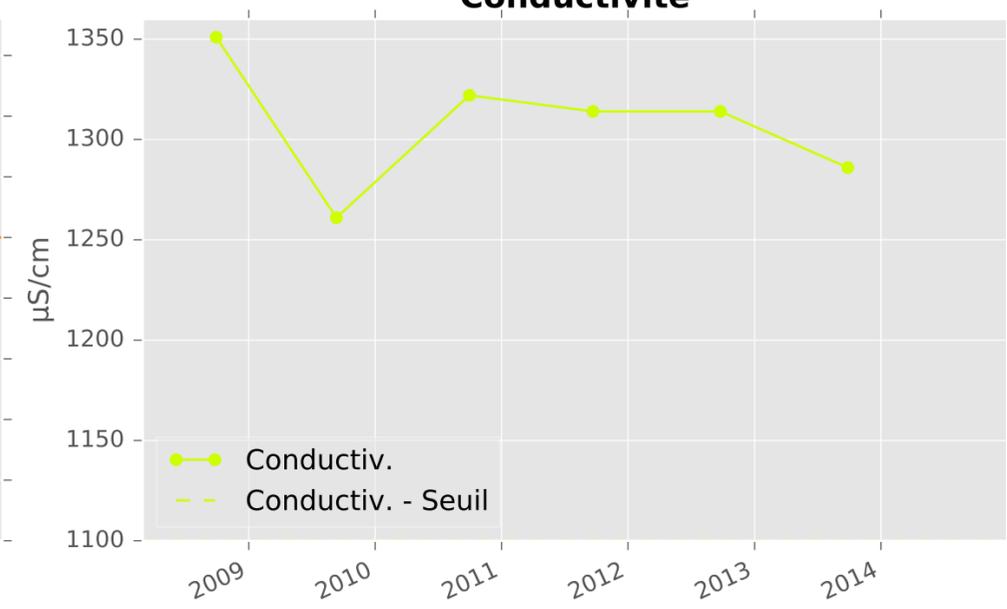
Température de l'Eau



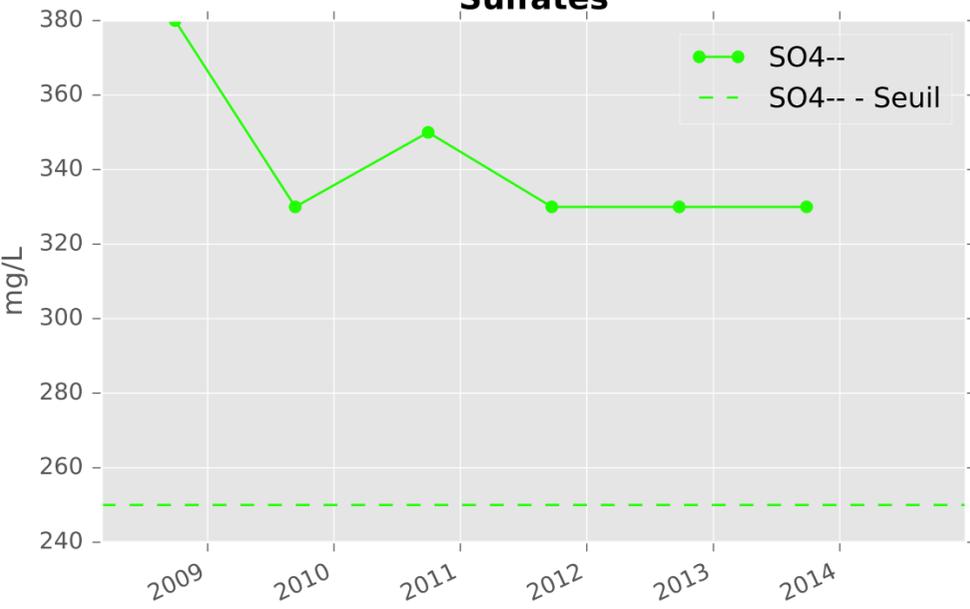
pH



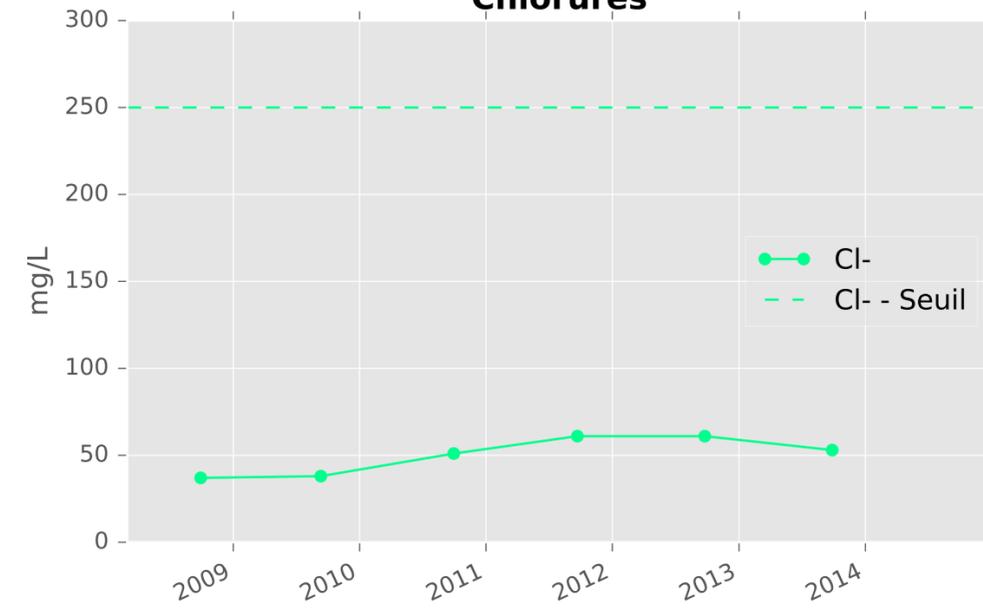
Conductivité



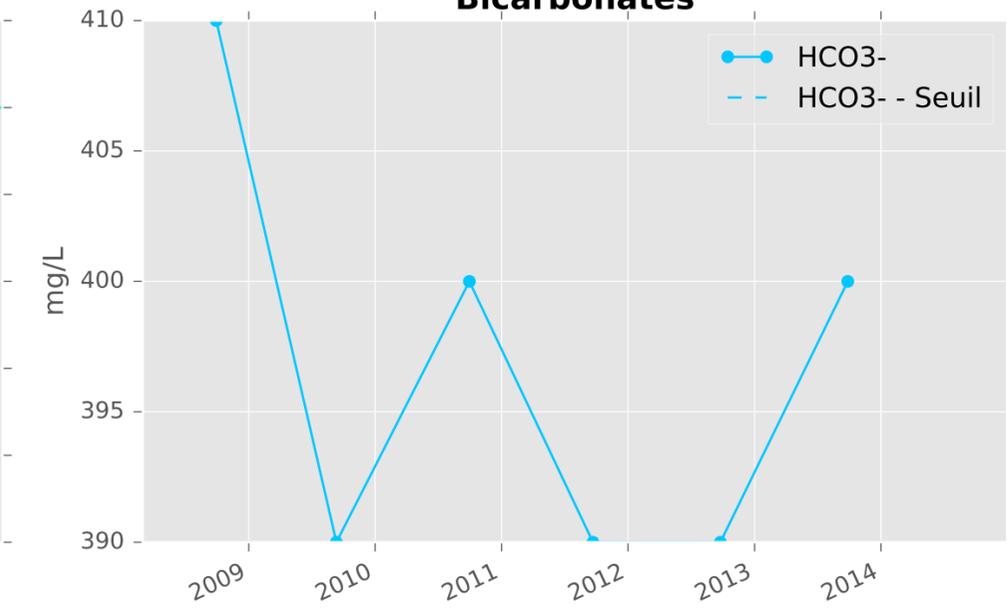
Sulfates



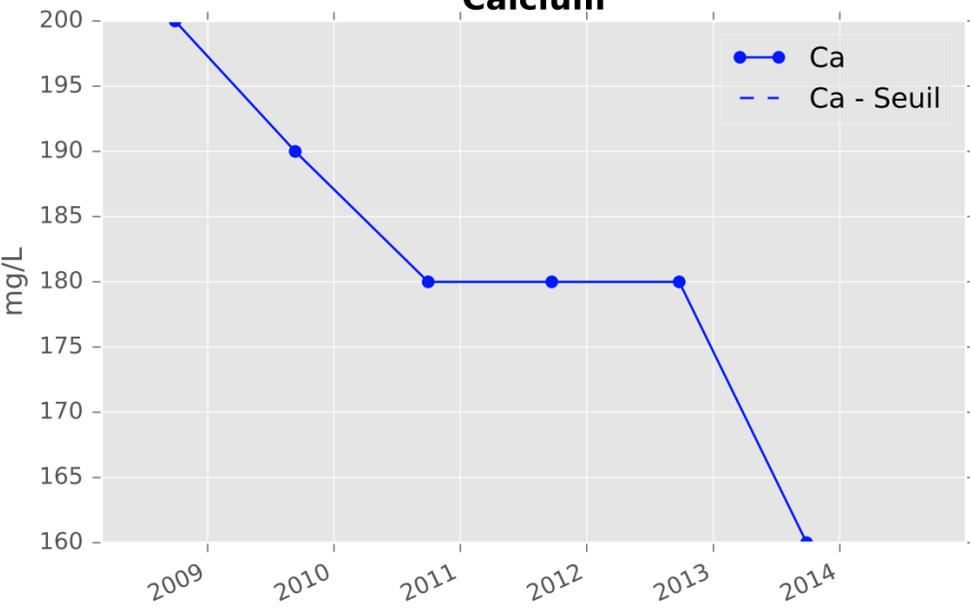
Chlorures



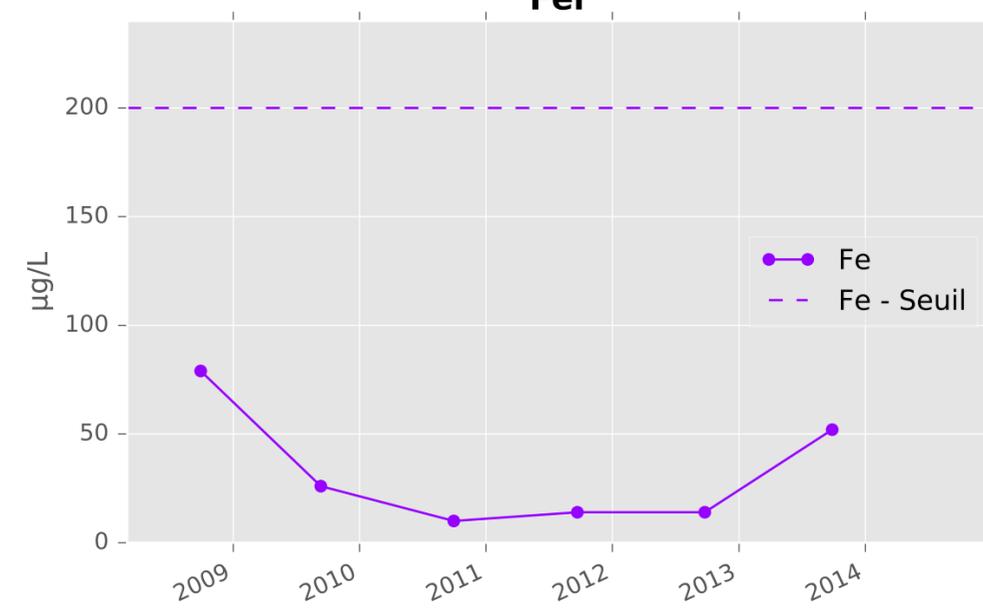
Bicarbonates



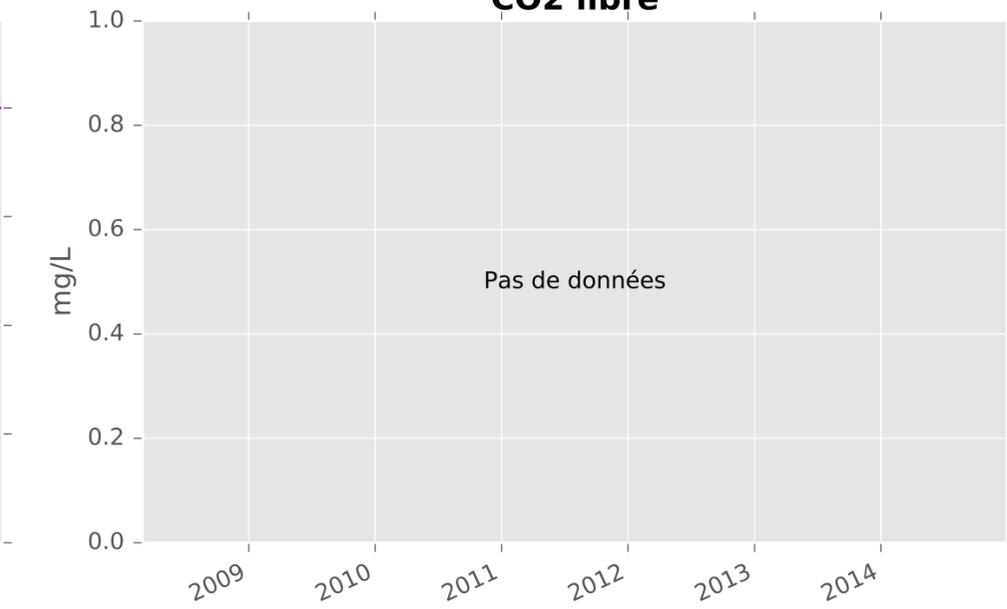
Calcium



Fer

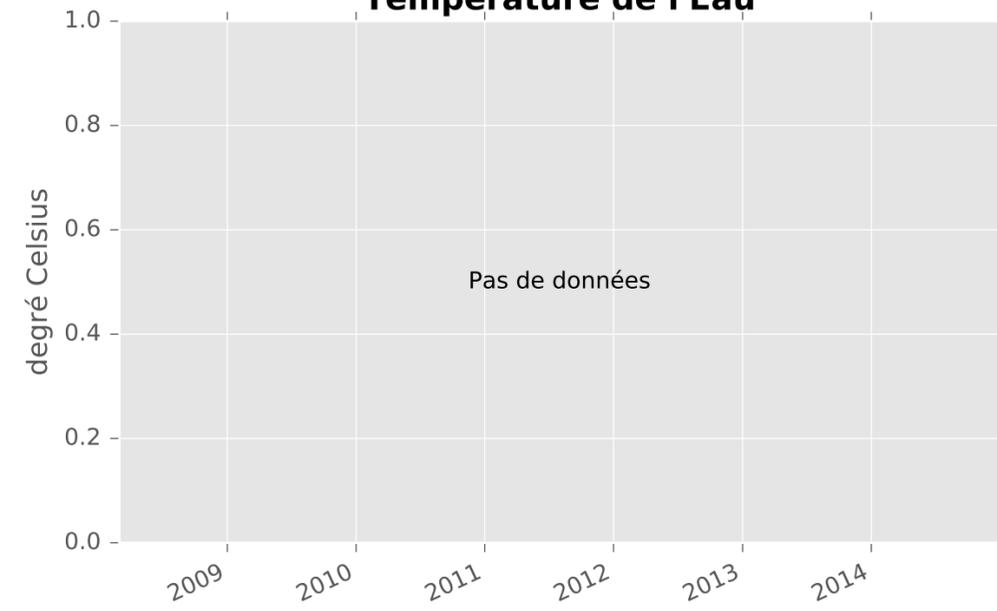


CO2 libre

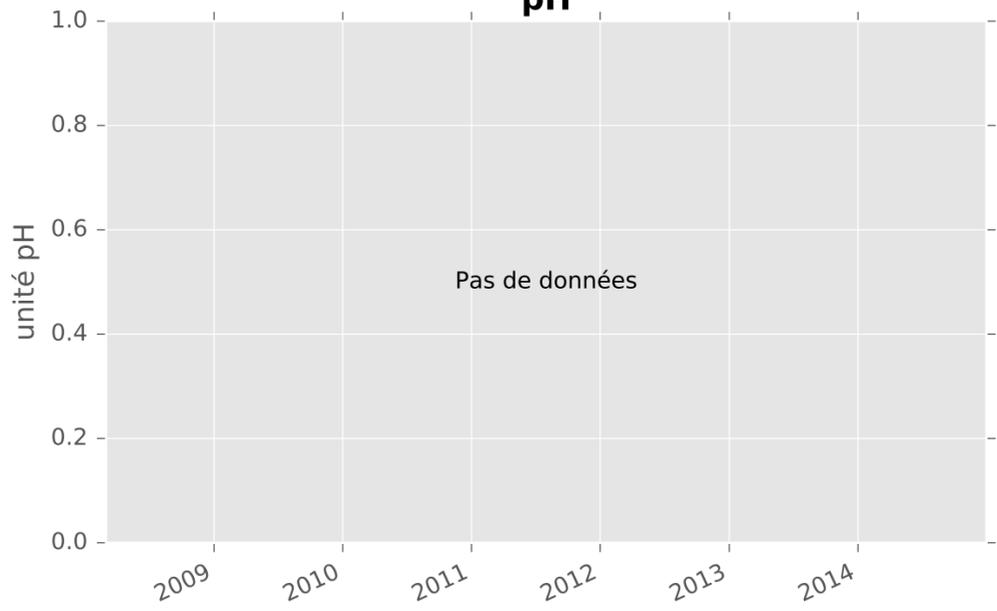


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01632X0070 - S16 - Piézomètre V105 Ville/Yron

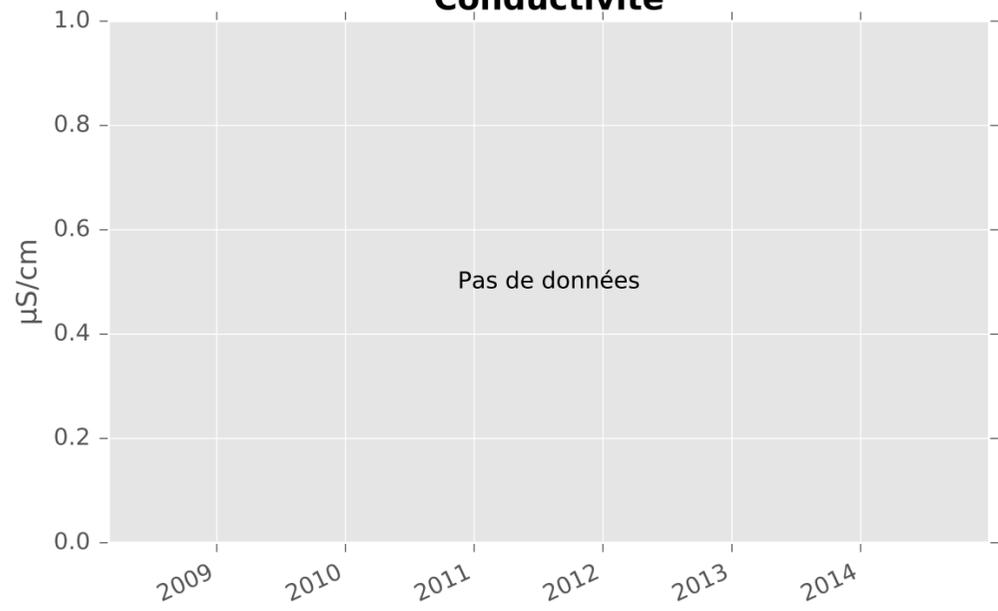
Température de l'Eau



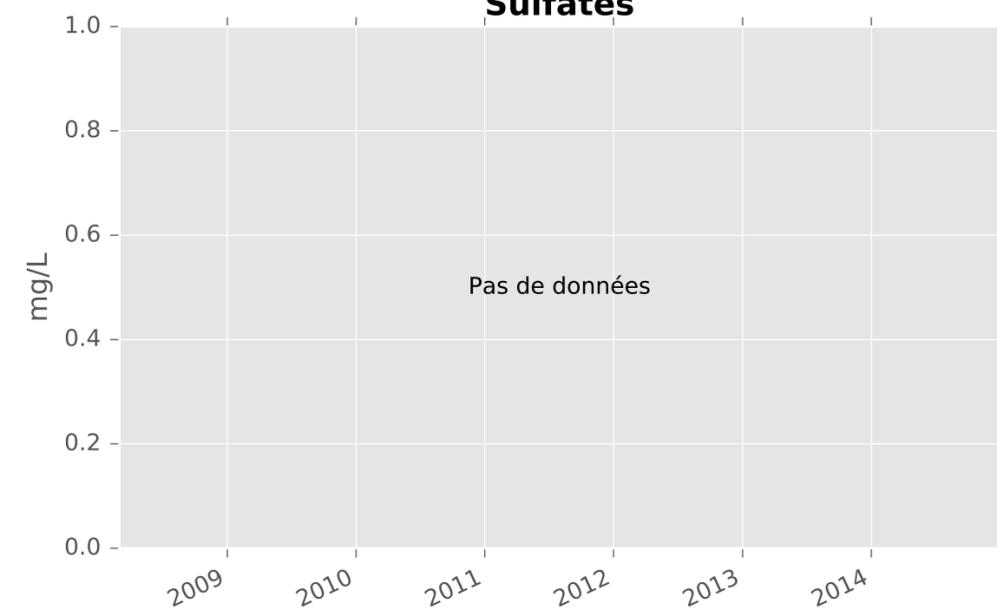
pH



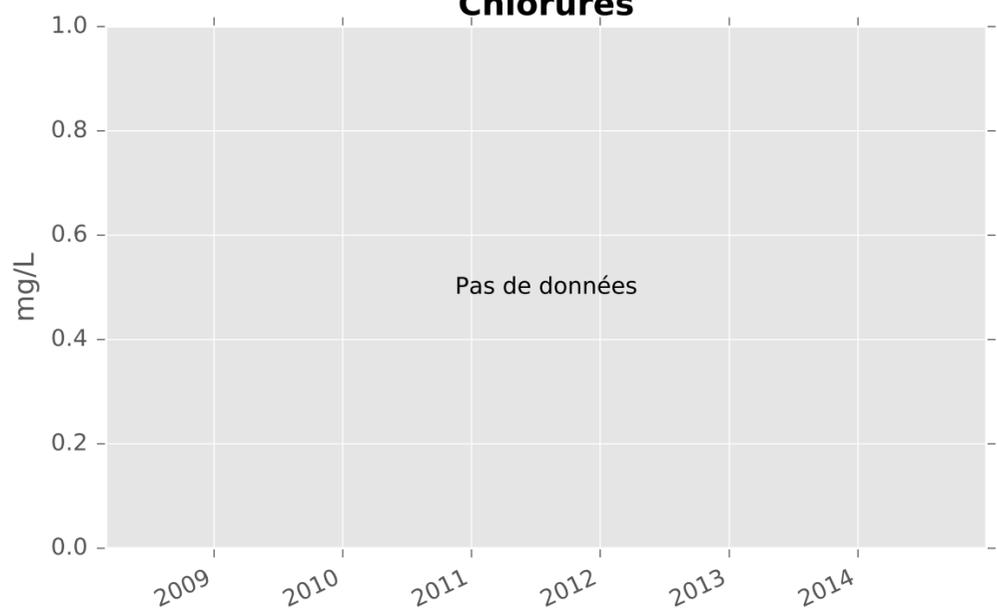
Conductivité



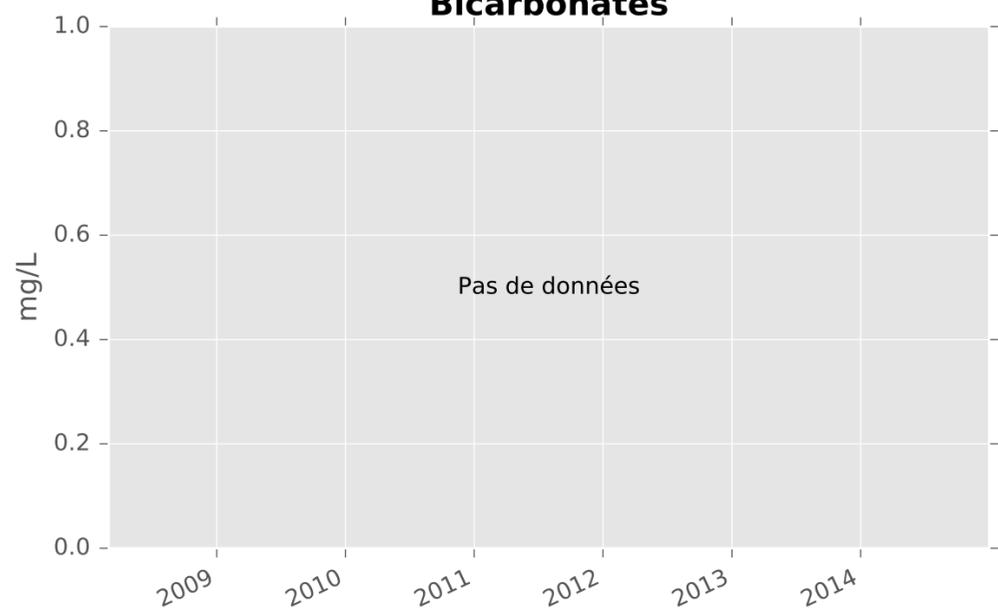
Sulfates



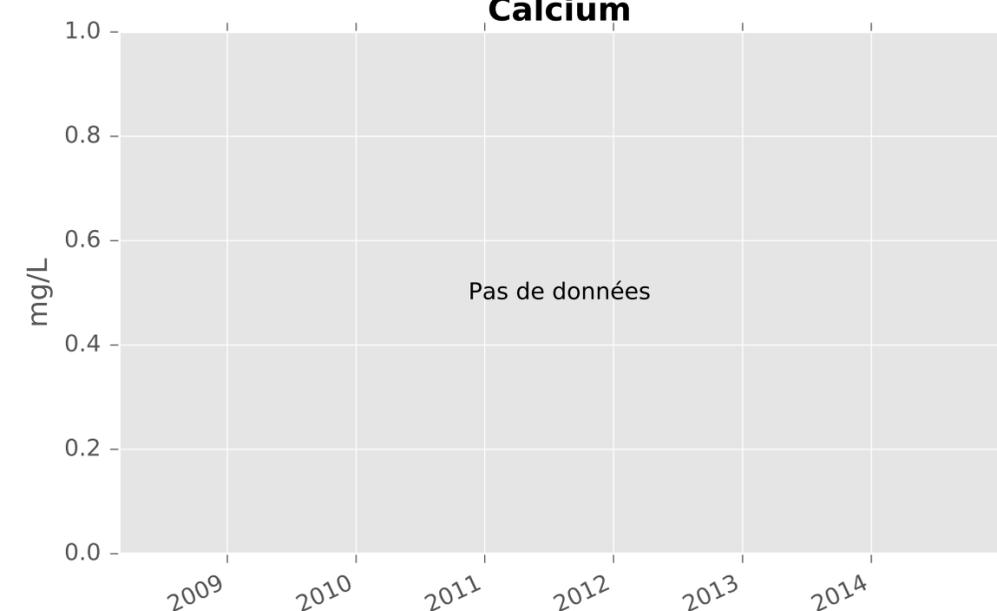
Chlorures



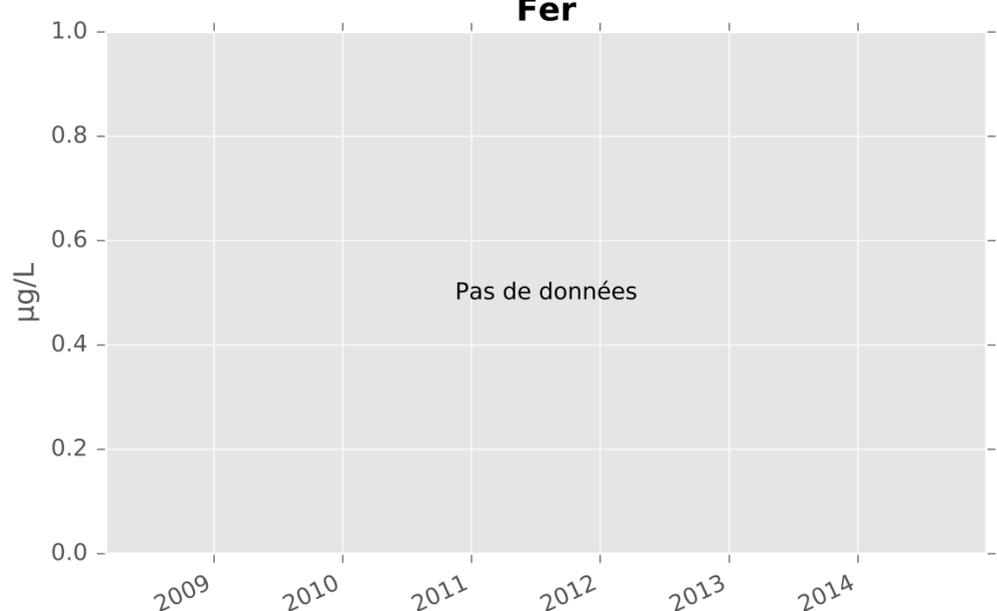
Bicarbonates



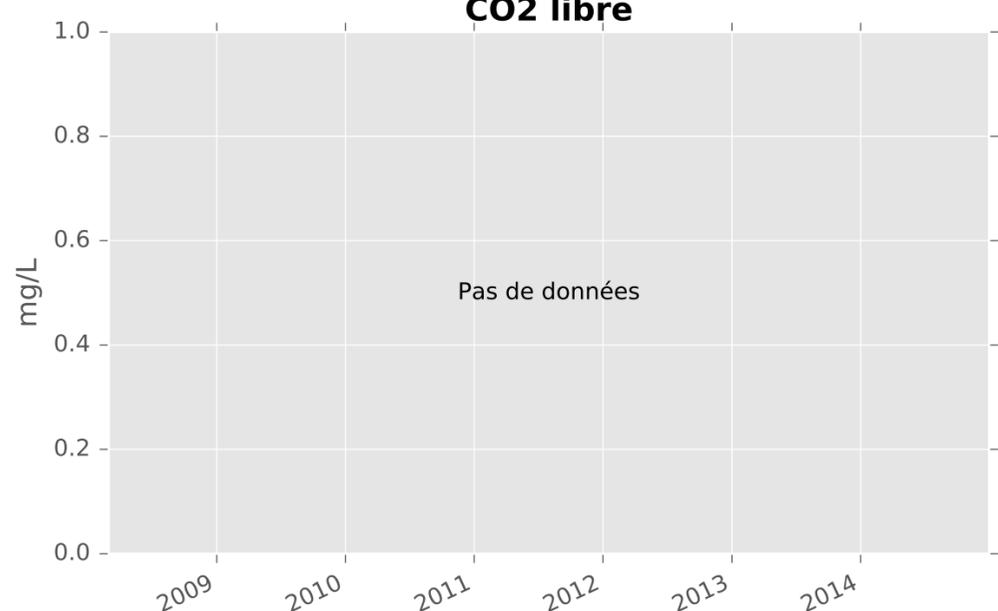
Calcium



Fer

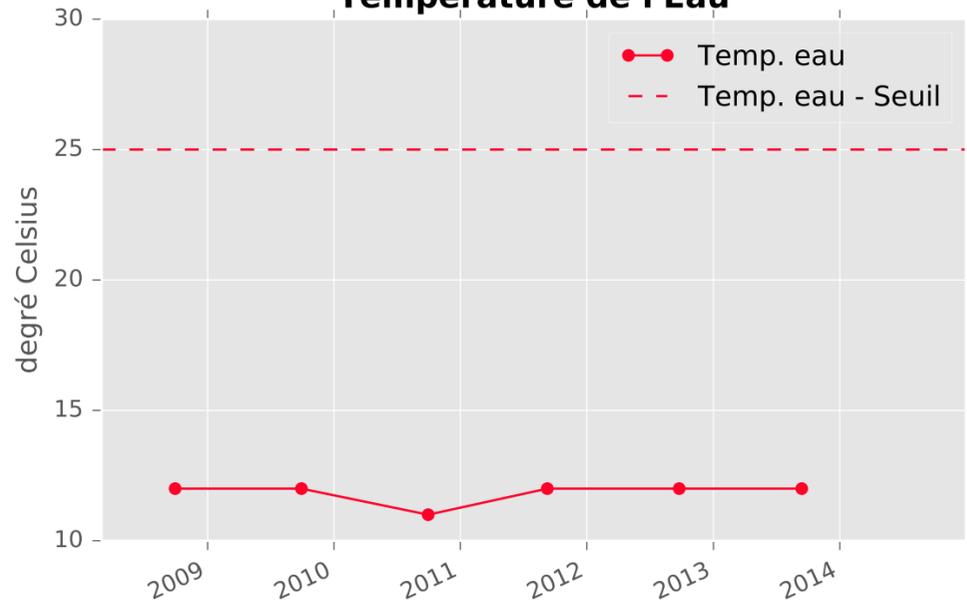


CO2 libre

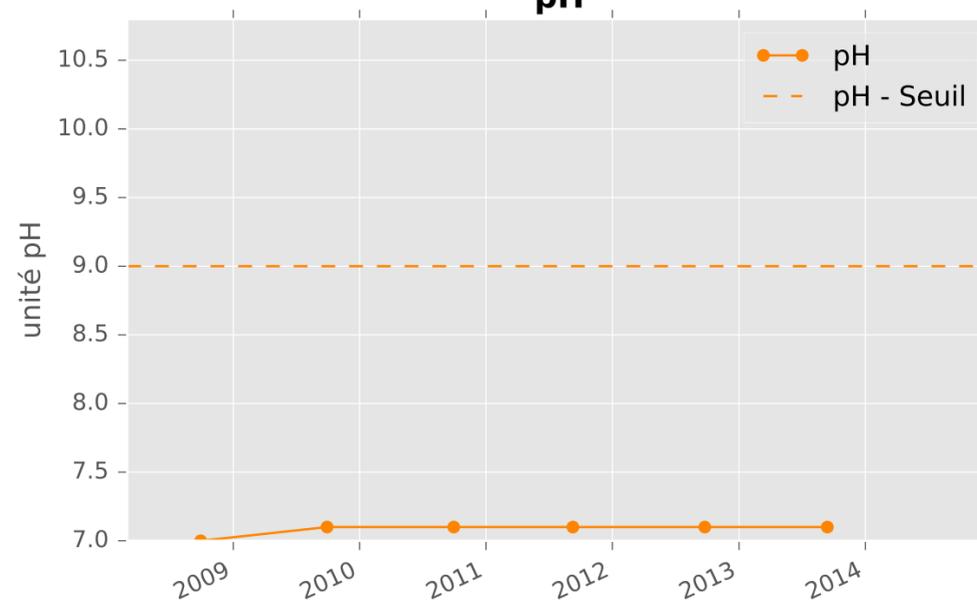


CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01632X0071 - S17 - Piézomètre V19 Ville/Yron

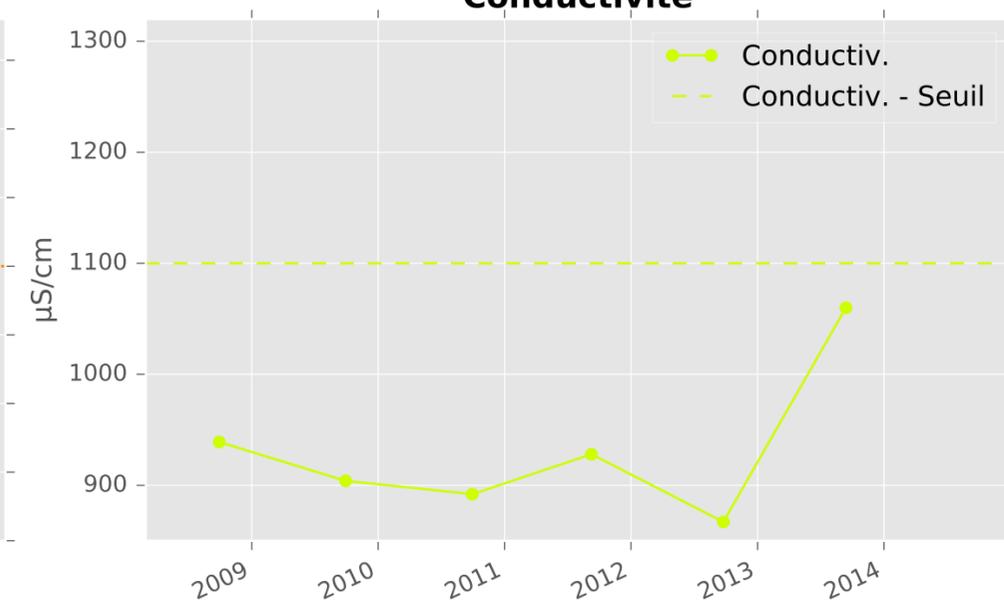
Température de l'Eau



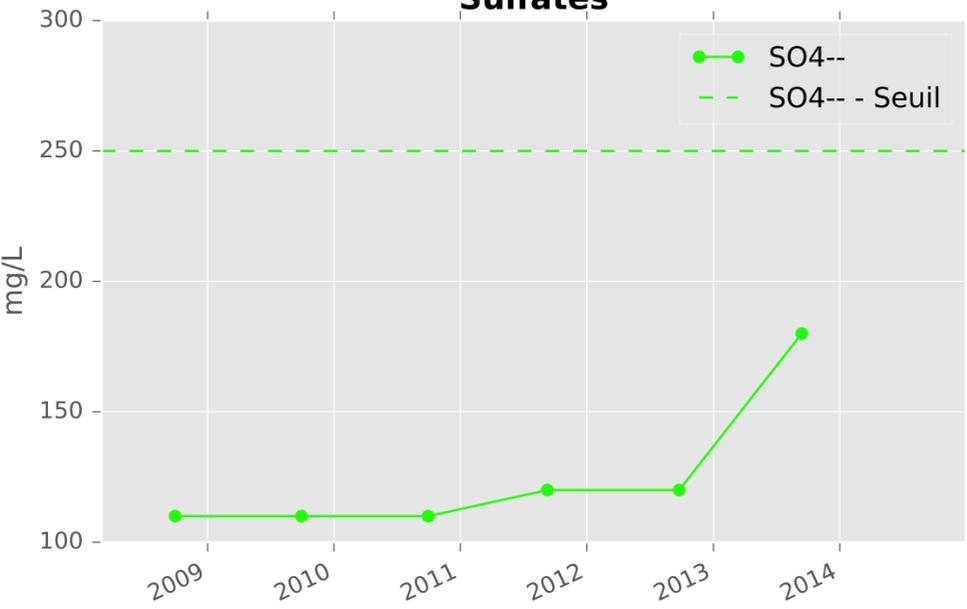
pH



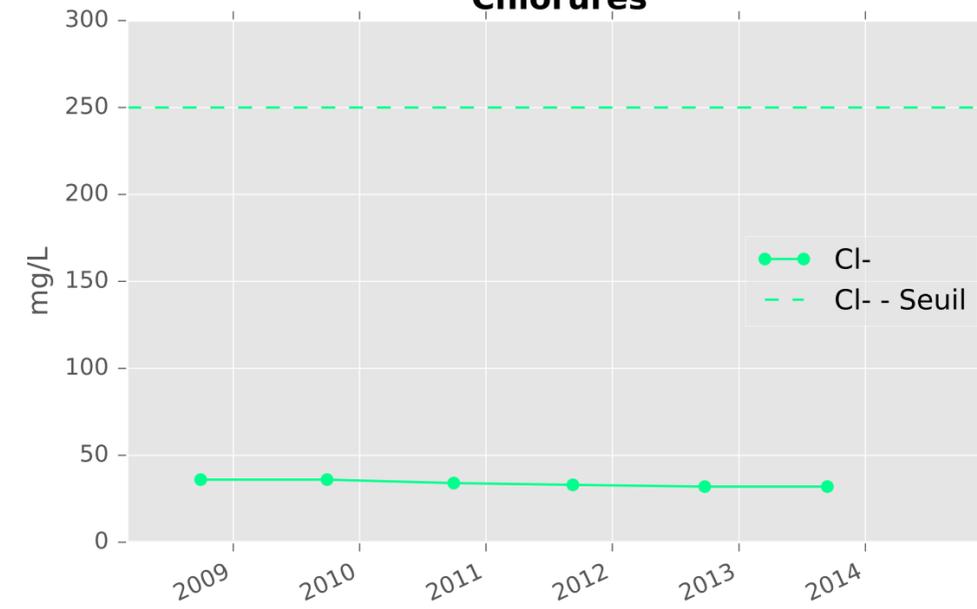
Conductivité



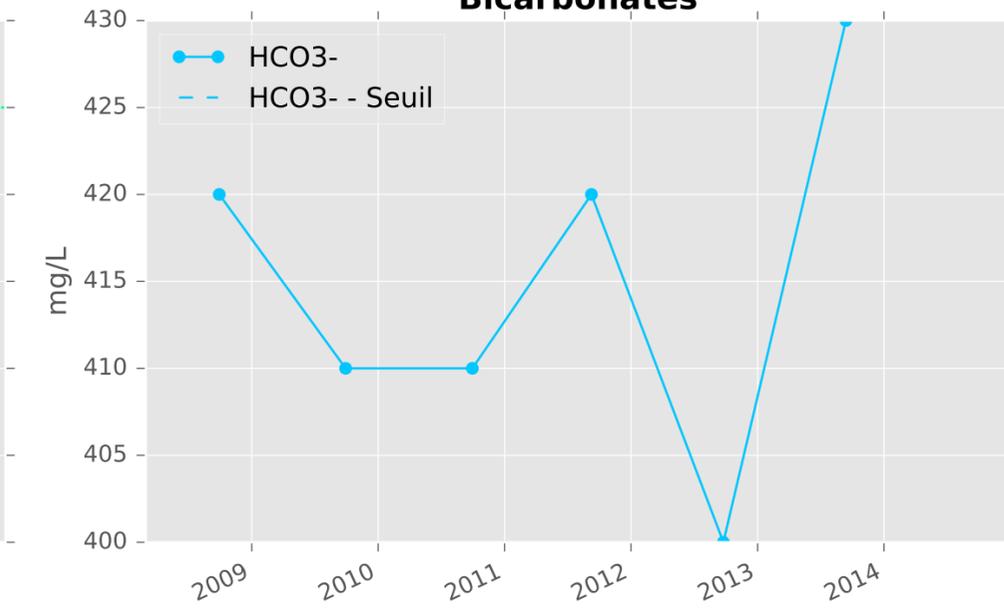
Sulfates



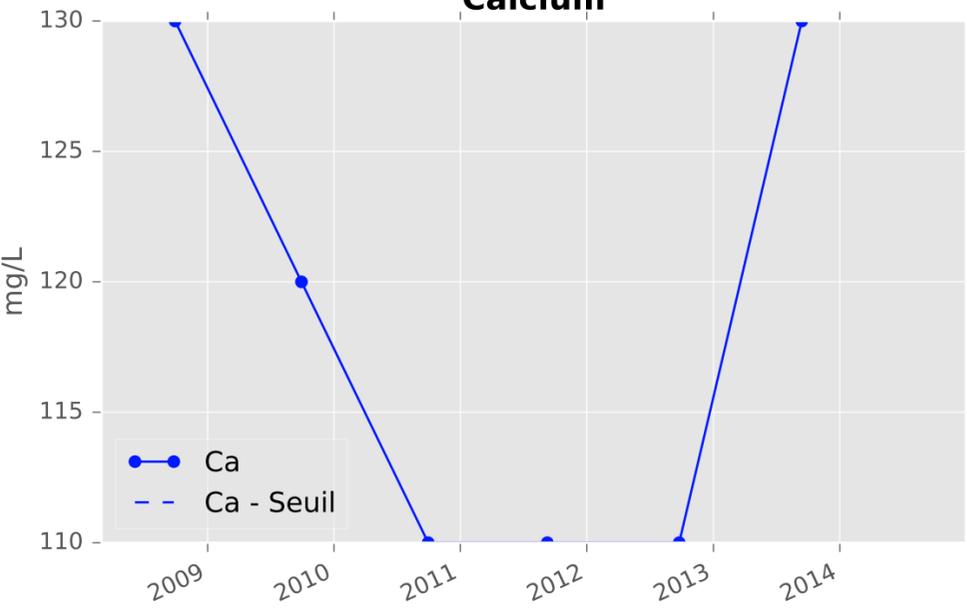
Chlorures



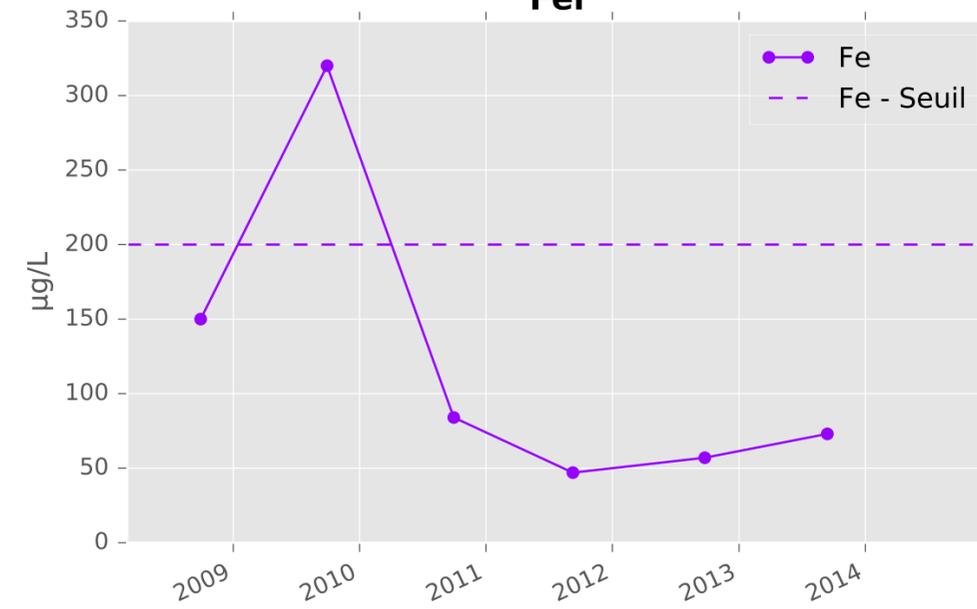
Bicarbonates



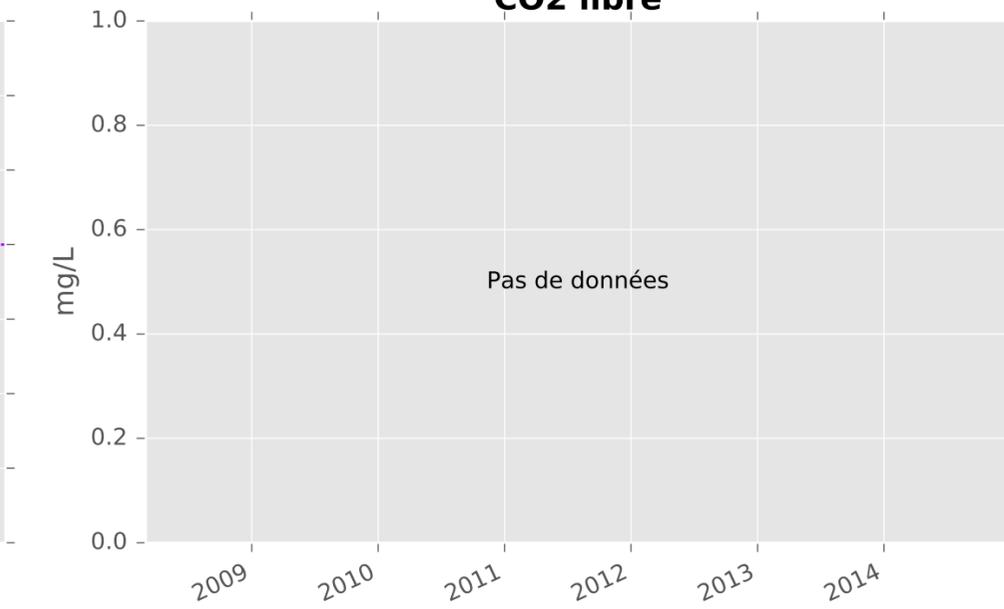
Calcium



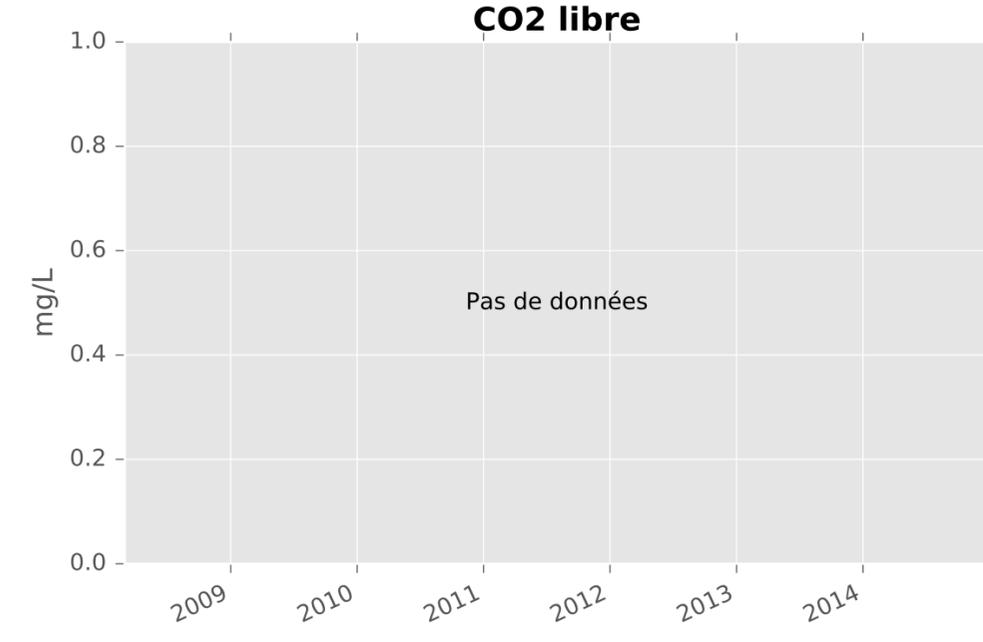
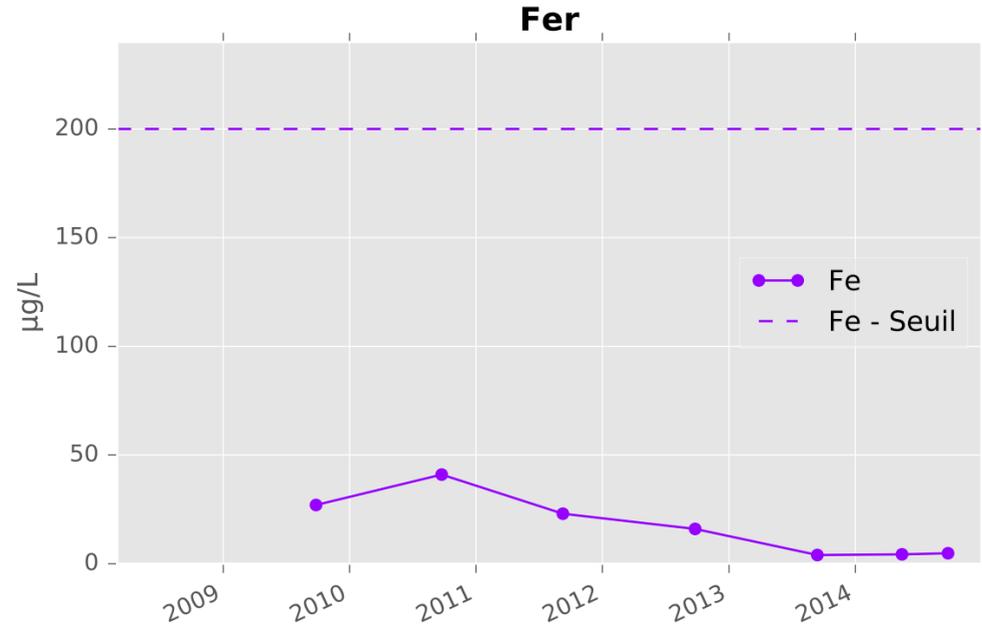
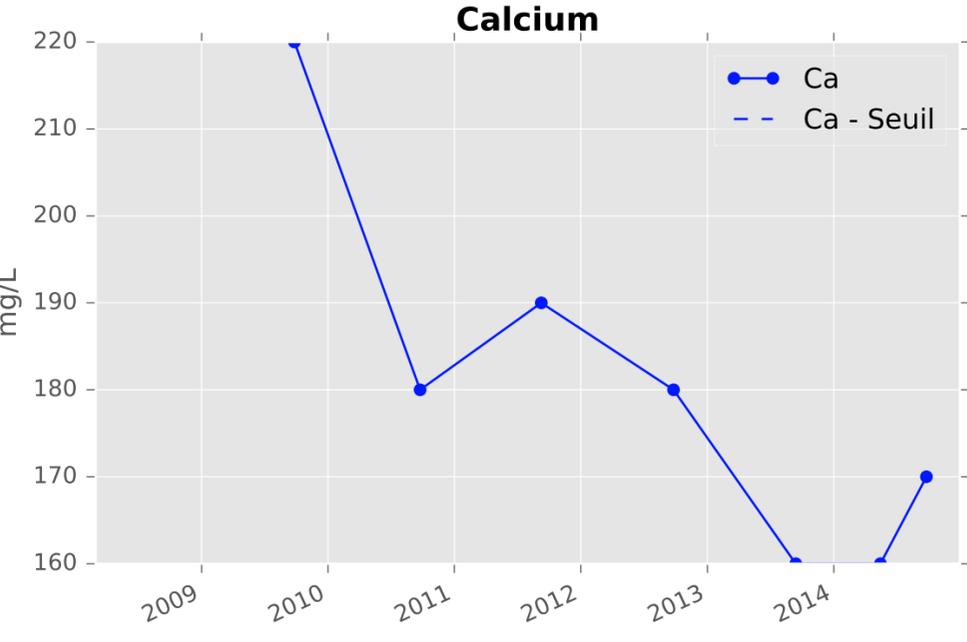
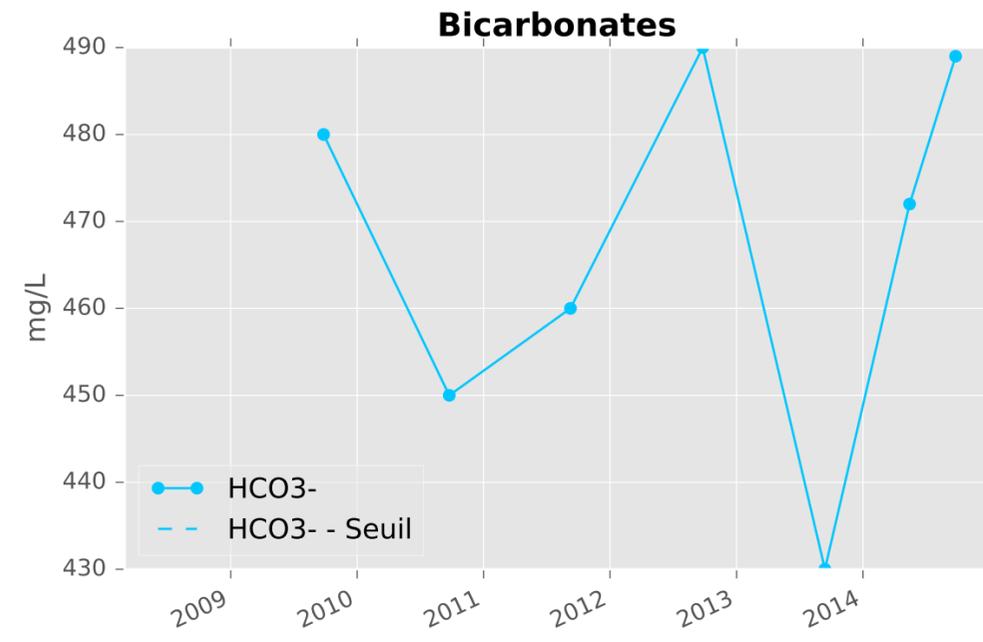
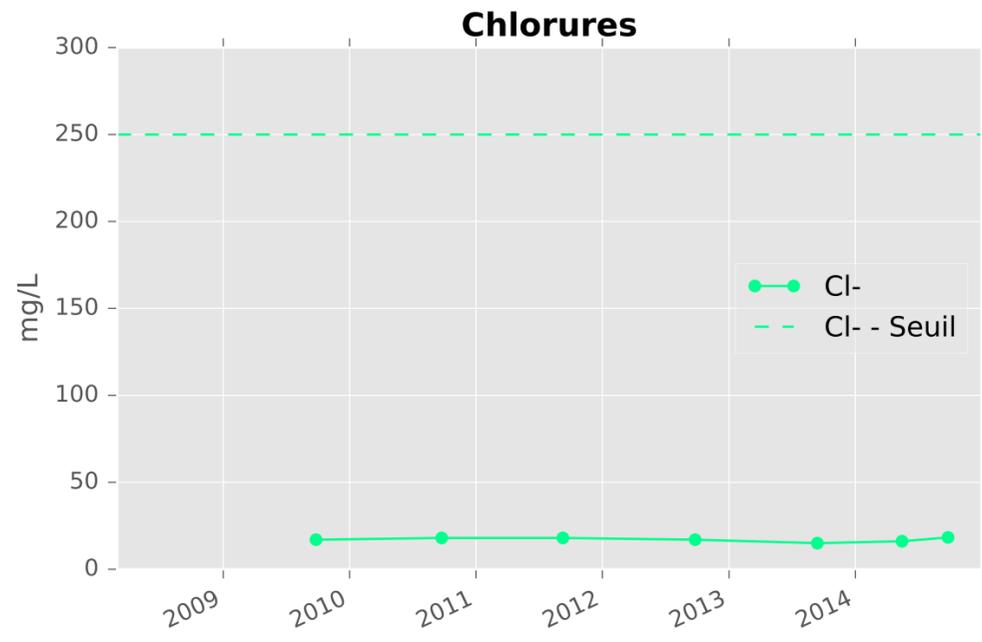
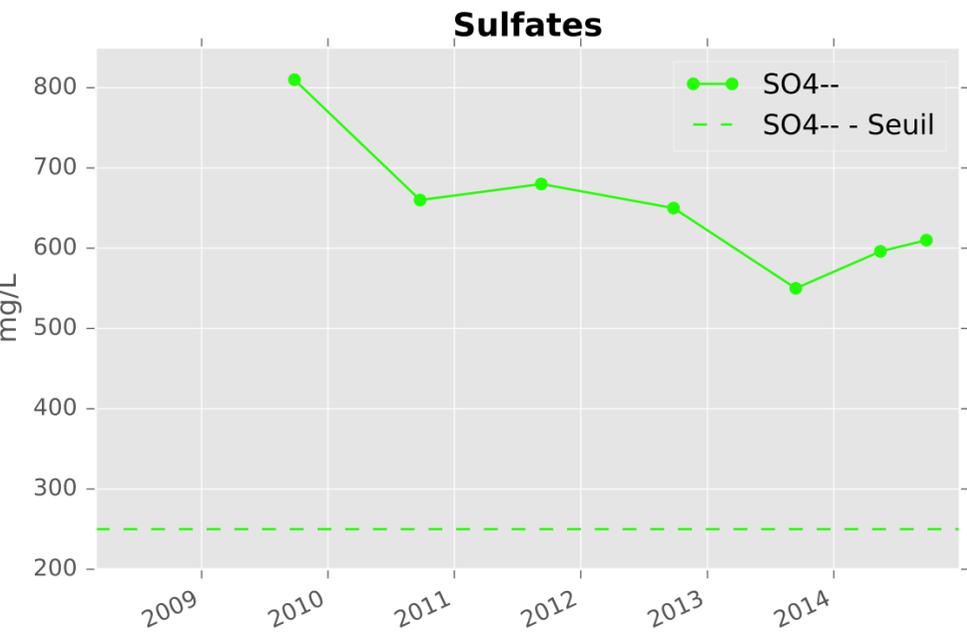
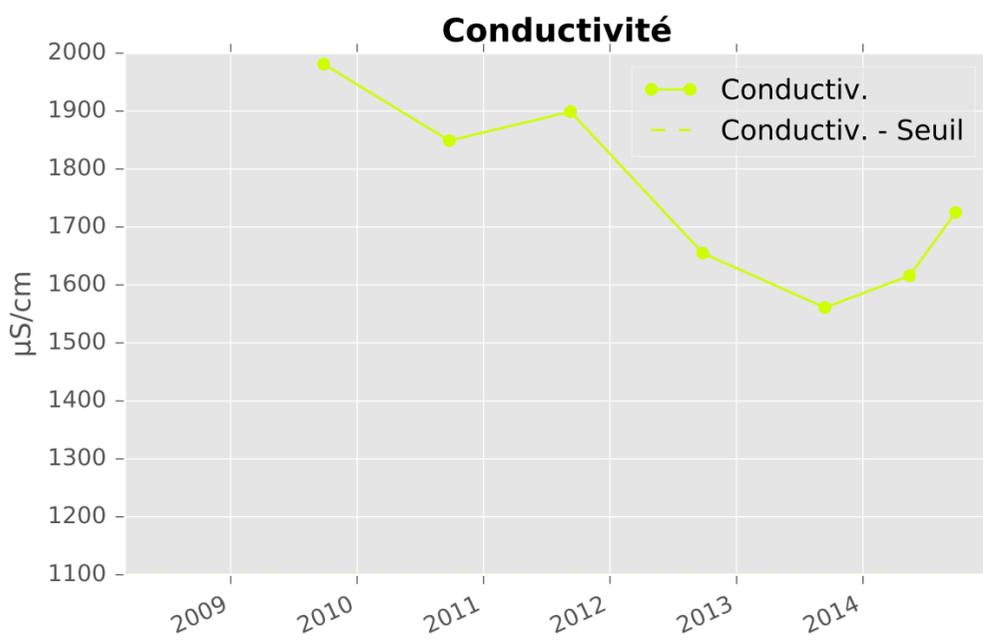
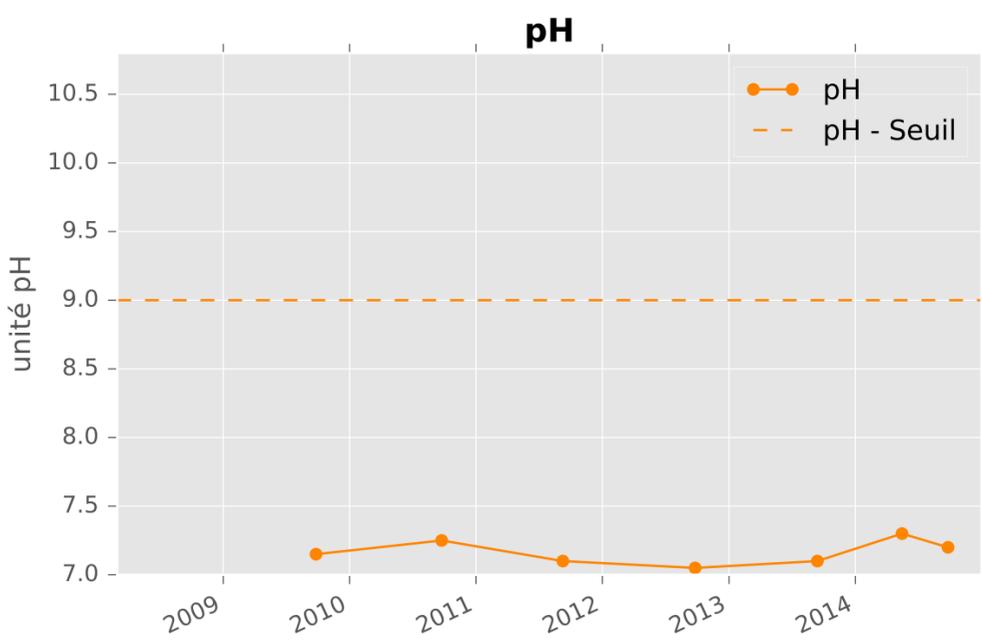
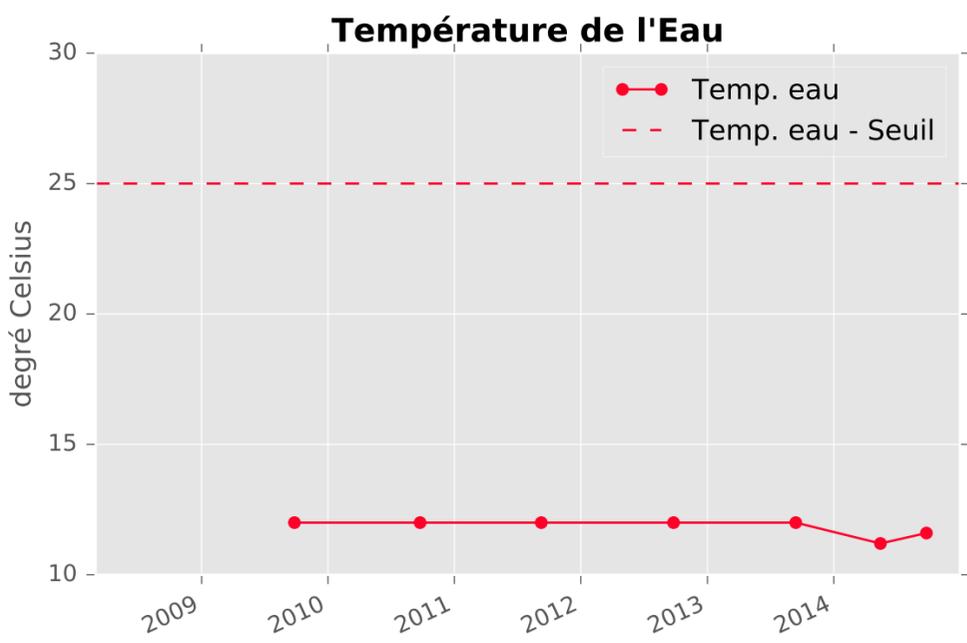
Fer



CO2 libre

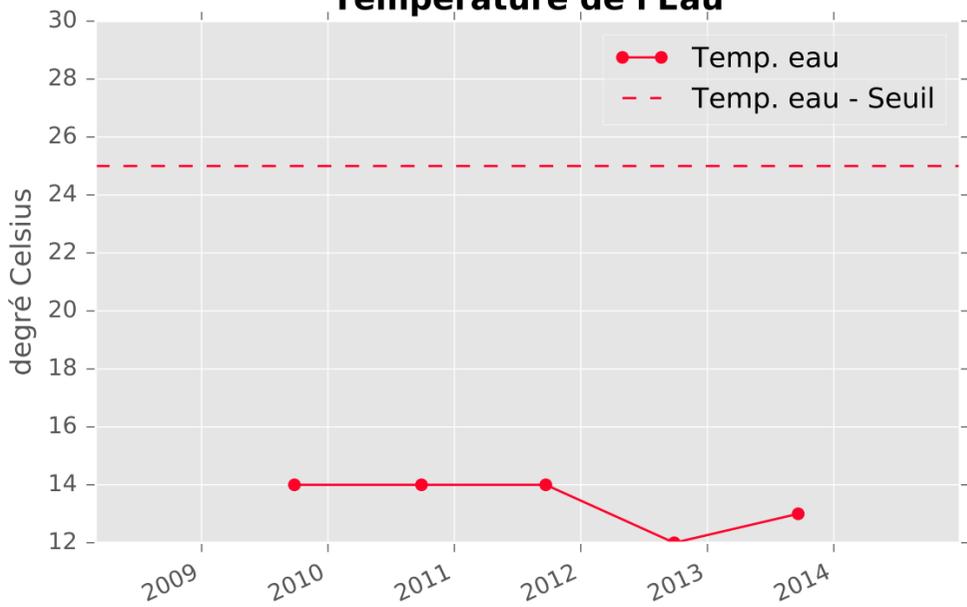


FERRIFERE NON EXPLOITEE CENTRE - 01373X0158 - C8 - Piézomètre Chevillon artésien

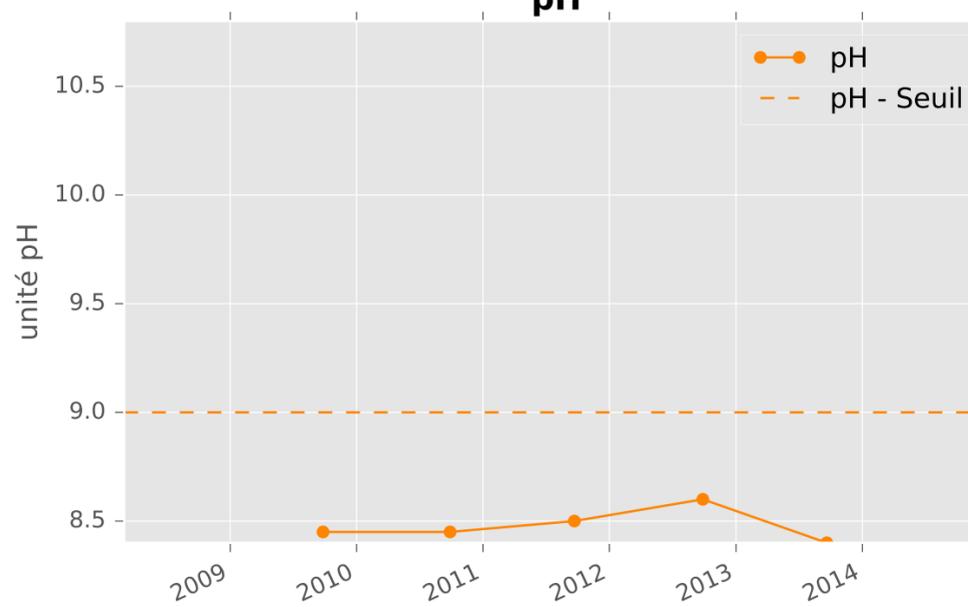


FERRIFERE NON EXPLOITEE CENTRE - 01372X0211 - C10 - Piézomètre Mance bis

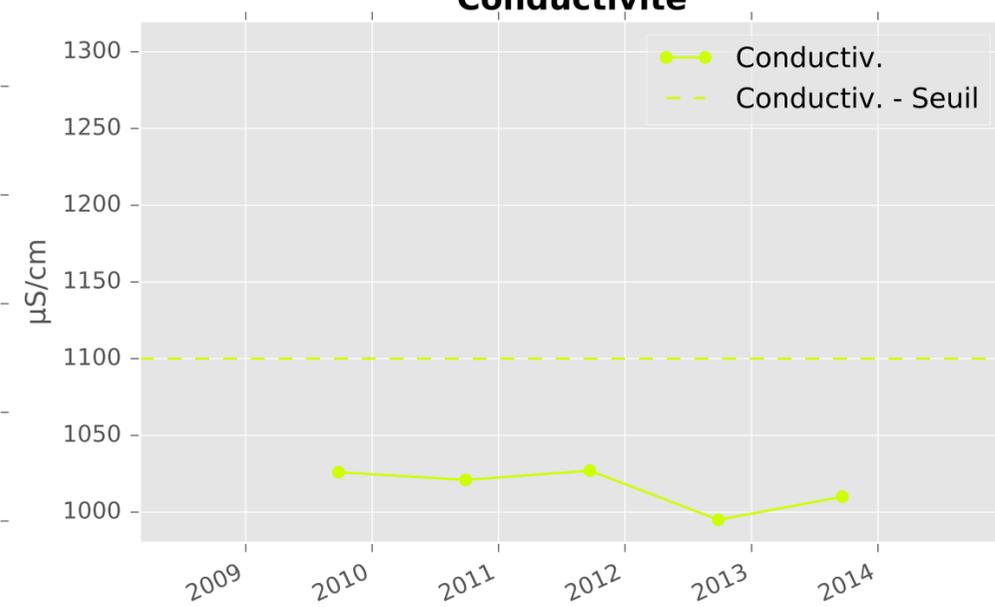
Température de l'Eau



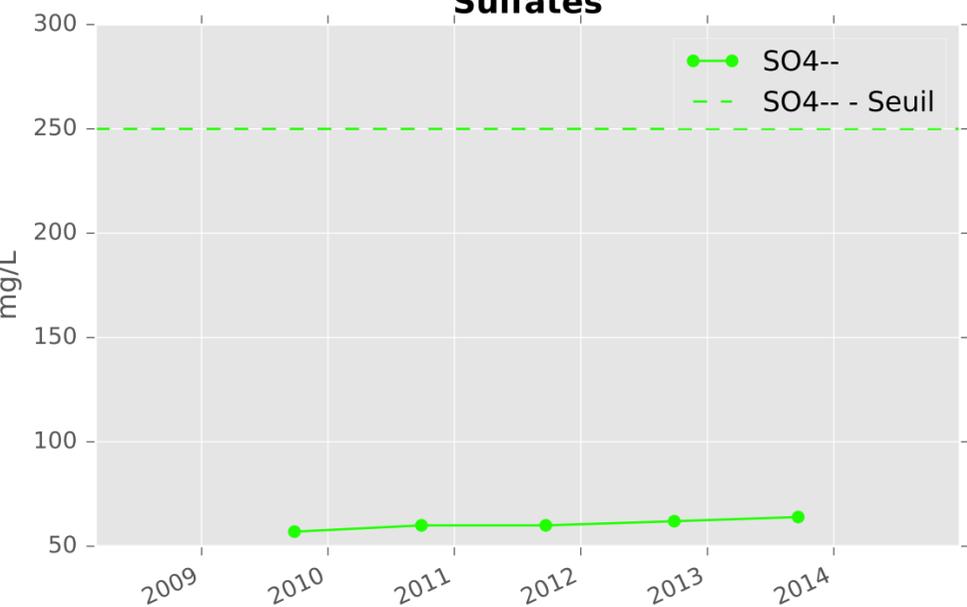
pH



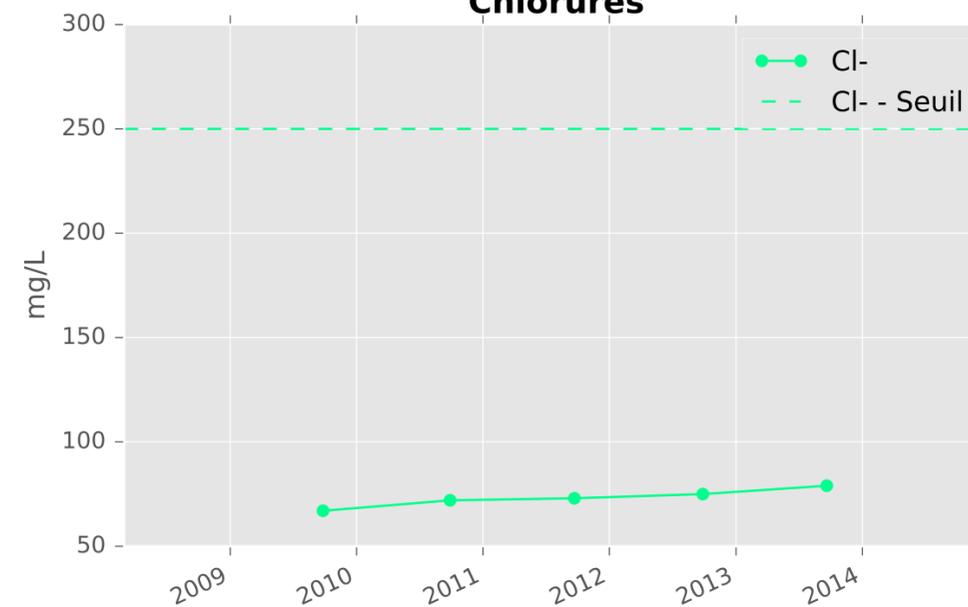
Conductivité



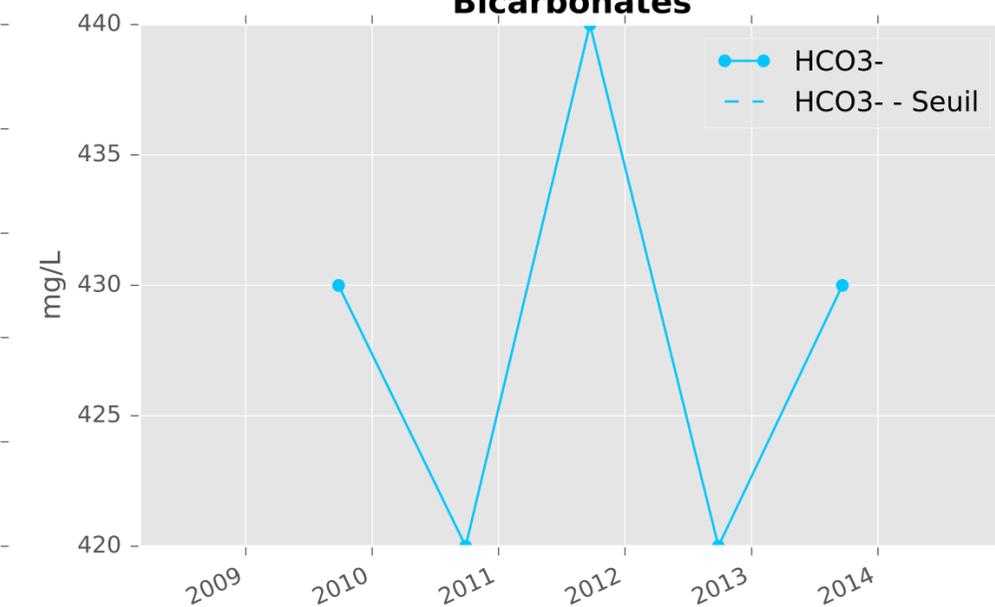
Sulfates



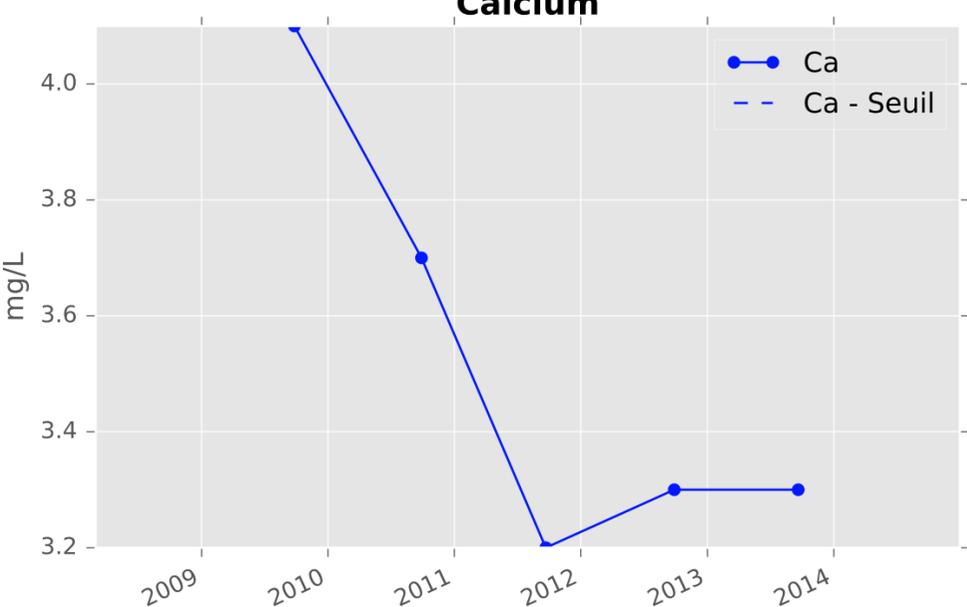
Chlorures



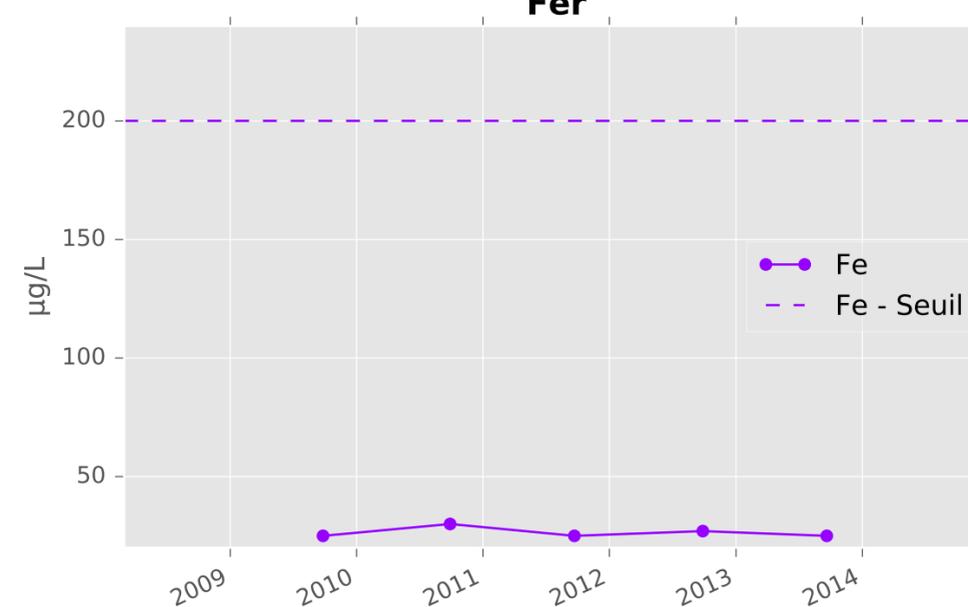
Bicarbonates



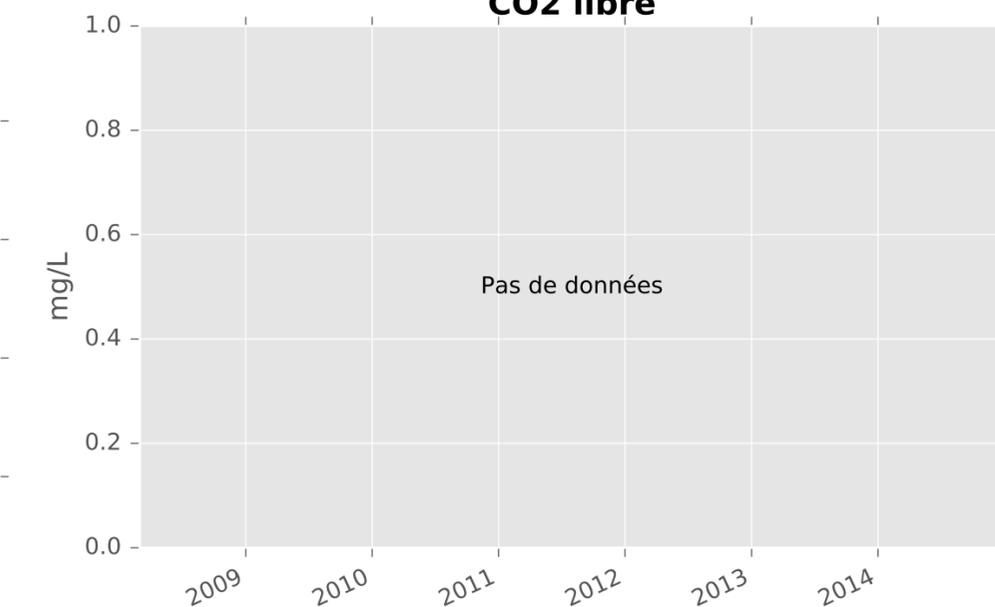
Calcium



Fer

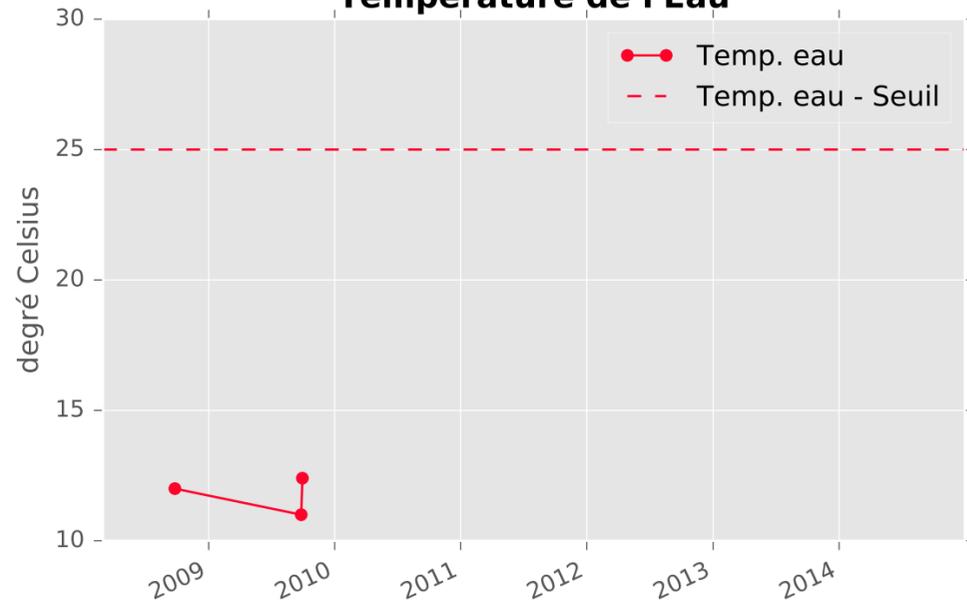


CO2 libre

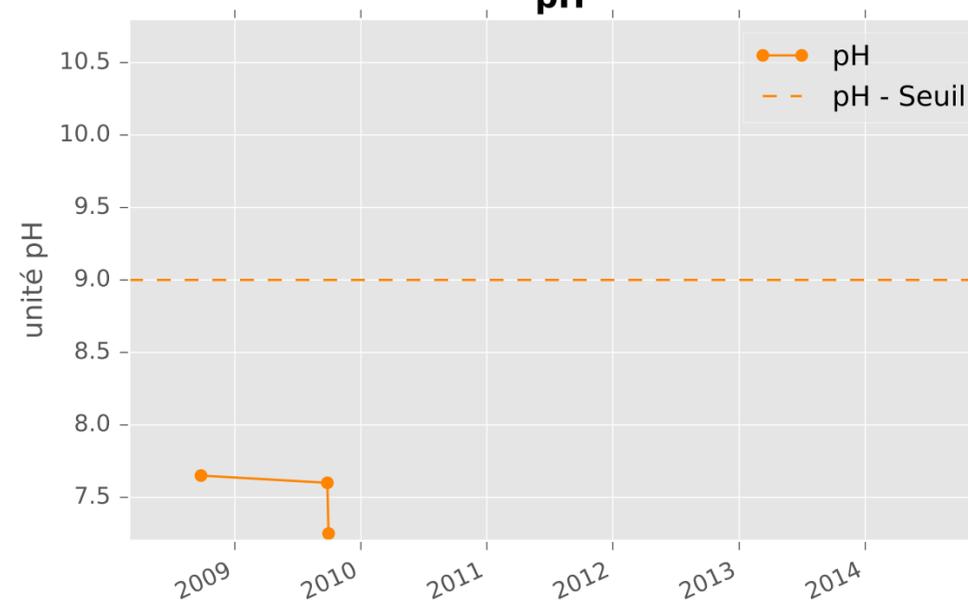


FERRIFERE NON EXPLOITEE SUD - 01373X0157 - S7 - Piézomètre Avril FF

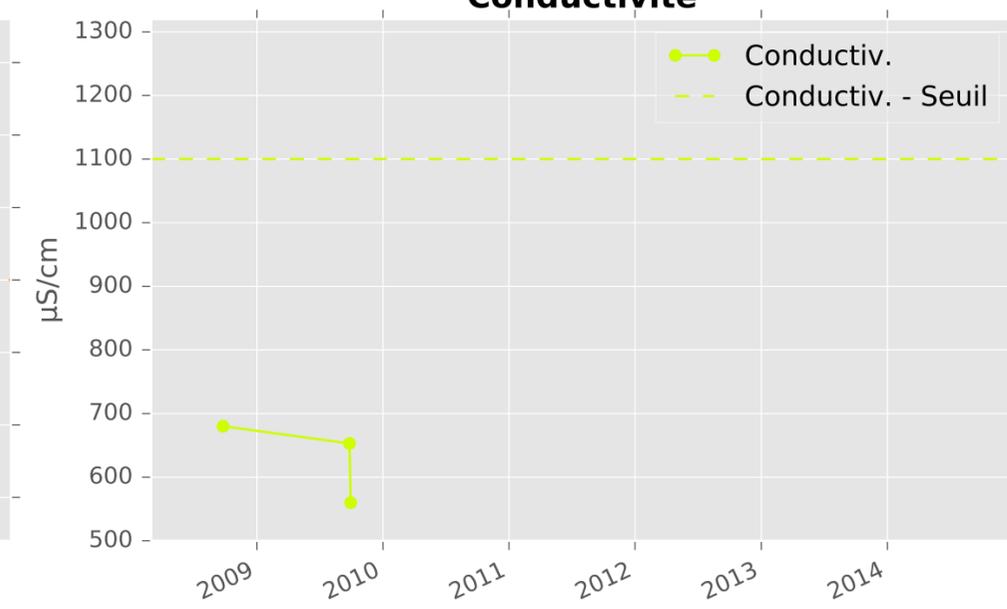
Température de l'Eau



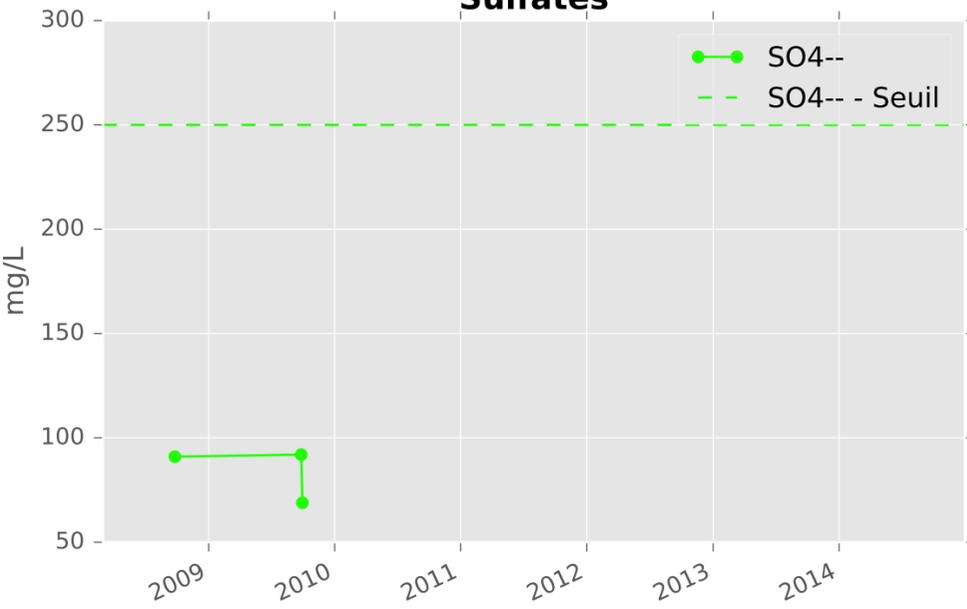
pH



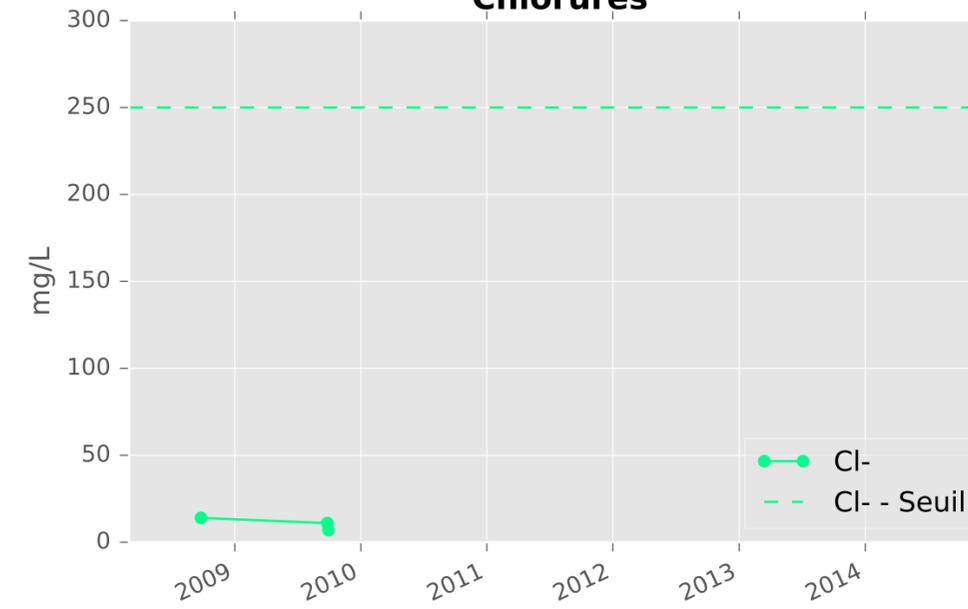
Conductivité



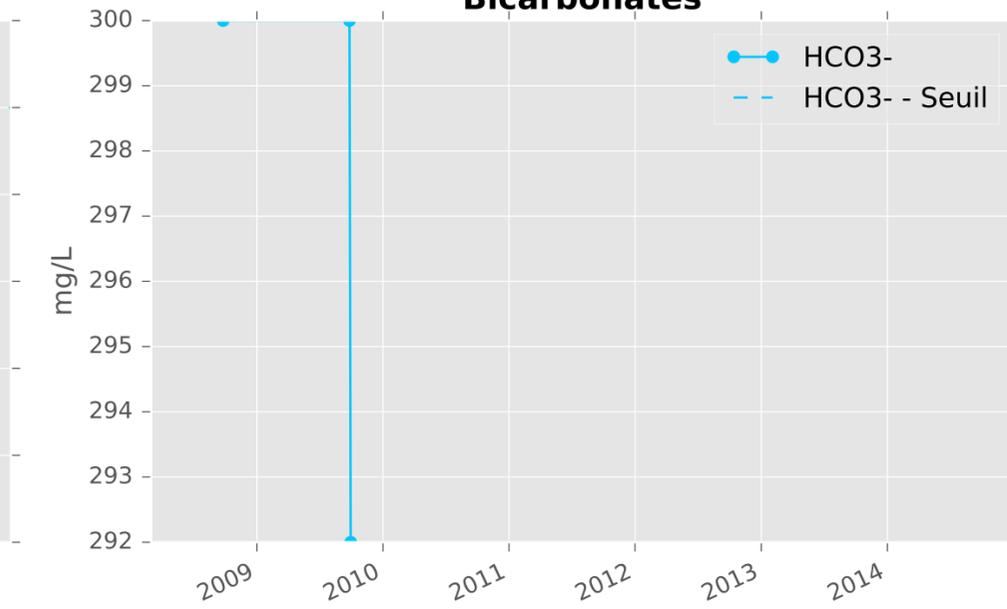
Sulfates



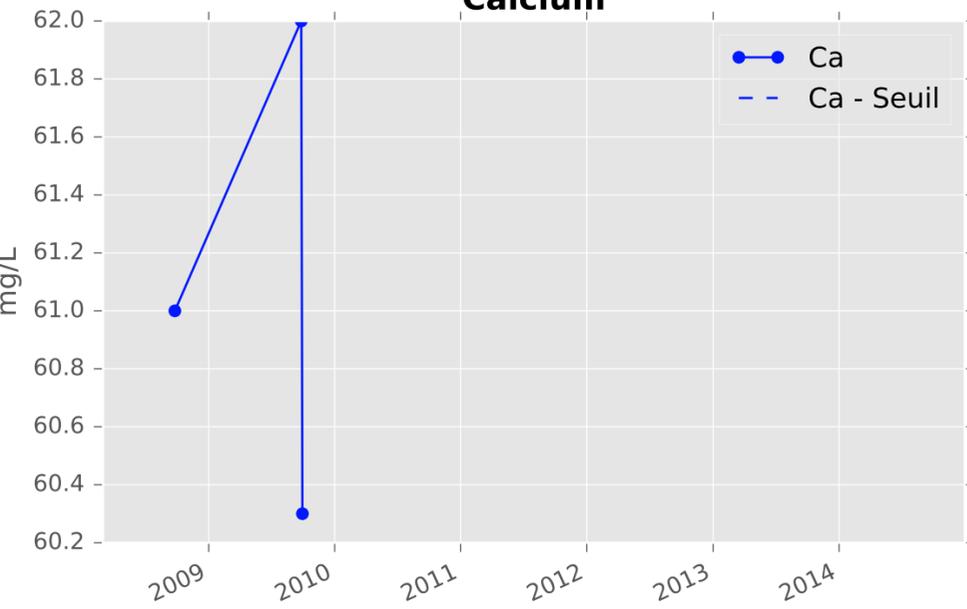
Chlorures



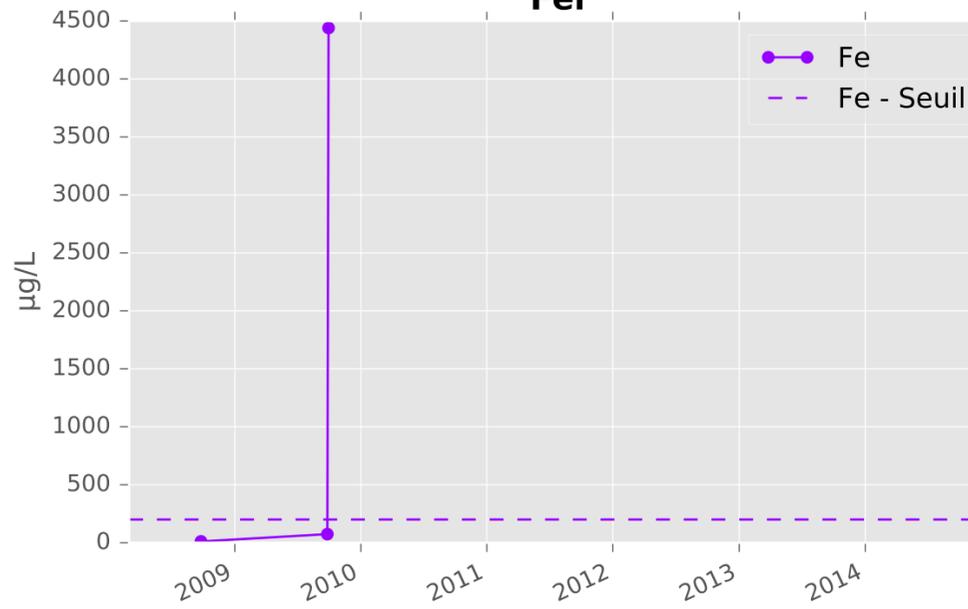
Bicarbonates



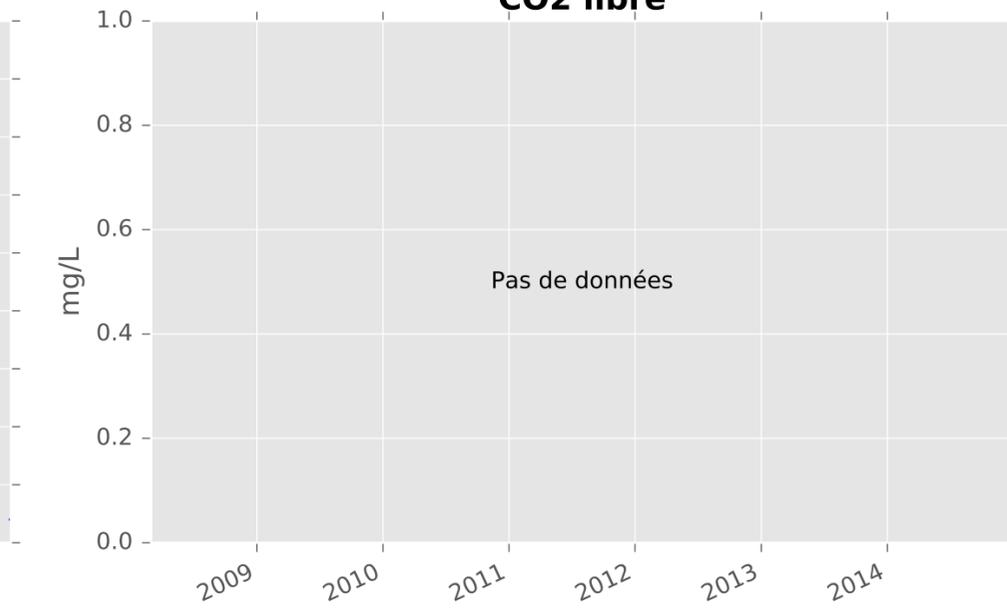
Calcium



Fer

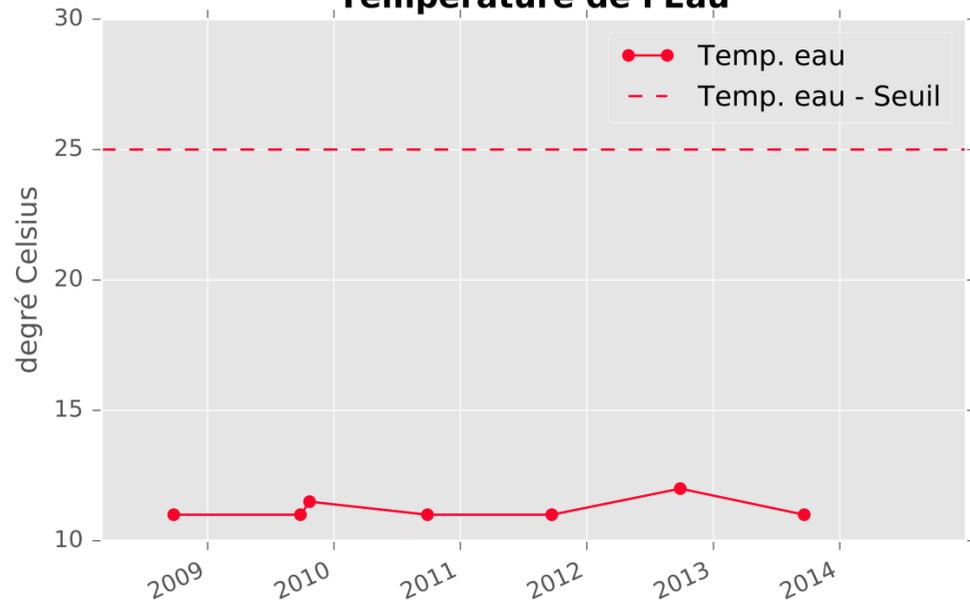


CO2 libre

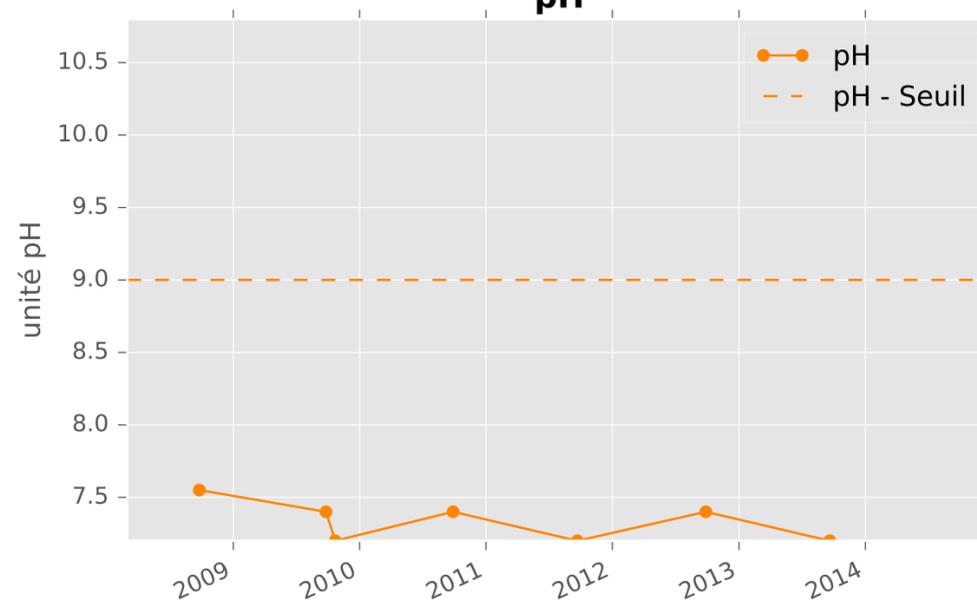


FERRIFERE NON EXPLOITEE SUD - 01372X0209 - S10 - Piézomètre Briey B

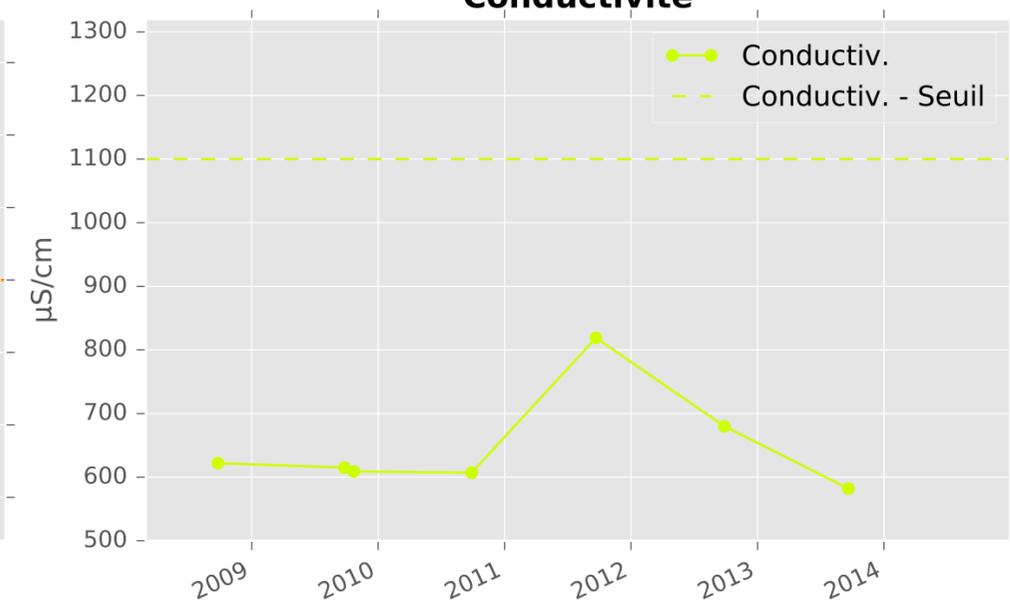
Température de l'Eau



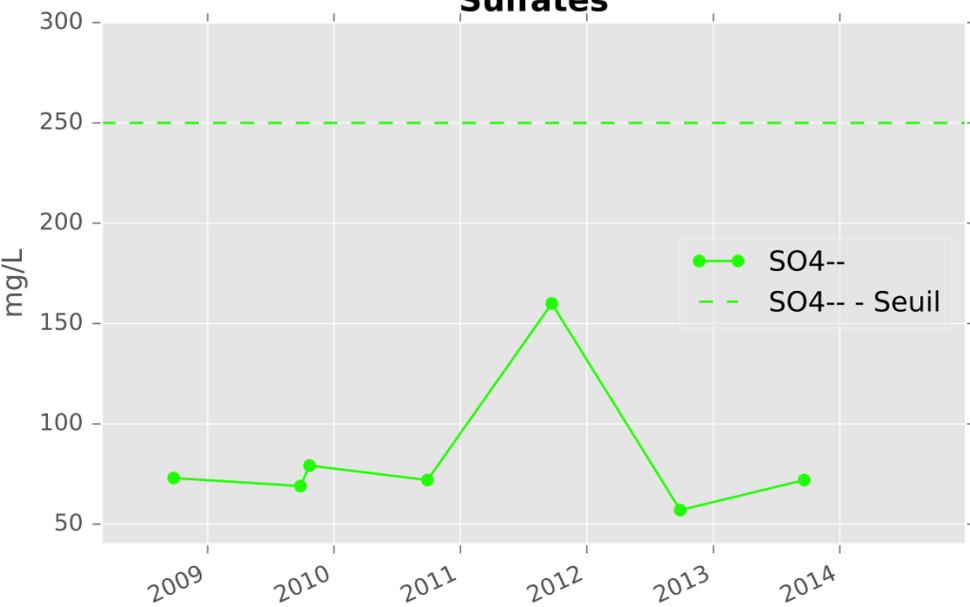
pH



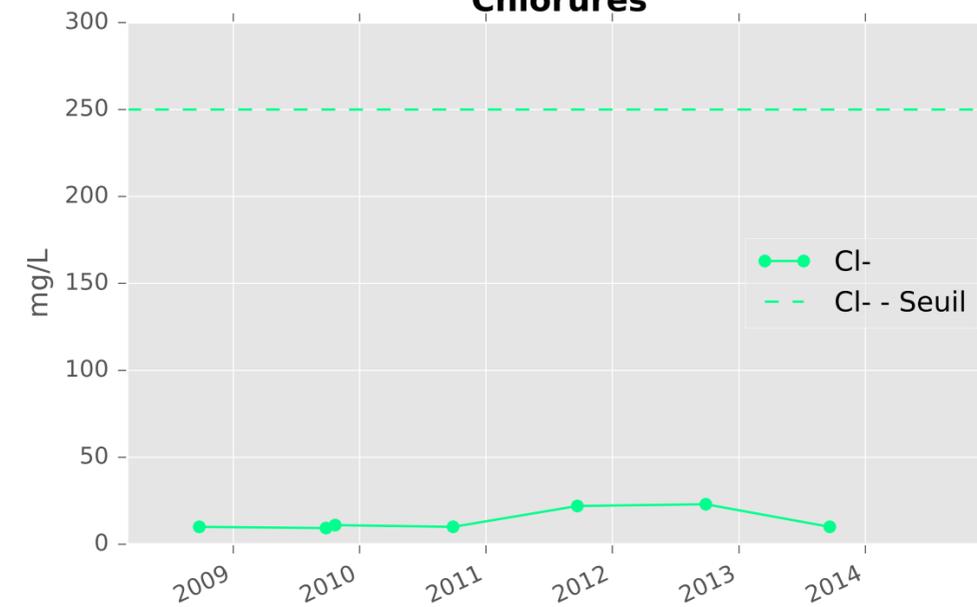
Conductivité



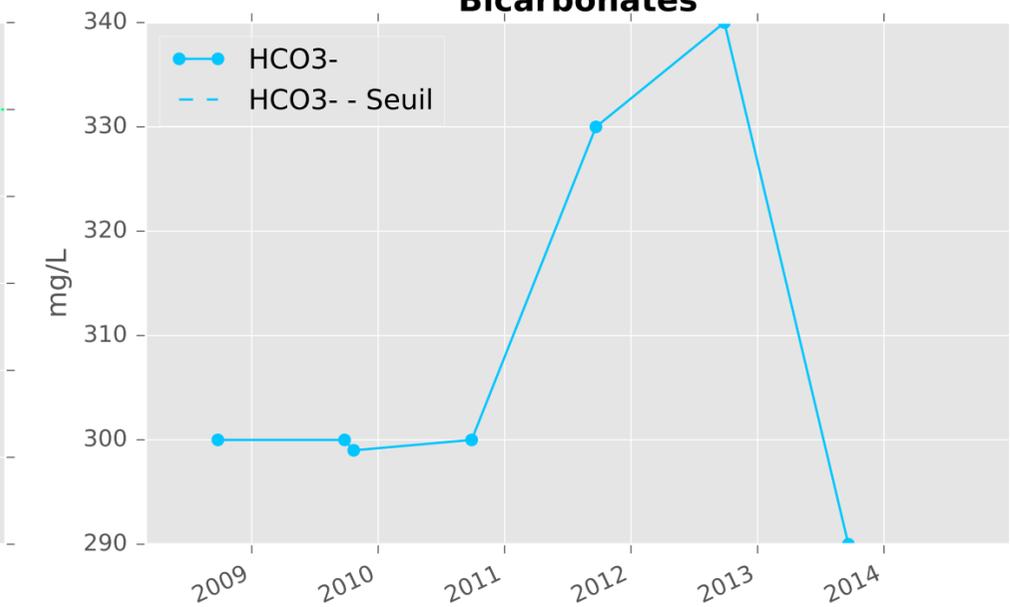
Sulfates



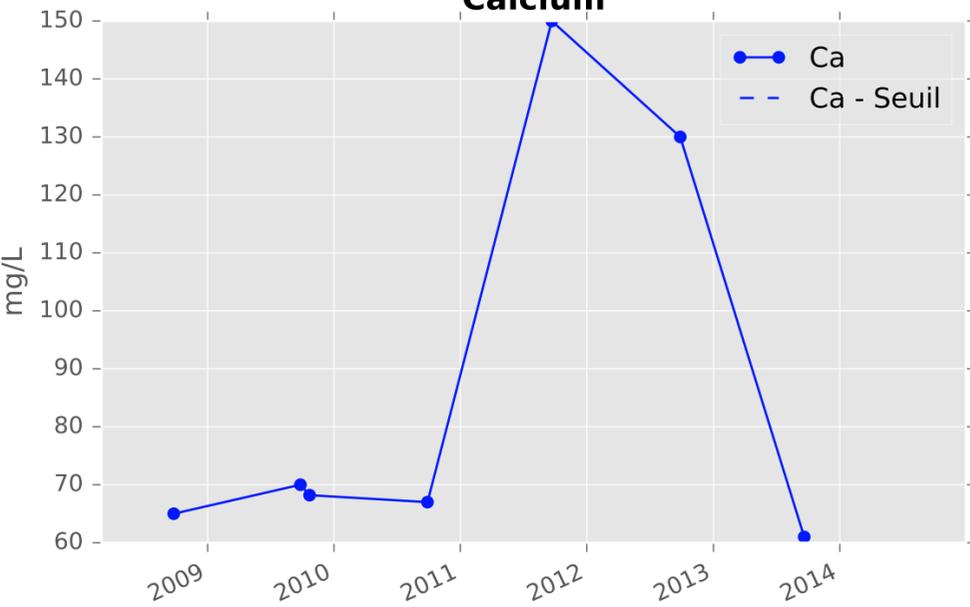
Chlorures



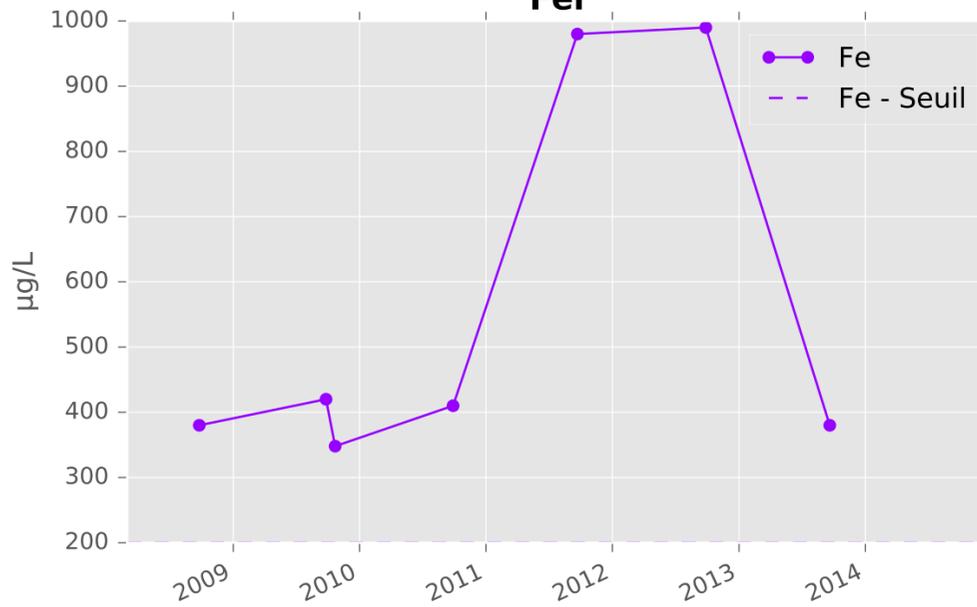
Bicarbonates



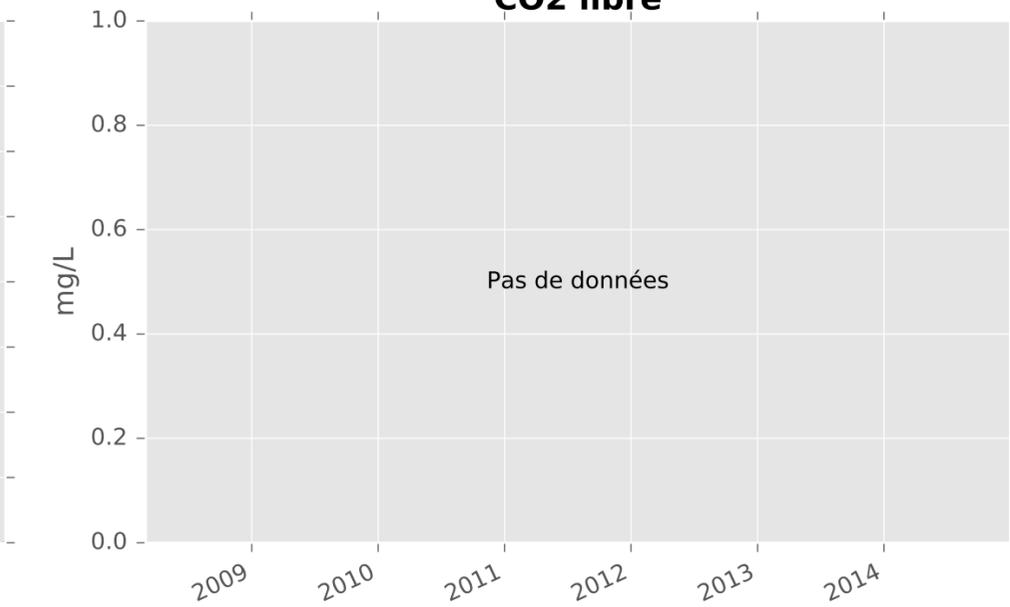
Calcium



Fer

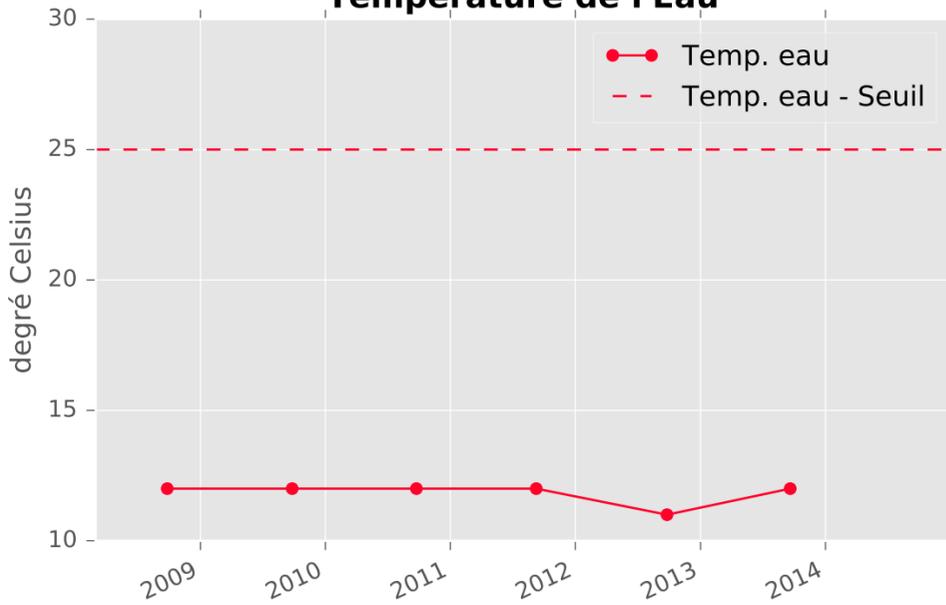


CO2 libre

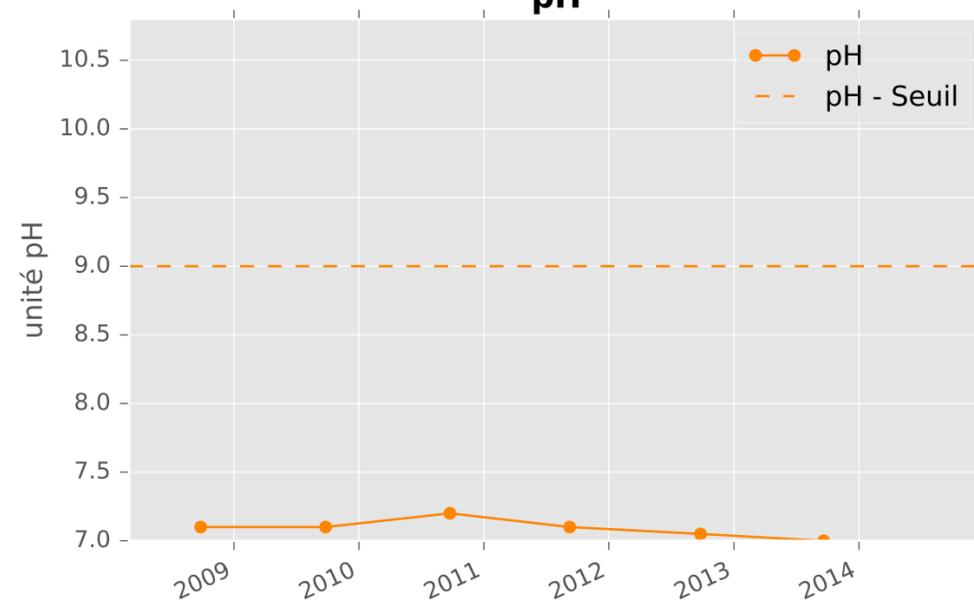


FERRIFERE NON EXPLOITEE SUD - 01373X0160 - S11 - Piézomètre Conroy aval

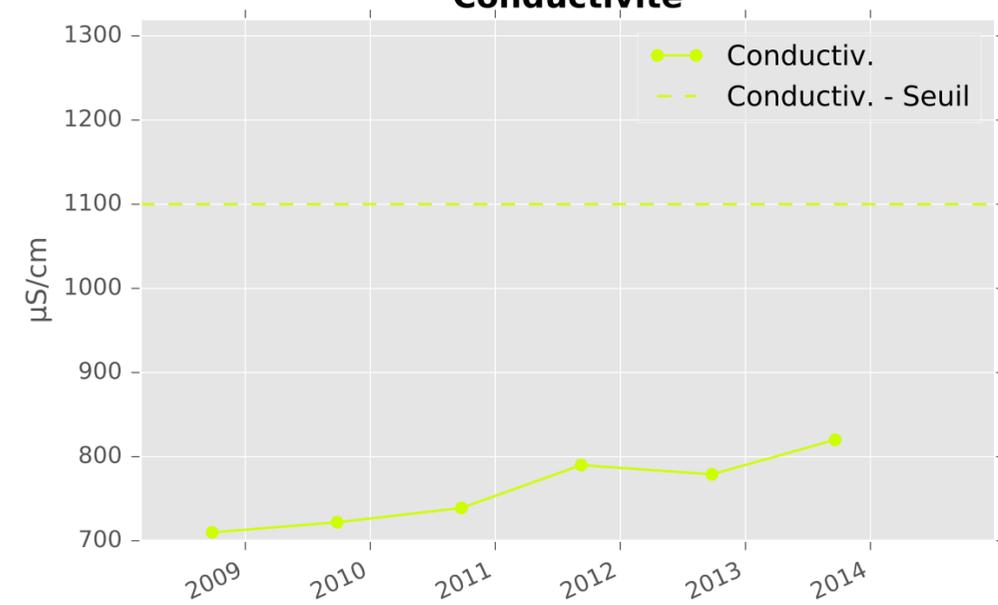
Température de l'Eau



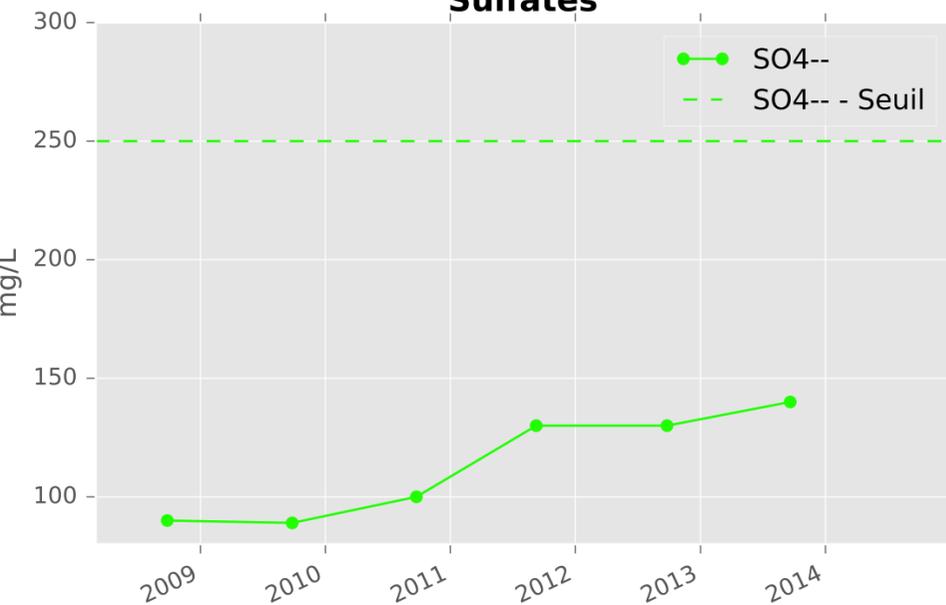
pH



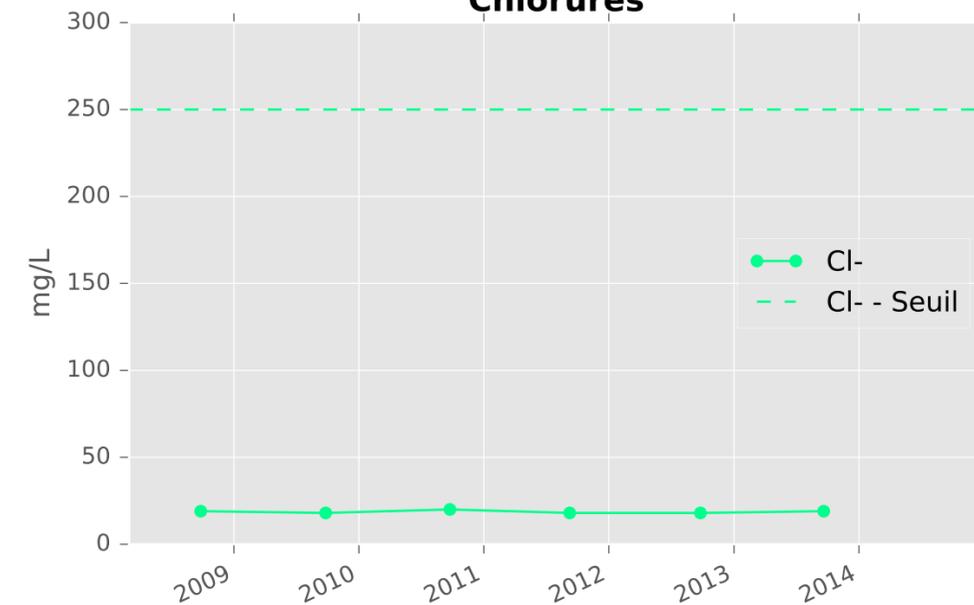
Conductivité



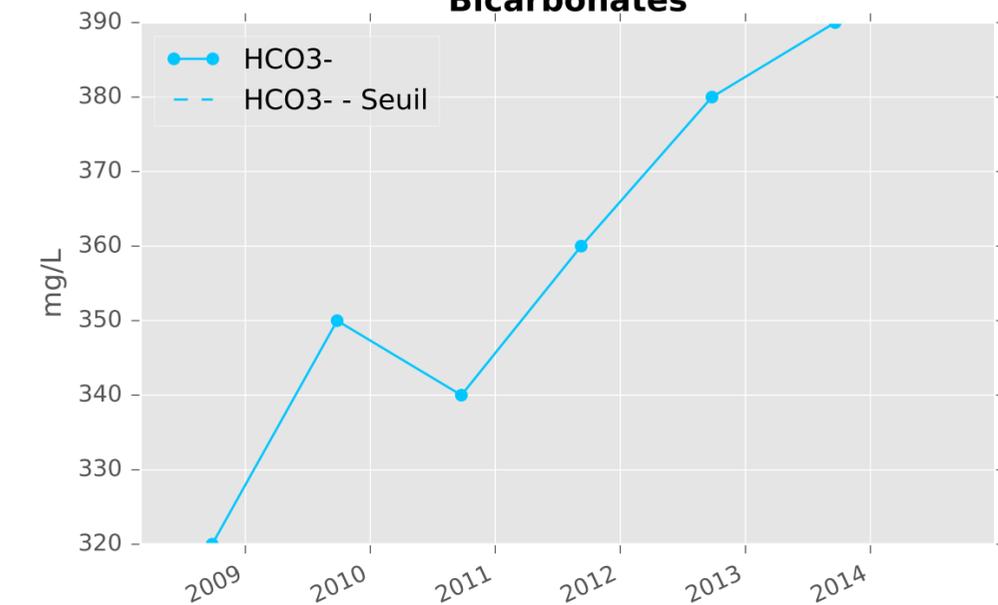
Sulfates



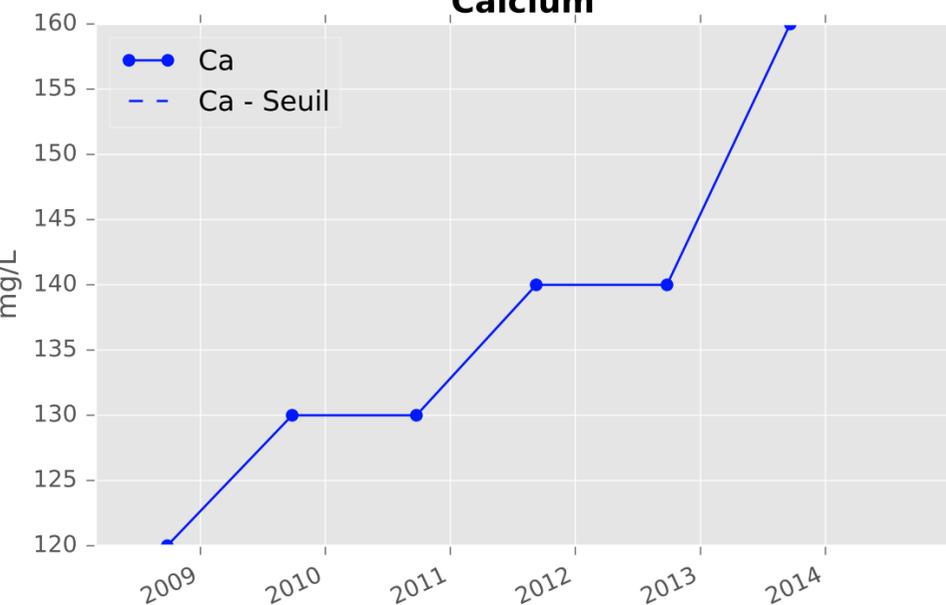
Chlorures



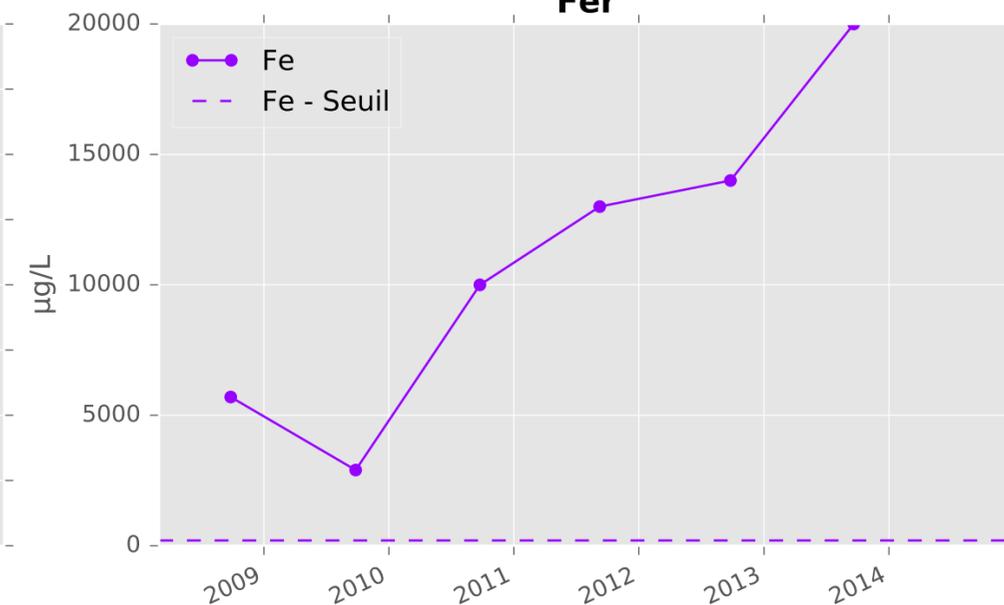
Bicarbonates



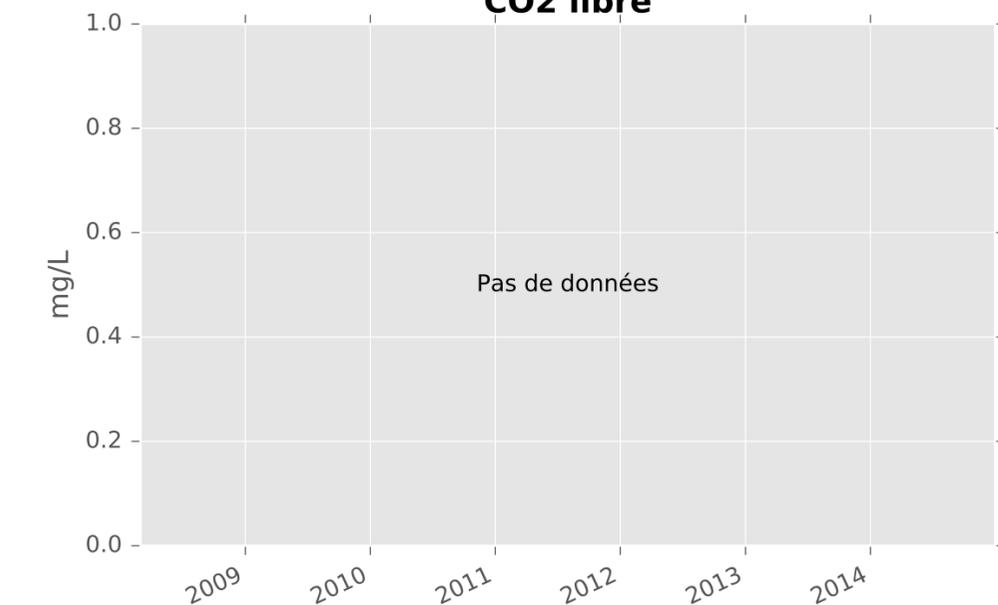
Calcium



Fer

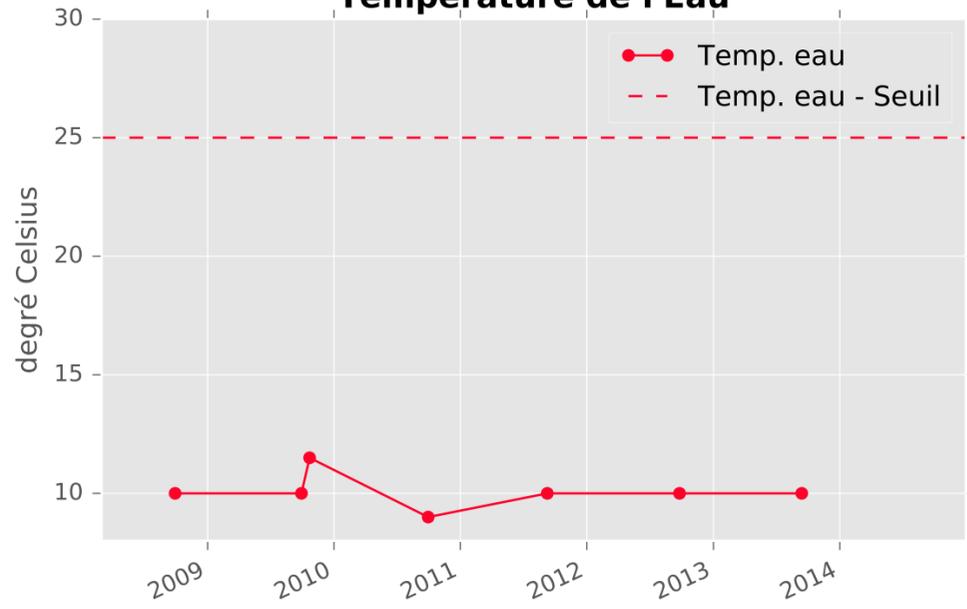


CO2 libre

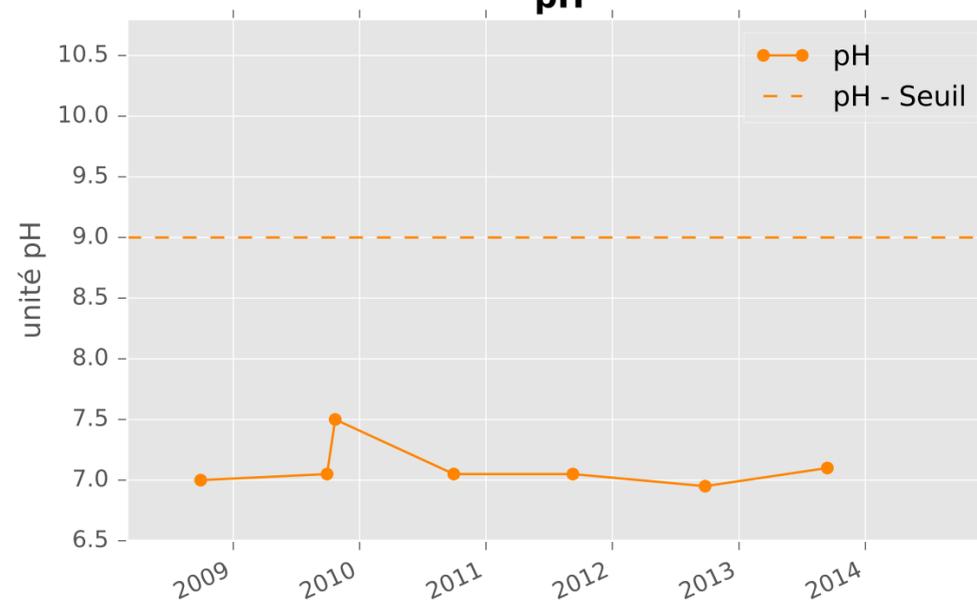


FERRIFERE NON EXPLOITEE et CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0130 - C7 - Piézomètre A25 Avril aval

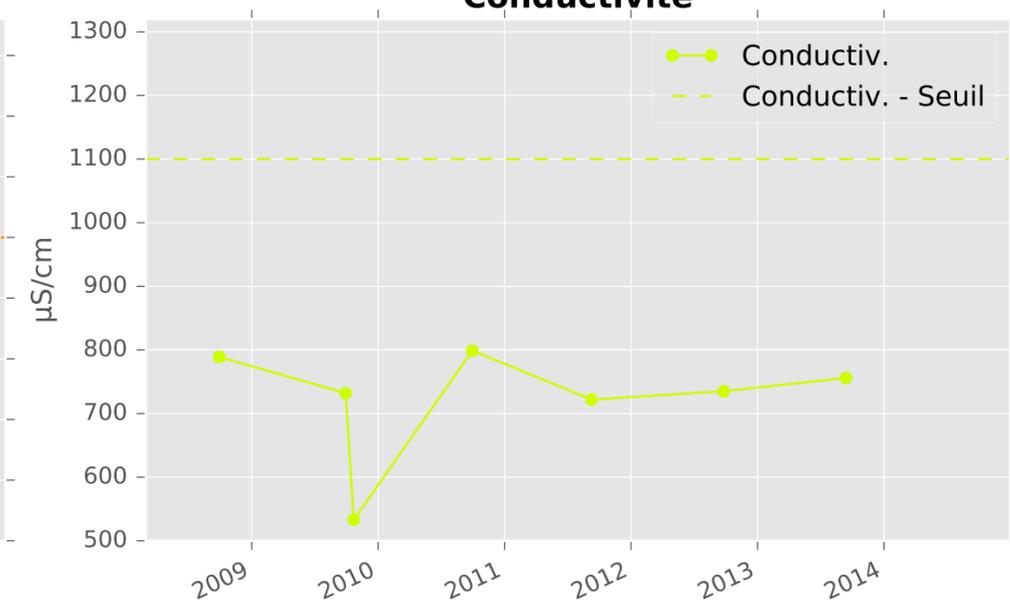
Température de l'Eau



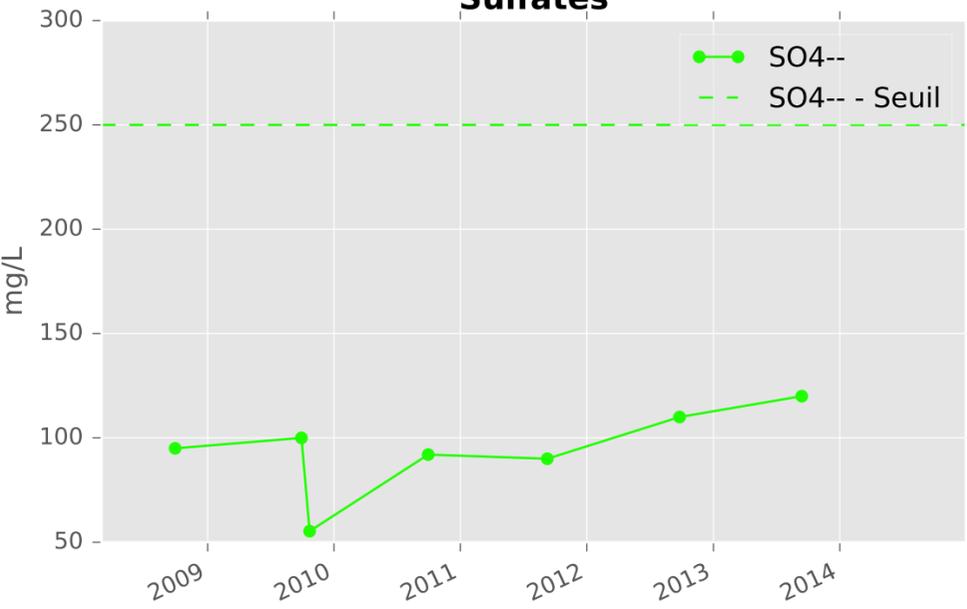
pH



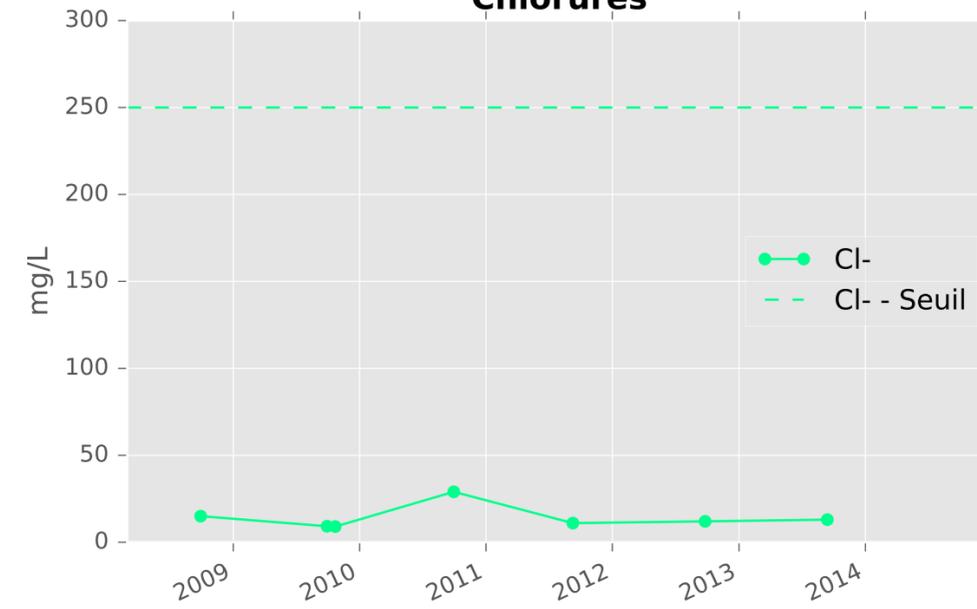
Conductivité



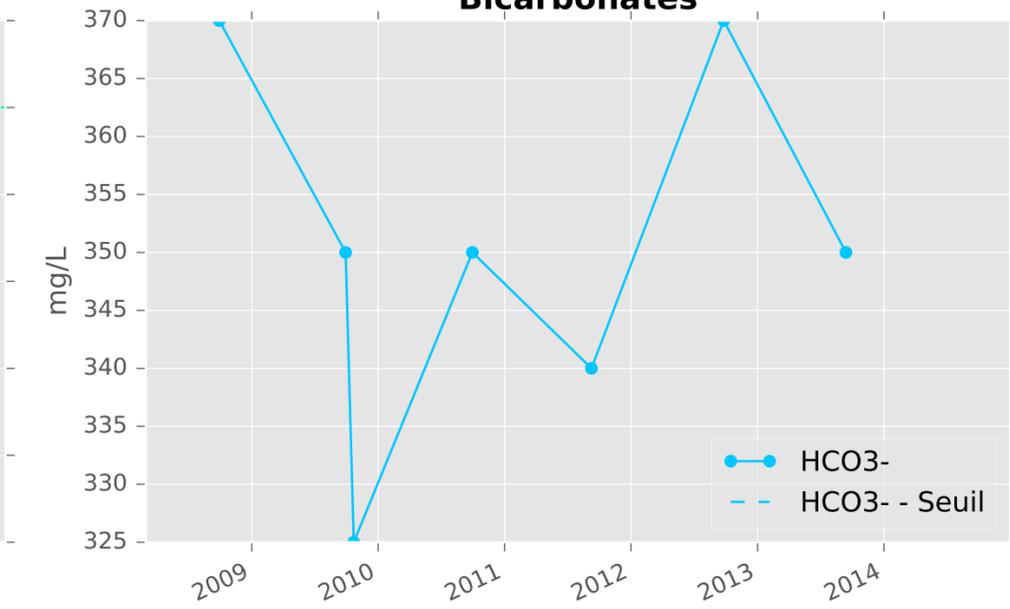
Sulfates



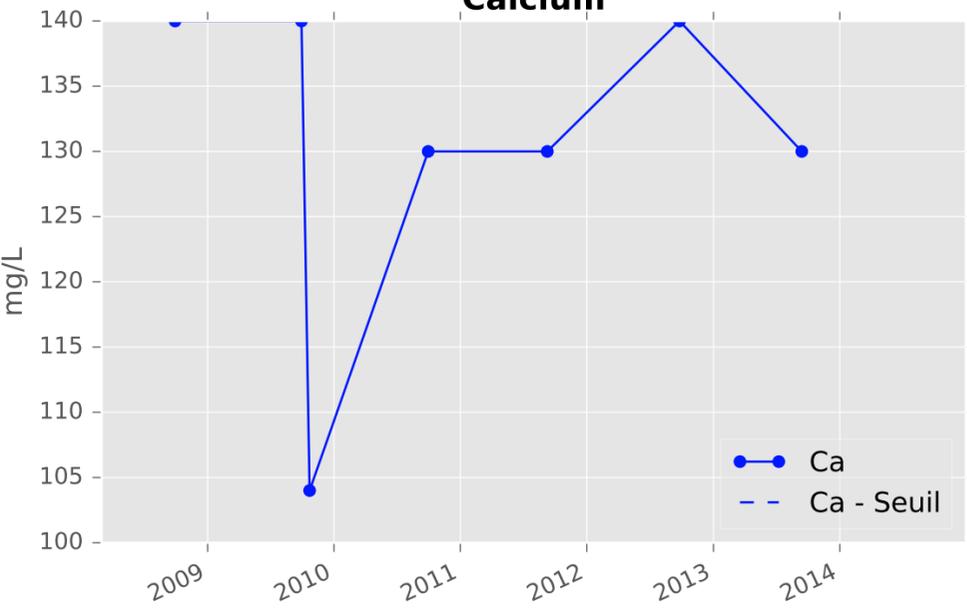
Chlorures



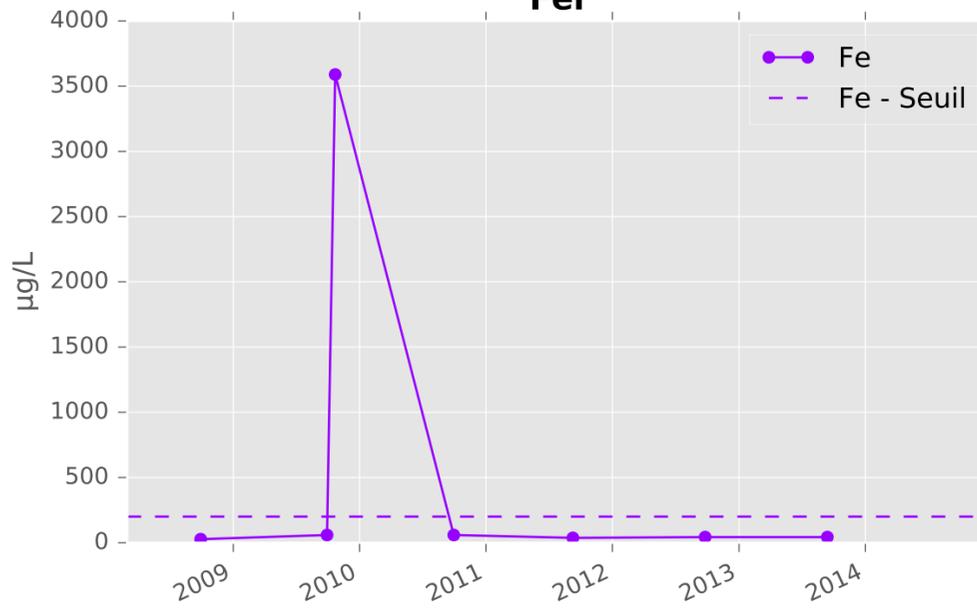
Bicarbonates



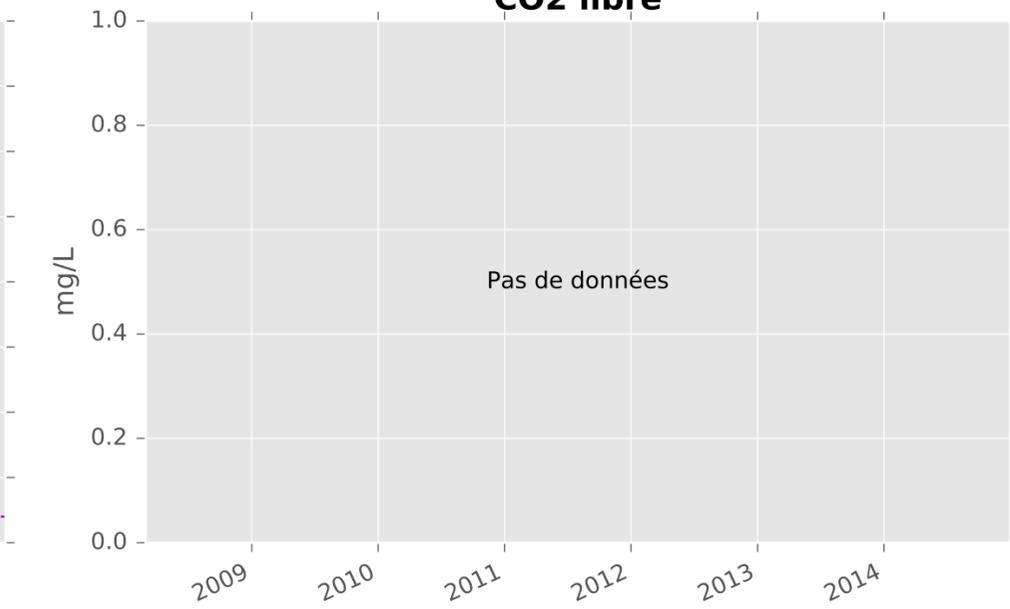
Calcium



Fer

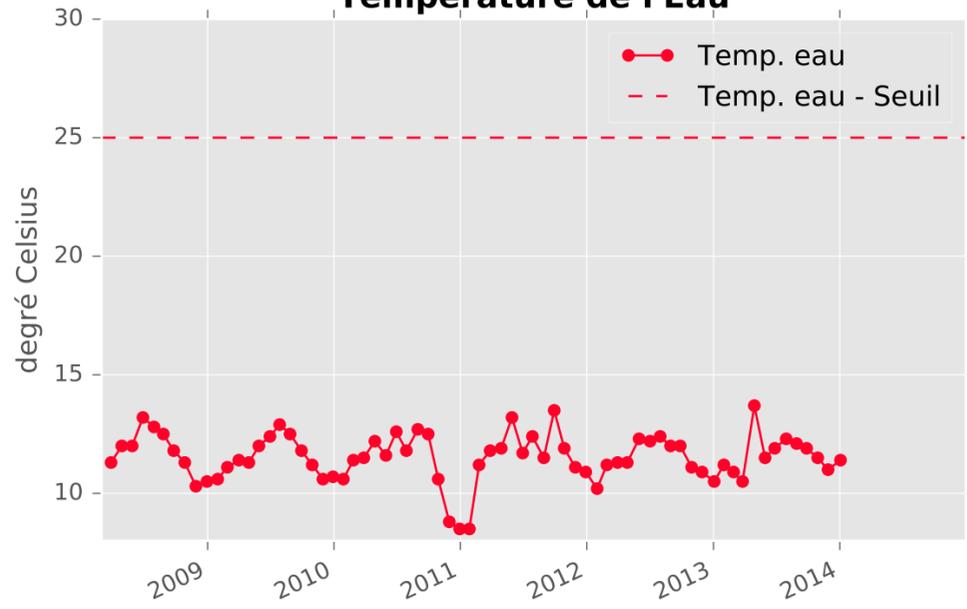


CO2 libre

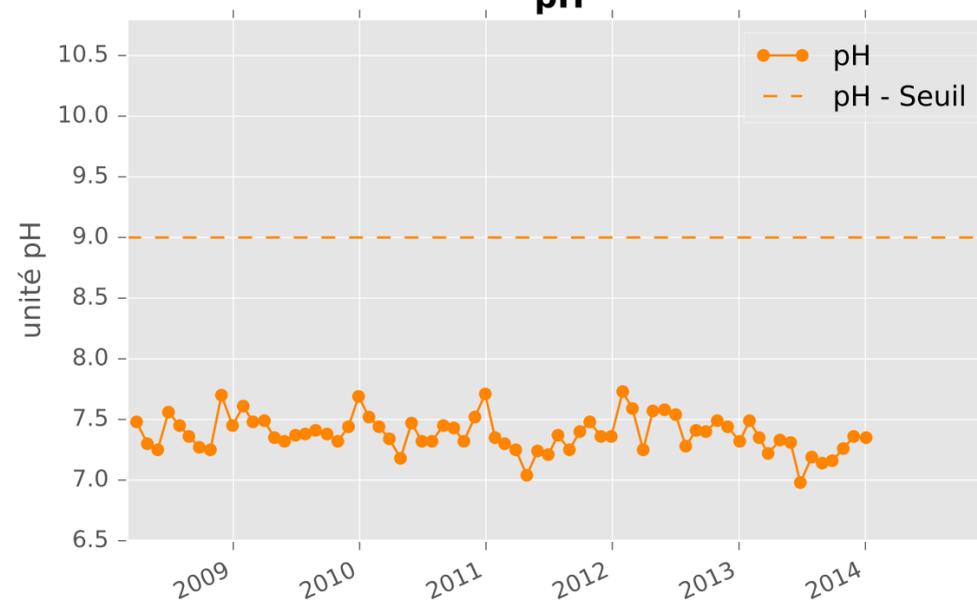


RESERVOIR MINIER BURBACH - 01138X0172 - Bu1 - Galerie de Burbach

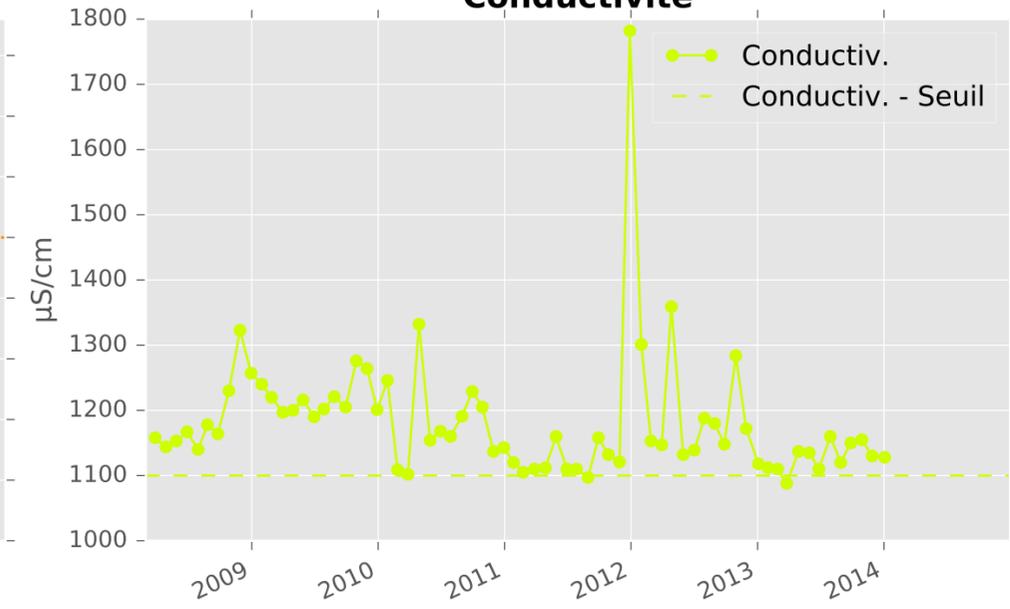
Température de l'Eau



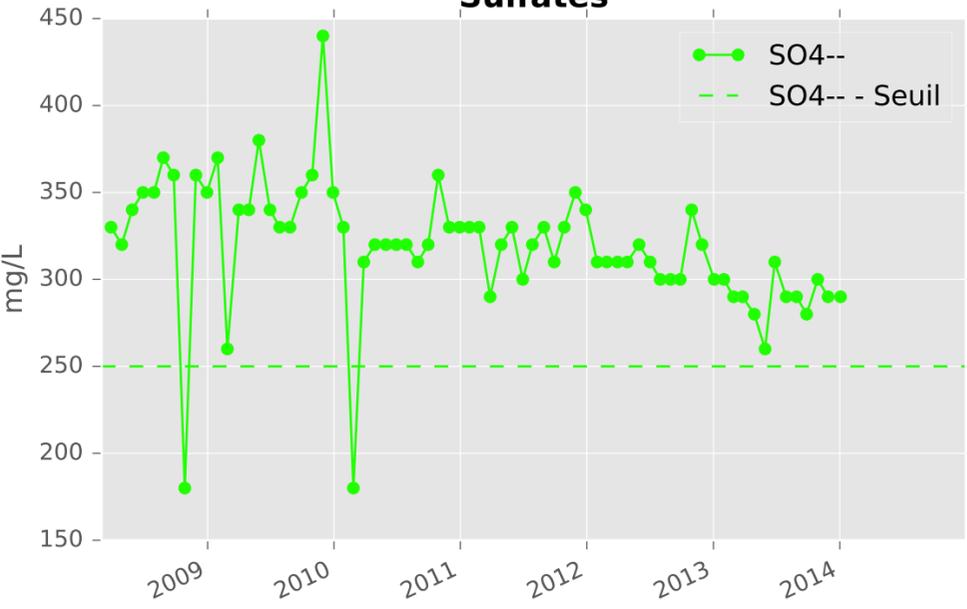
pH



Conductivité



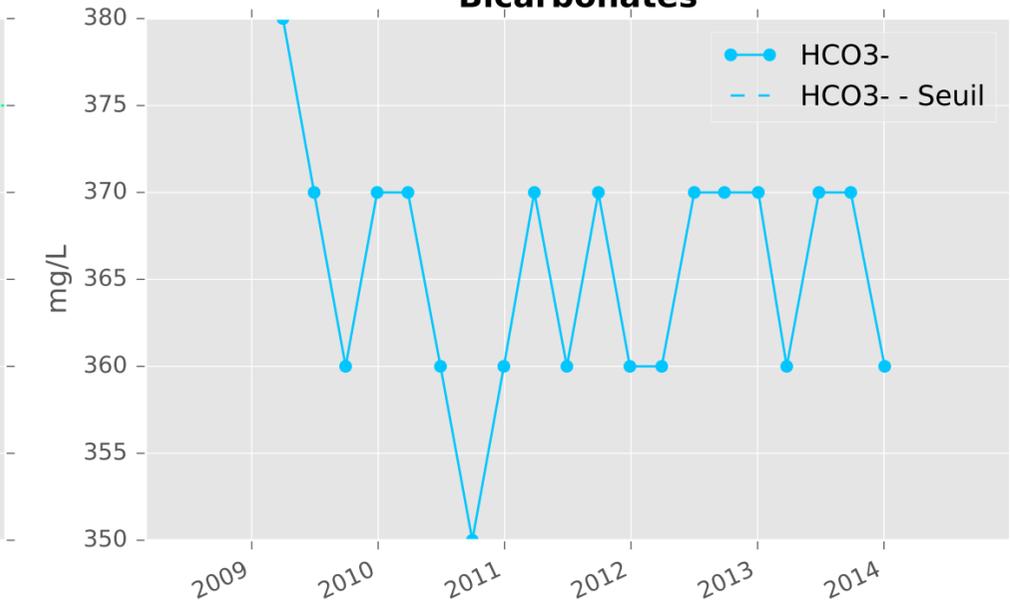
Sulfates



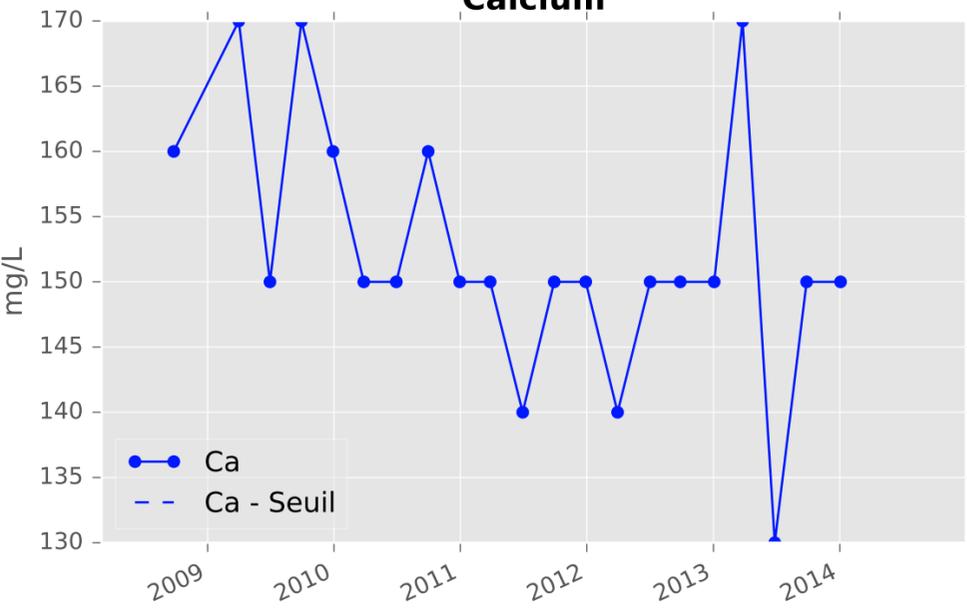
Chlorures



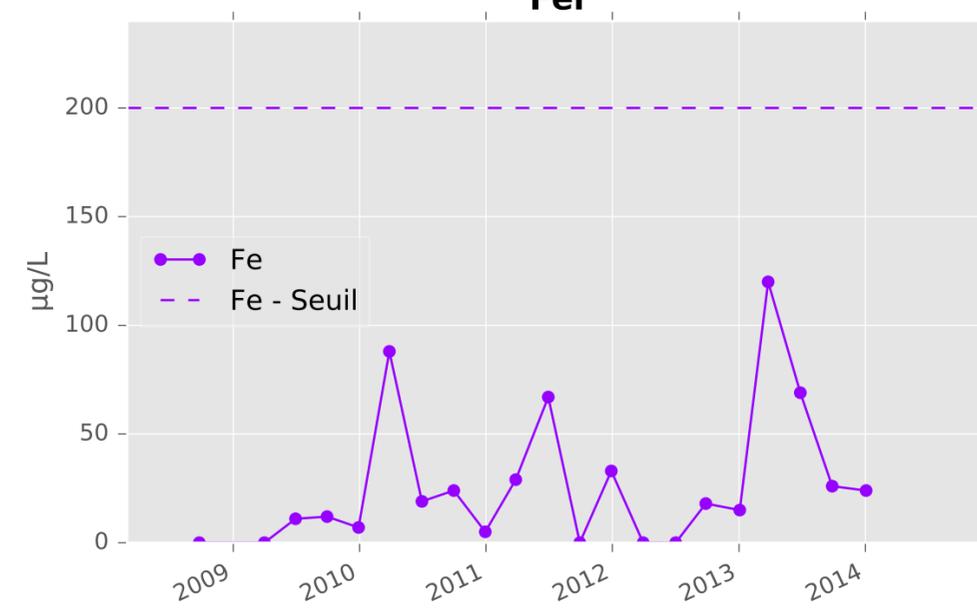
Bicarbonates



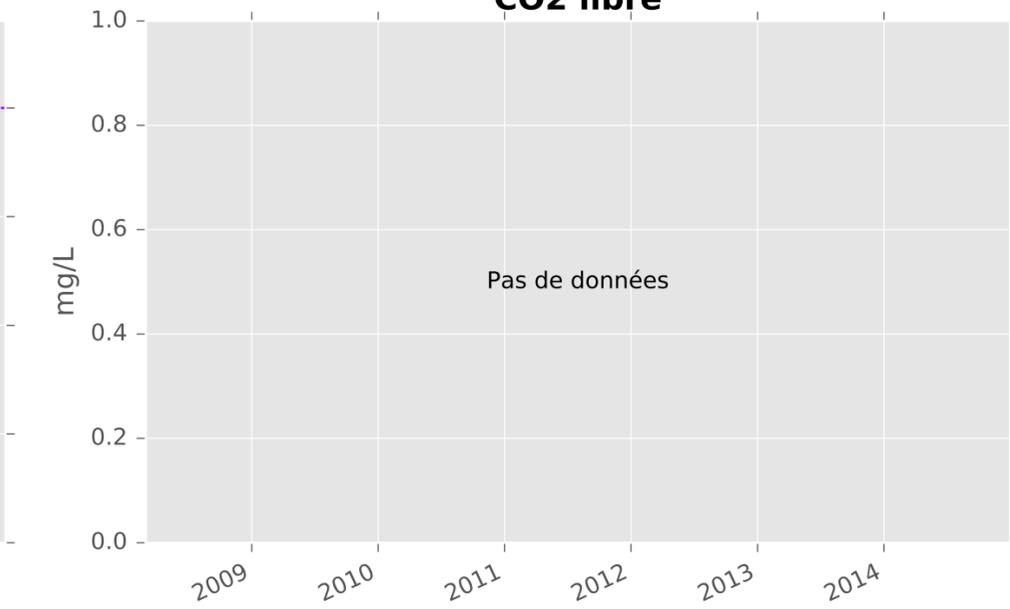
Calcium



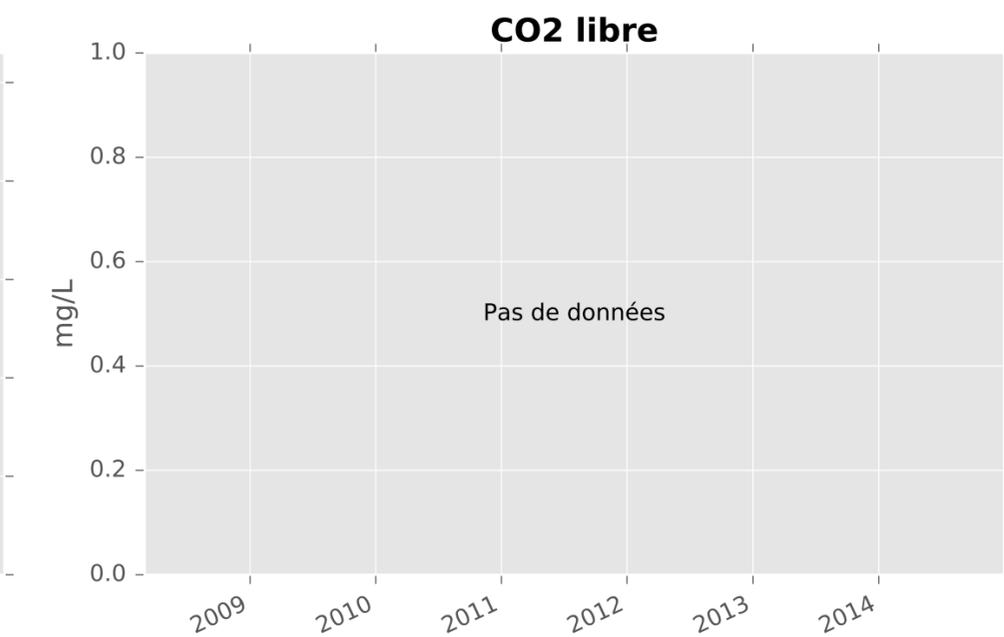
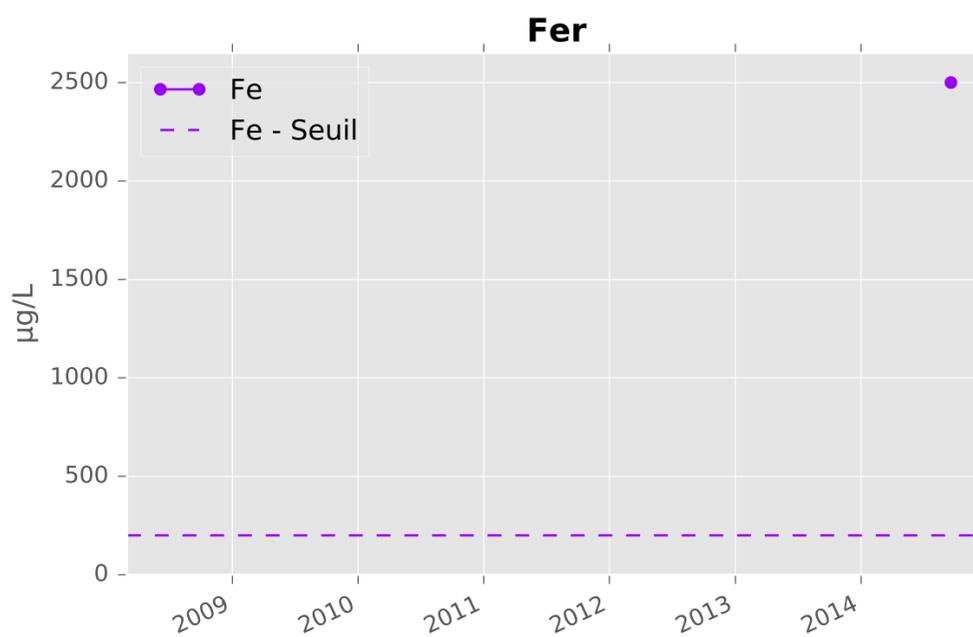
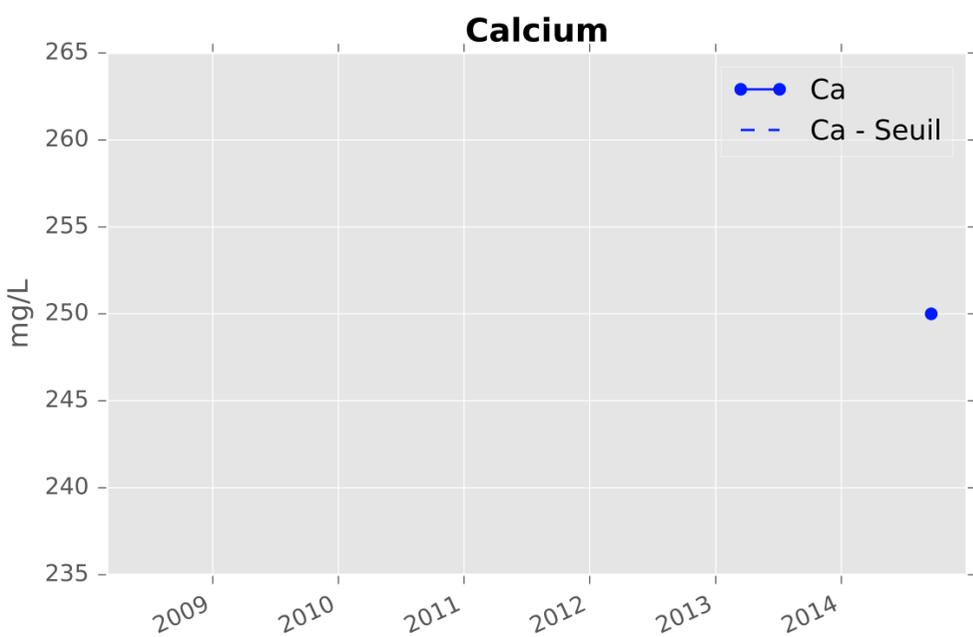
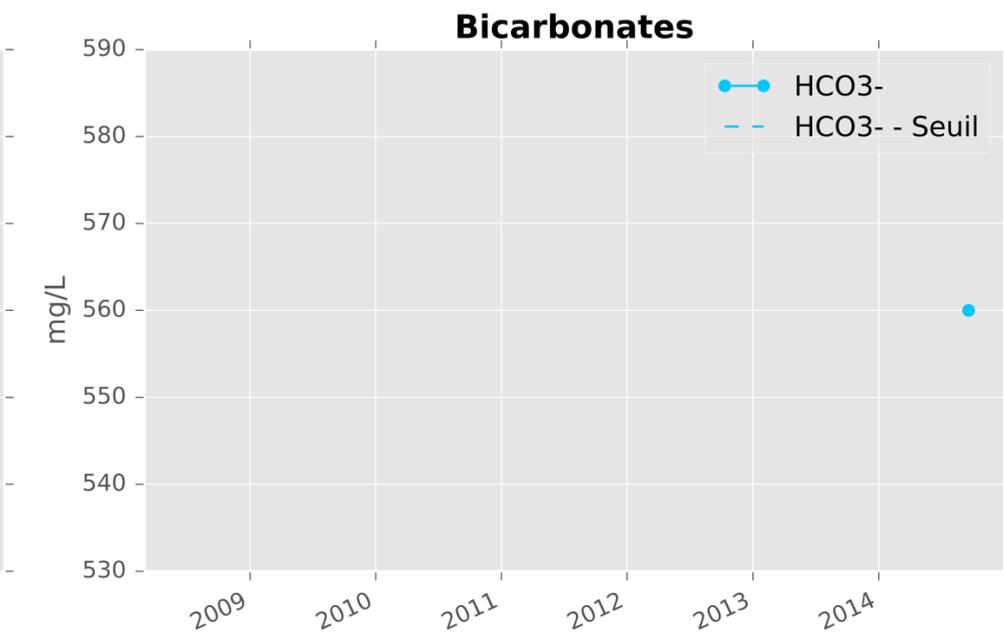
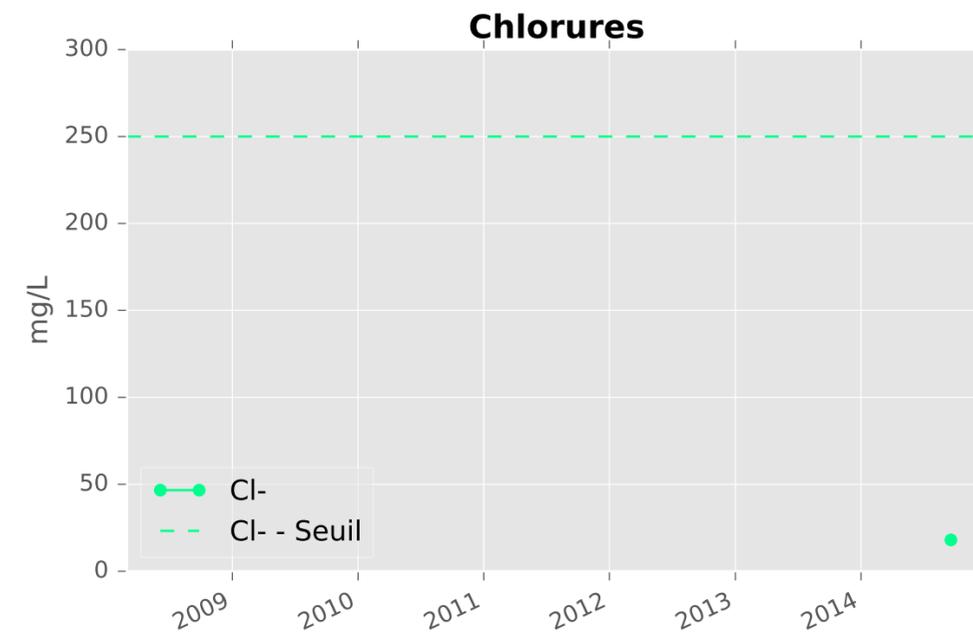
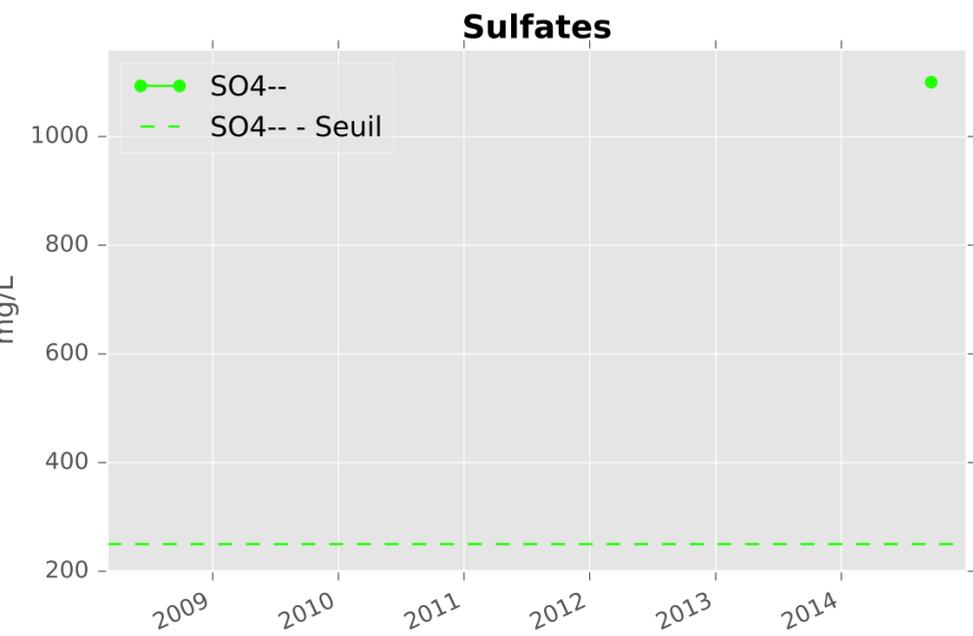
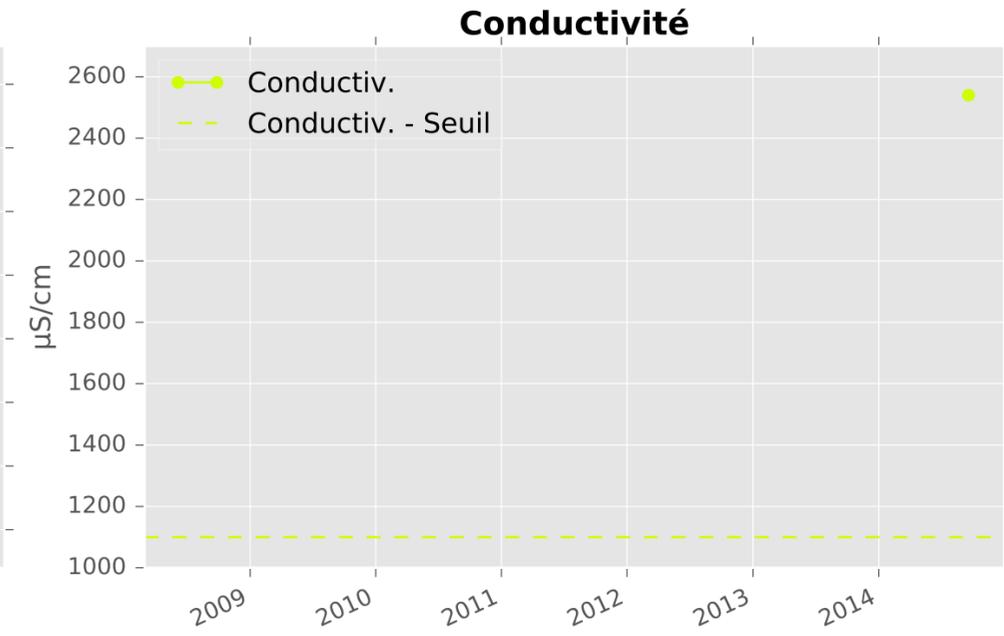
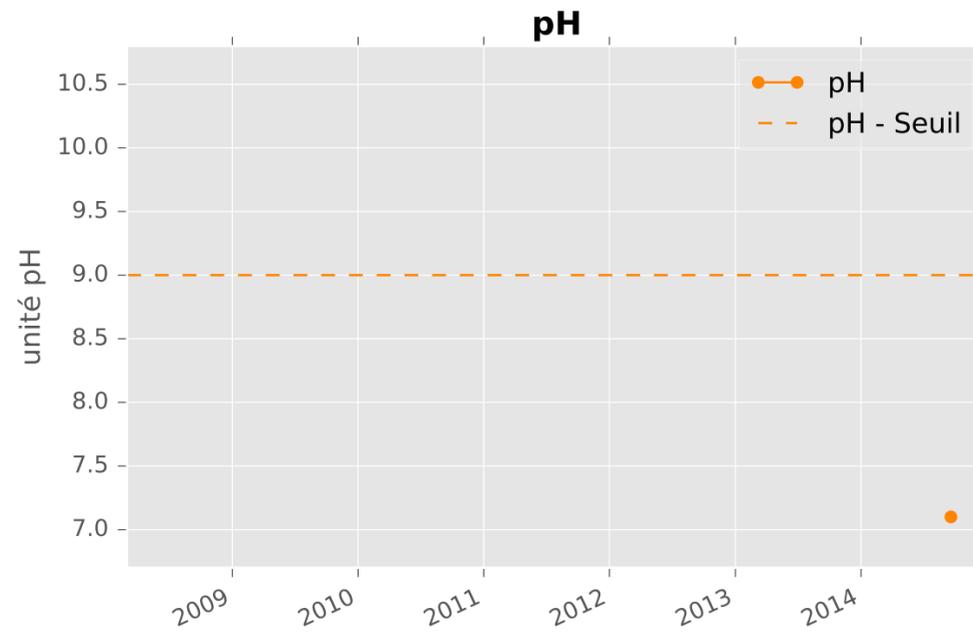
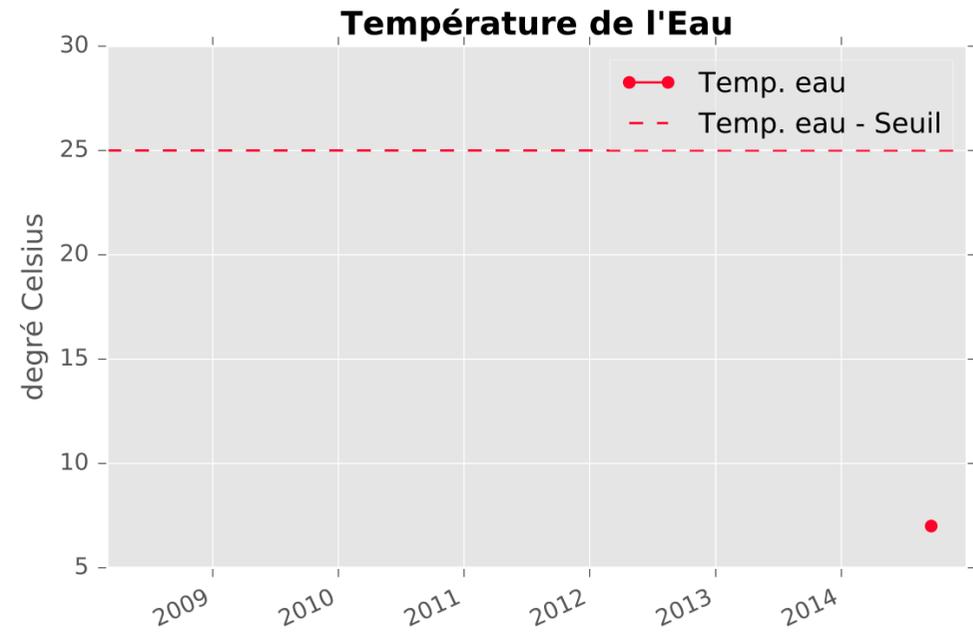
Fer



CO2 libre

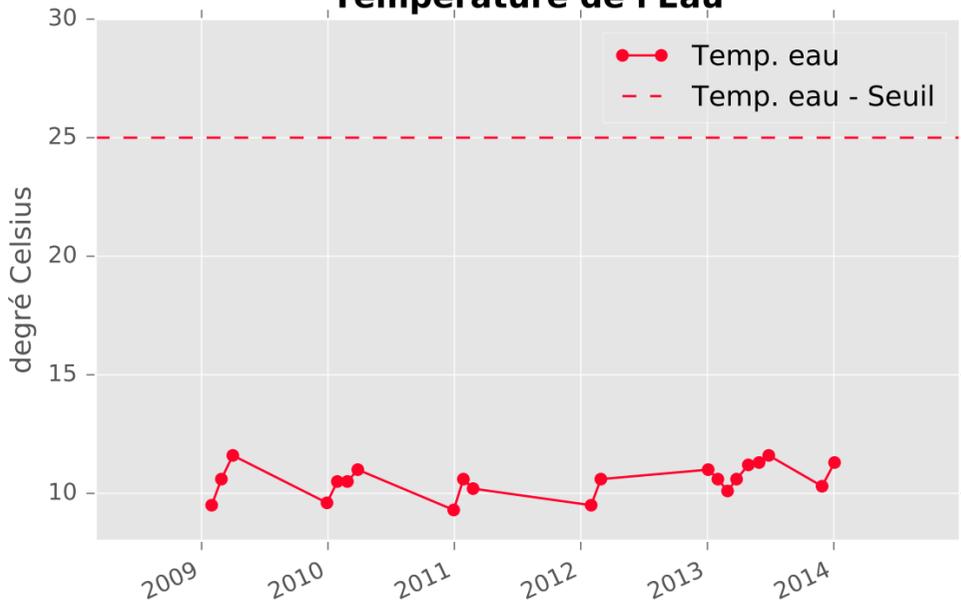


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01137X0157 - C2 - Forage Route Blanche

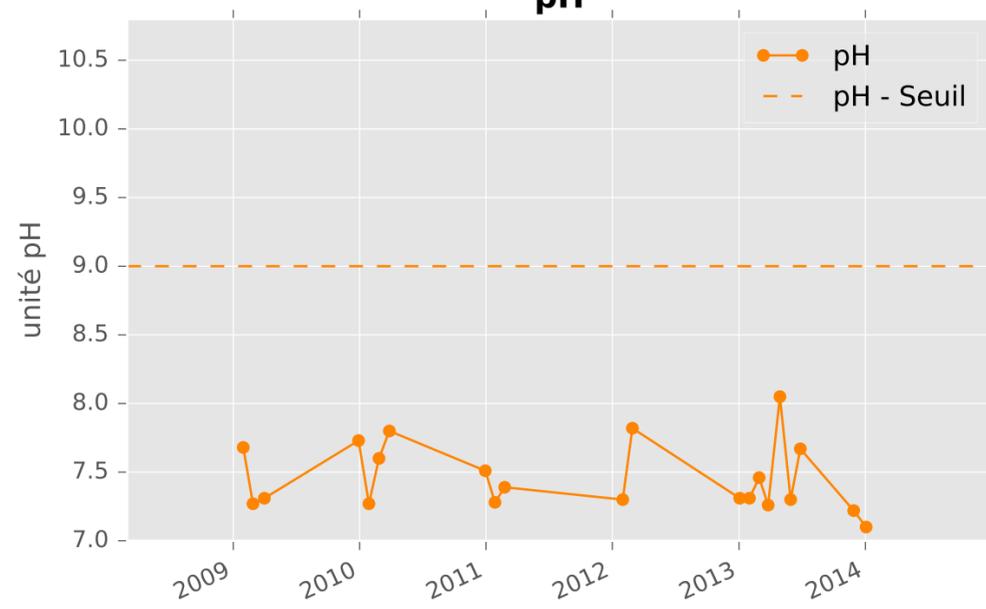


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01373X0134 - C3 - Galerie de bois d'Avril

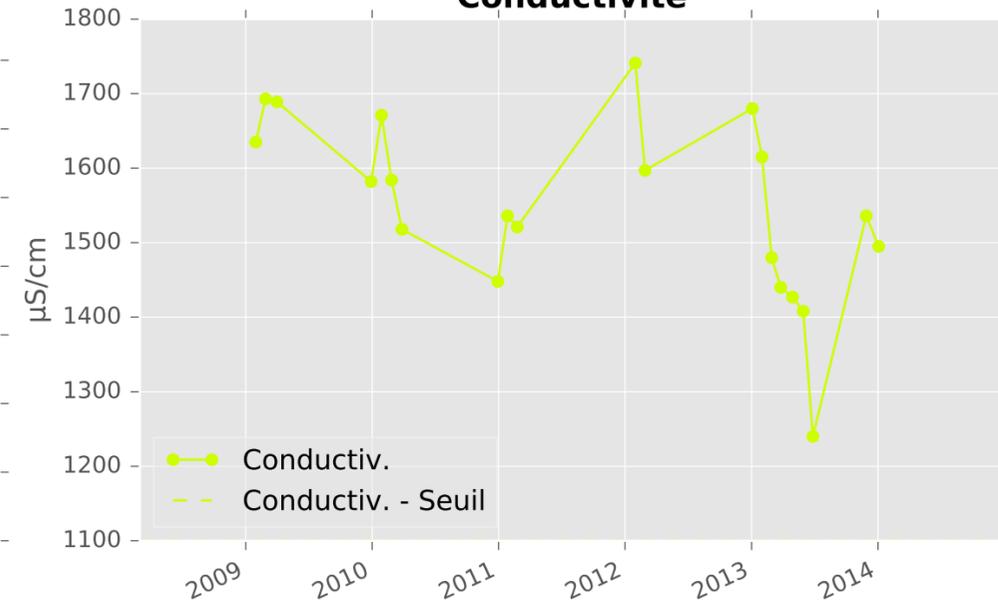
Température de l'Eau



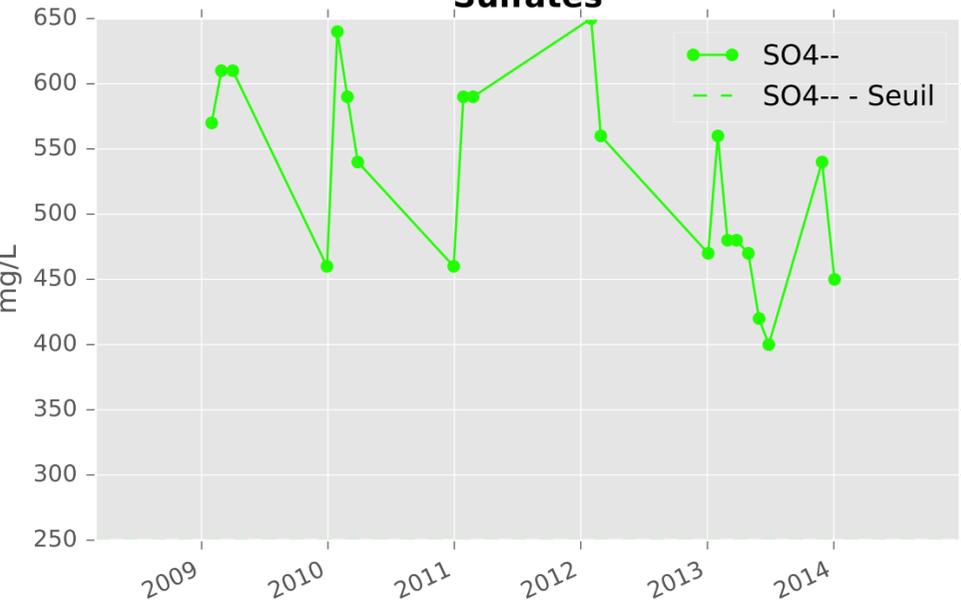
pH



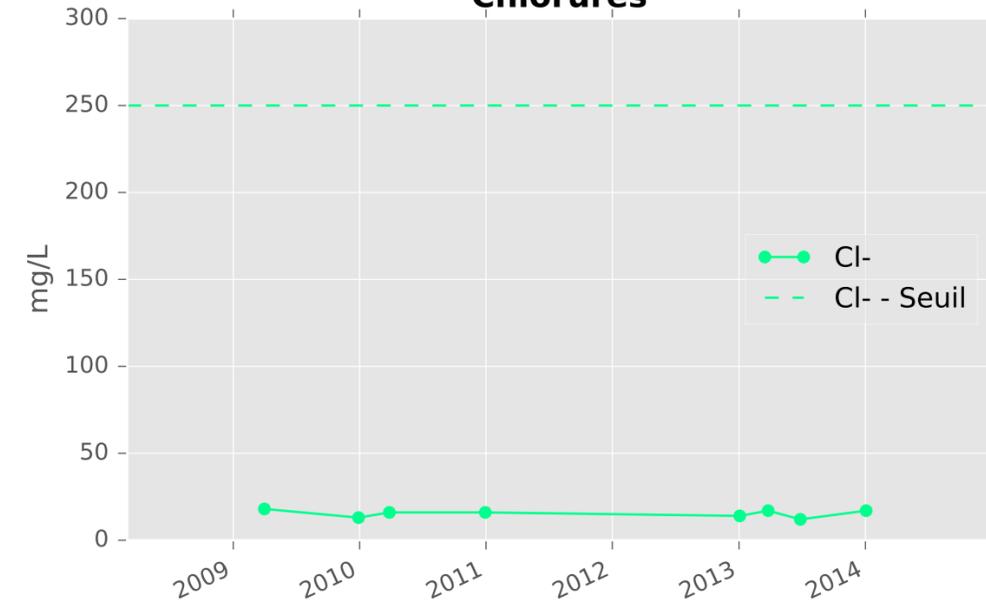
Conductivité



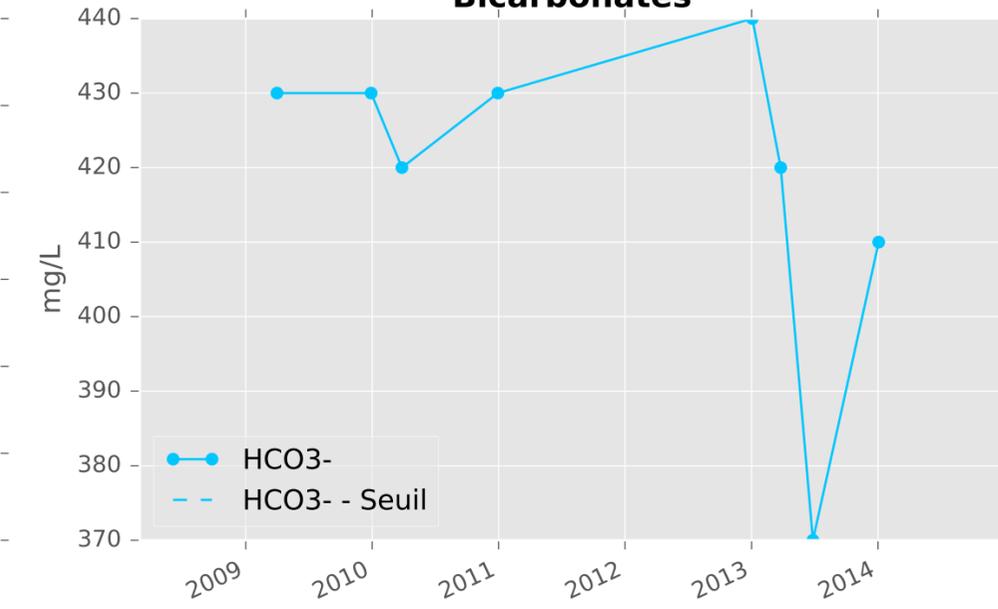
Sulfates



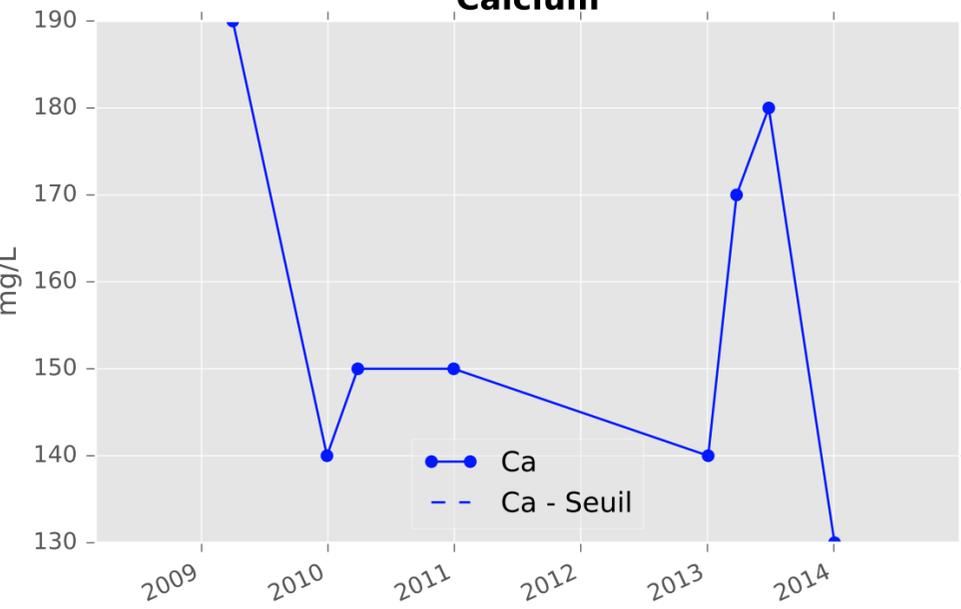
Chlorures



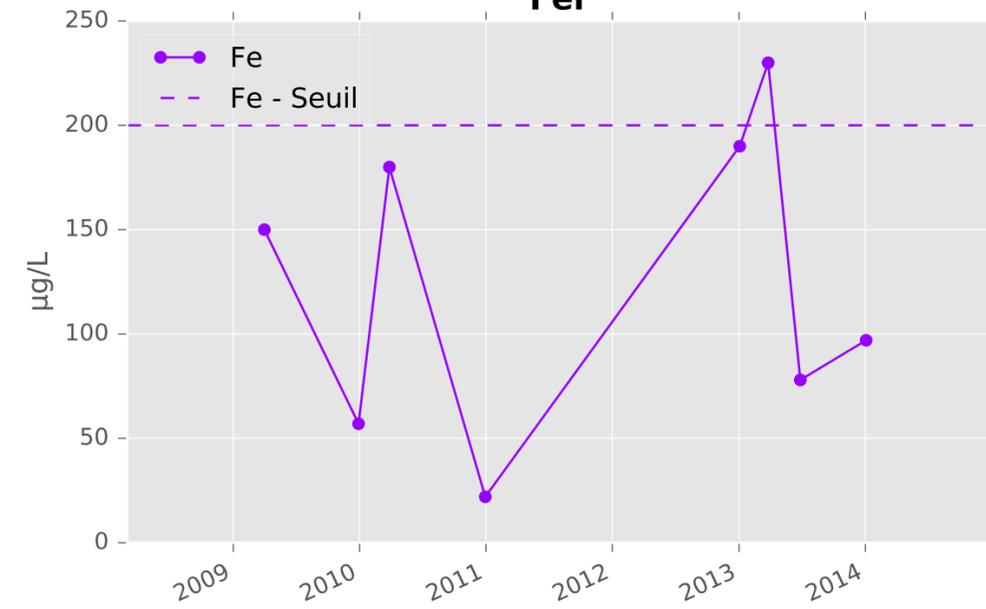
Bicarbonates



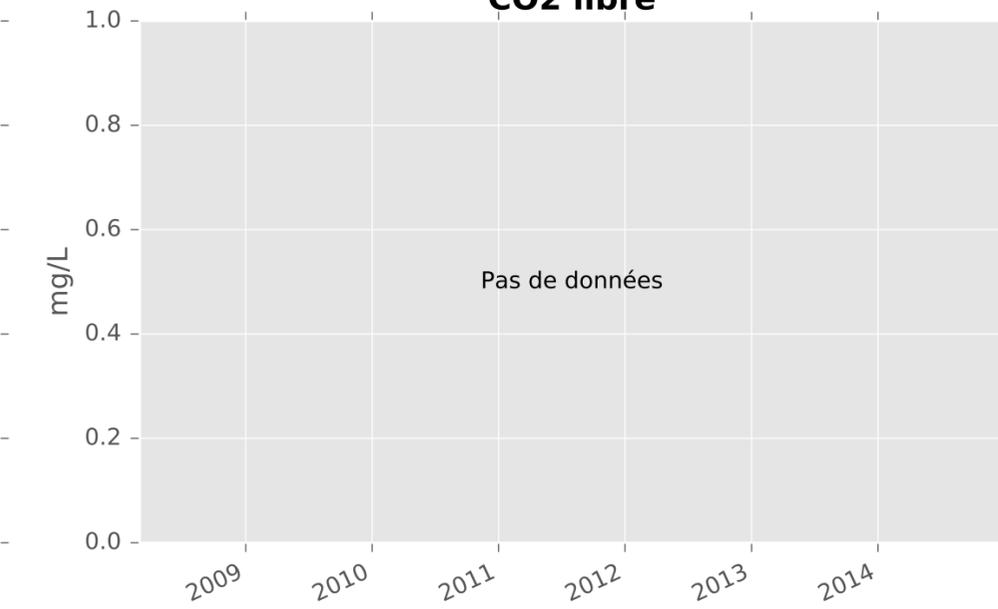
Calcium



Fer

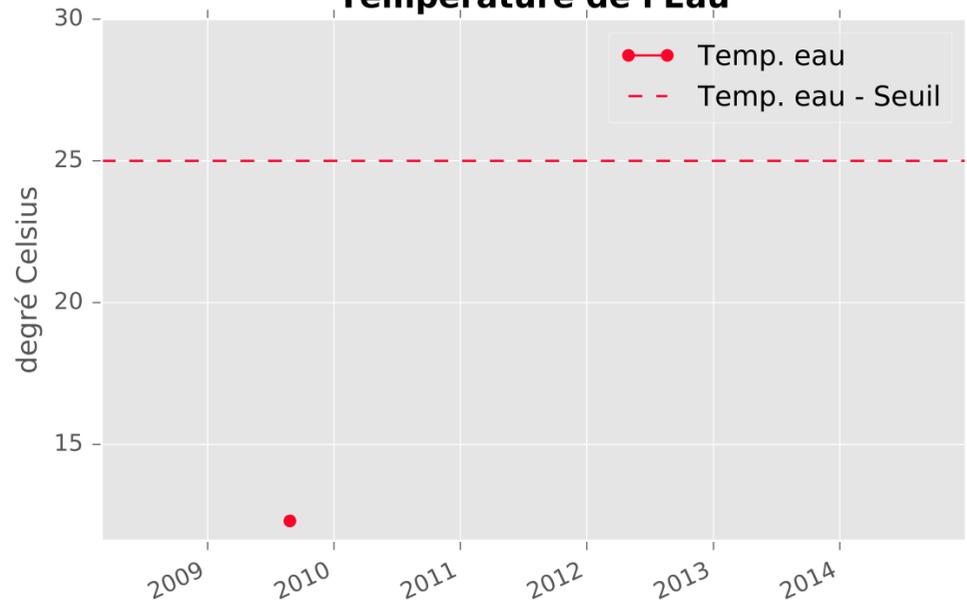


CO2 libre



RESERVOIR MINIER CENTRE - 01137X0151 - C4 - Galerie de Fontoy

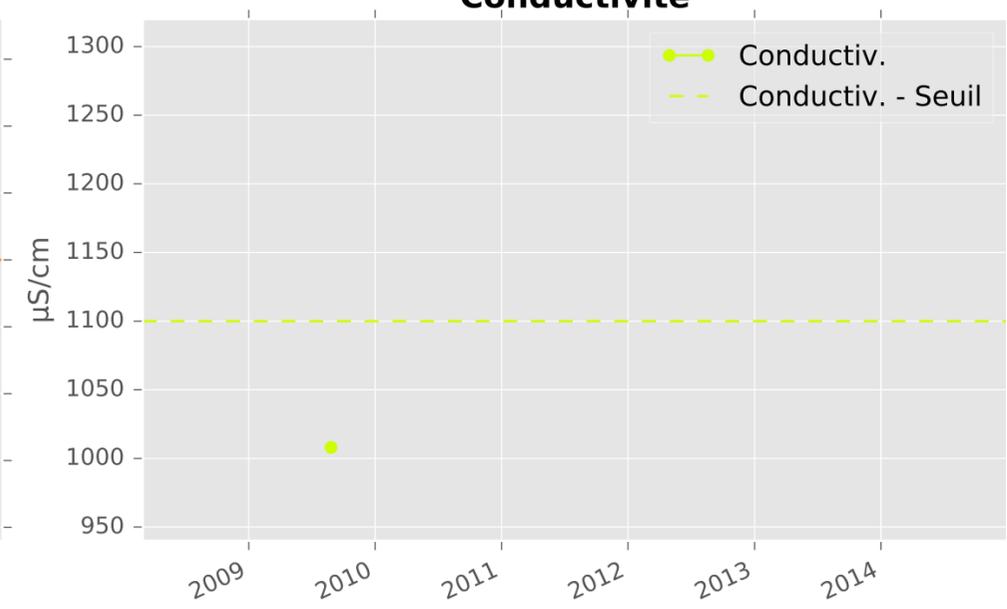
Température de l'Eau



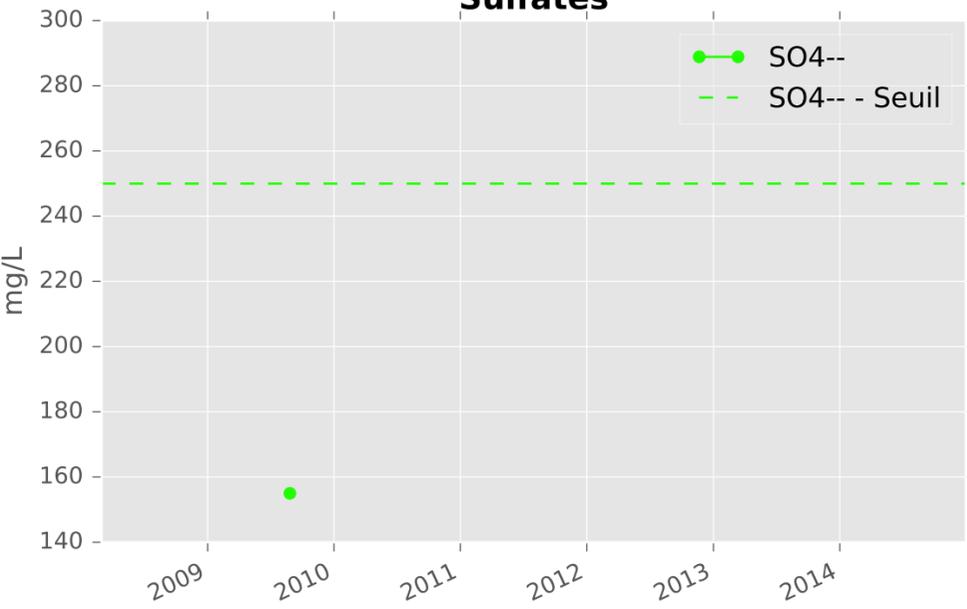
pH



Conductivité



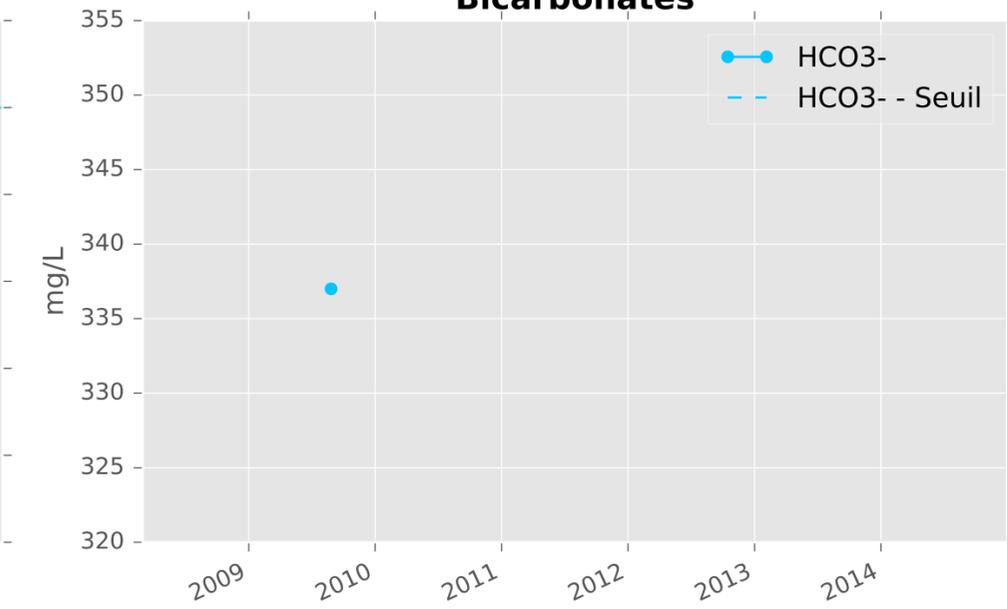
Sulfates



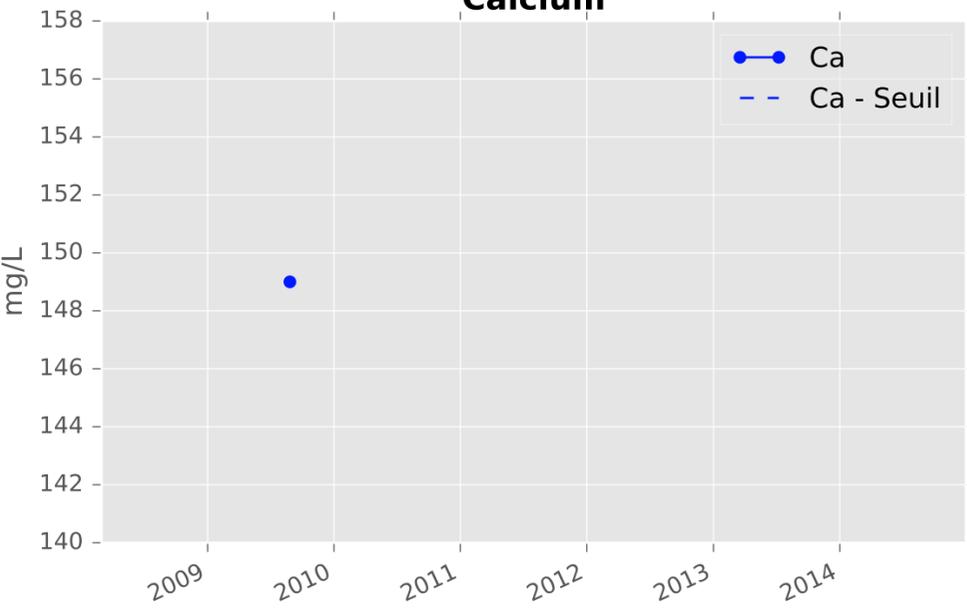
Chlorures



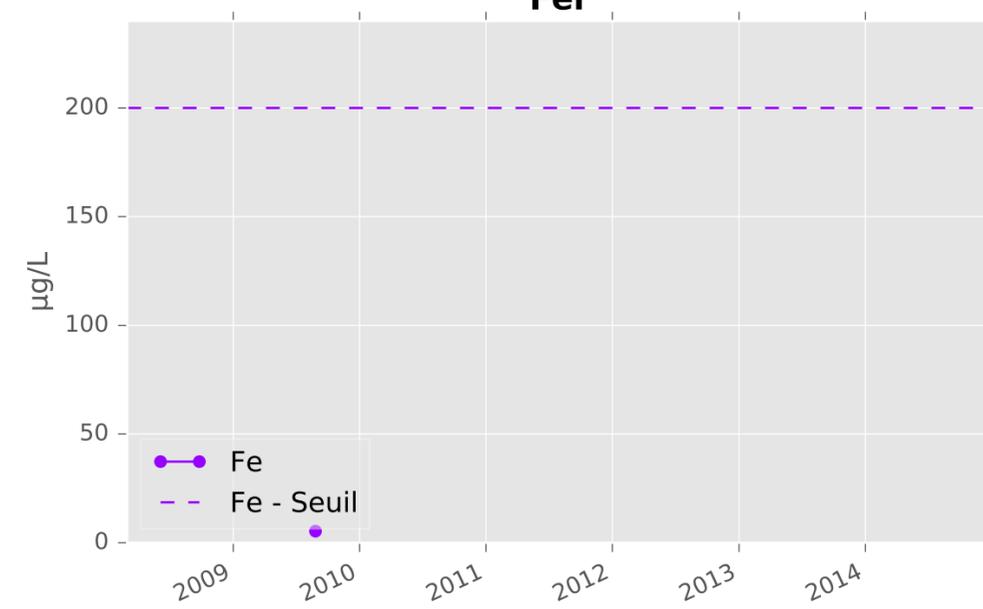
Bicarbonates



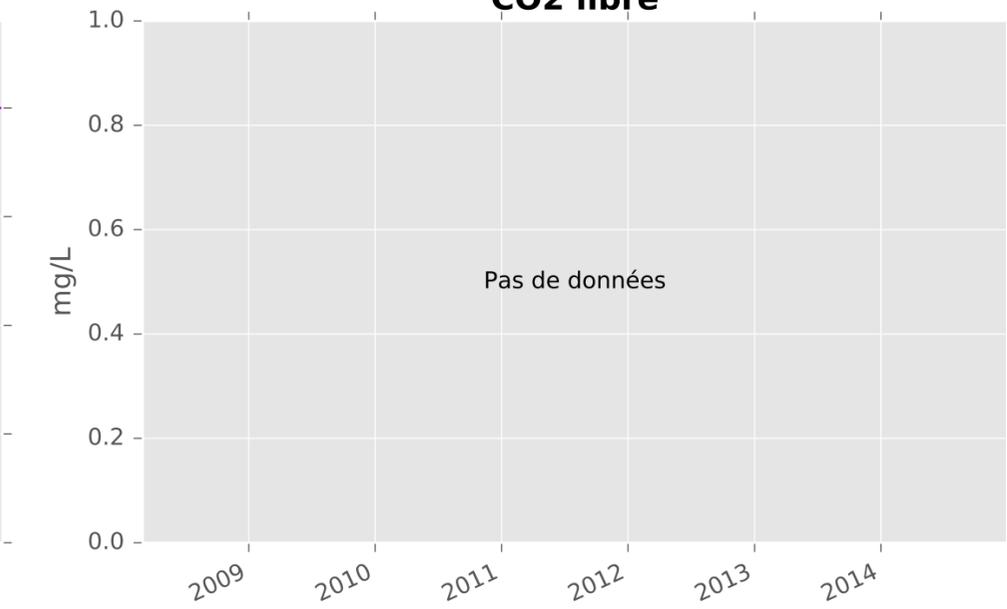
Calcium



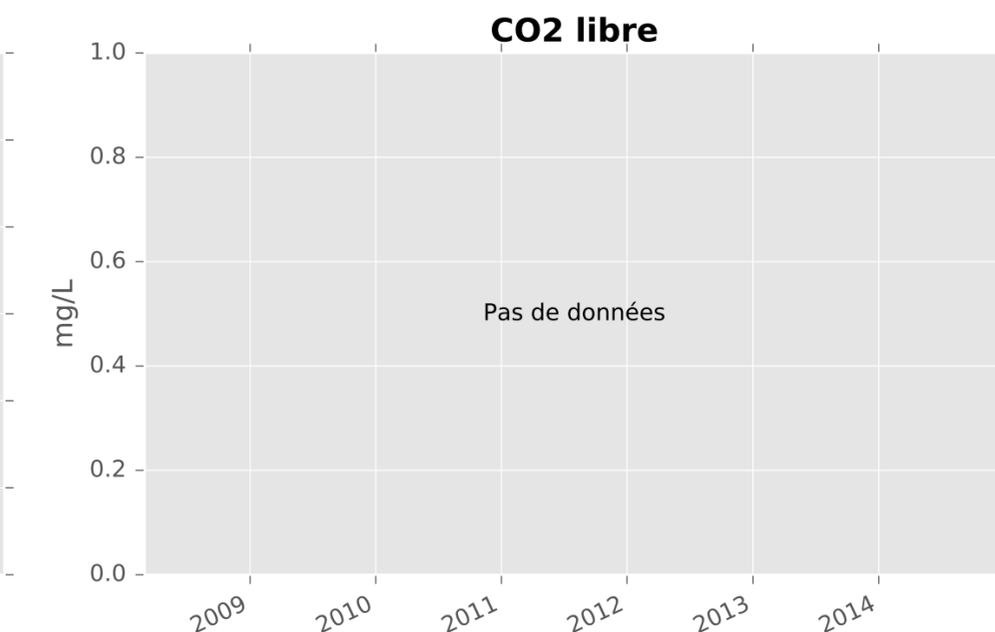
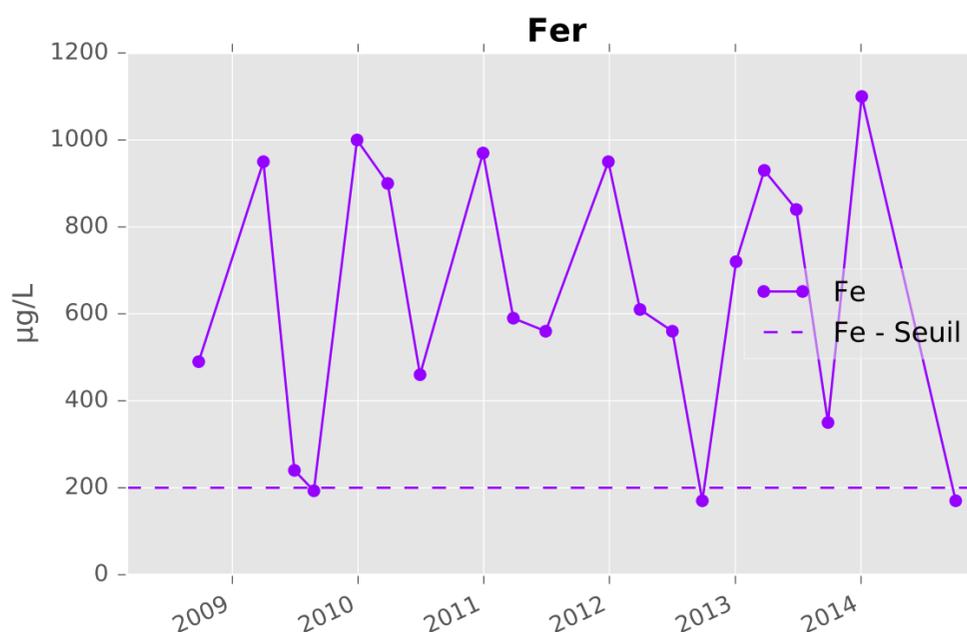
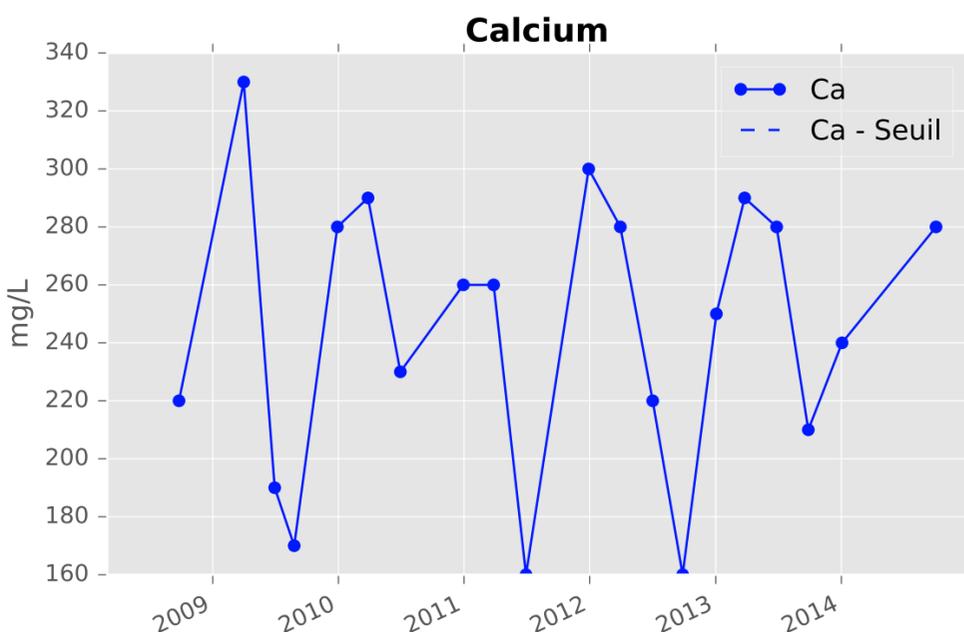
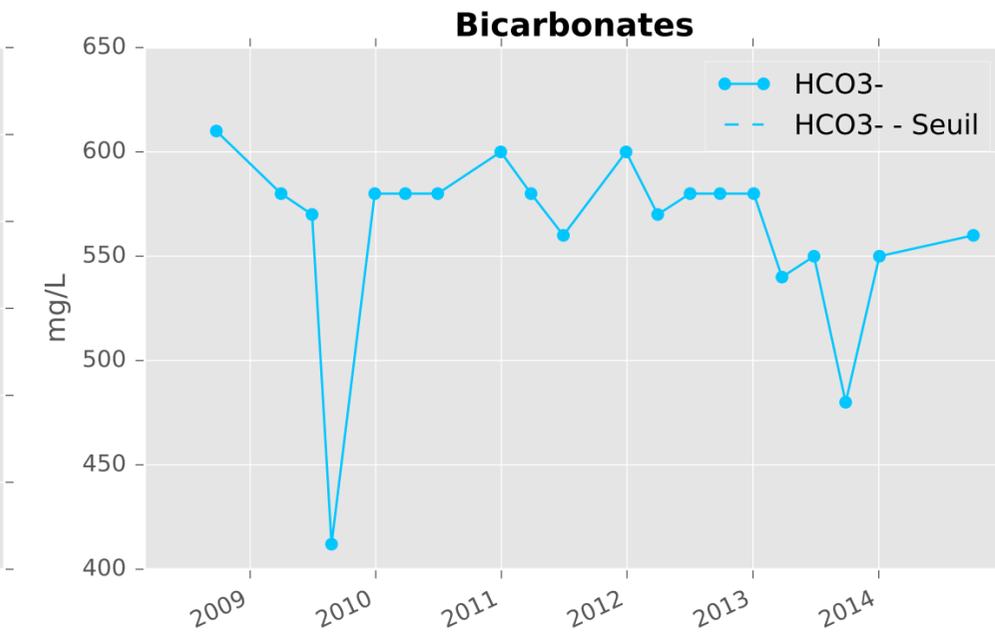
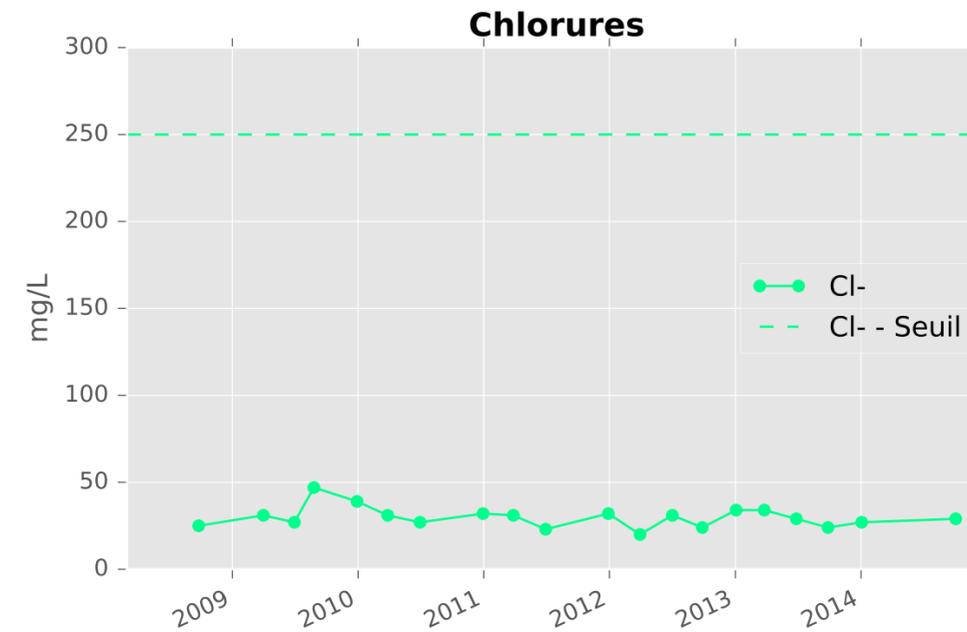
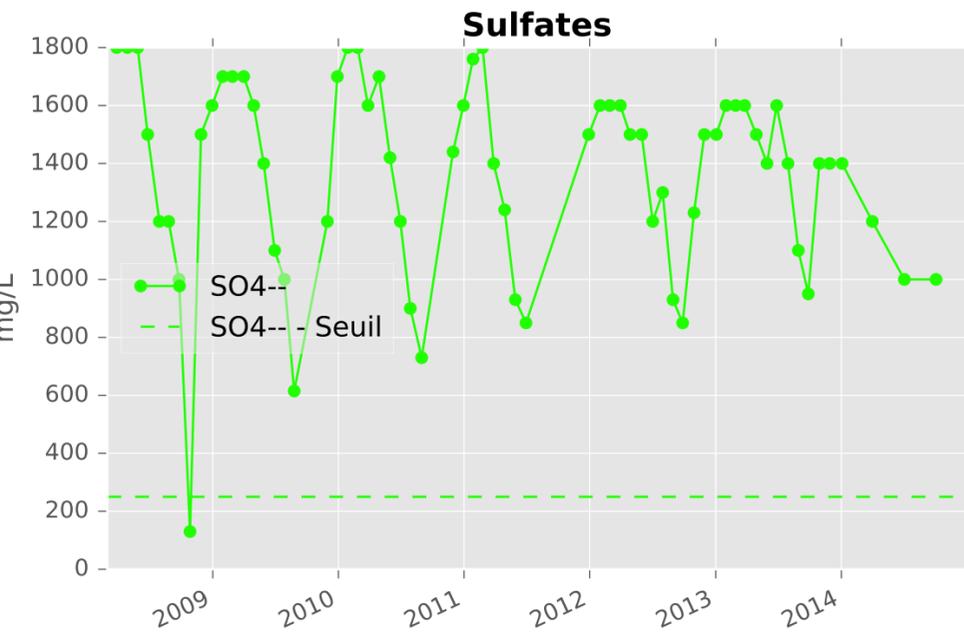
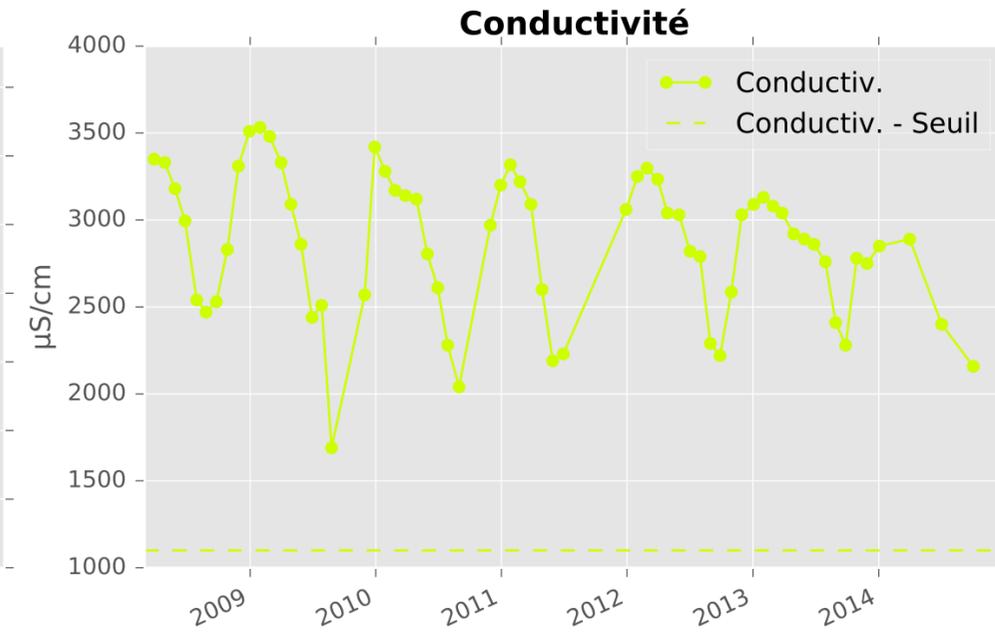
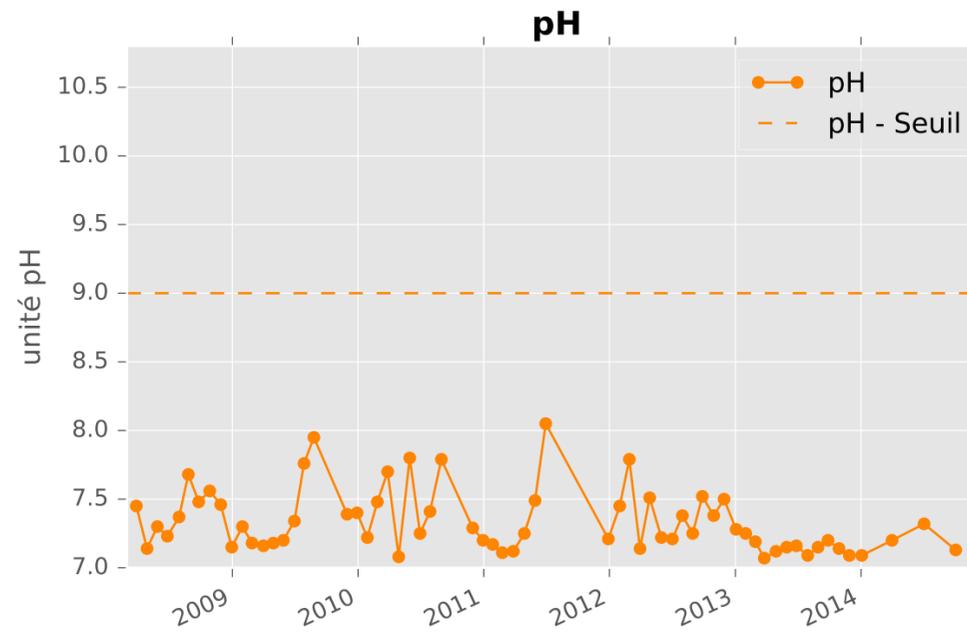
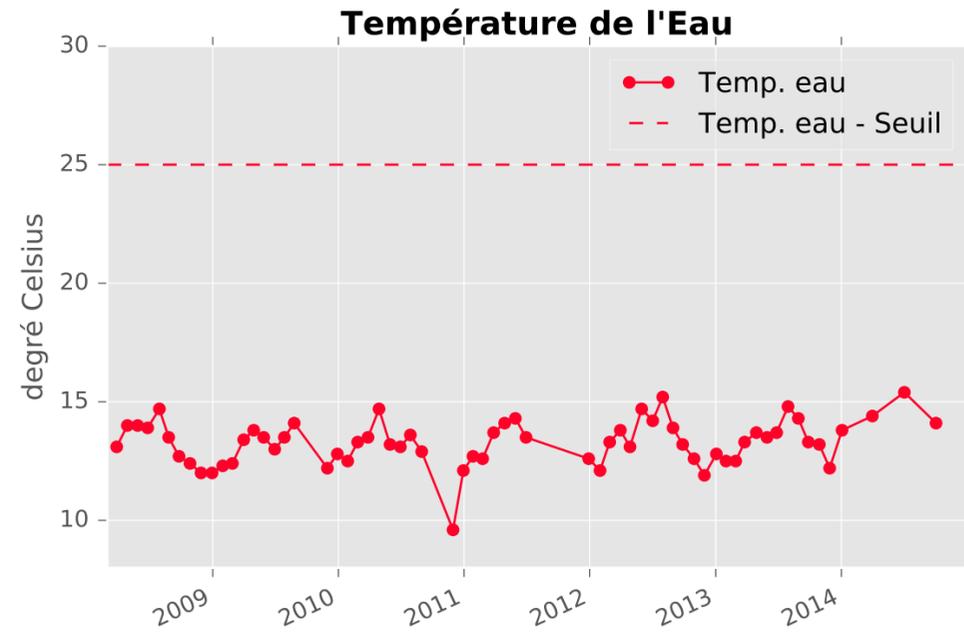
Fer



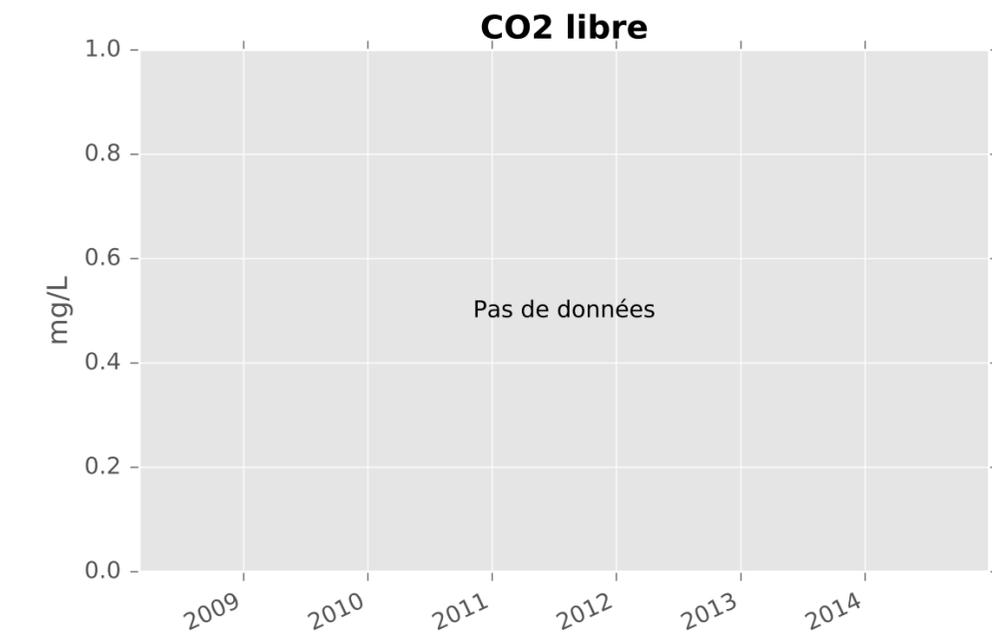
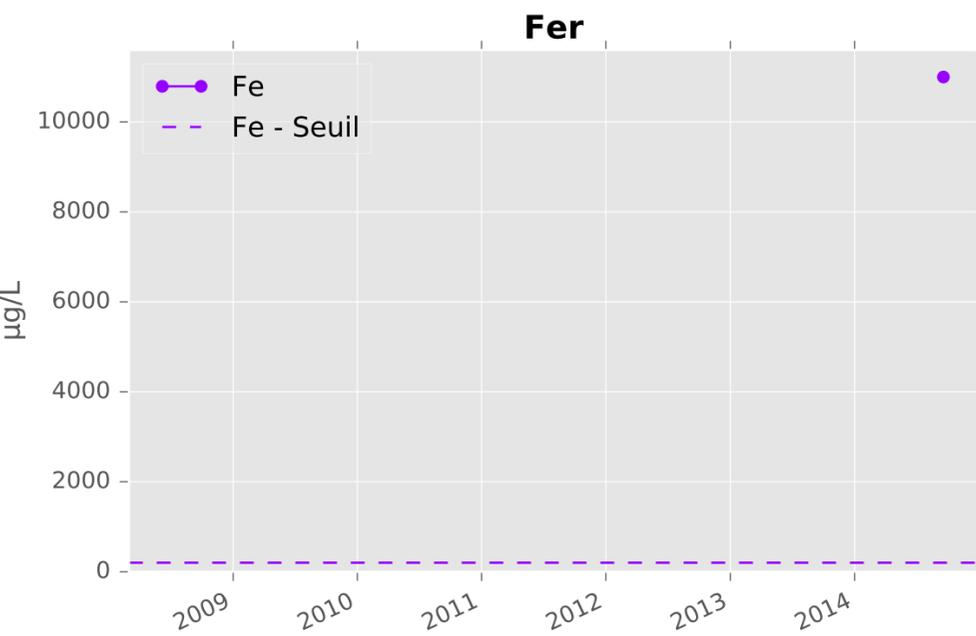
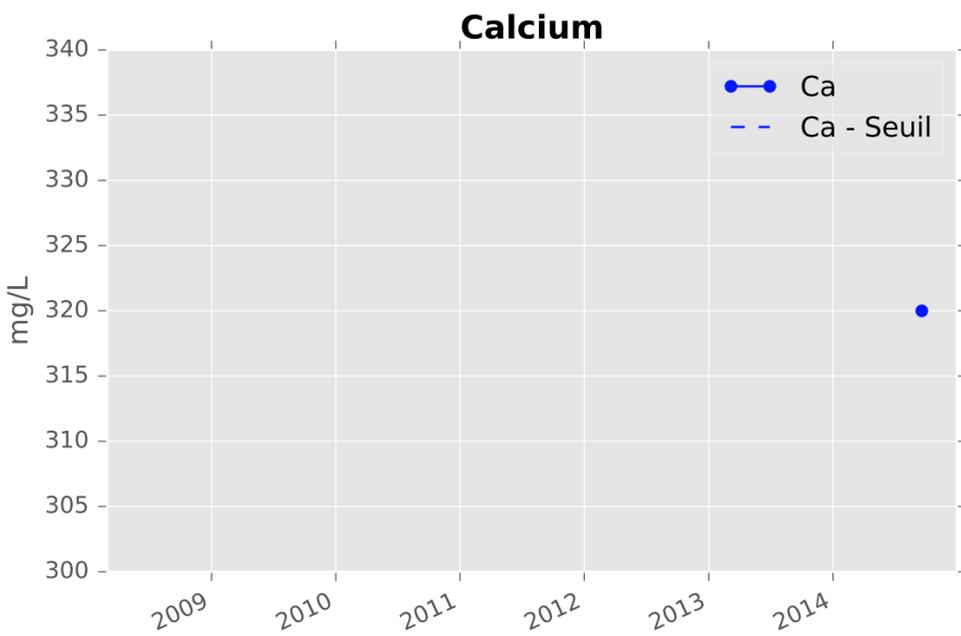
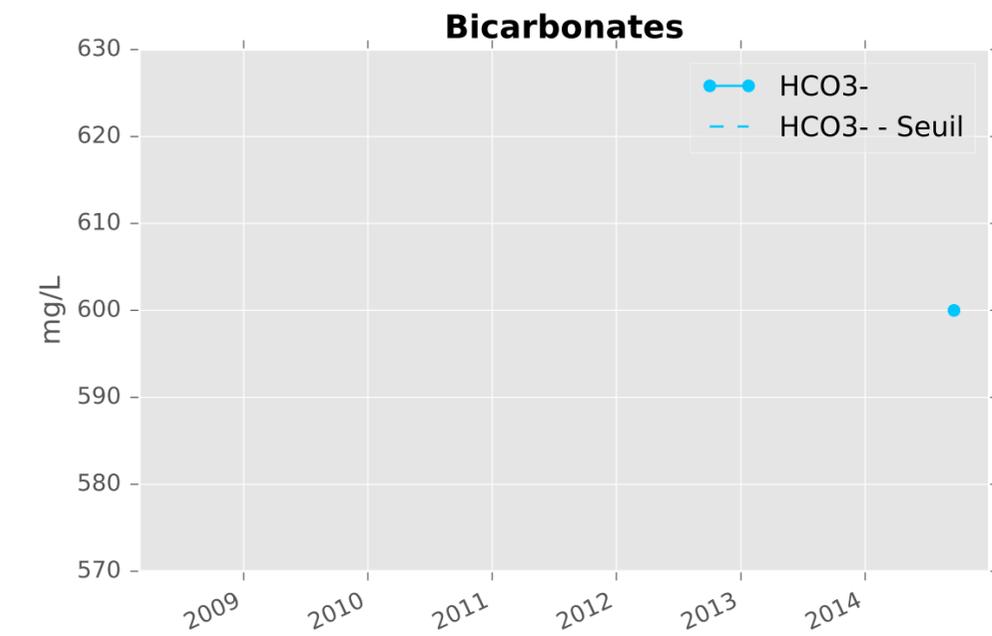
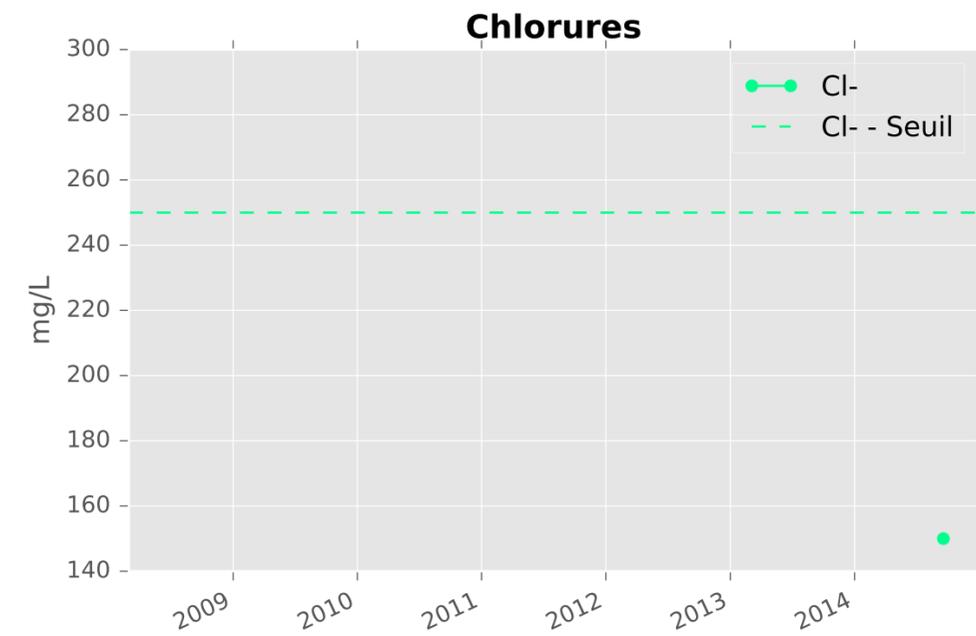
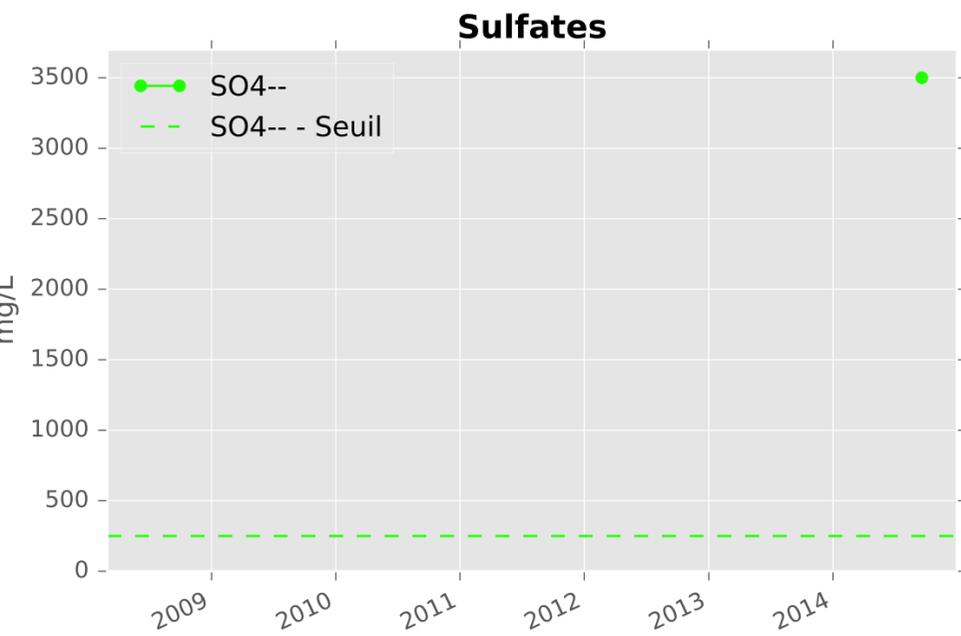
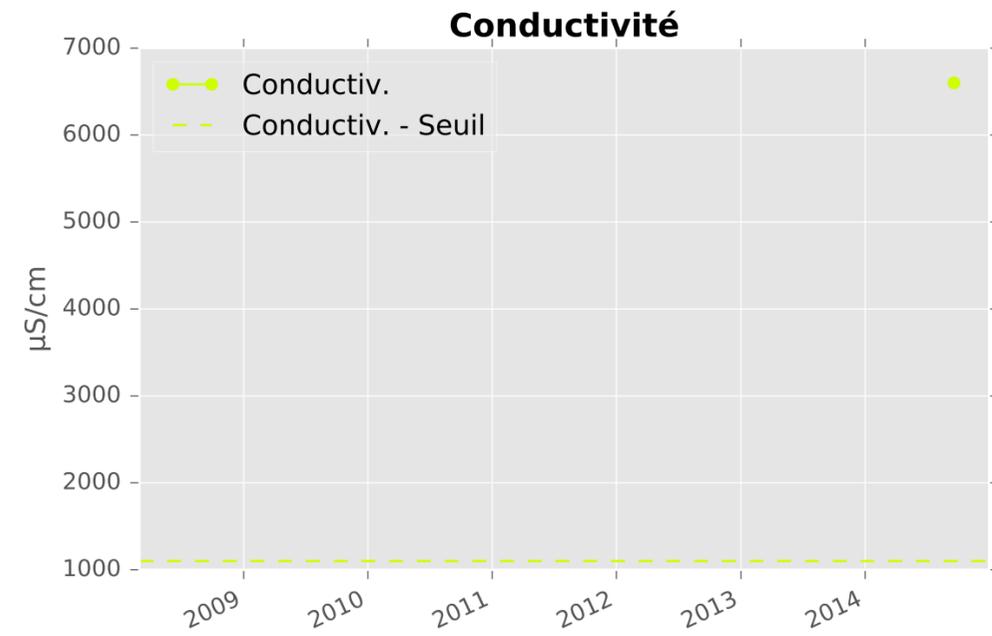
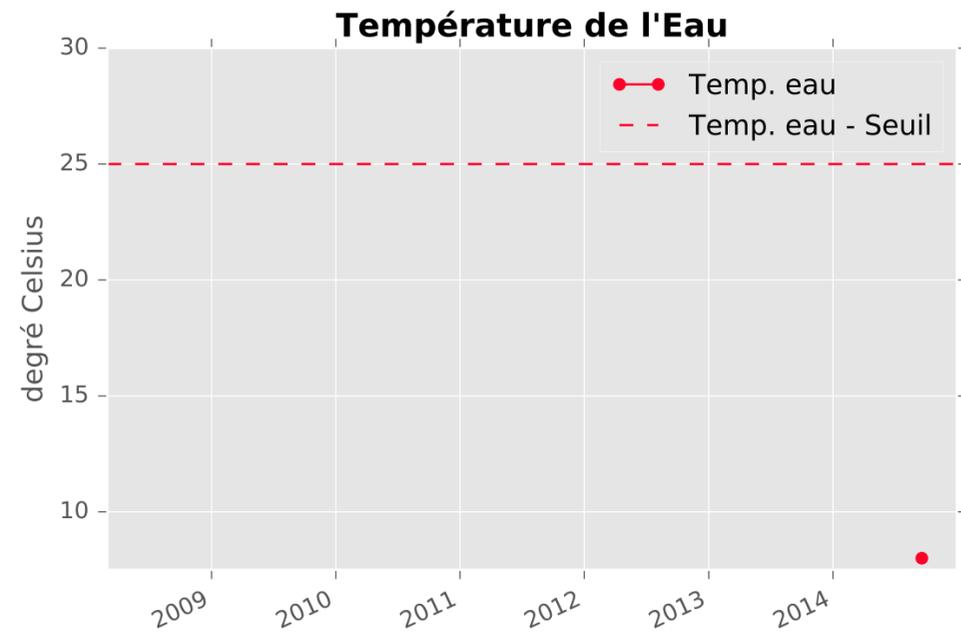
CO2 libre



RESERVOIR MINIER CENTRE - 01372X0197 - C5 - Galerie du Woigt

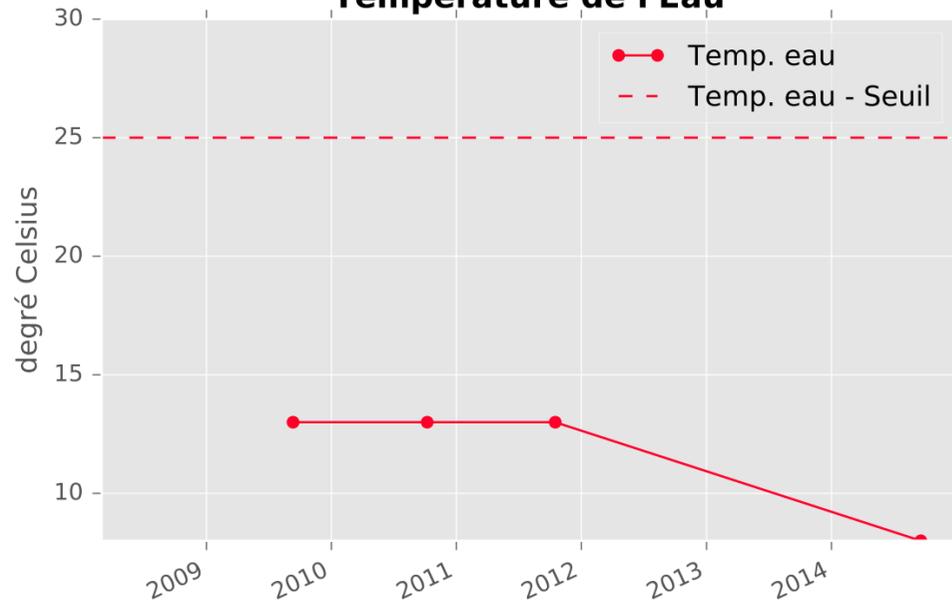


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01364X0042 - C13 - Puits Amermont III



RESERVOIR MINIER CENTRE - 01136X0148 - C14 - Puits Anderny II

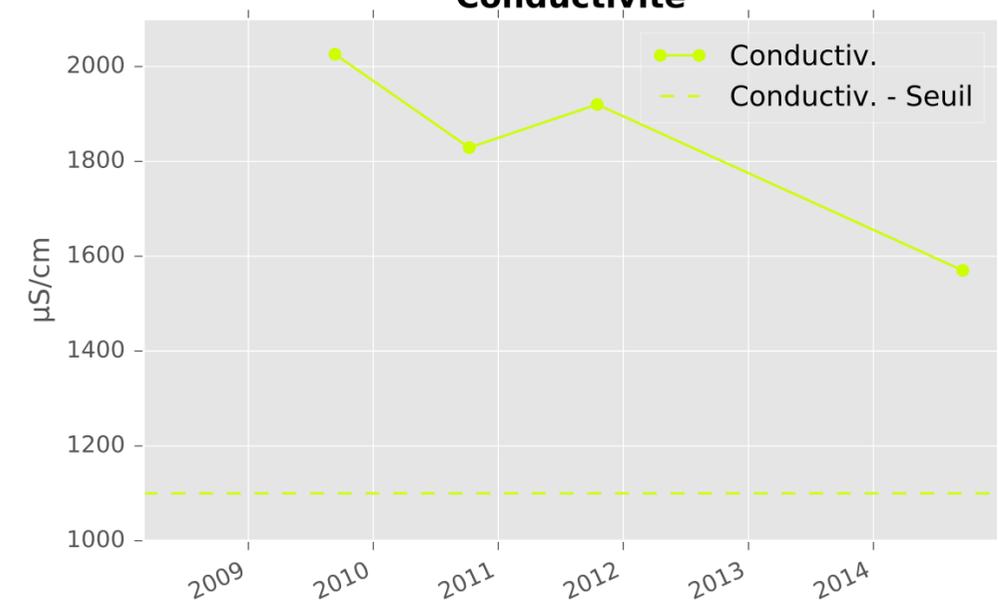
Température de l'Eau



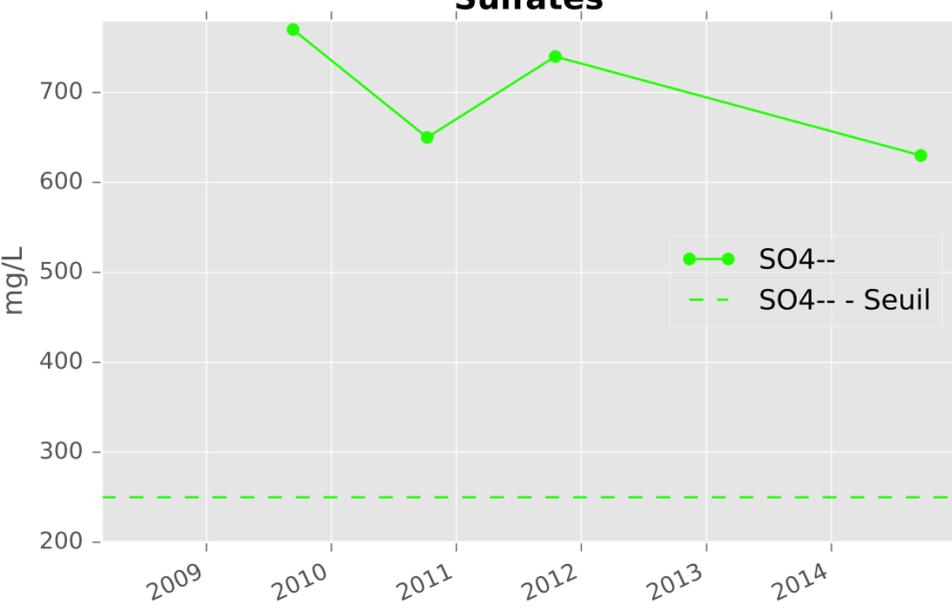
pH



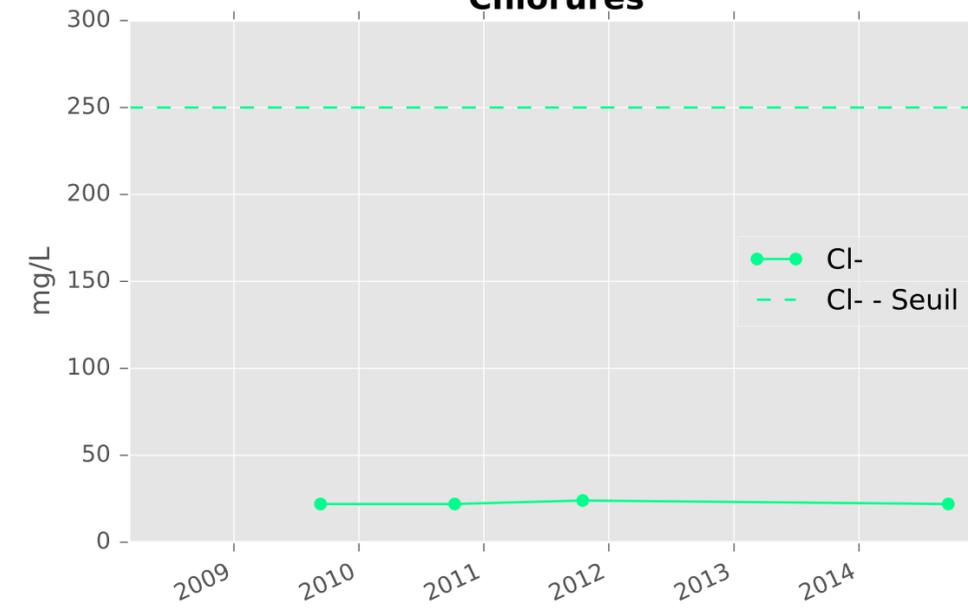
Conductivité



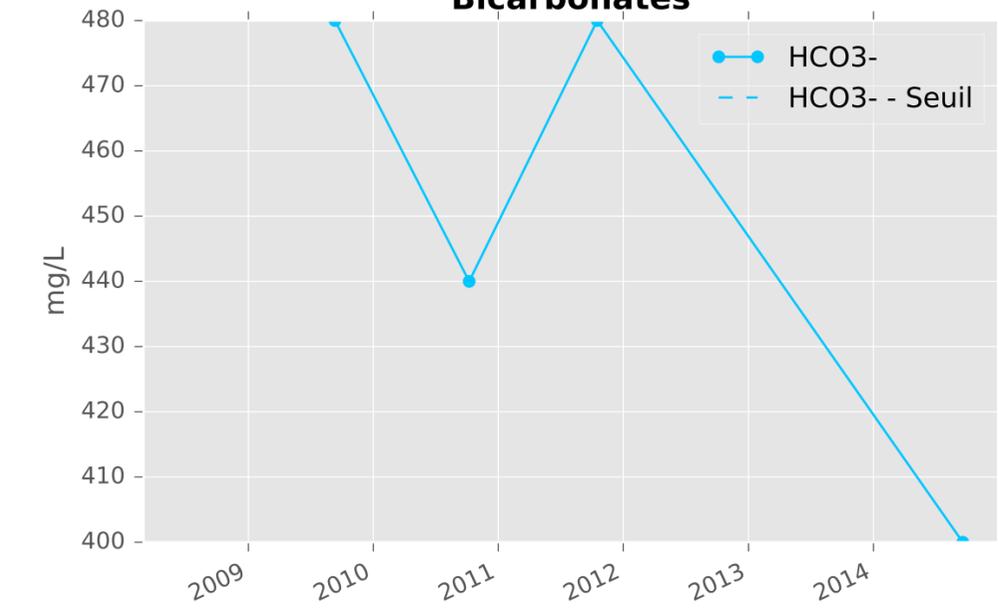
Sulfates



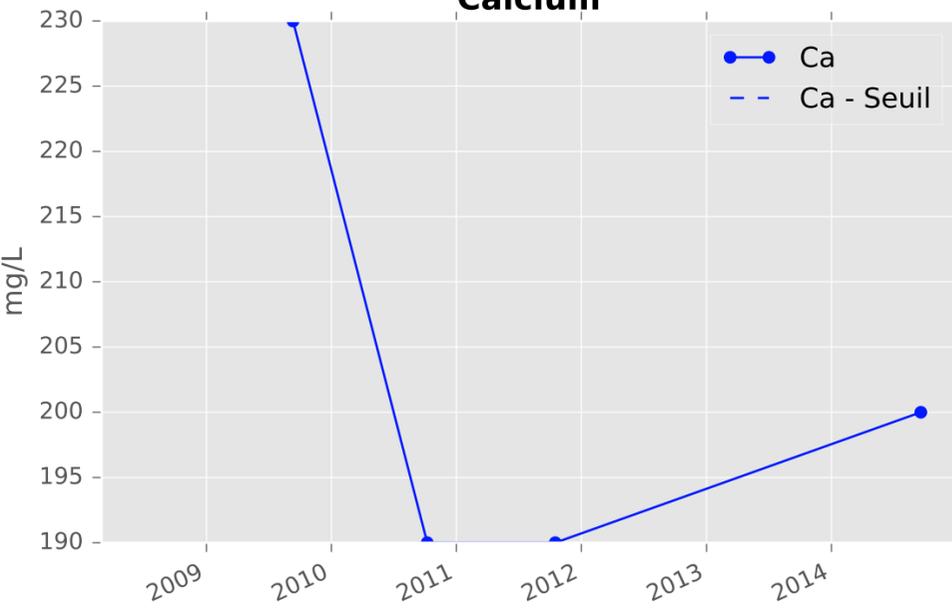
Chlorures



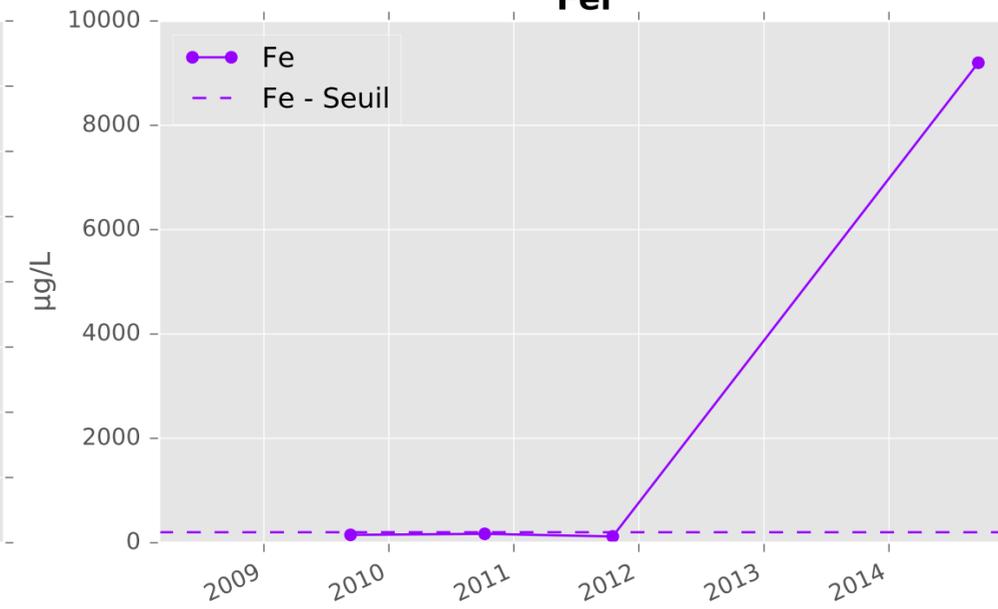
Bicarbonates



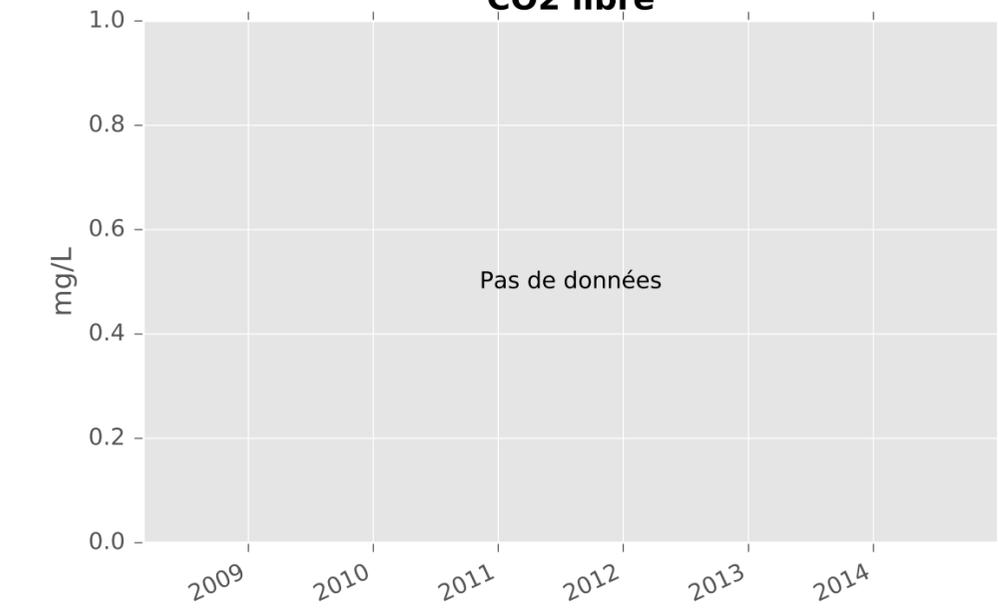
Calcium



Fer

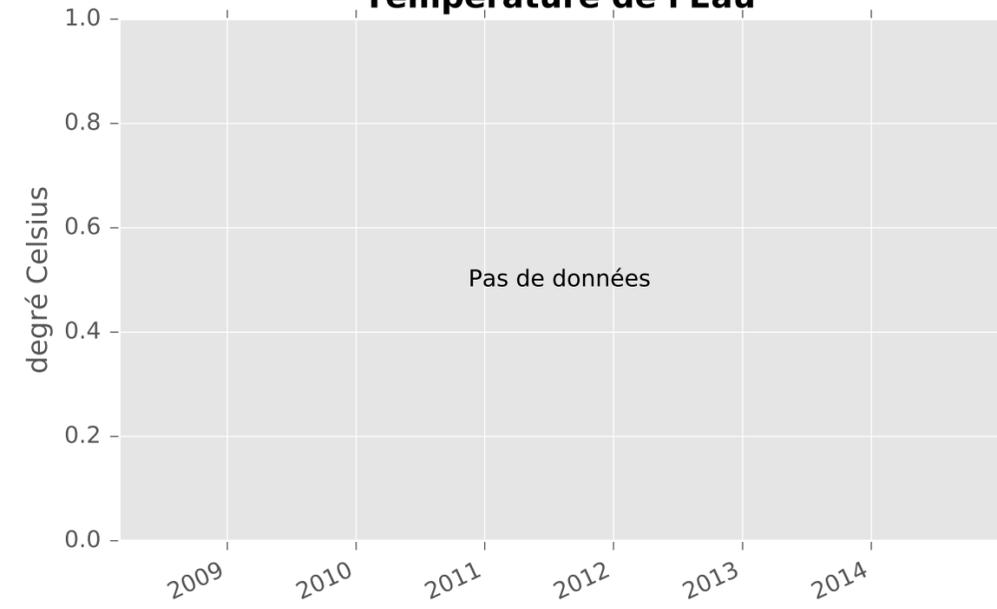


CO2 libre

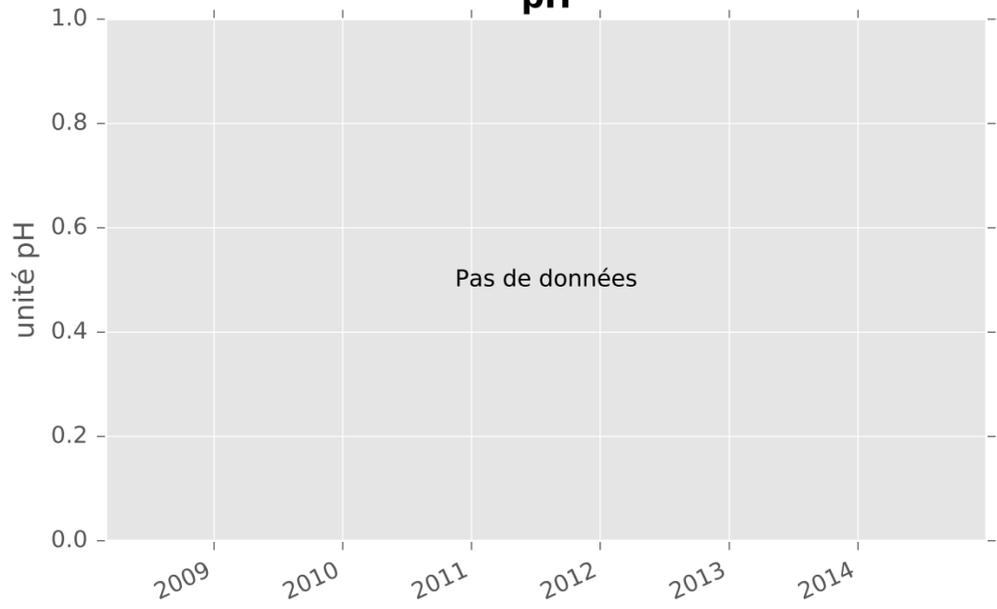


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01373X0136 - C15 - Puits Chevillon

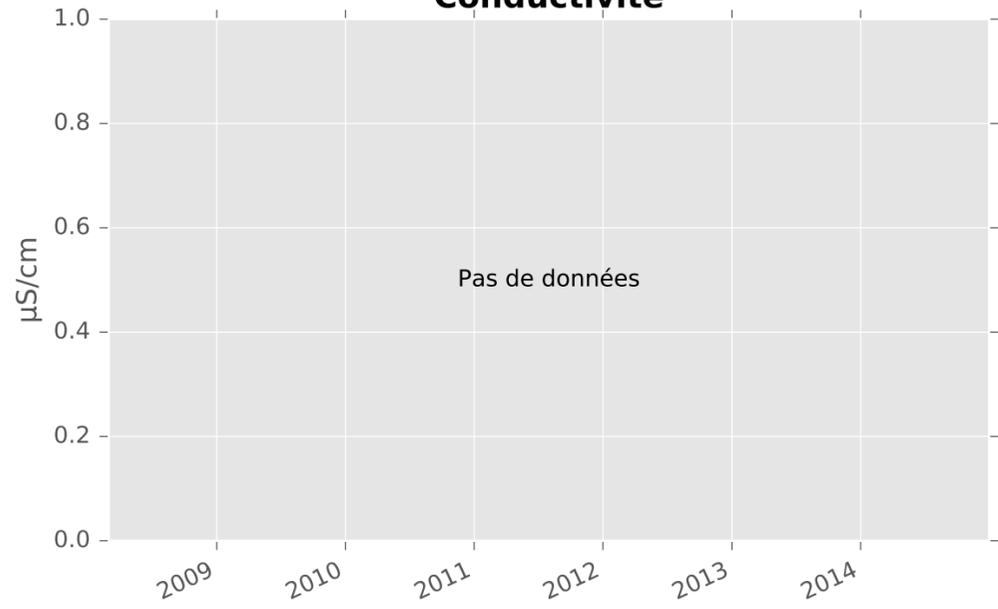
Température de l'Eau



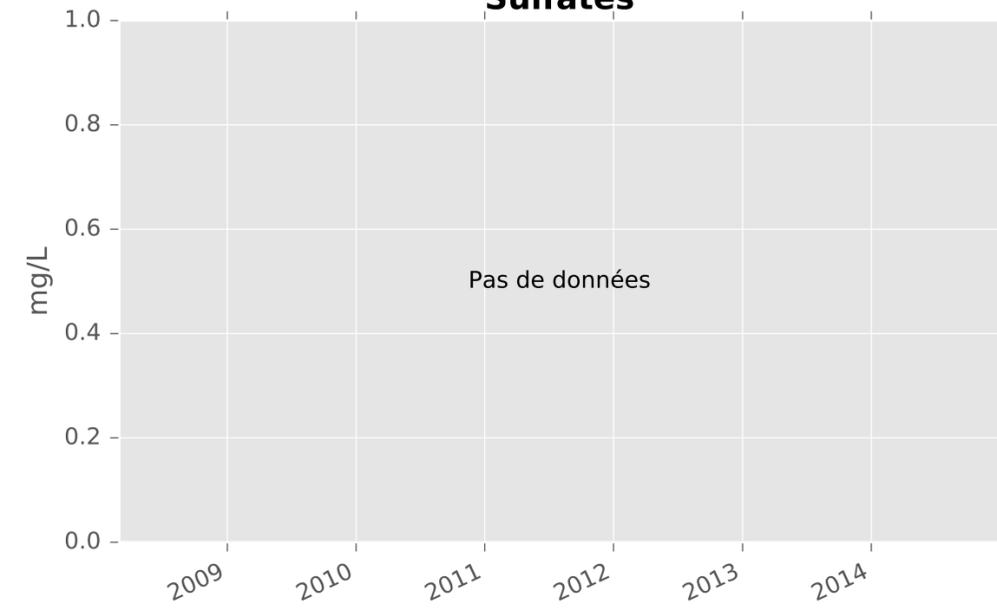
pH



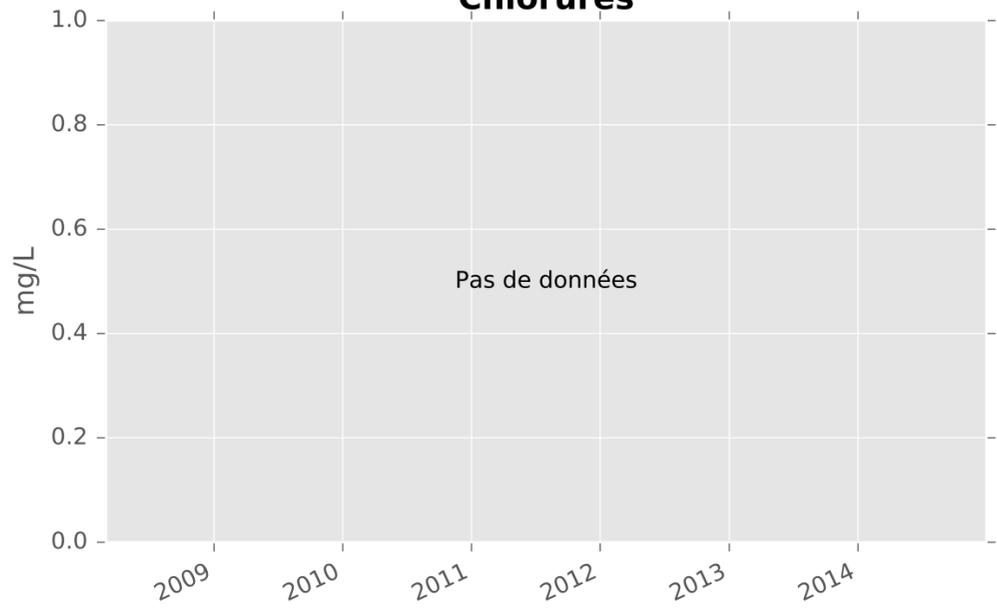
Conductivité



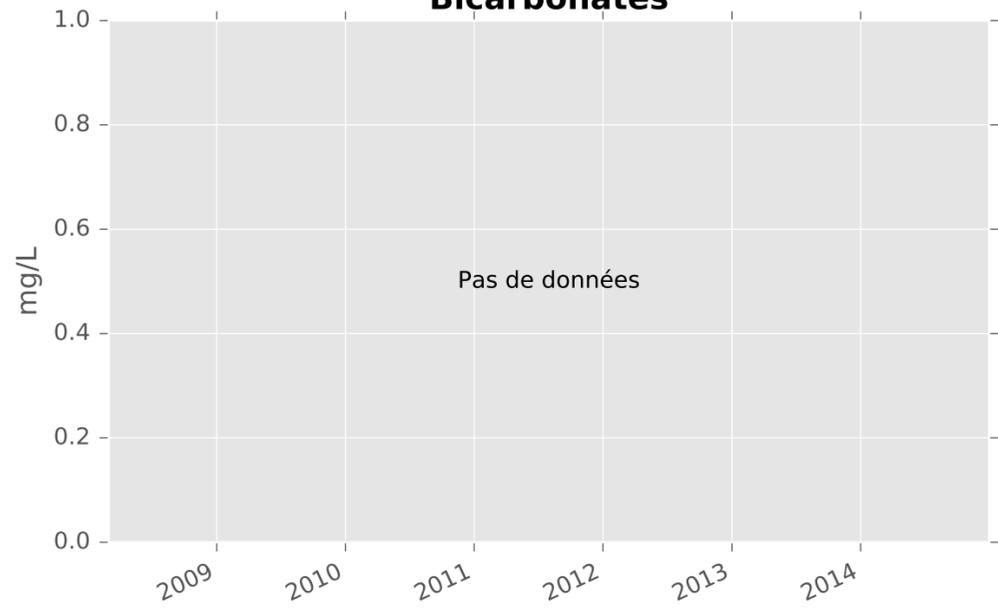
Sulfates



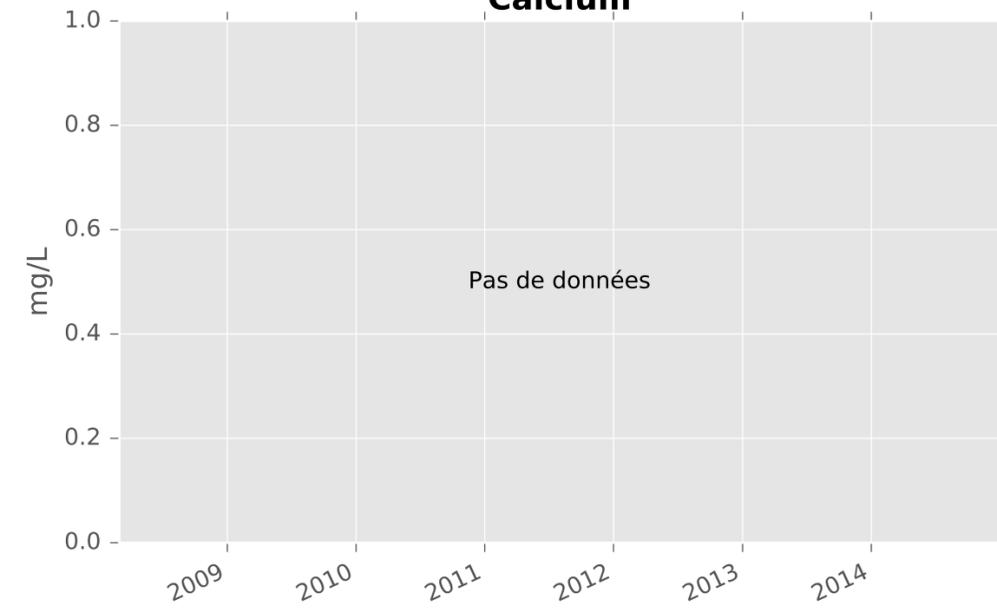
Chlorures



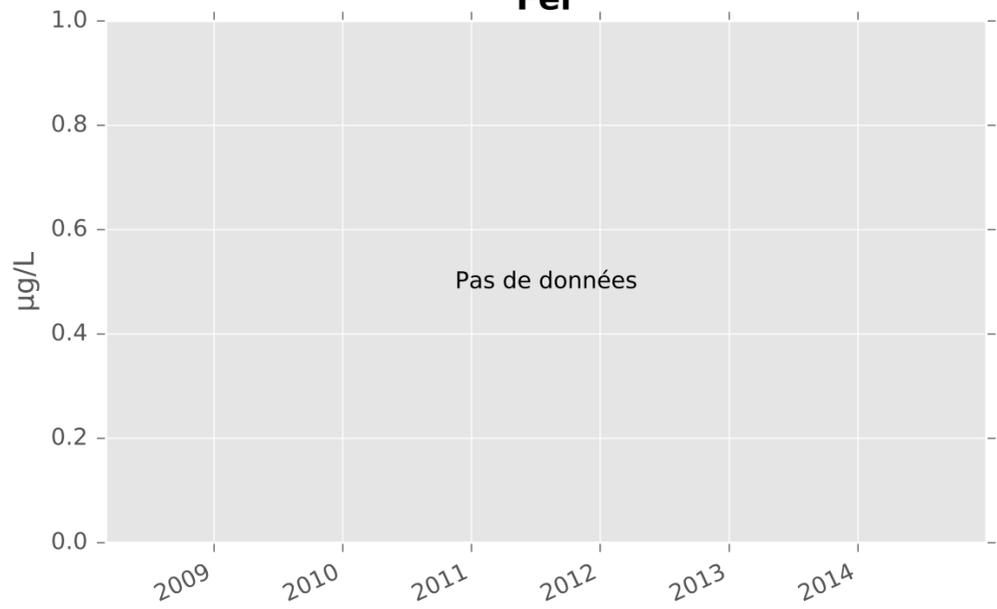
Bicarbonates



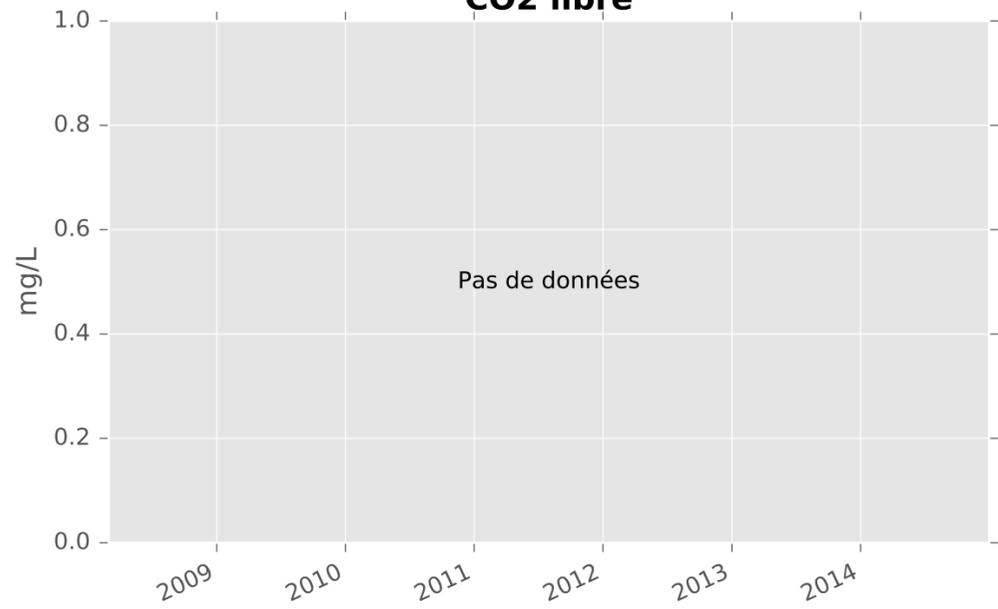
Calcium



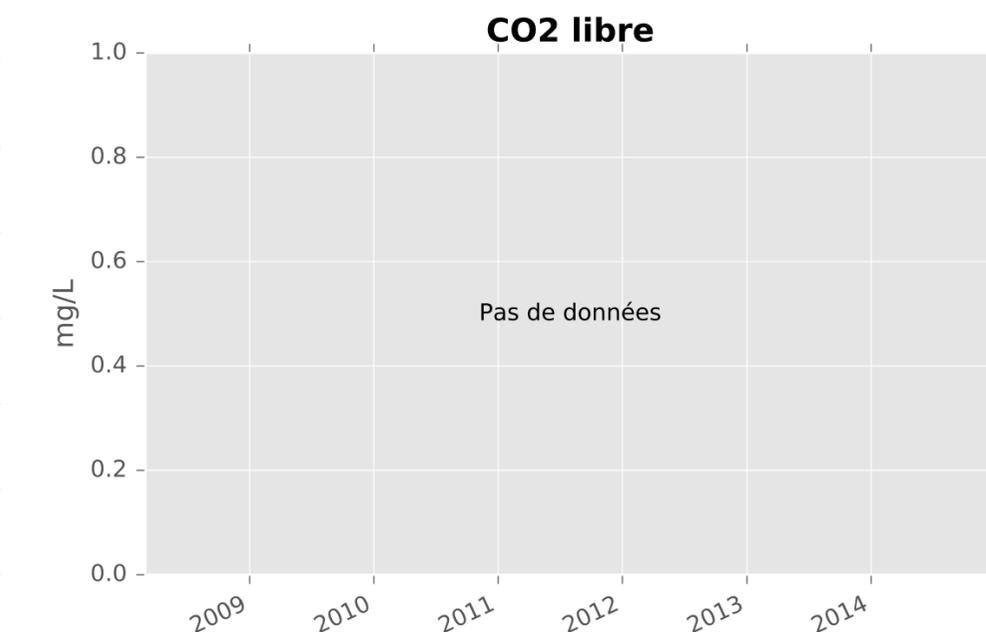
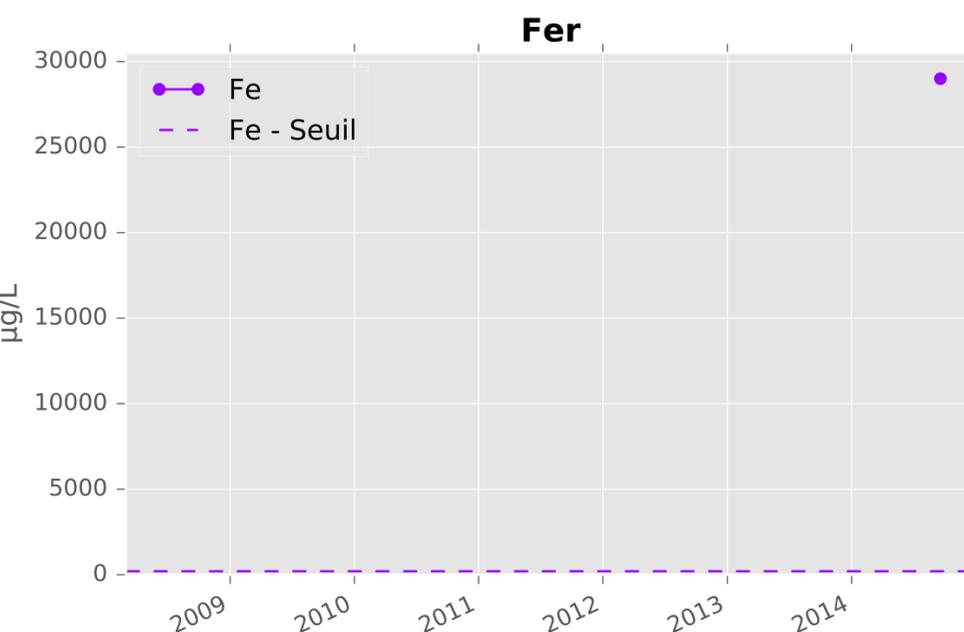
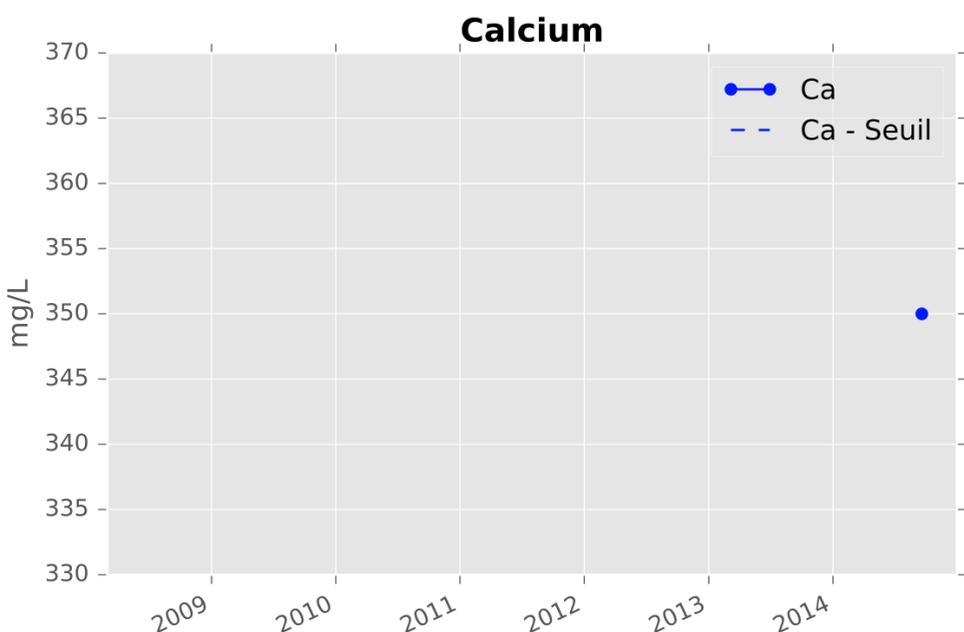
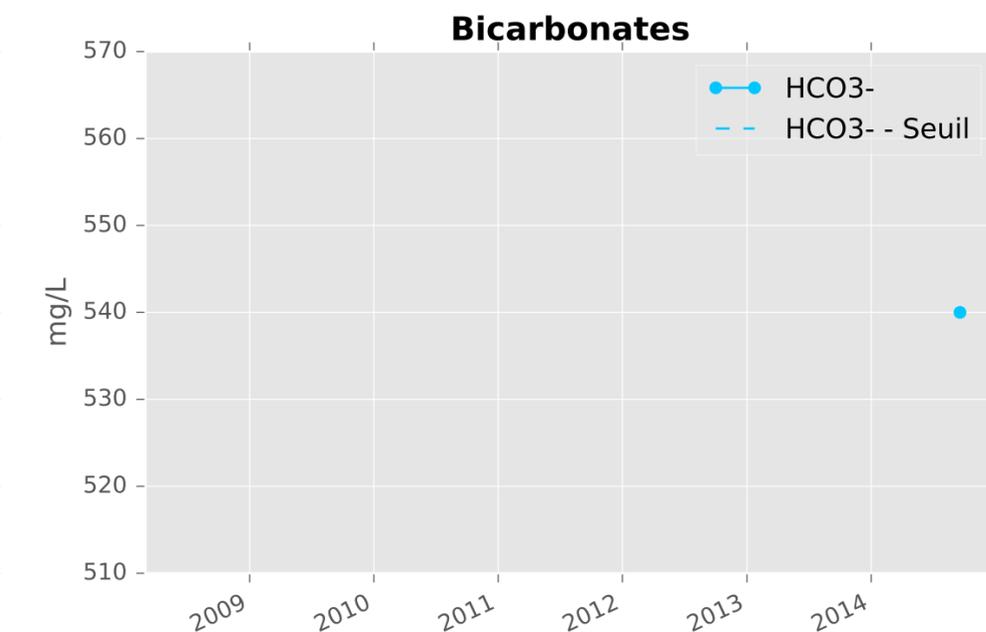
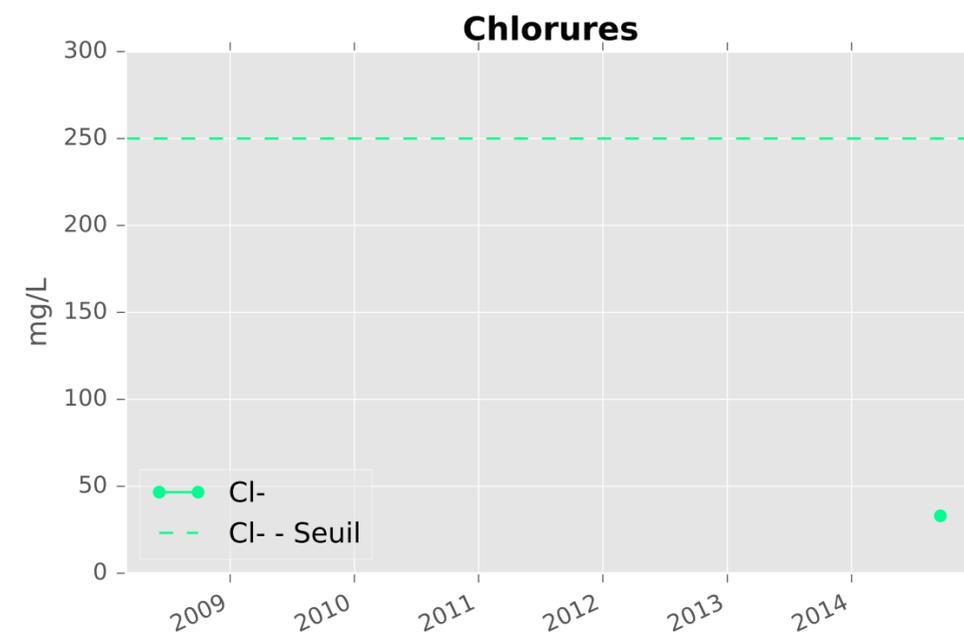
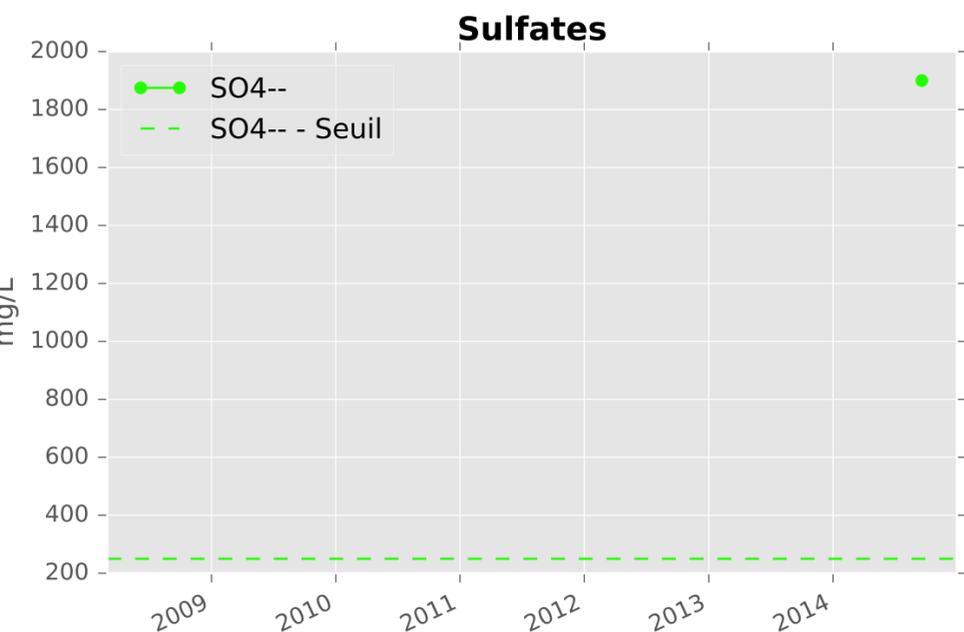
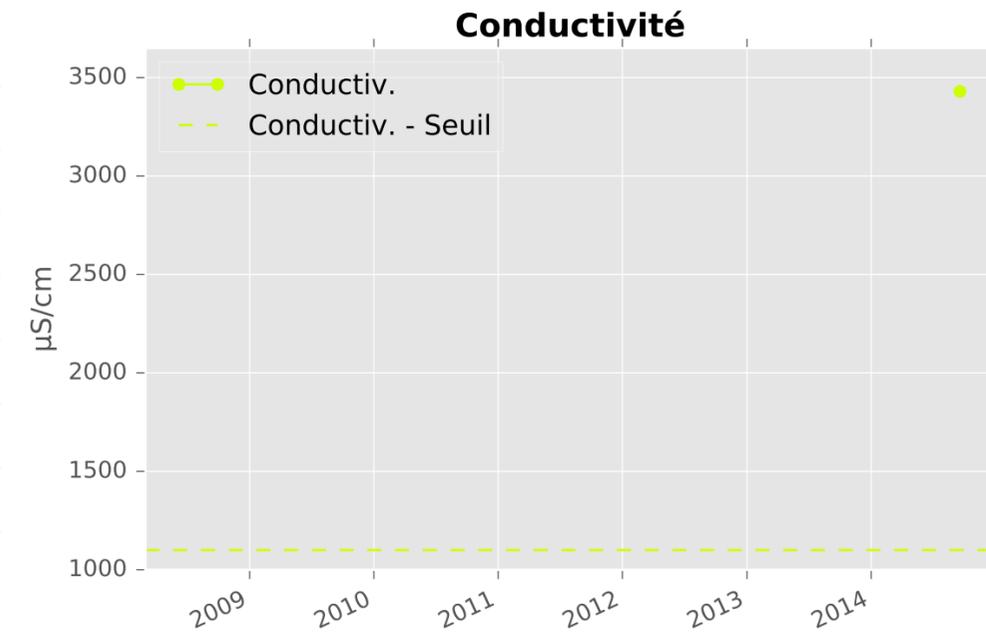
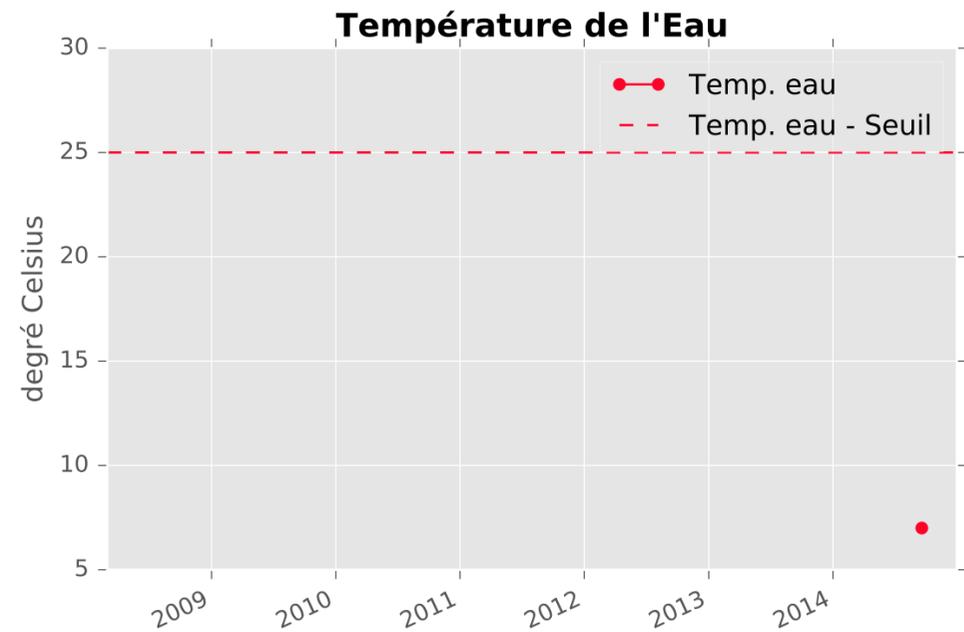
Fer



CO2 libre

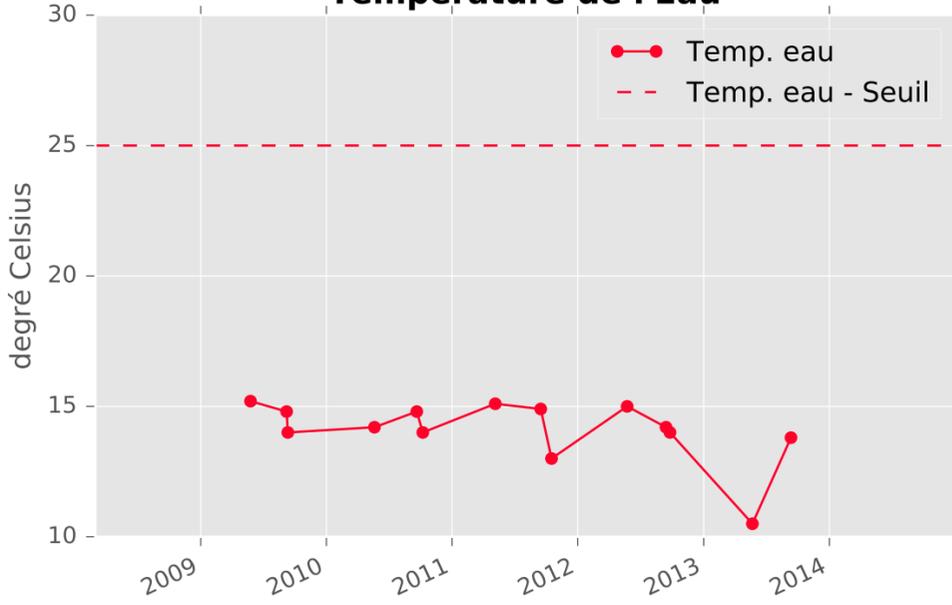


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01372X0198 - C16 - Puits St Pierremont II

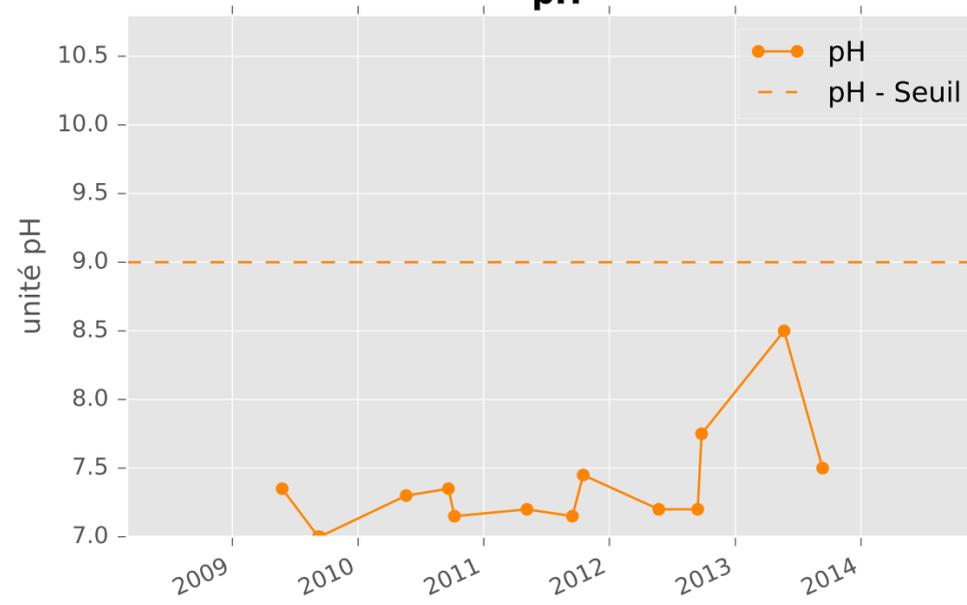


RESERVOIR MINIER CENTRE - 01372X0196 - C17 - Puits Tucquegnieux I

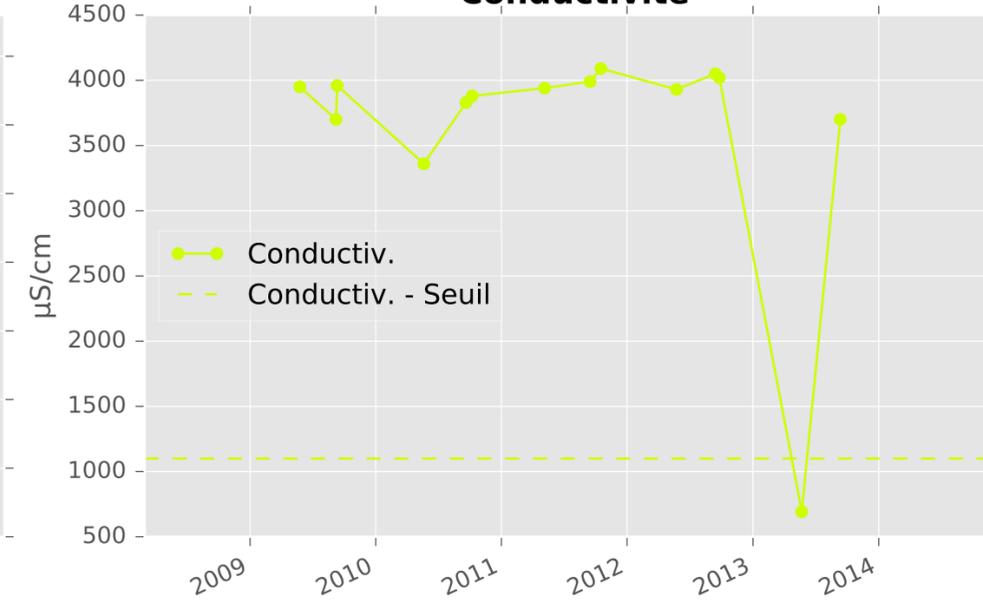
Température de l'Eau



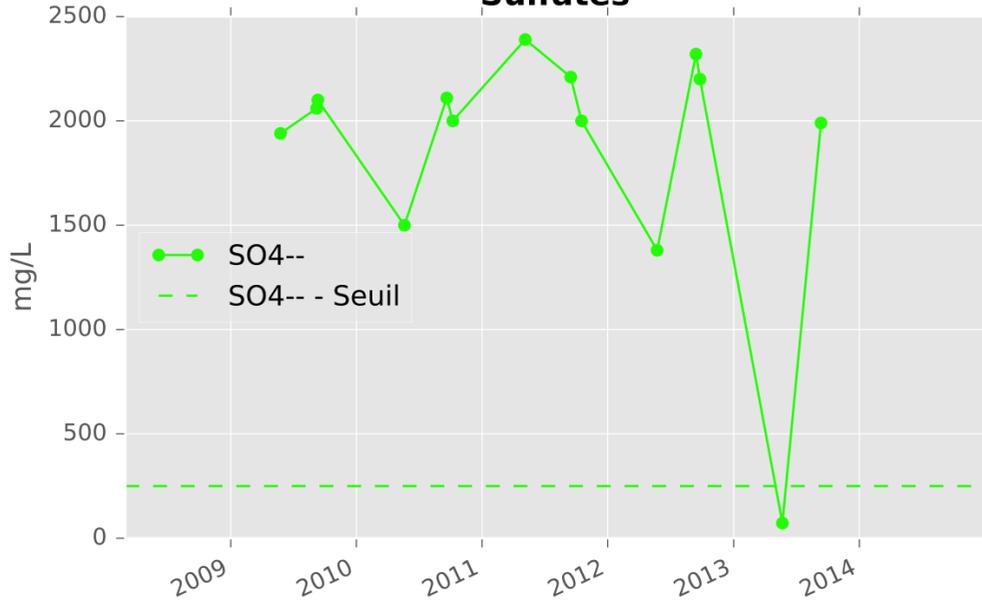
pH



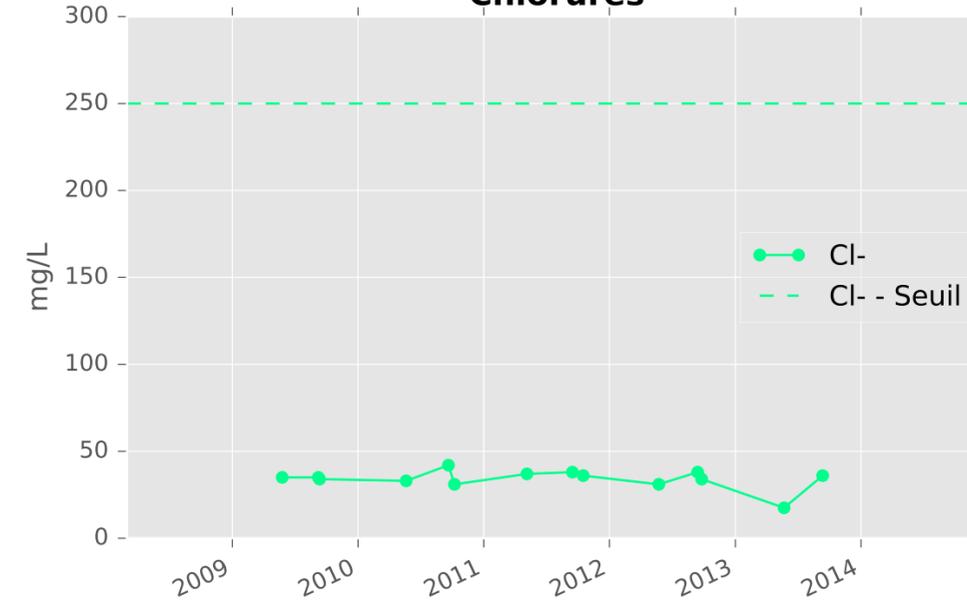
Conductivité



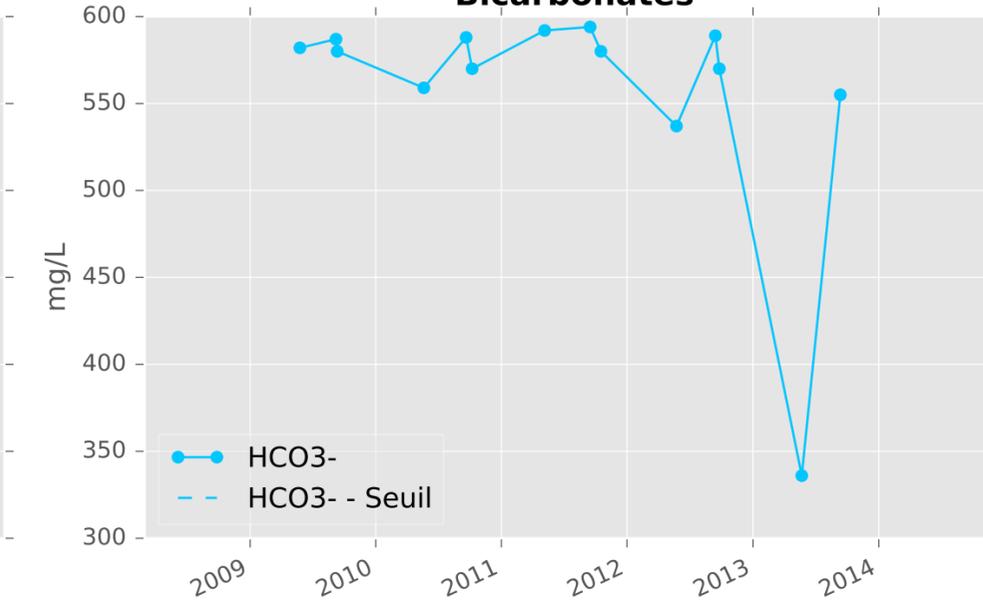
Sulfates



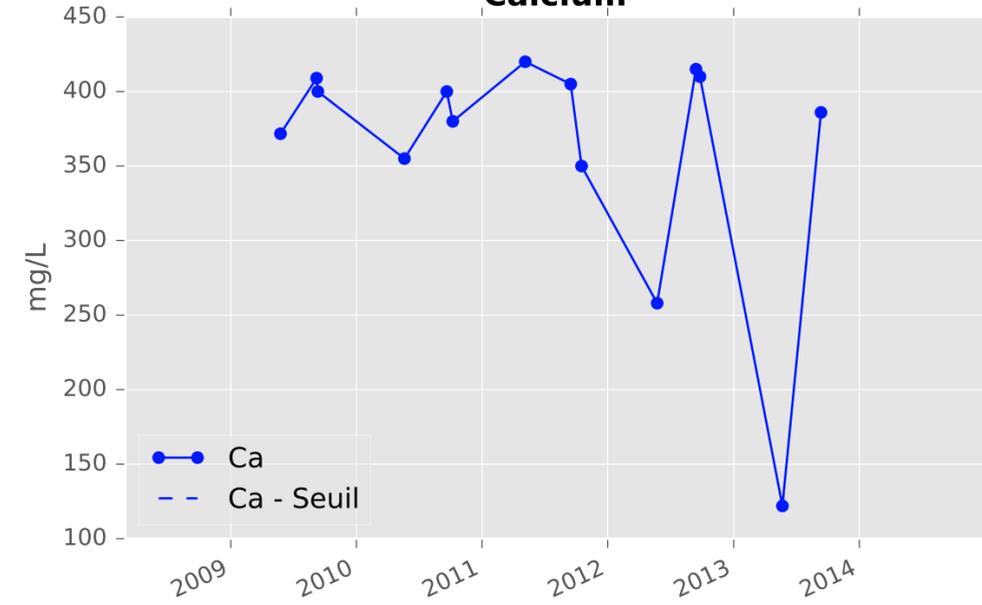
Chlorures



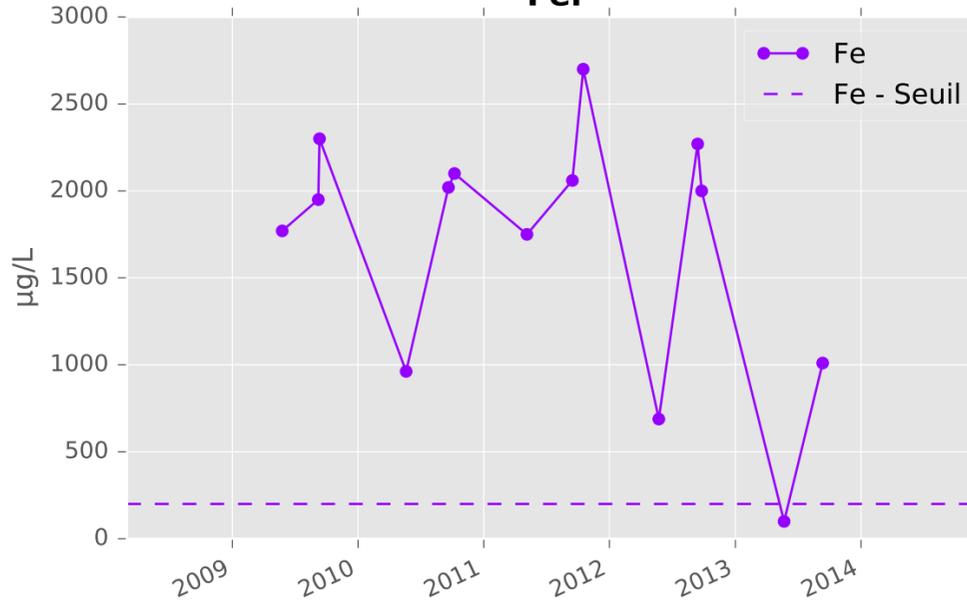
Bicarbonates



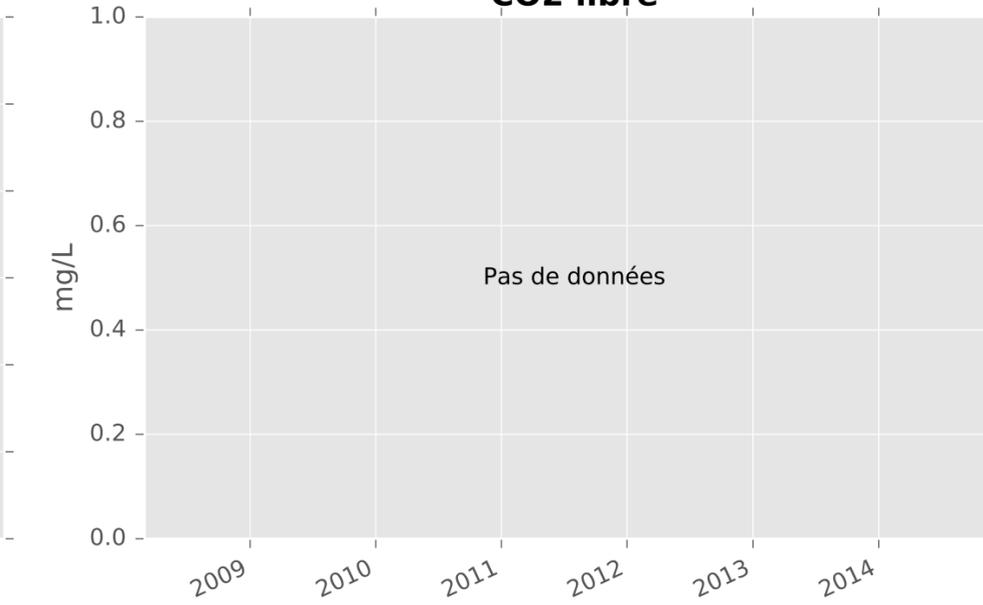
Calcium



Fer

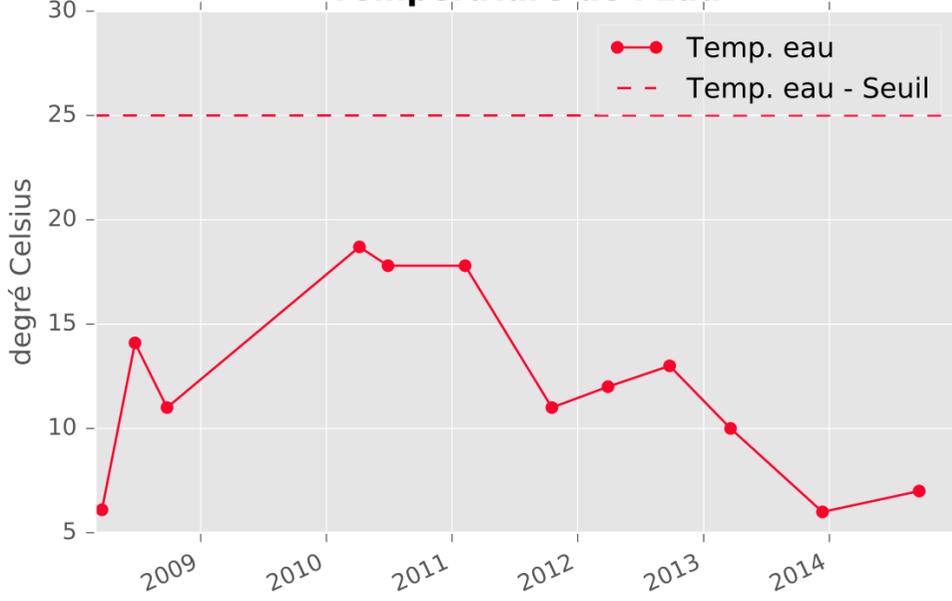


CO2 libre

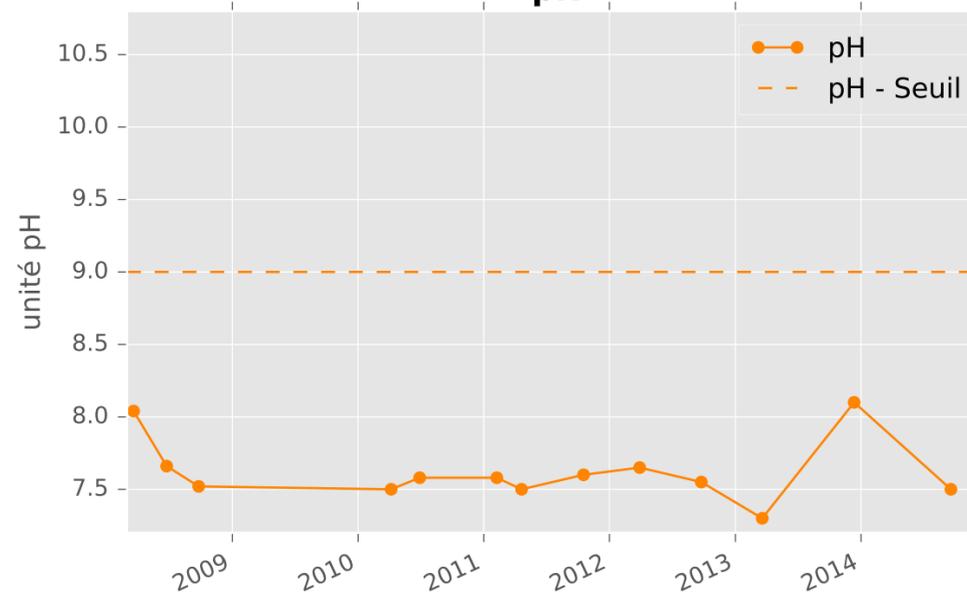


RESERVOIR MINIER ERROUVILLE - 01132X0164 - N17 - Puits Errouville III

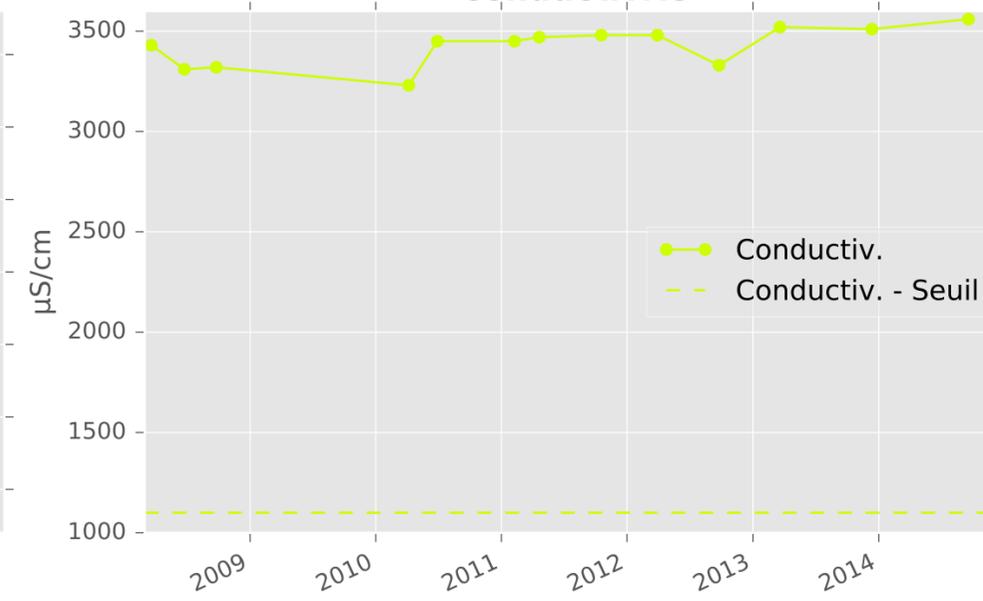
Température de l'Eau



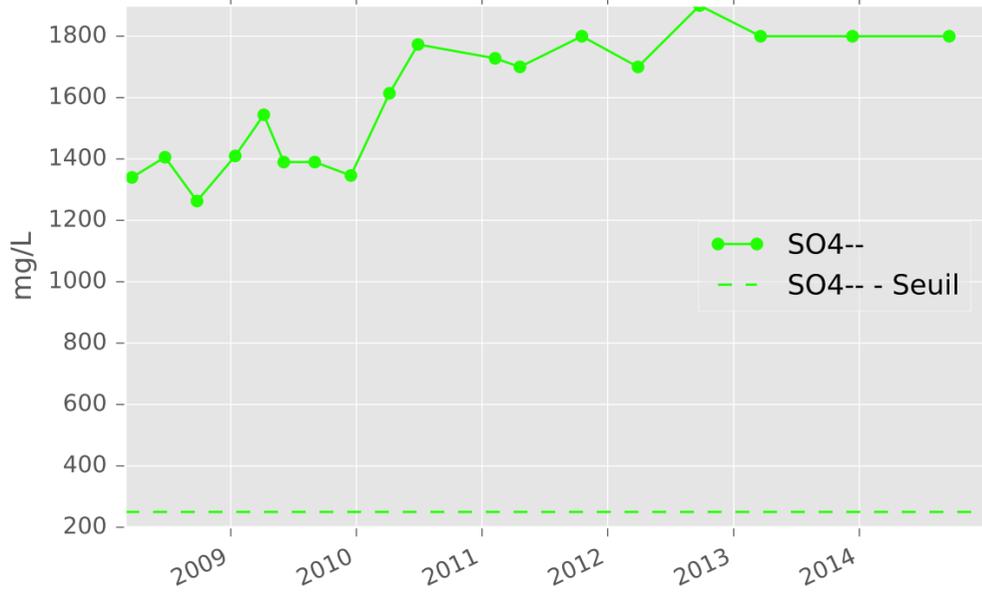
pH



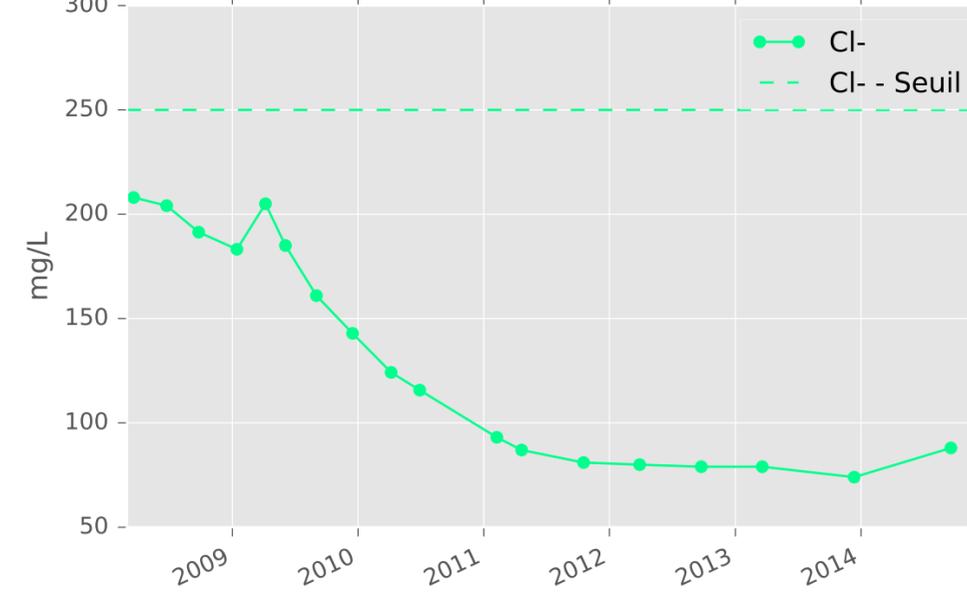
Conductivité



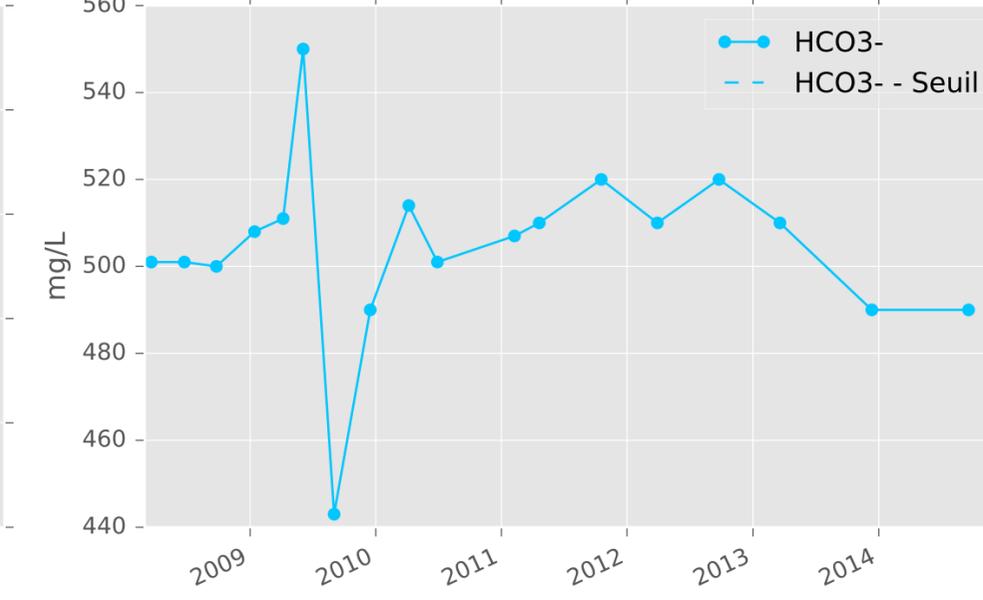
Sulfates



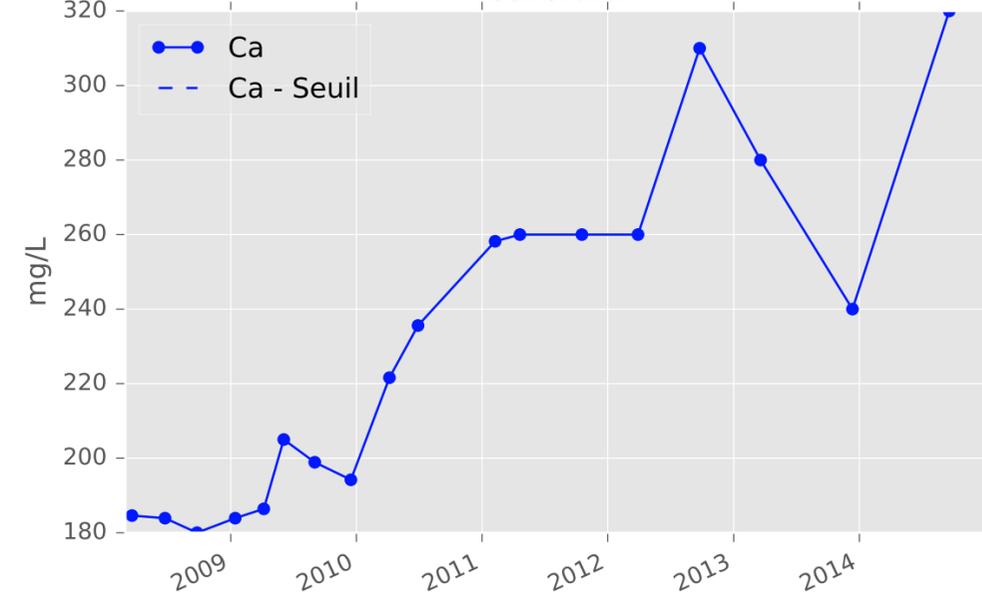
Chlorures



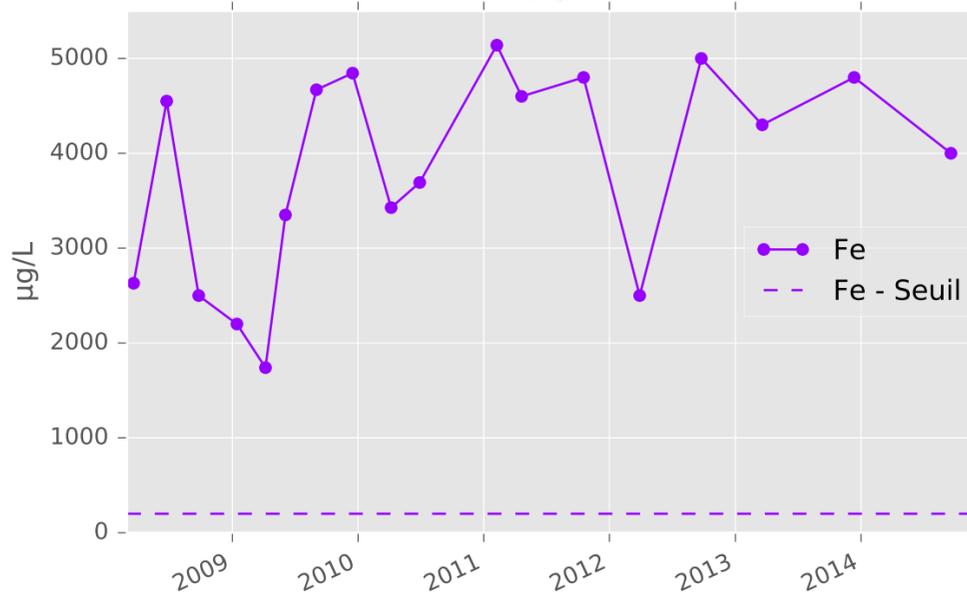
Bicarbonates



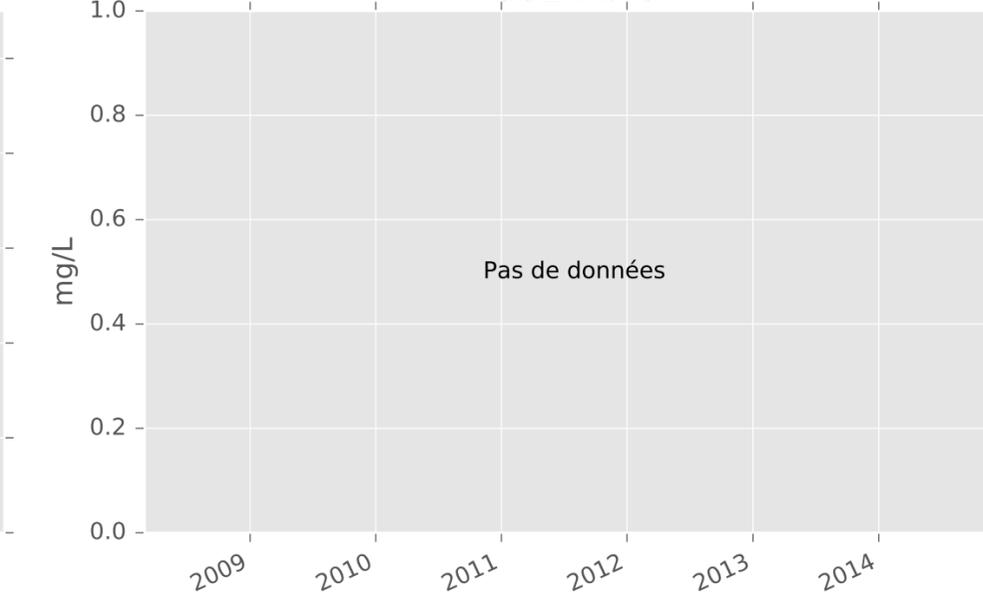
Calcium



Fer

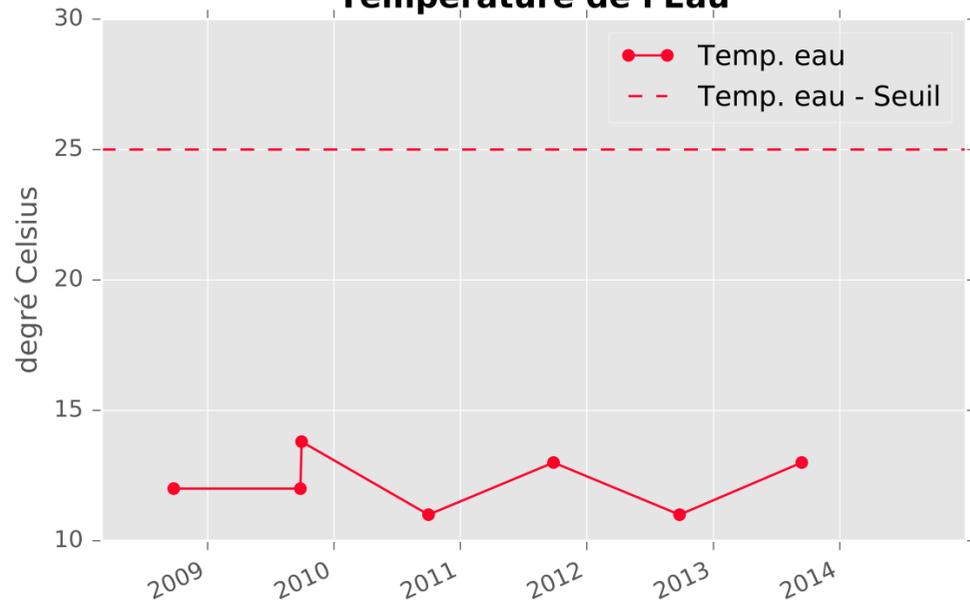


CO2 libre

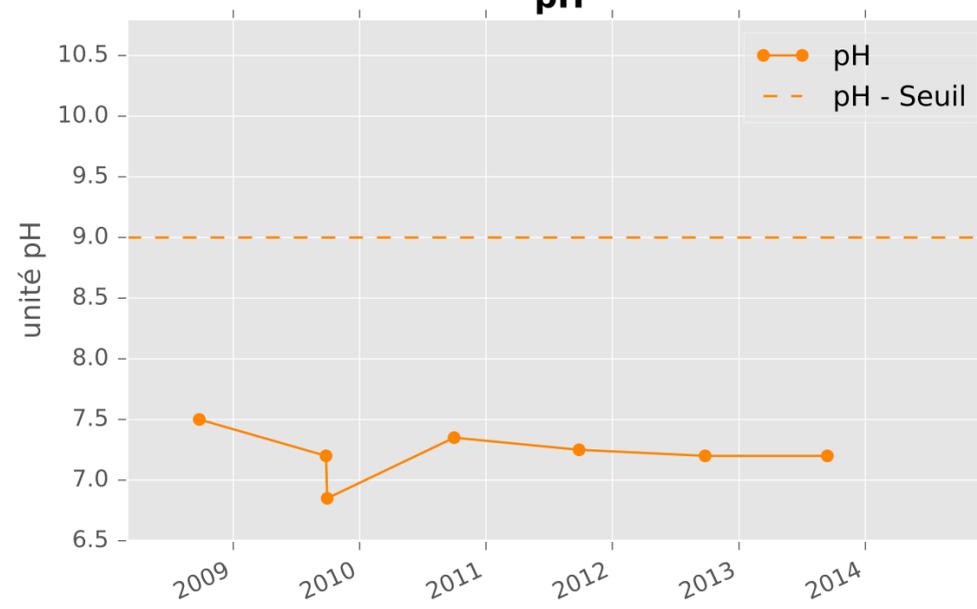


RESERVOIR MINIER HAYANGE SUD - 01374X0268 - Ha1 - Piézomètre Hayange Sud

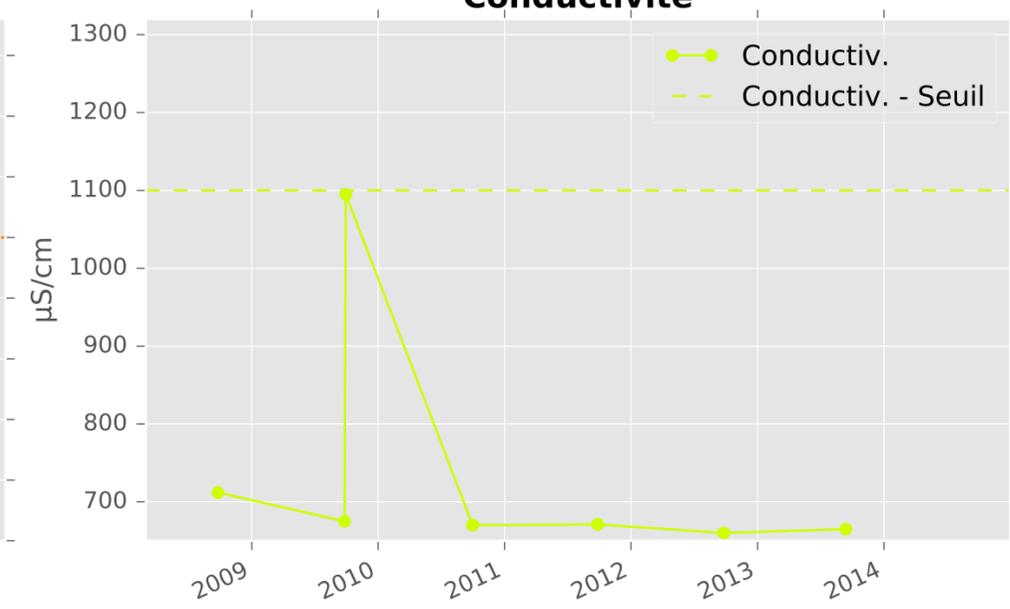
Température de l'Eau



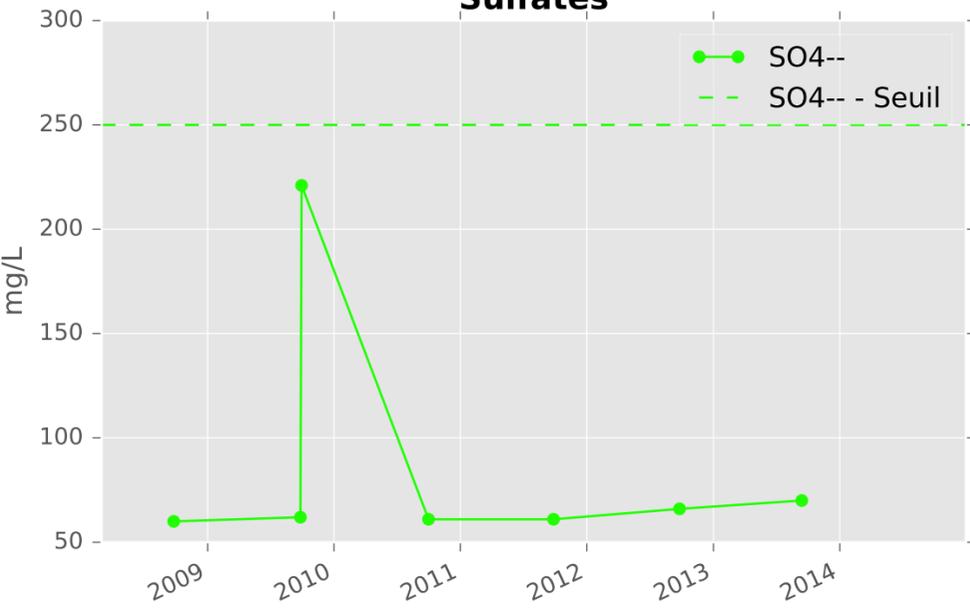
pH



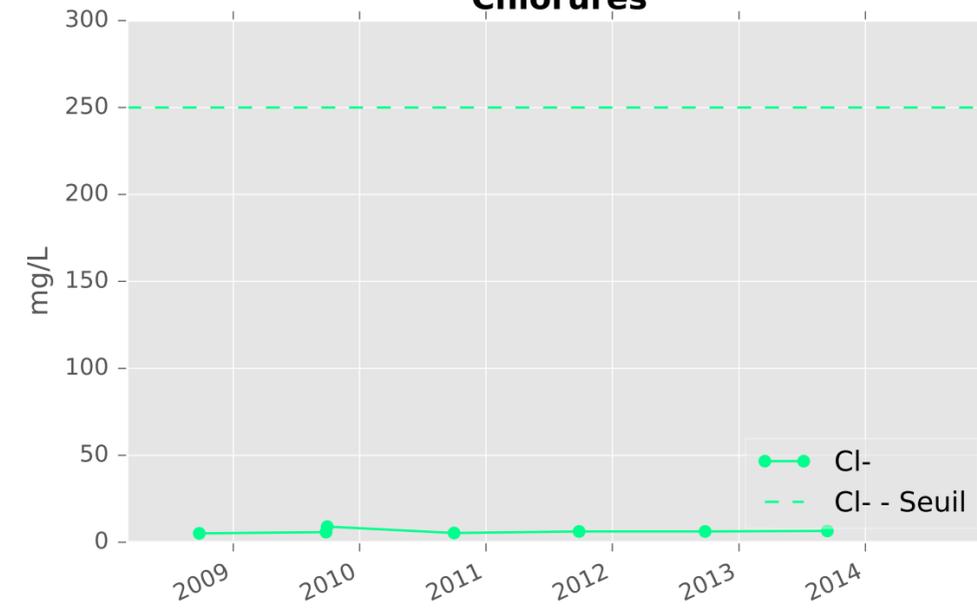
Conductivité



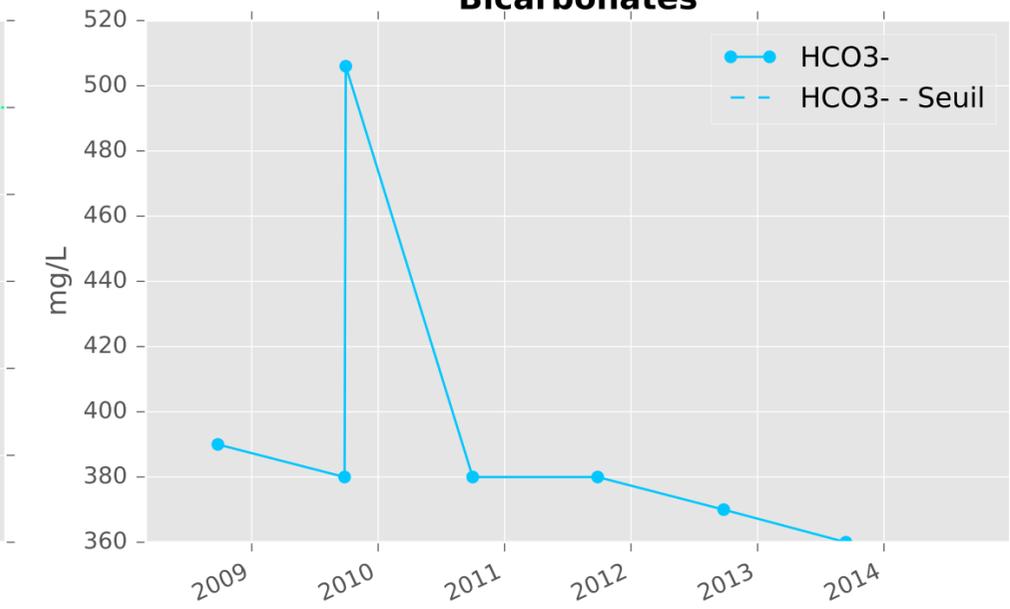
Sulfates



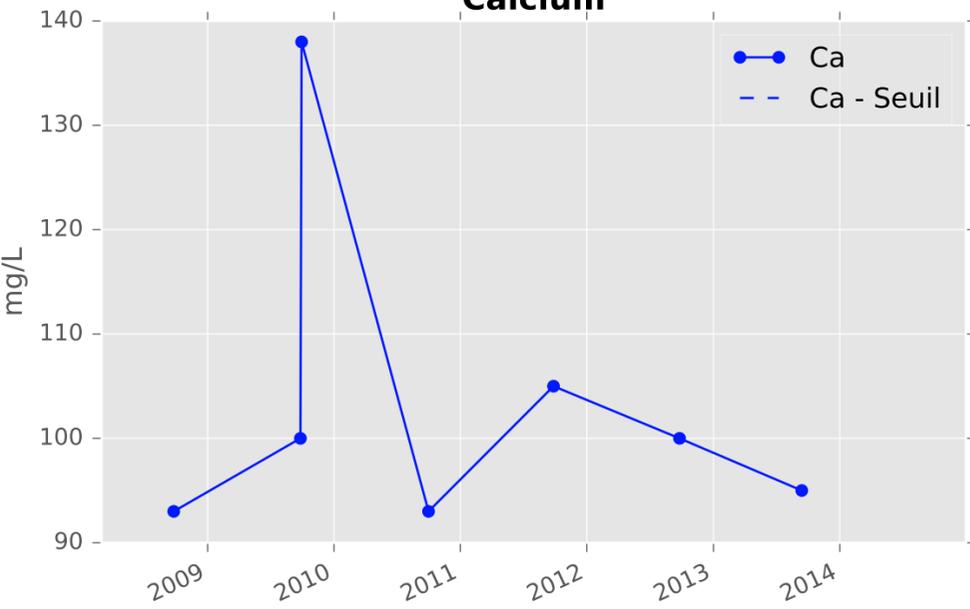
Chlorures



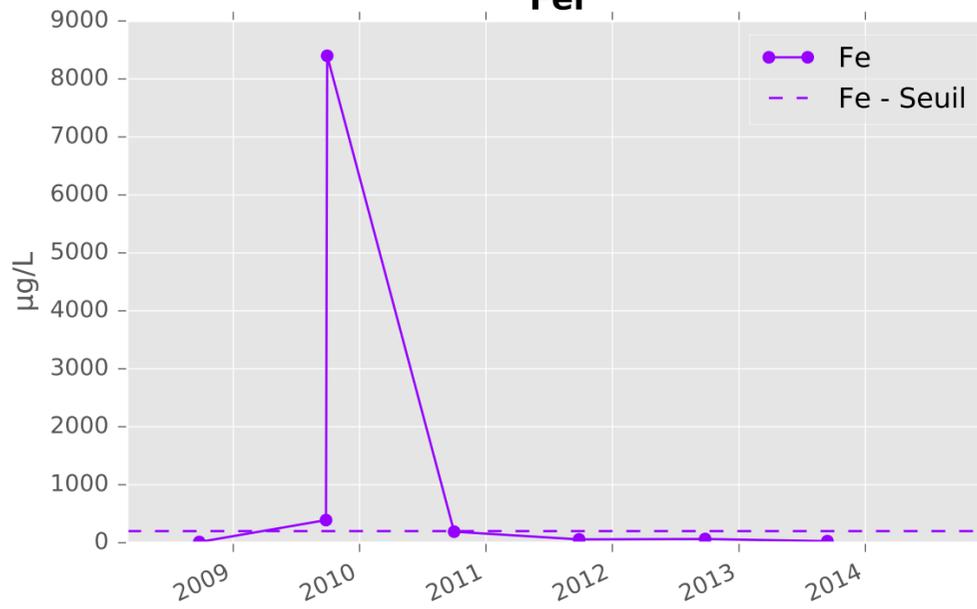
Bicarbonates



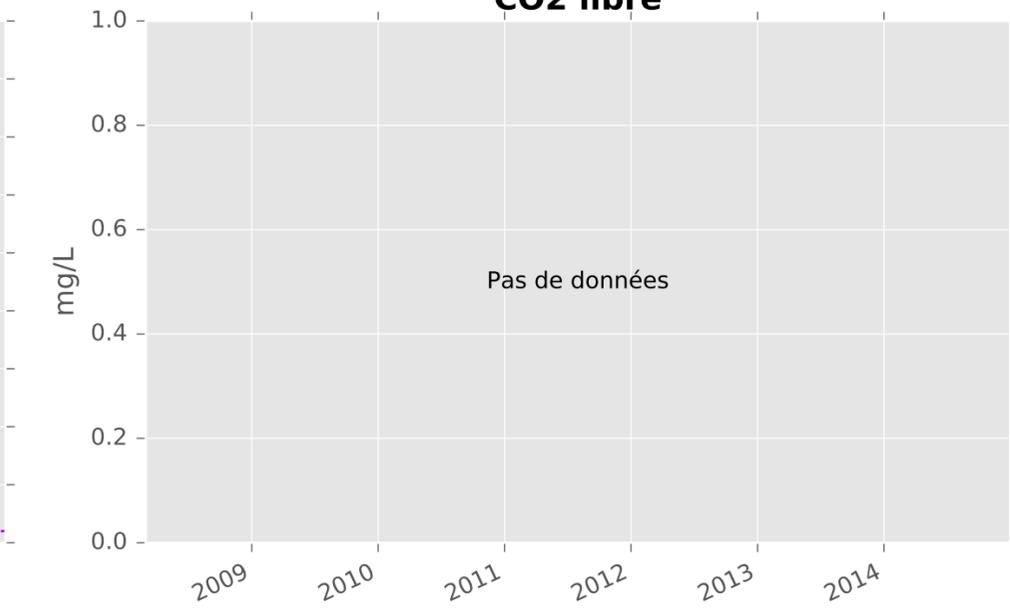
Calcium



Fer

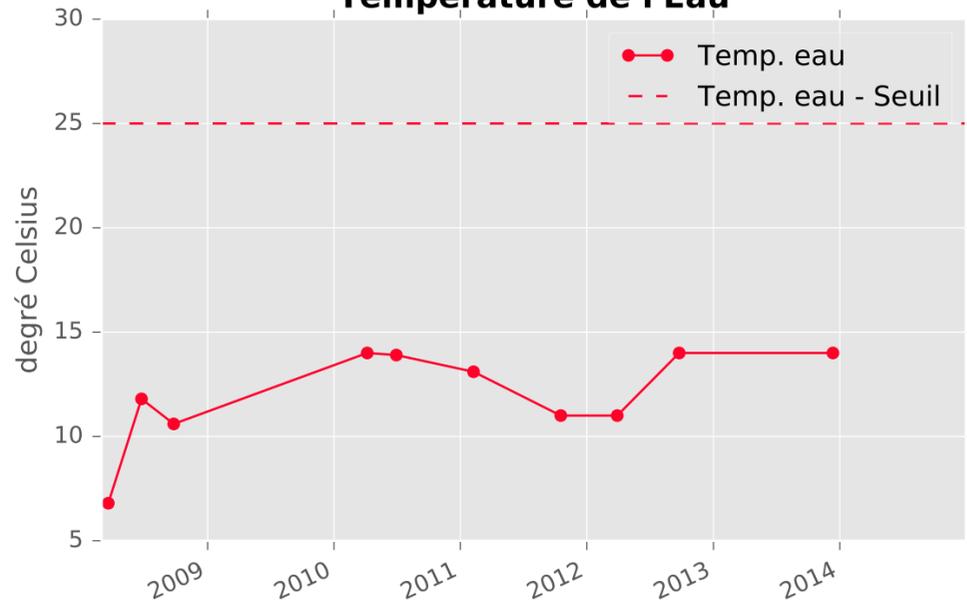


CO2 libre

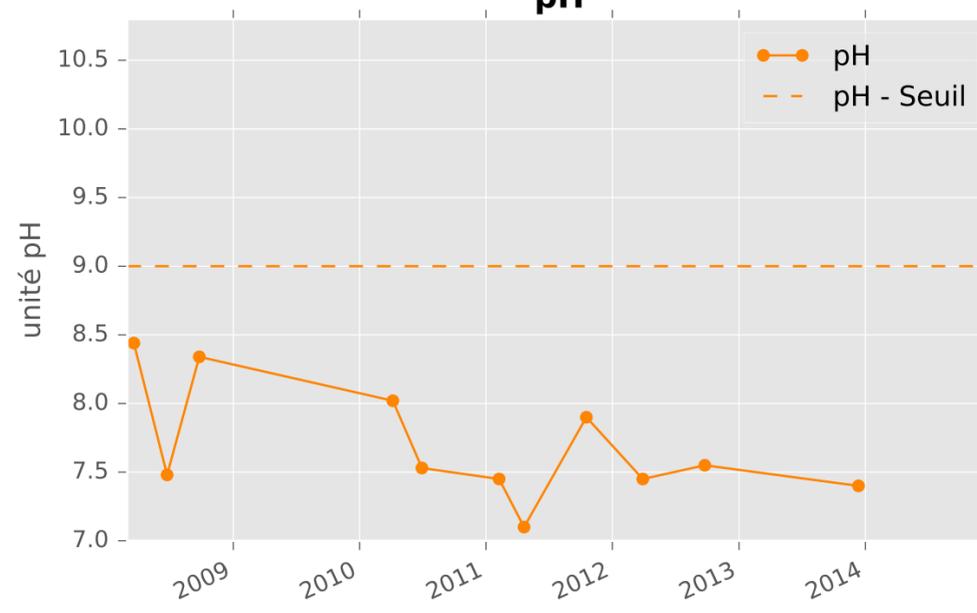


RESERVOIR MINIER NORD - 01133X0094 - N2 - Piézomètre François Brune

Température de l'Eau



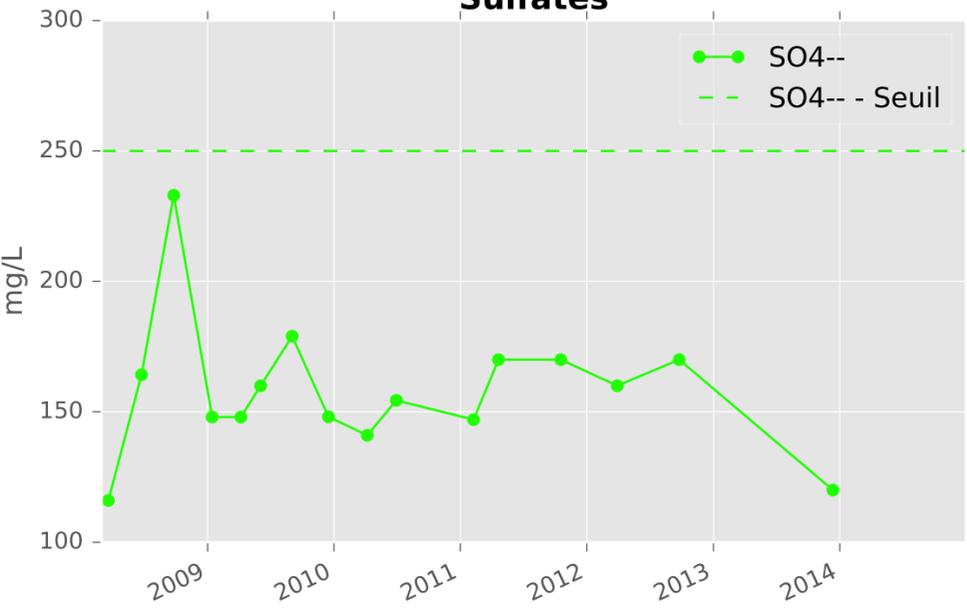
pH



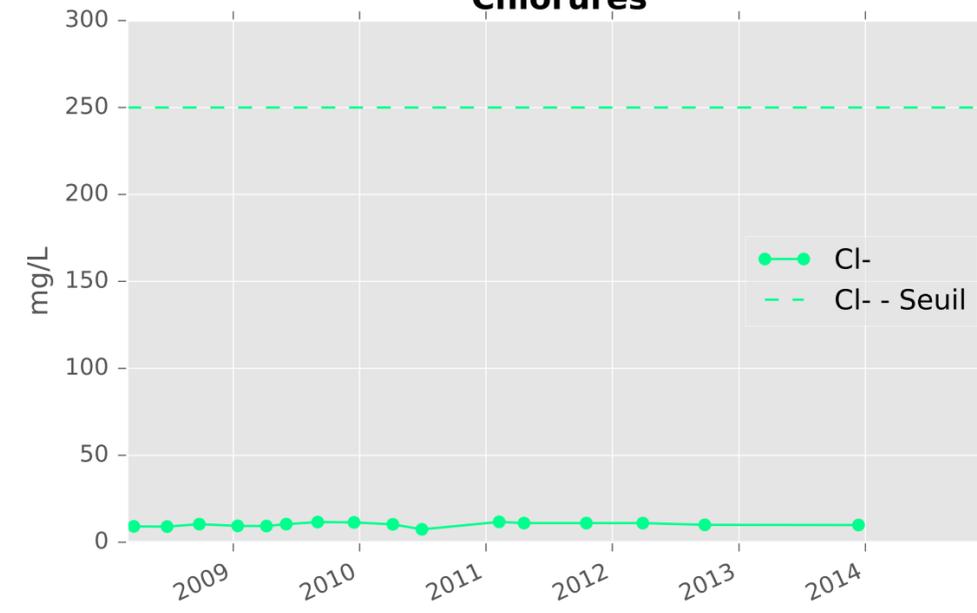
Conductivité



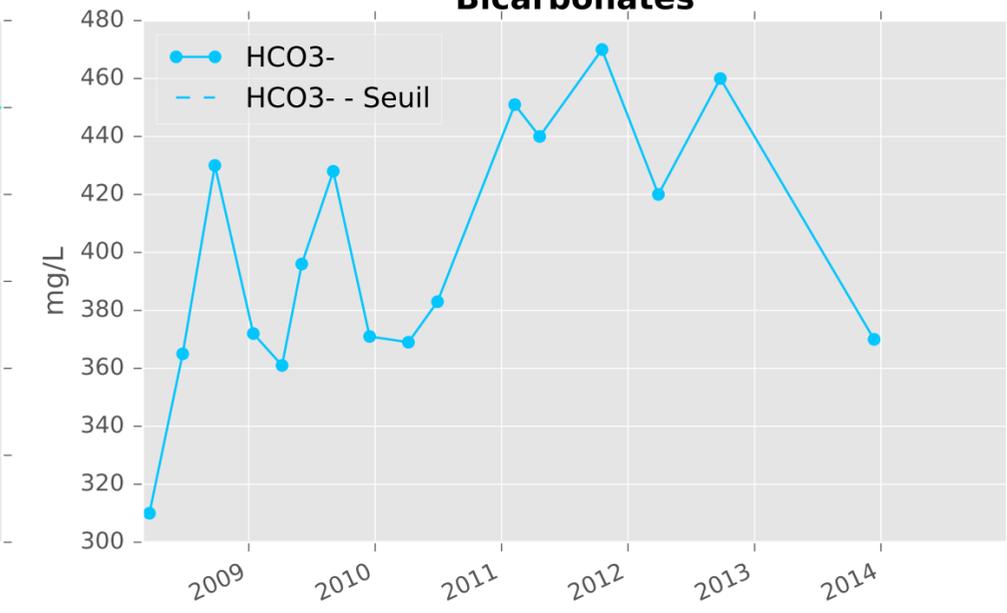
Sulfates



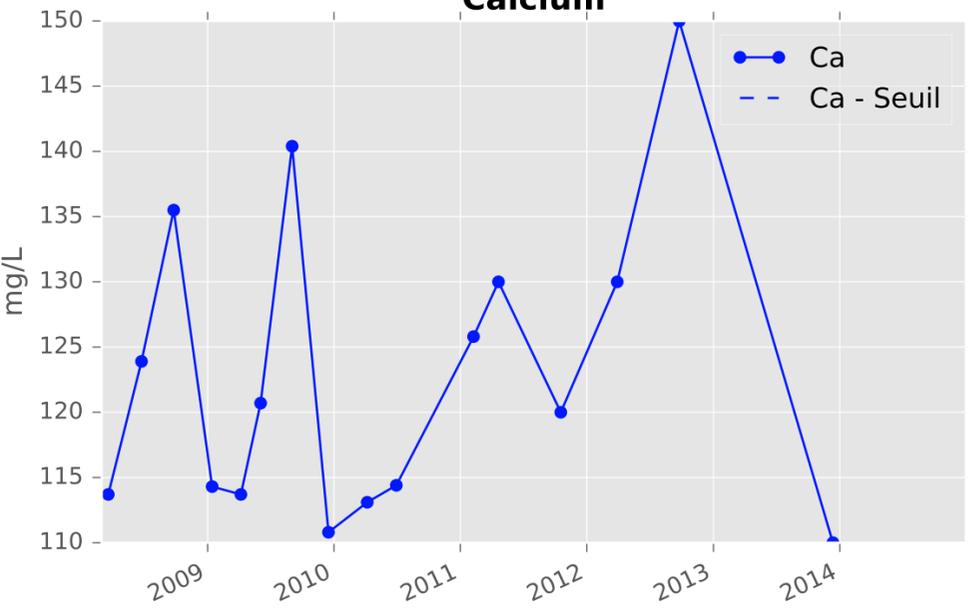
Chlorures



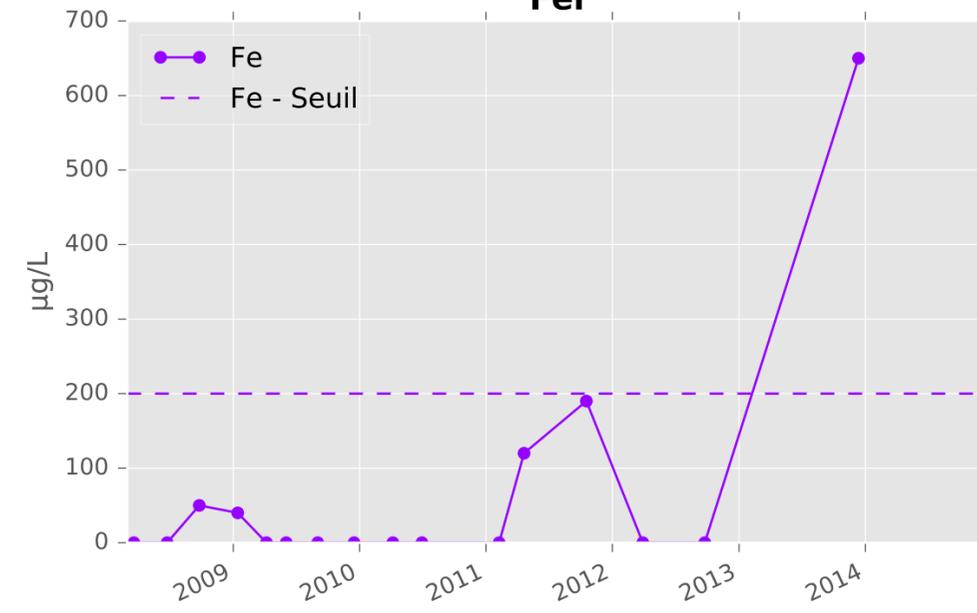
Bicarbonates



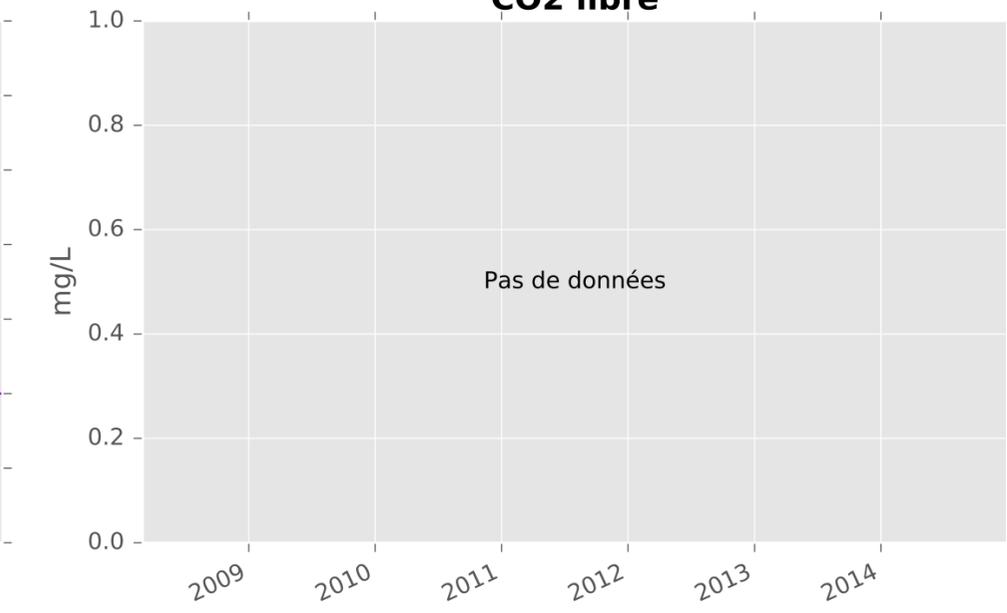
Calcium



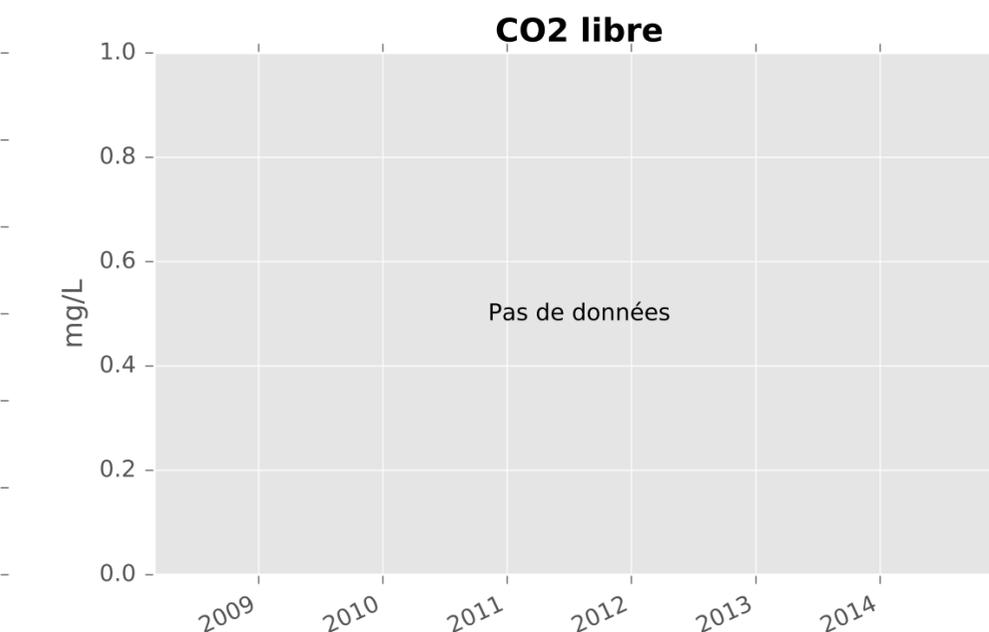
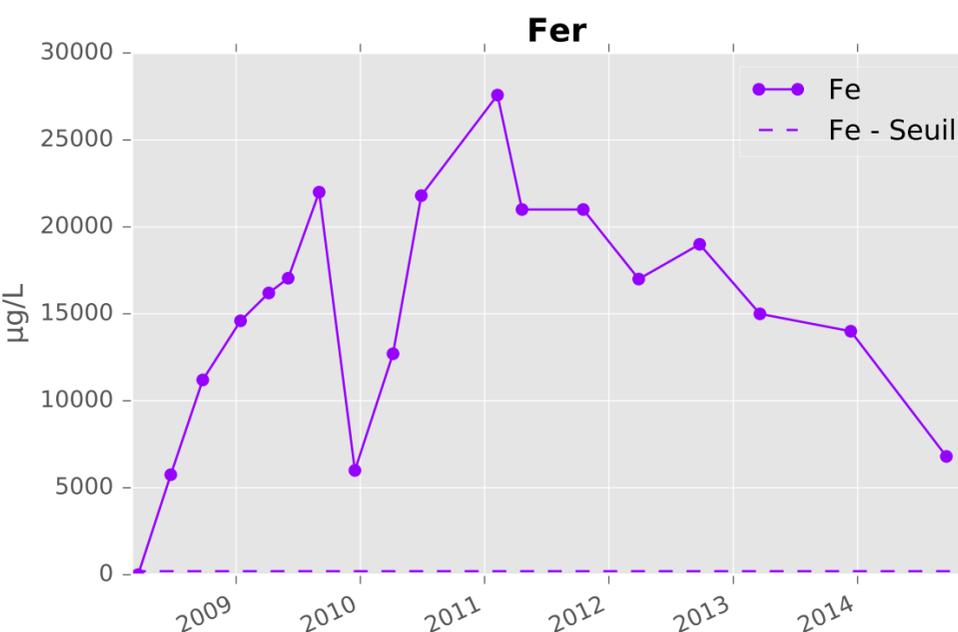
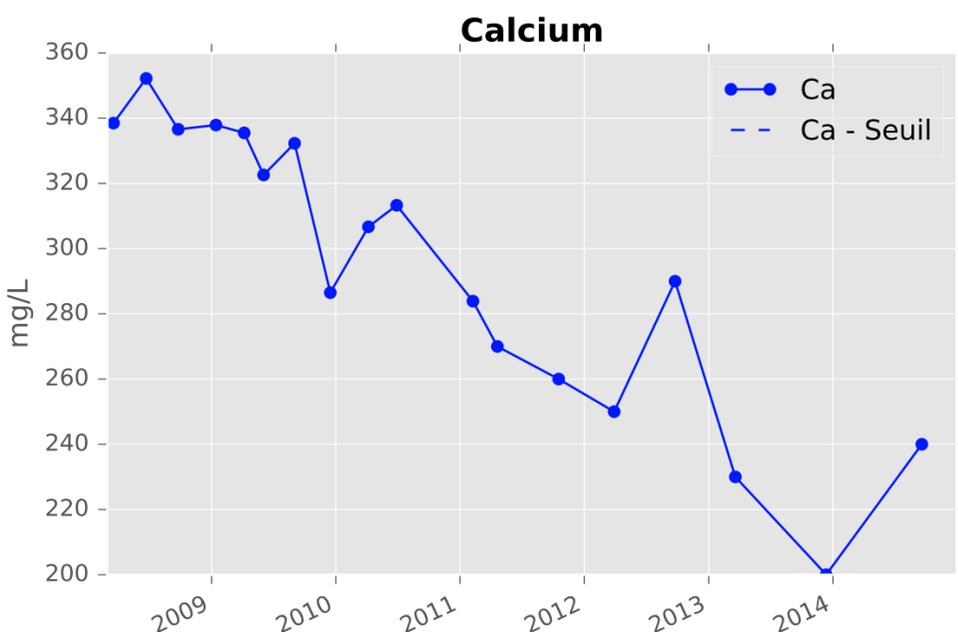
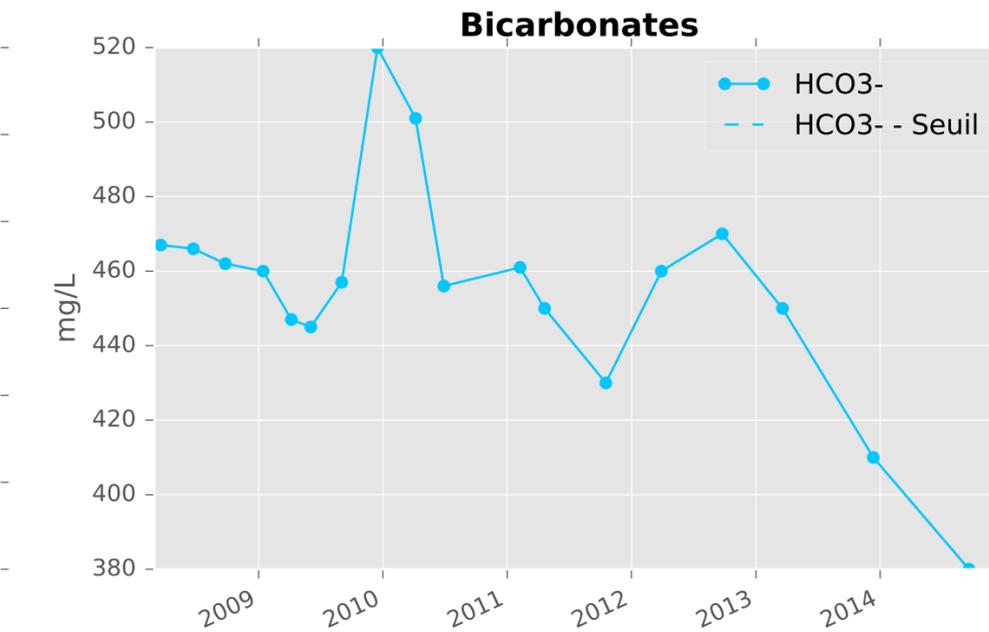
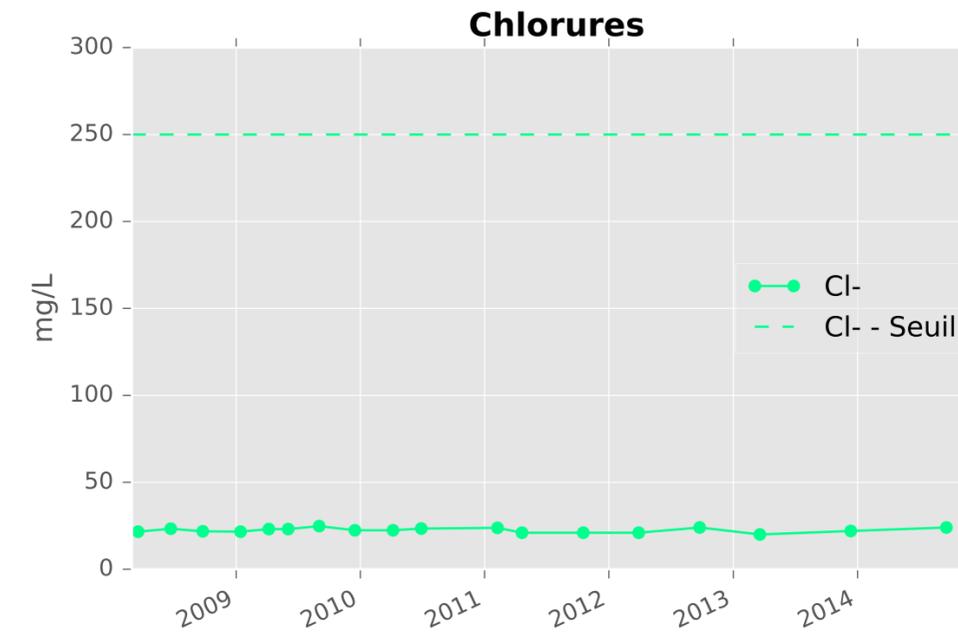
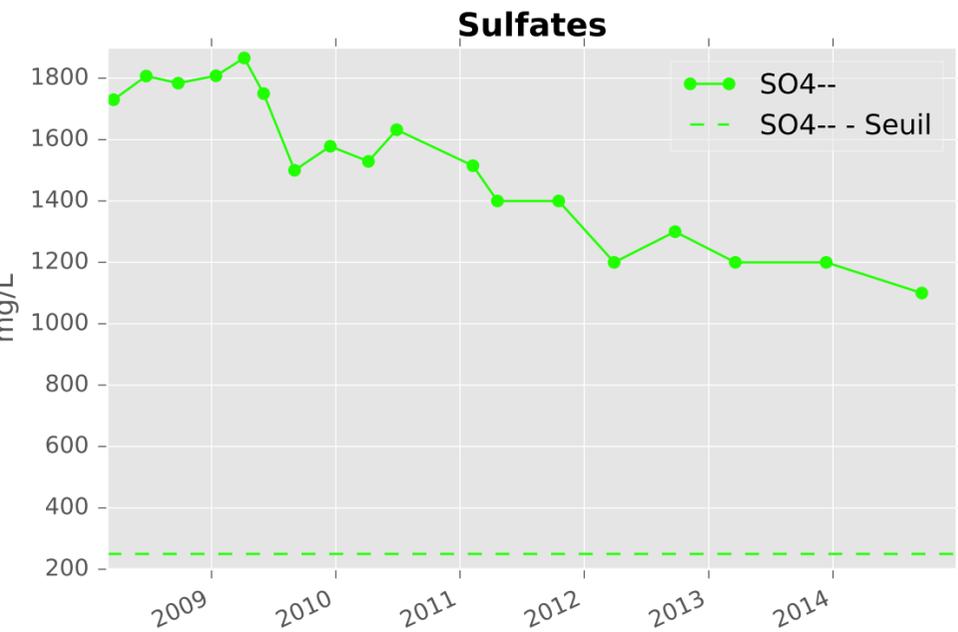
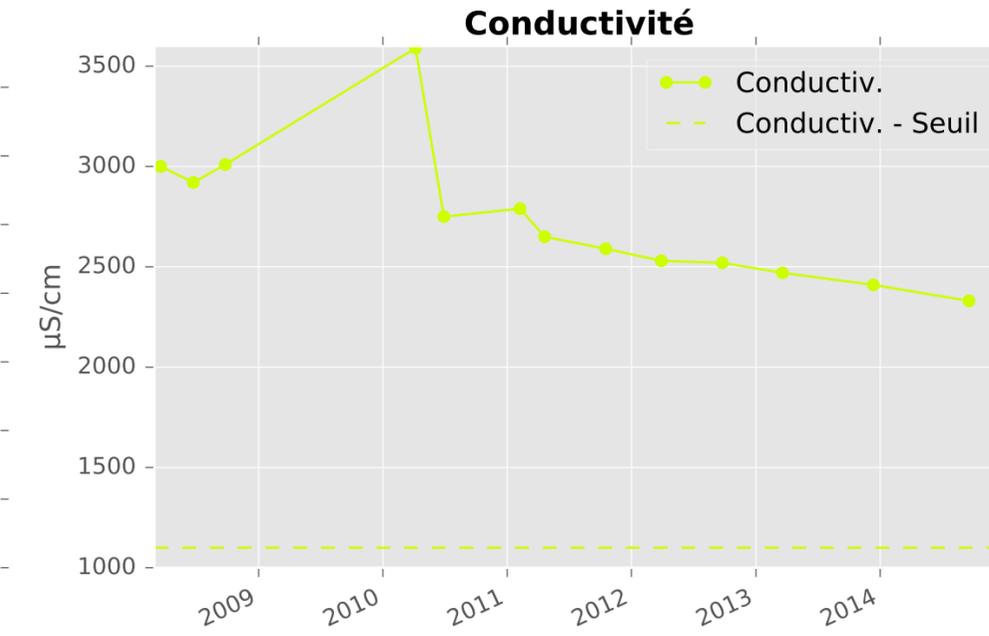
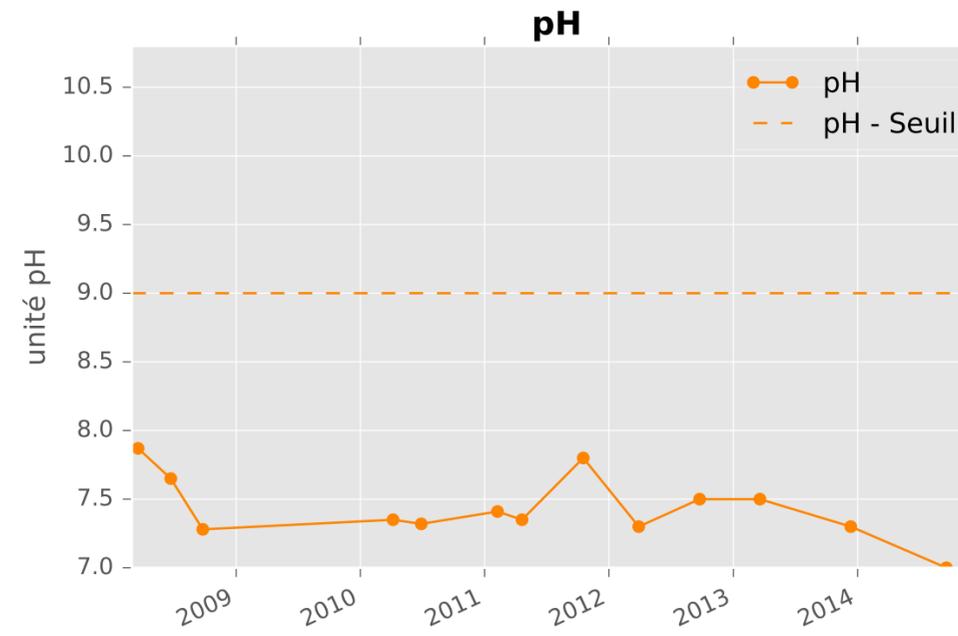
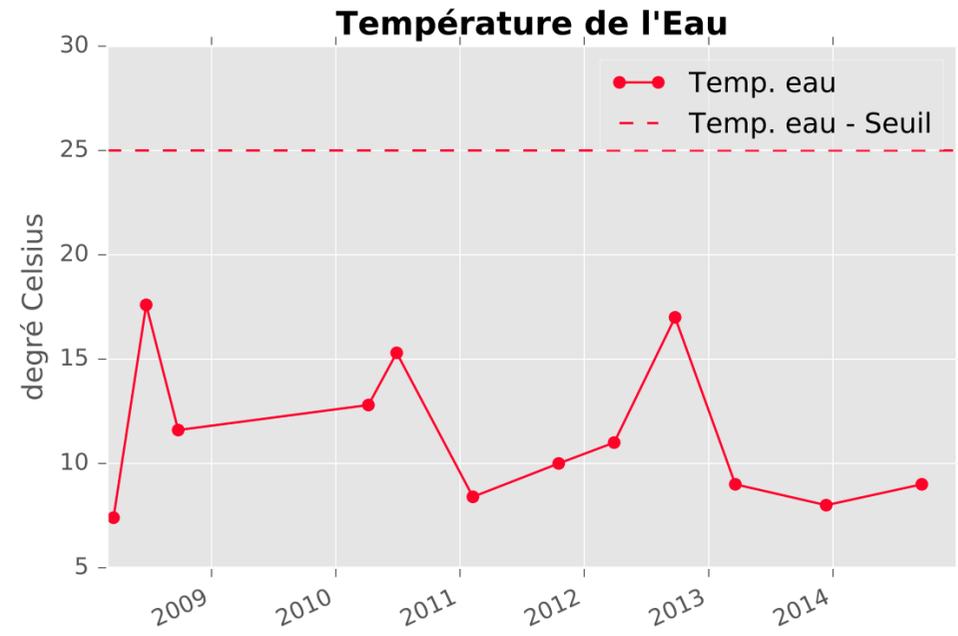
Fer



CO2 libre

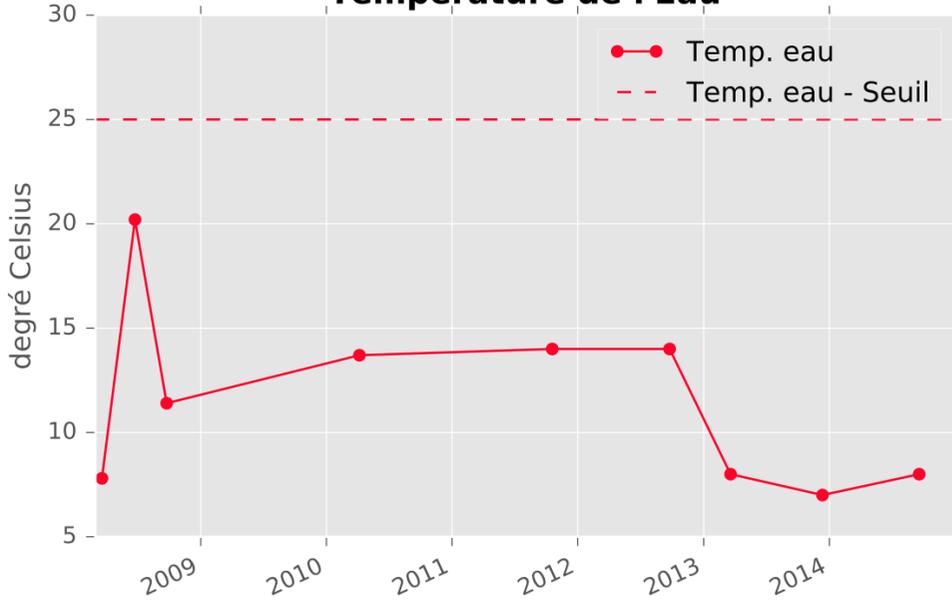


RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0143 - N3 - Puits Ferdinand Grise

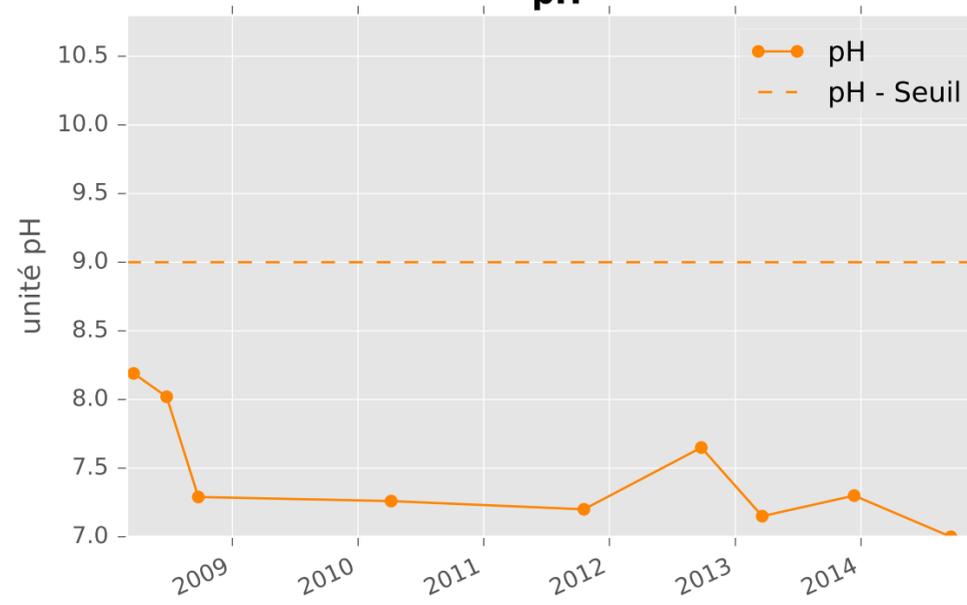


RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0175 - N5 - Puits Cheminée Sud Grise

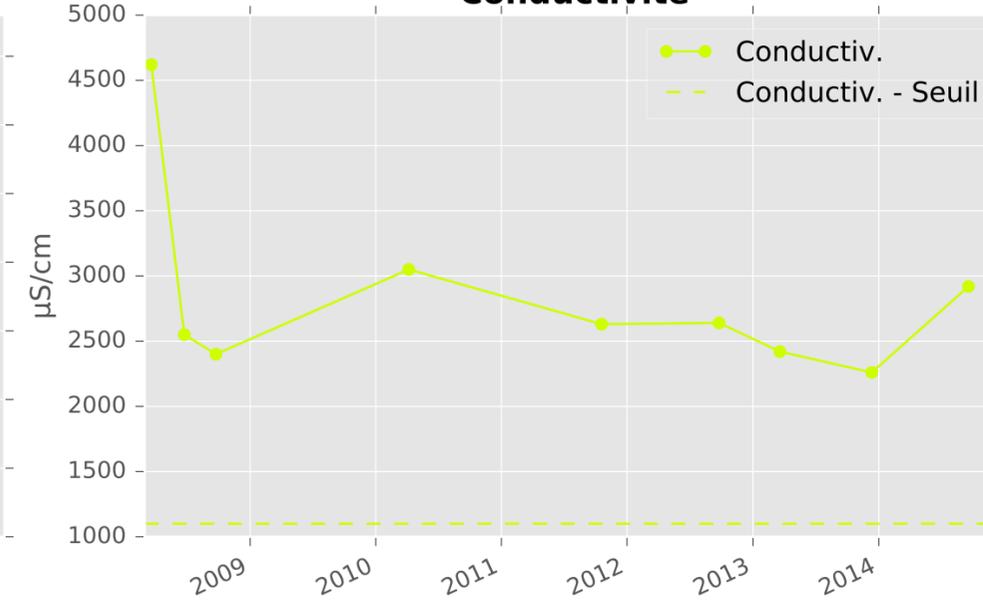
Température de l'Eau



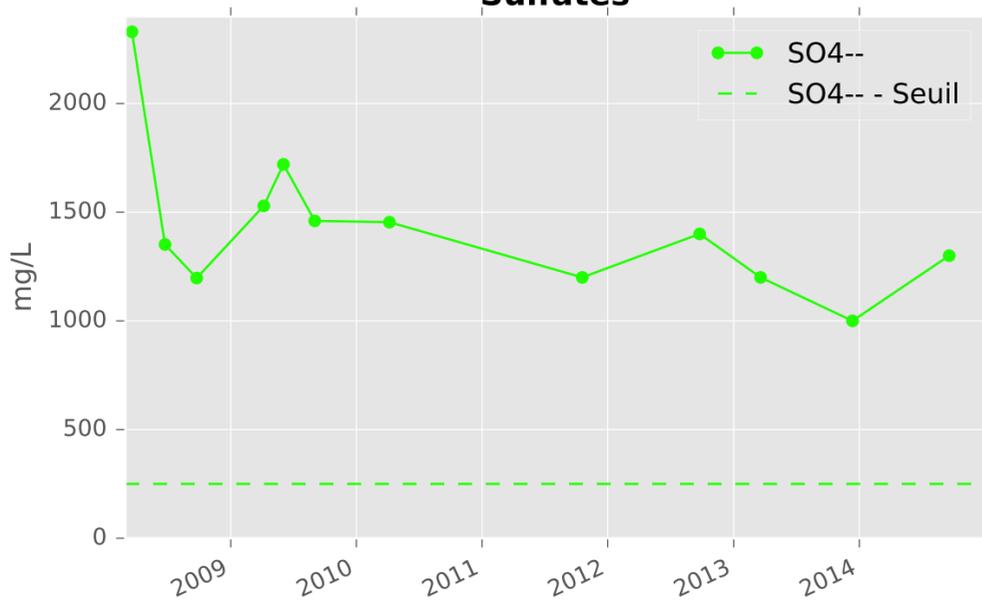
pH



Conductivité



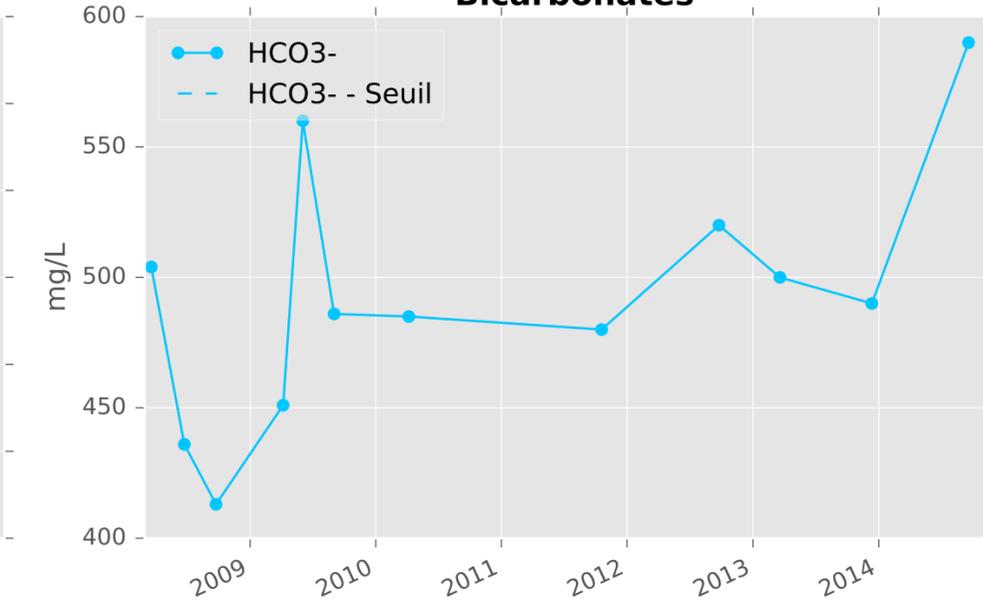
Sulfates



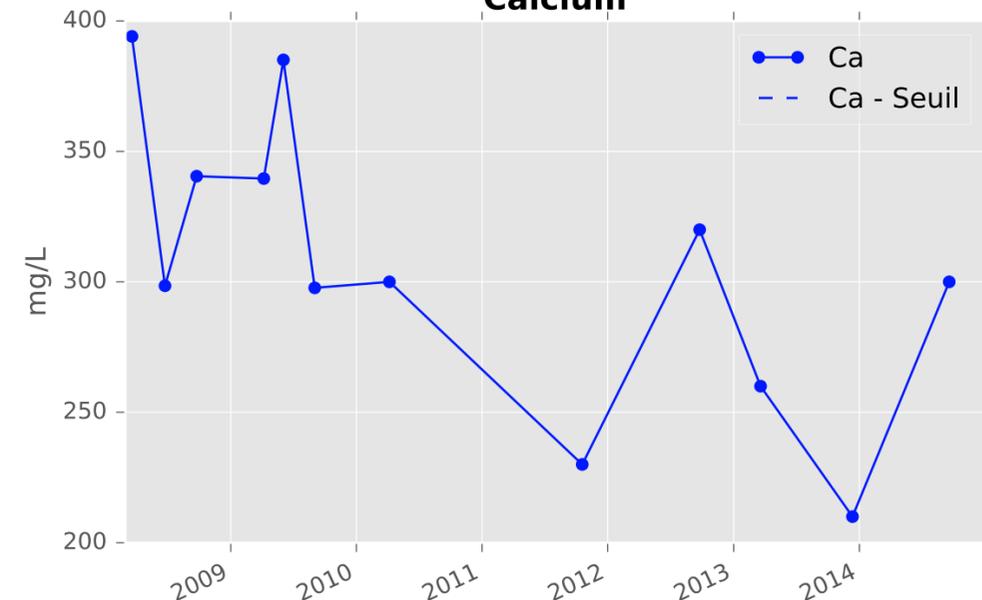
Chlorures



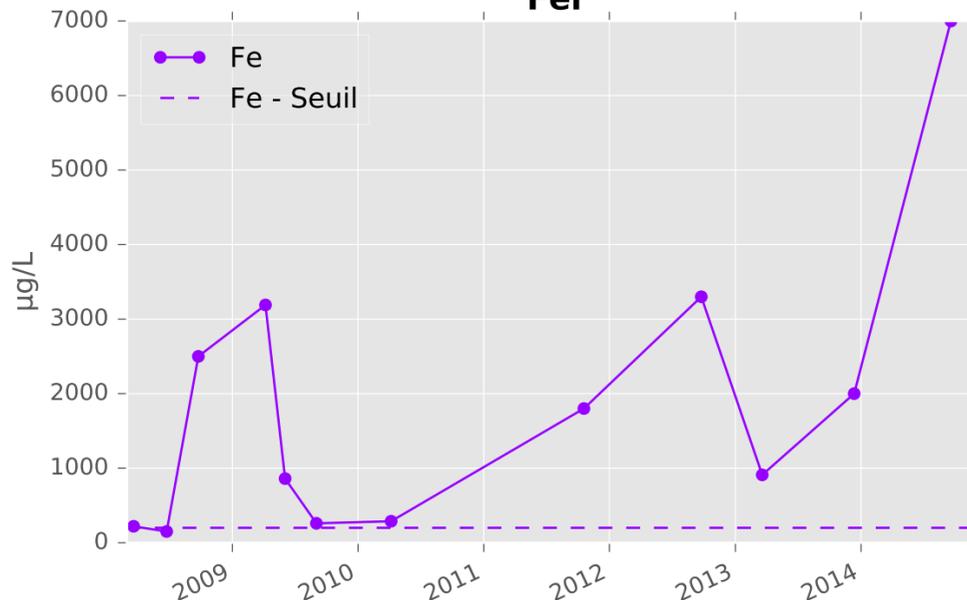
Bicarbonates



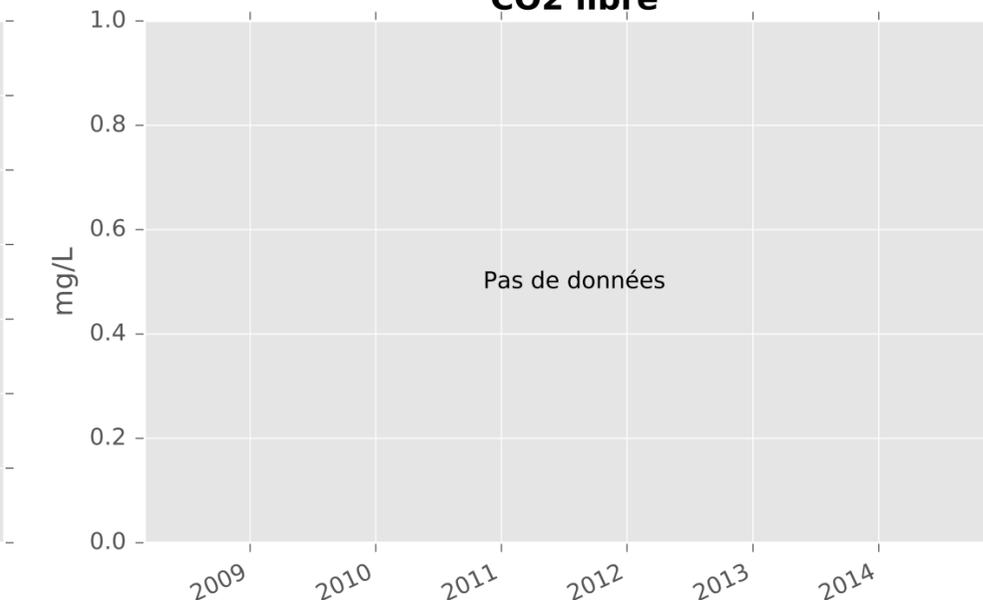
Calcium



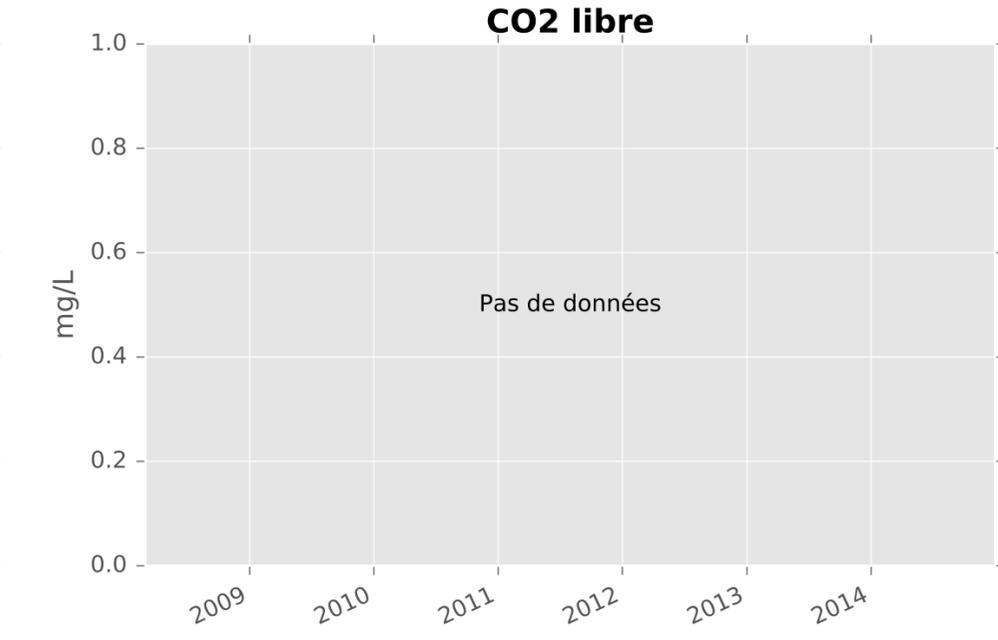
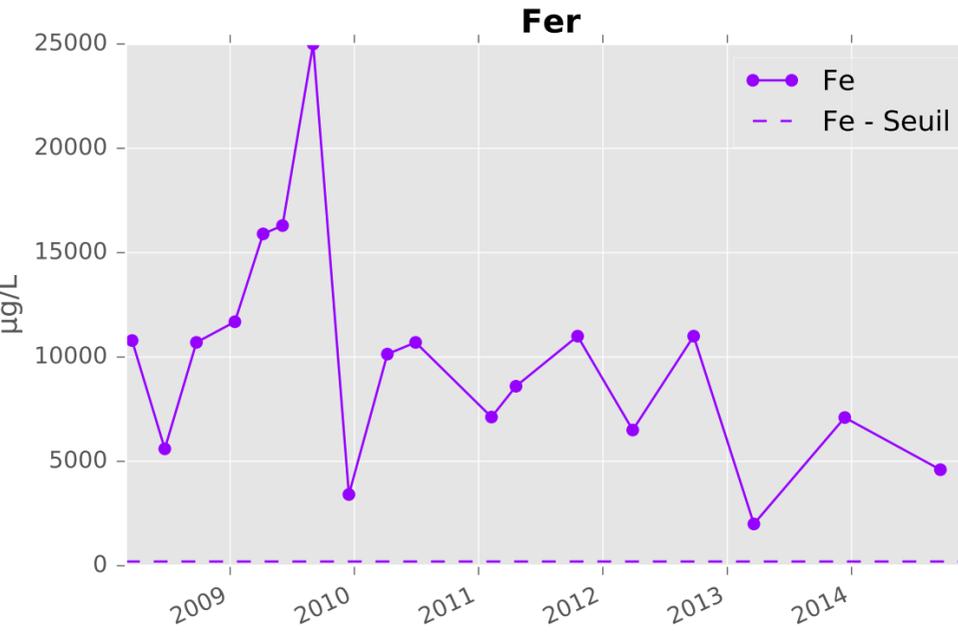
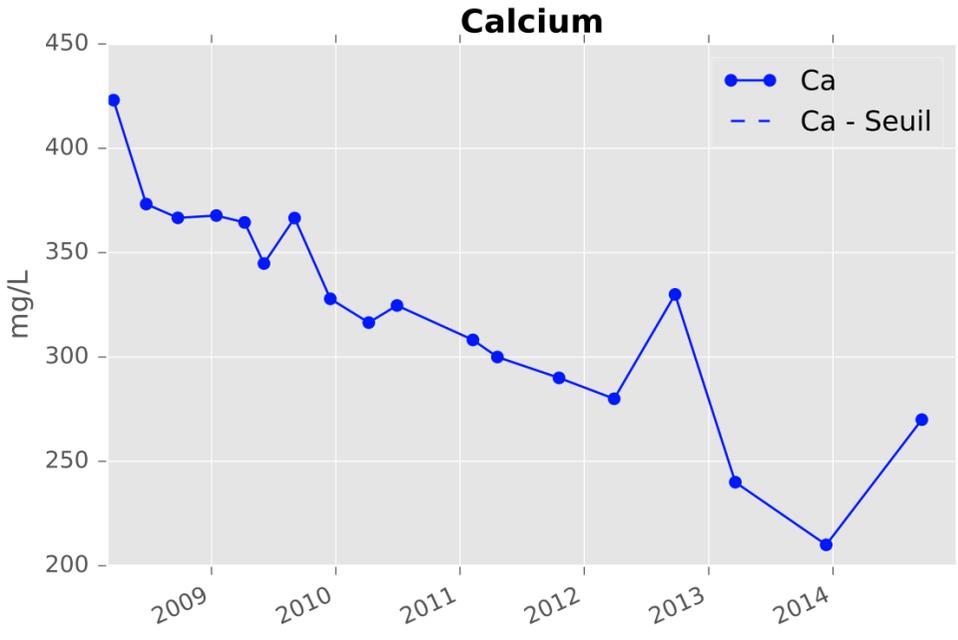
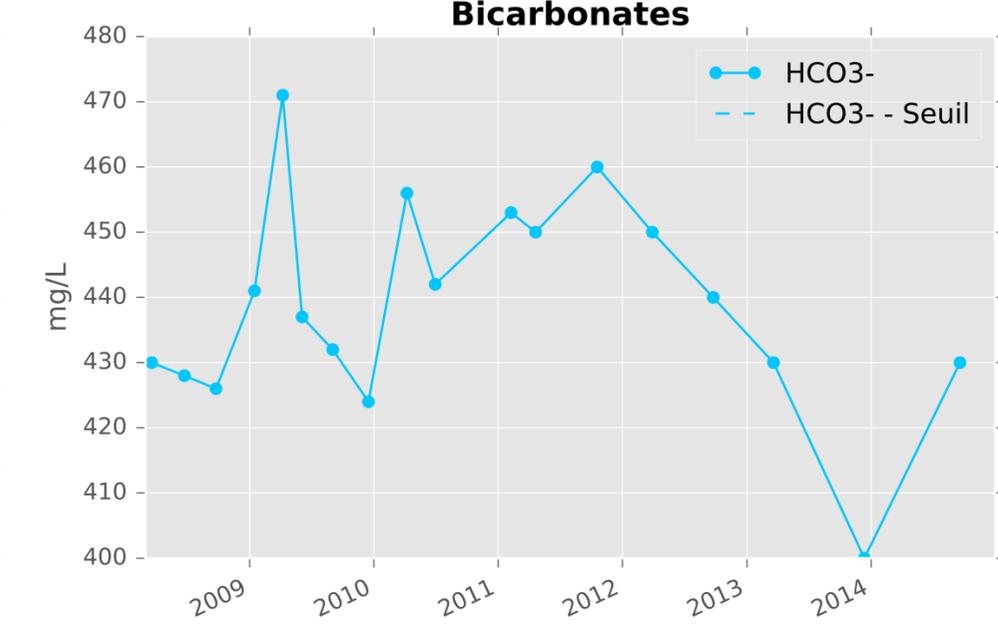
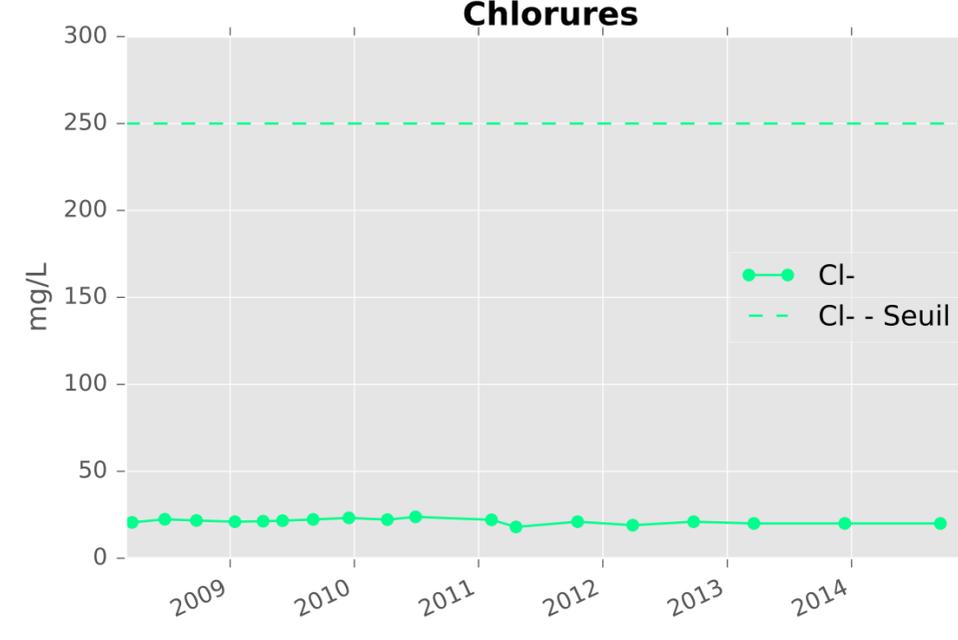
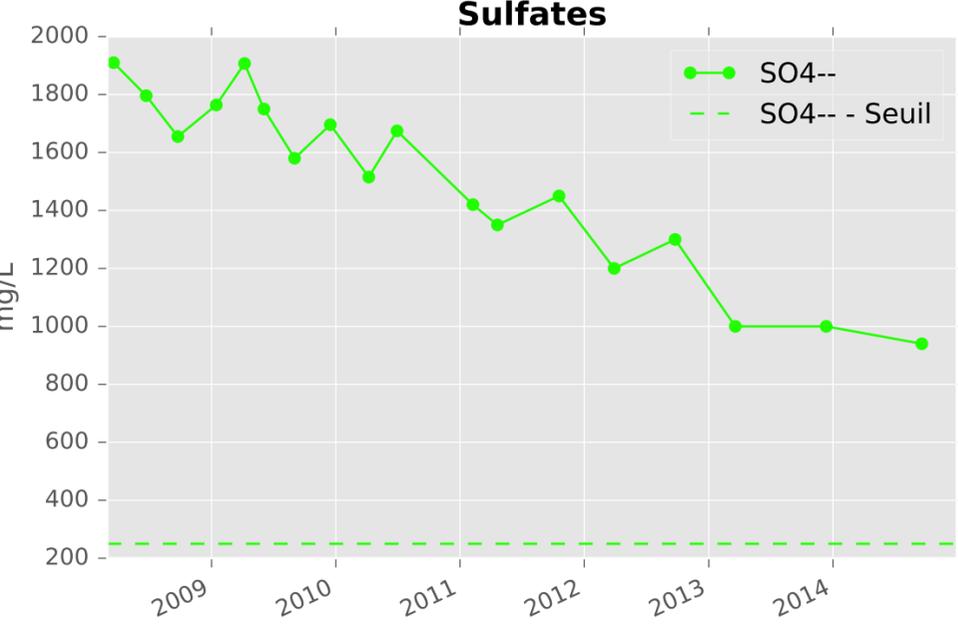
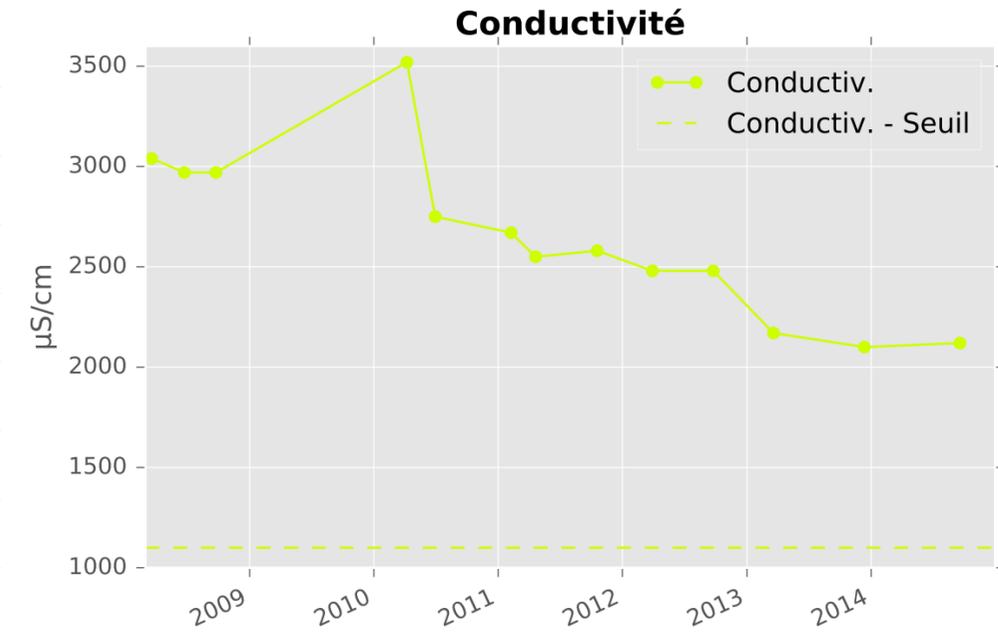
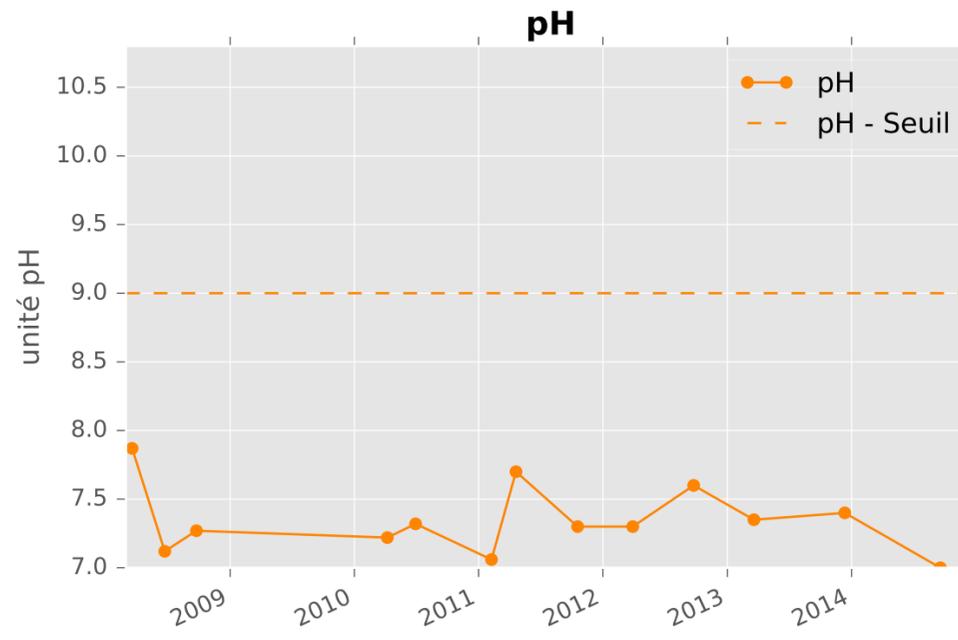
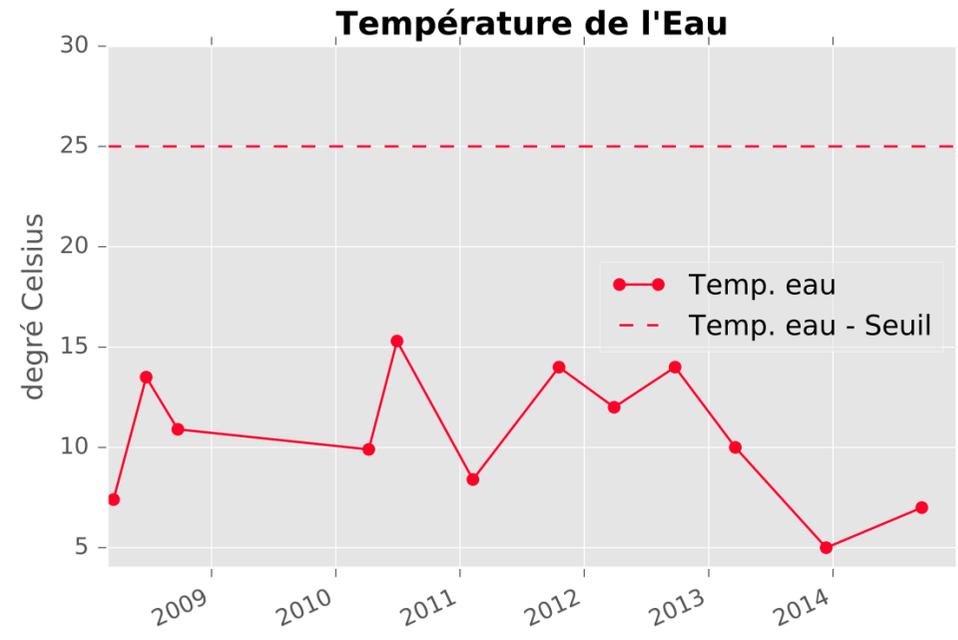
Fer



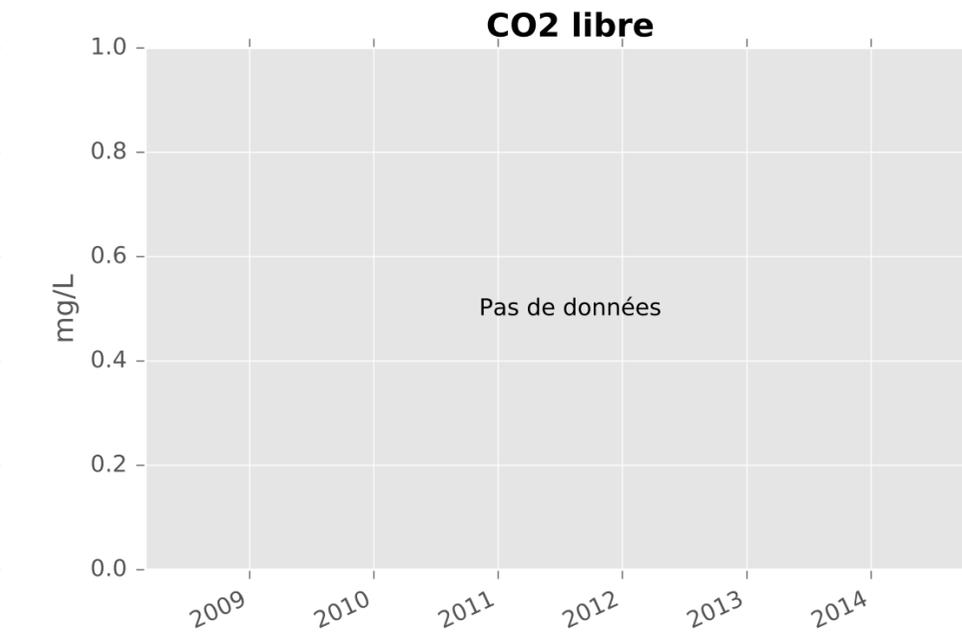
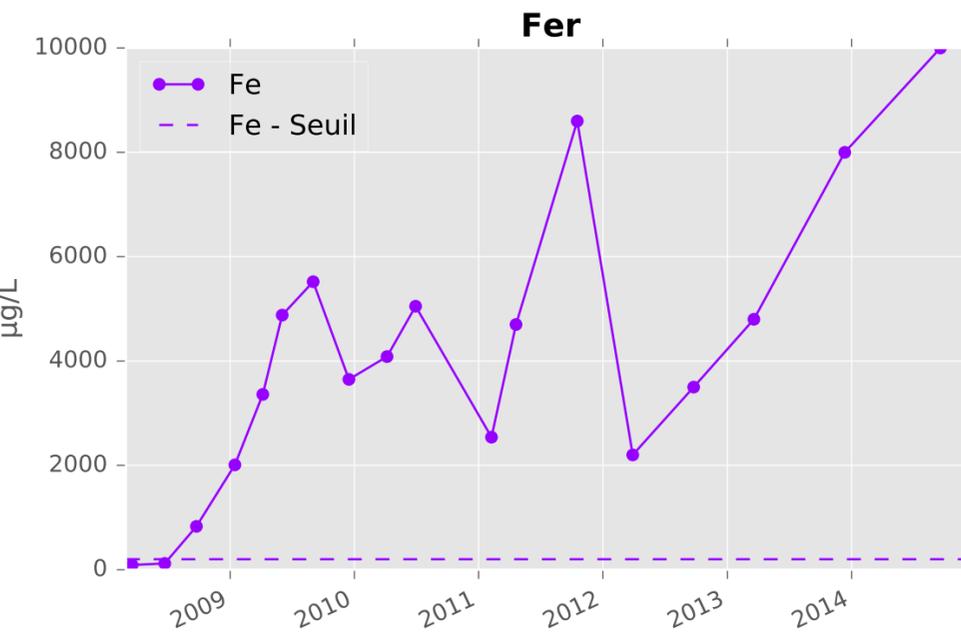
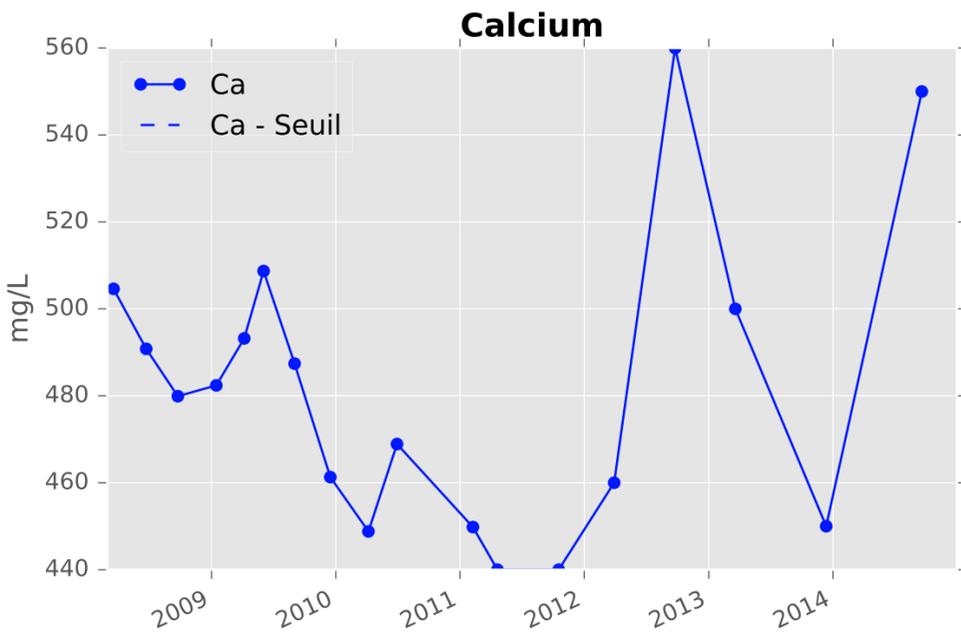
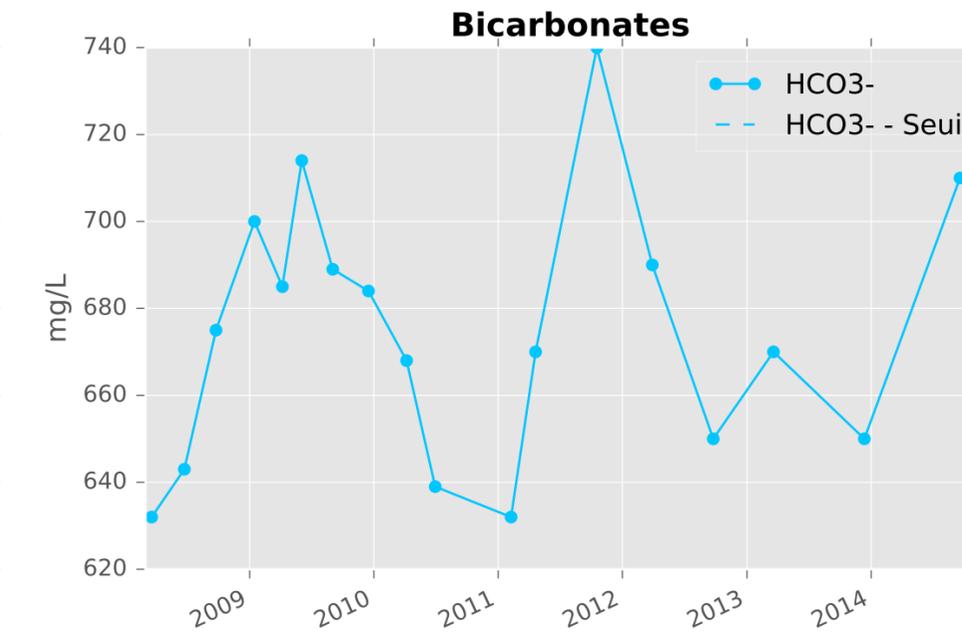
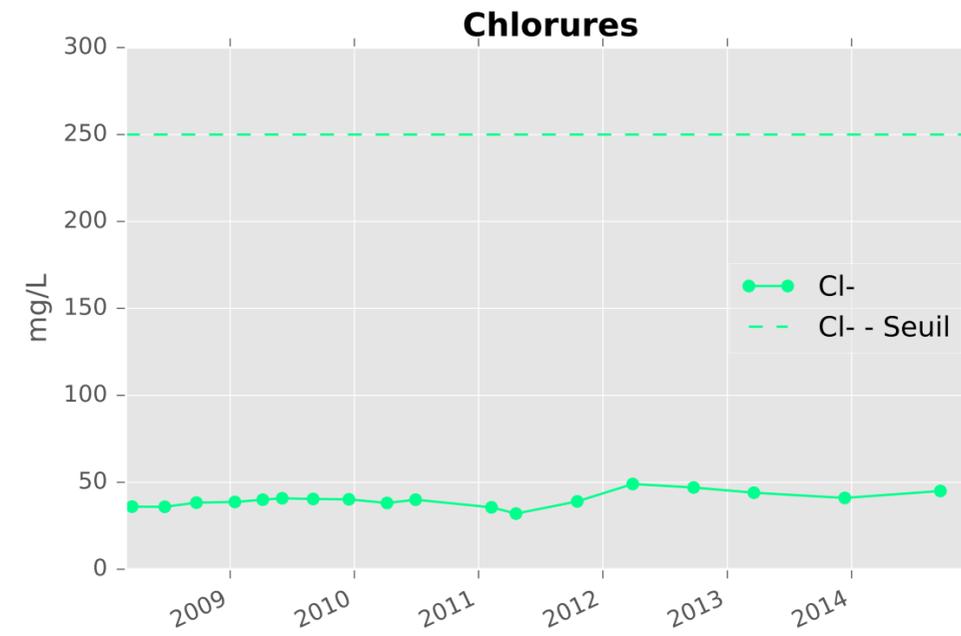
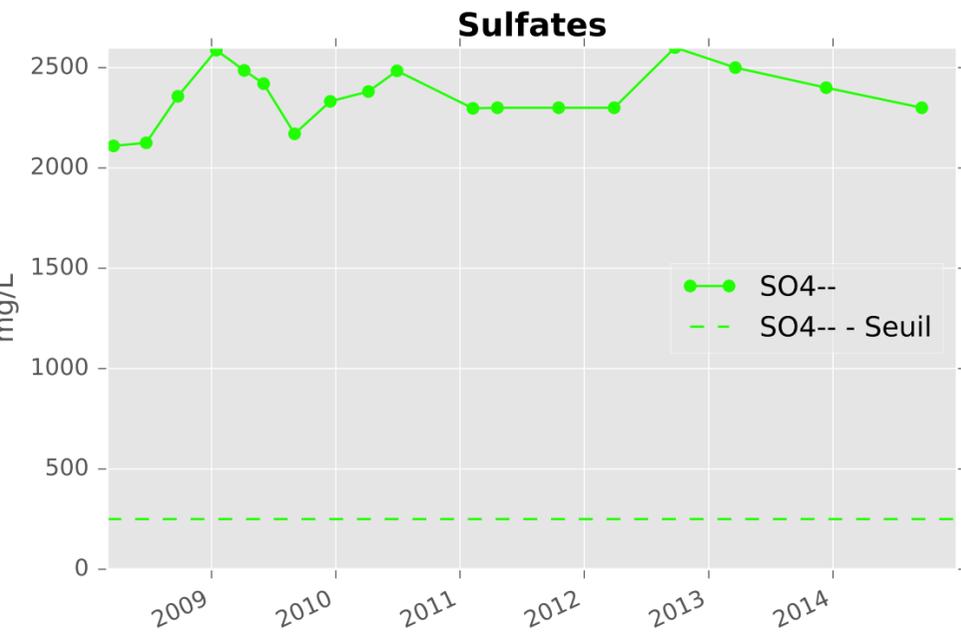
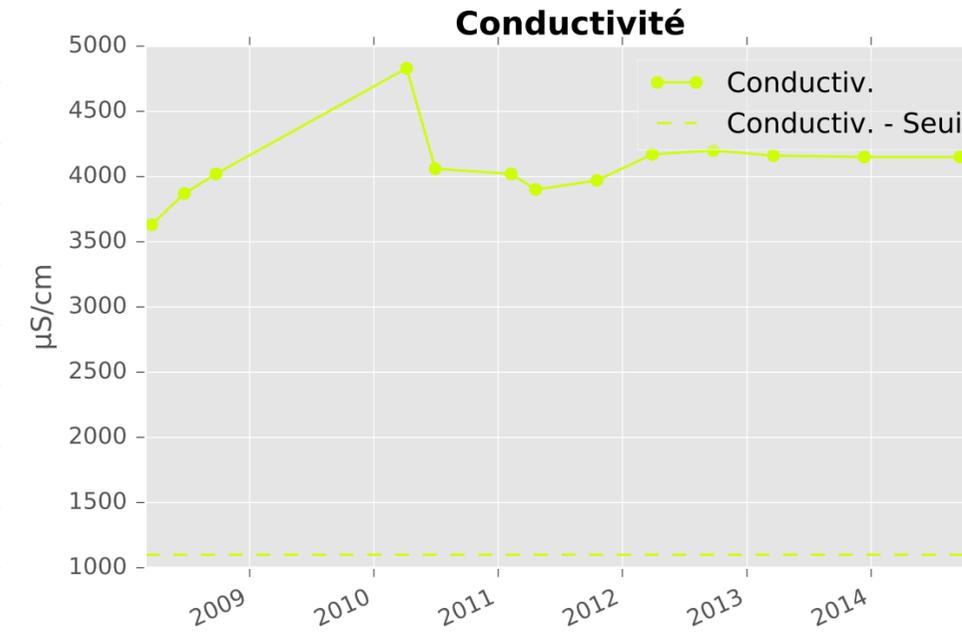
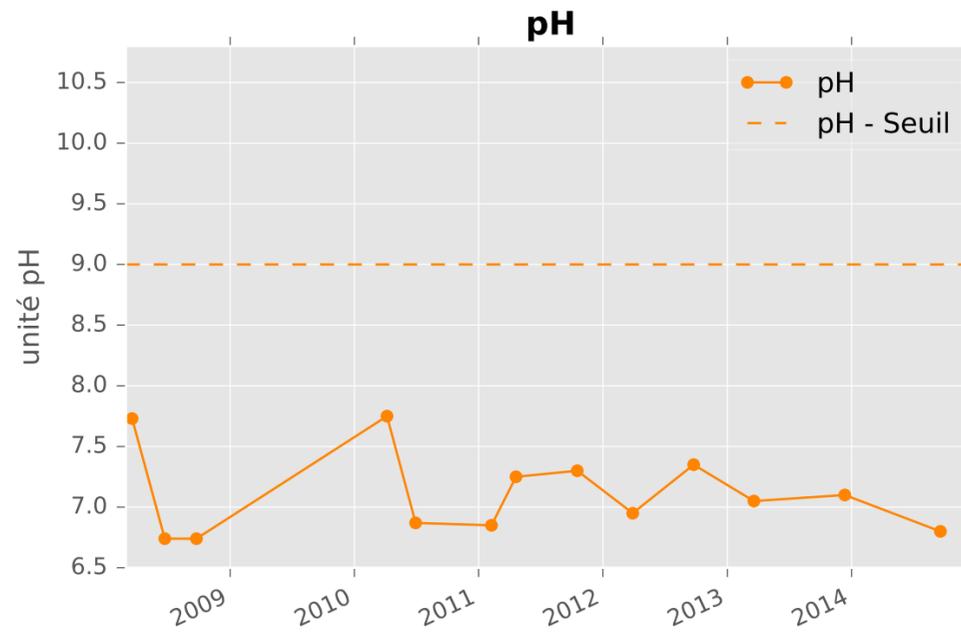
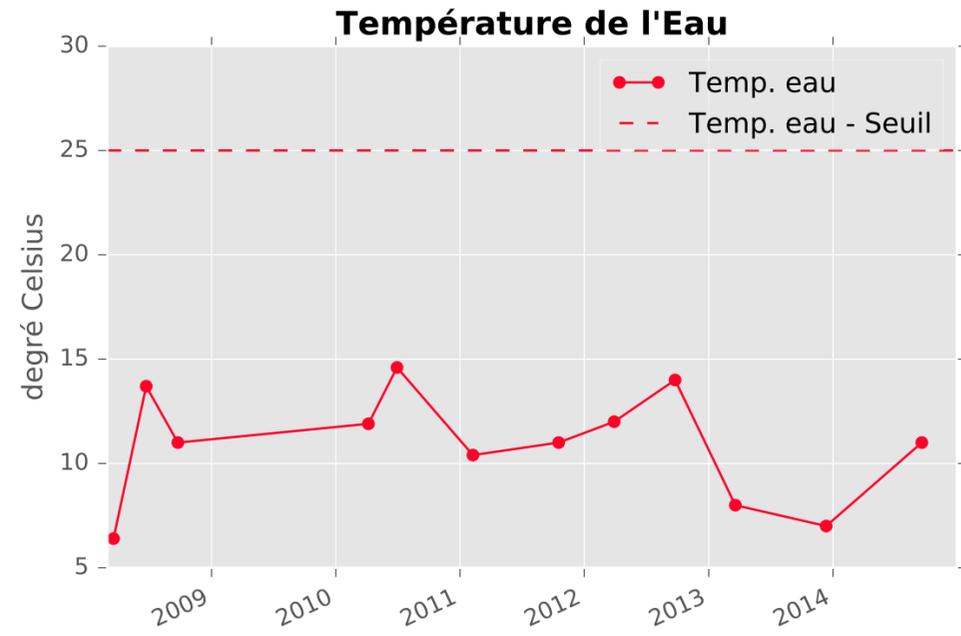
CO2 libre



RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0099 - N6 - Puits Boulange Grise

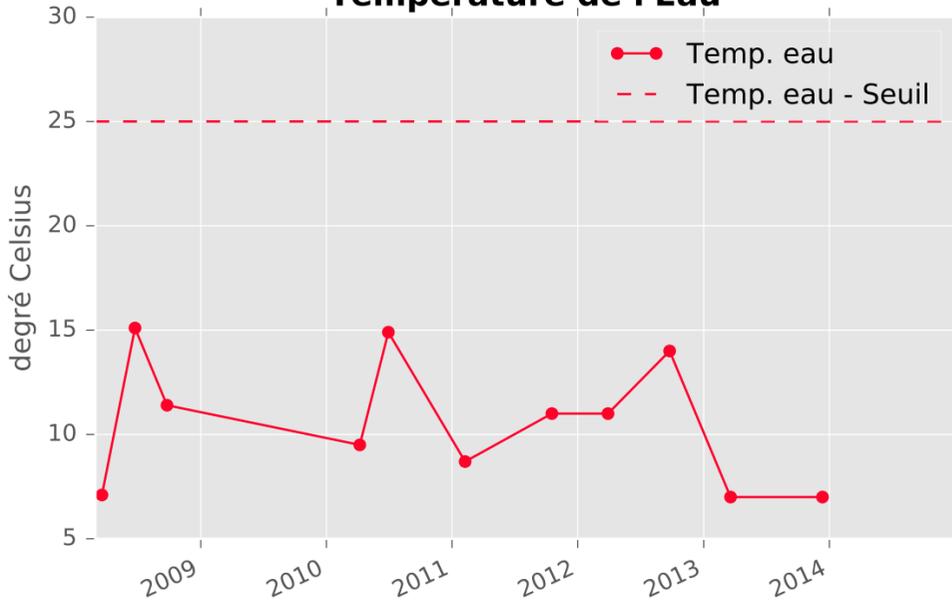


RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0169 - N7 - Piézomètre Angevillers Grise

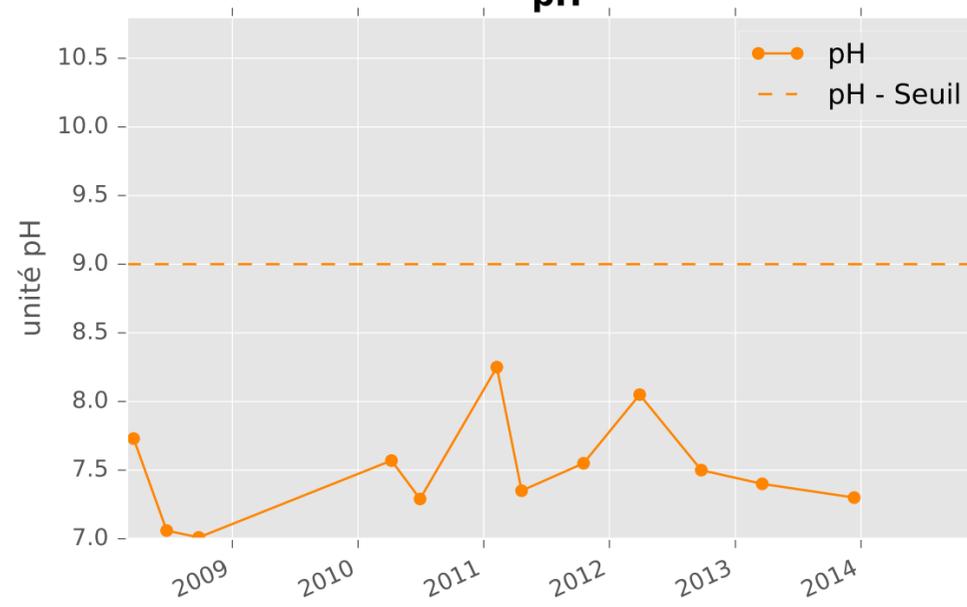


RESERVOIR MINIER NORD - 01133X0052 - N9 - Puits Bure Jaune Sauvage

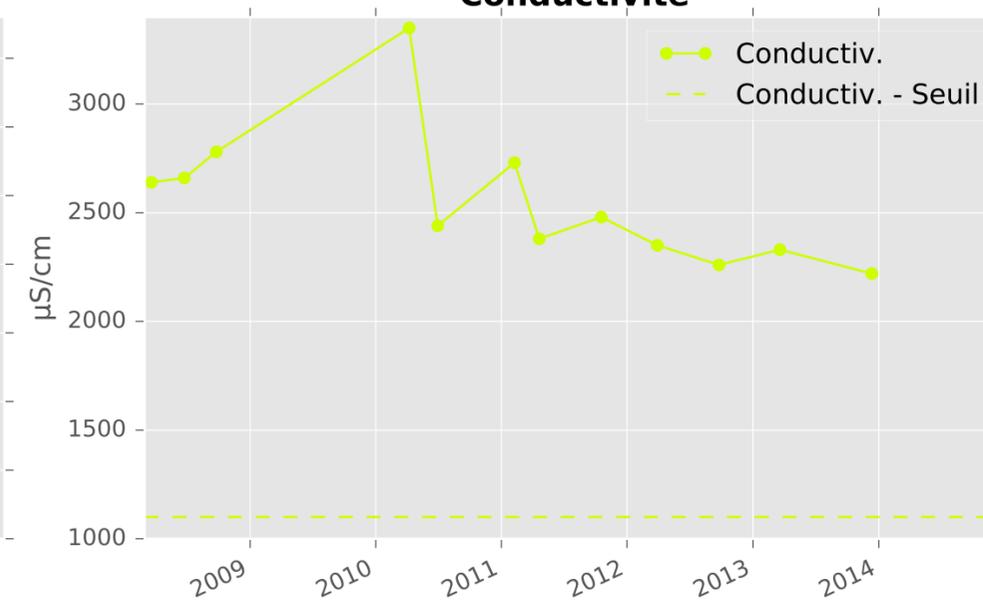
Température de l'Eau



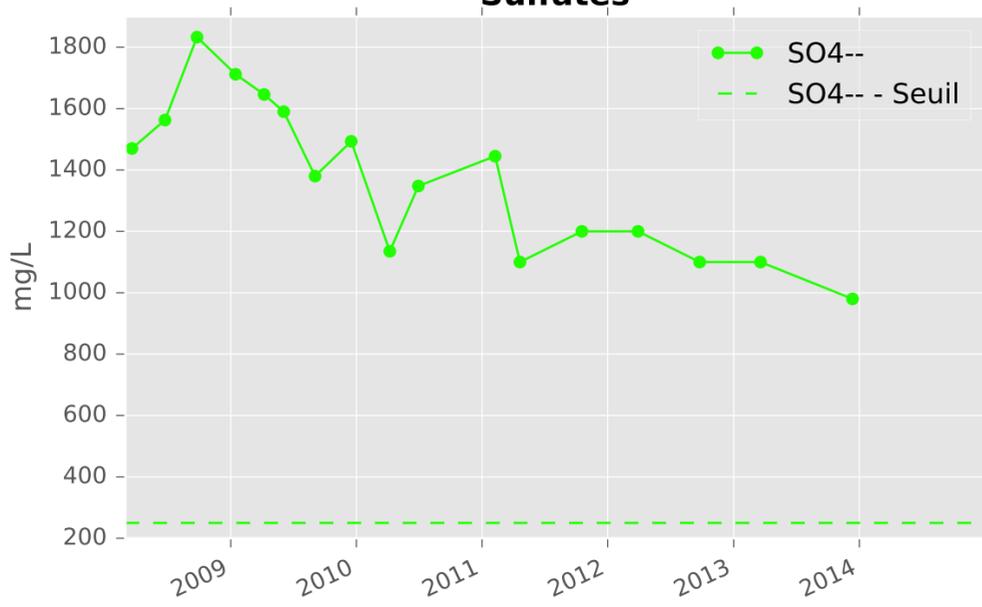
pH



Conductivité



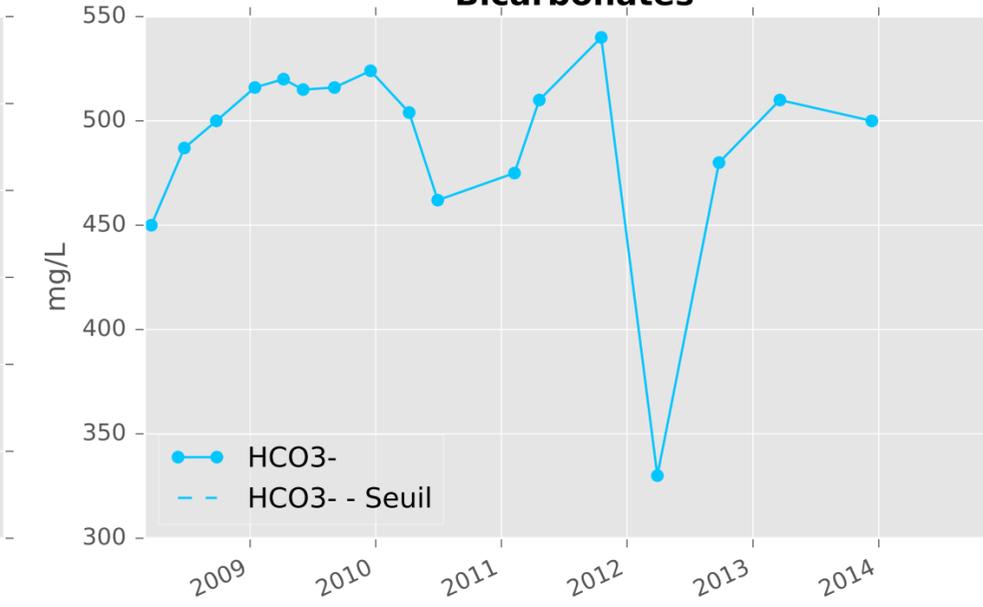
Sulfates



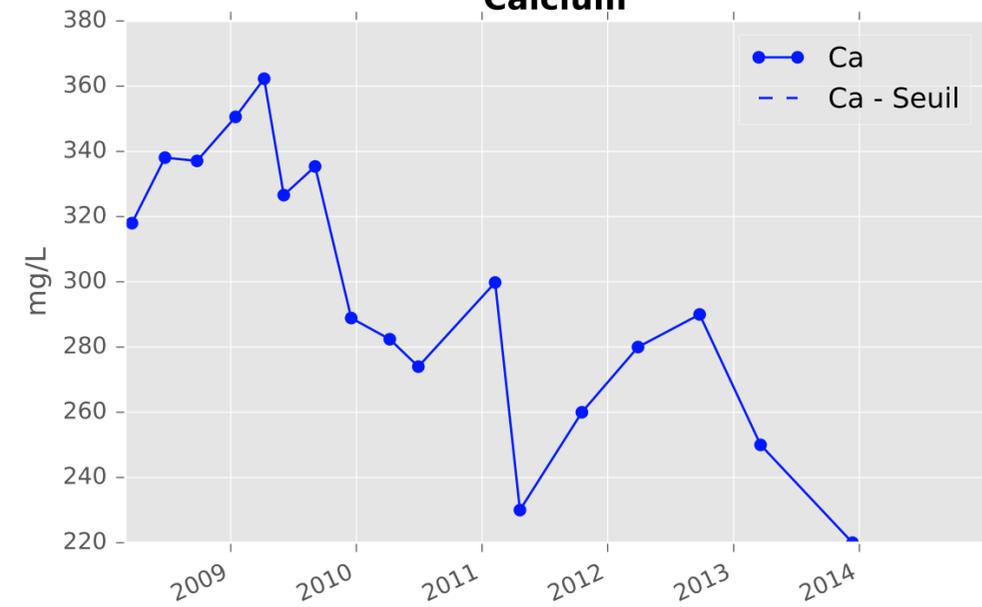
Chlorures



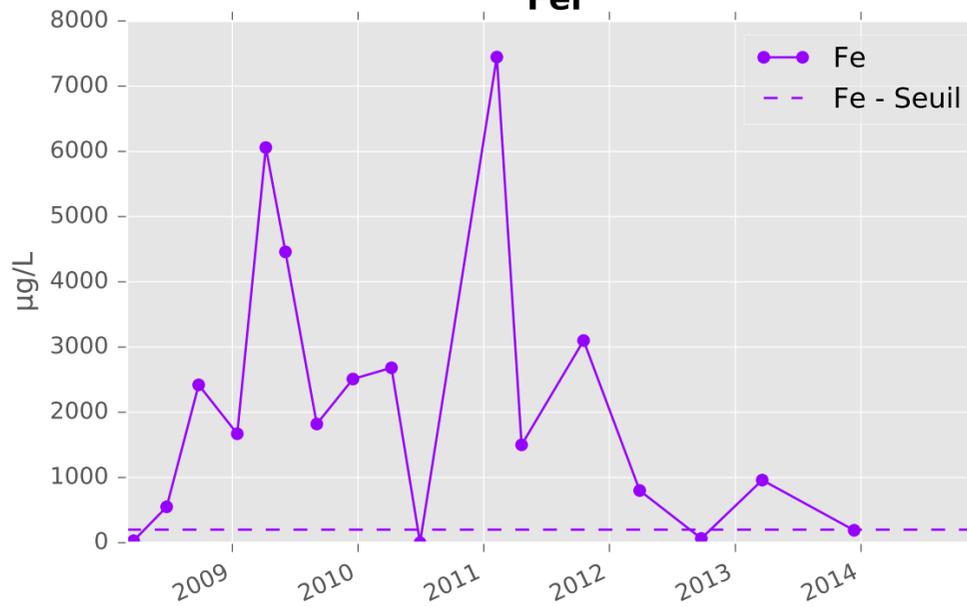
Bicarbonates



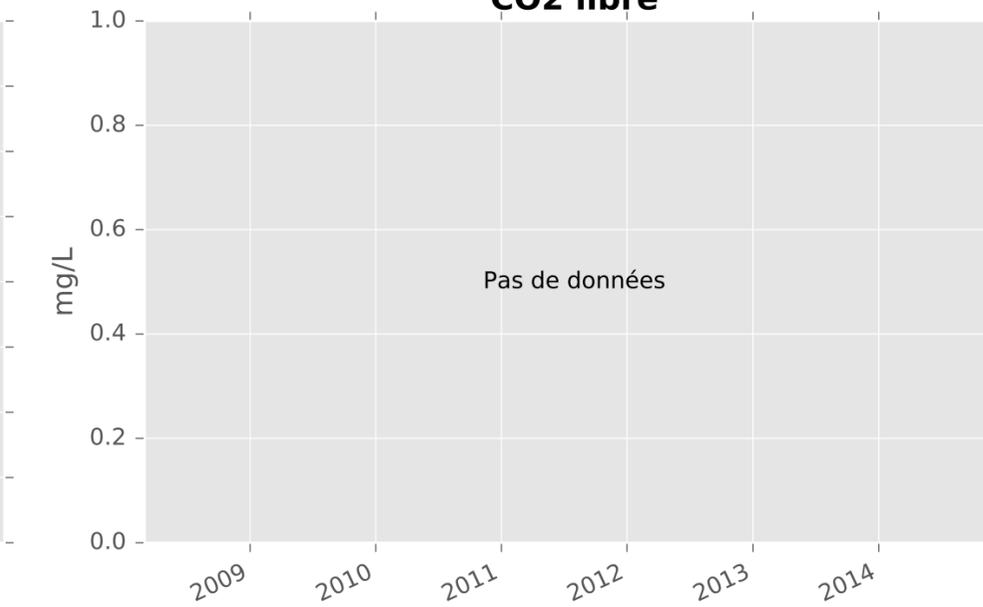
Calcium



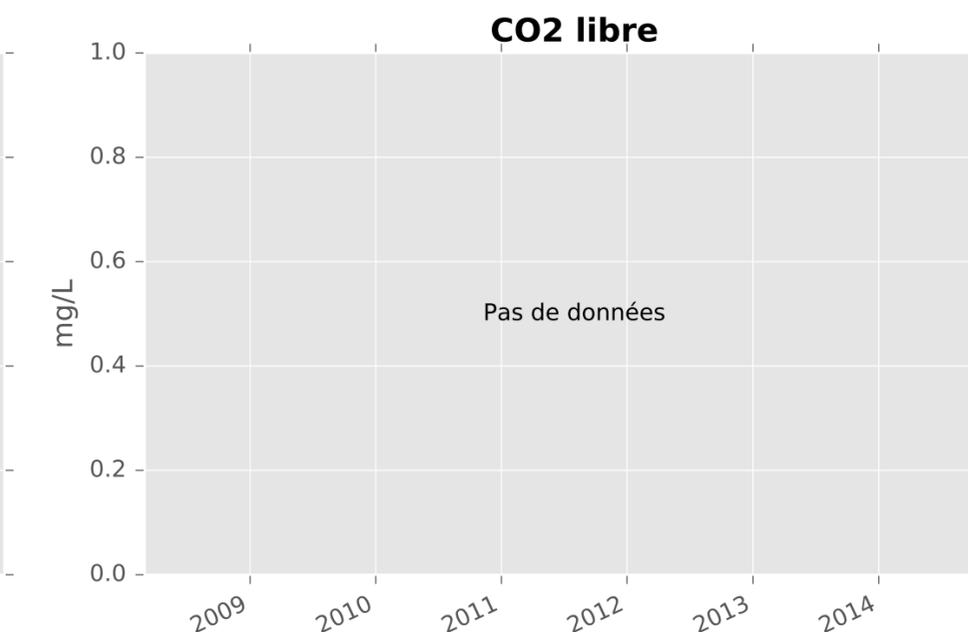
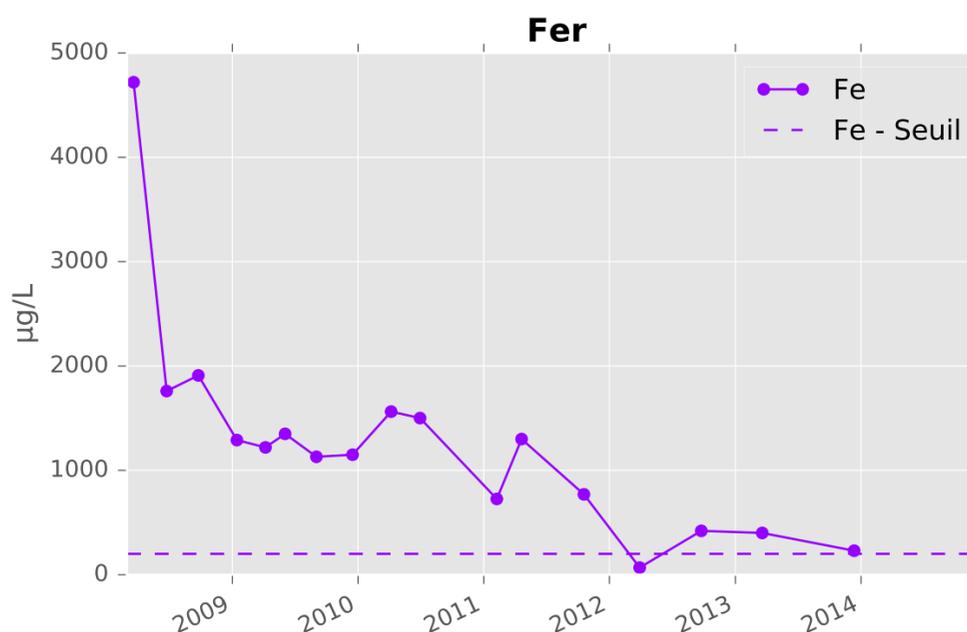
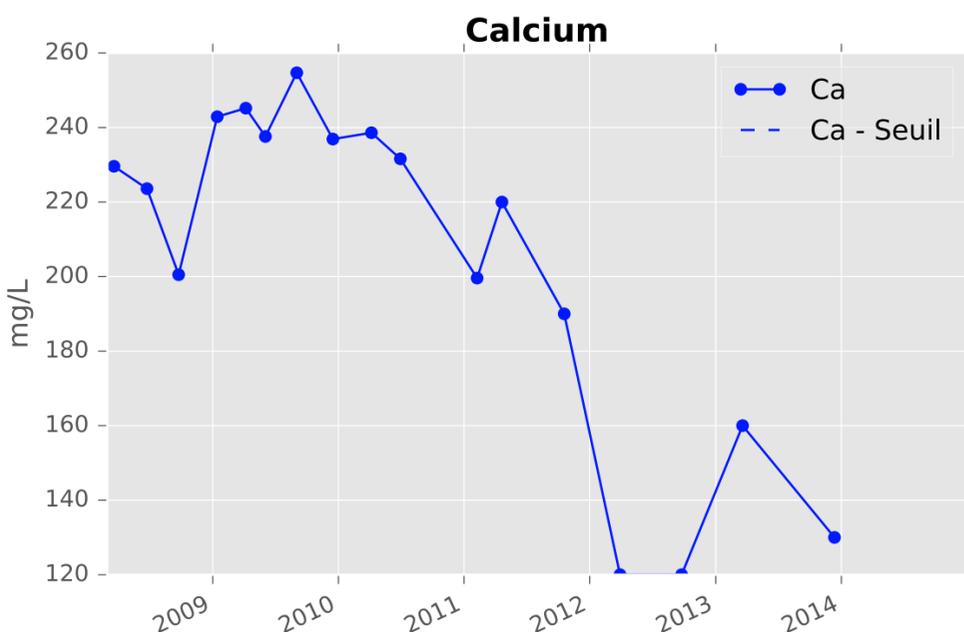
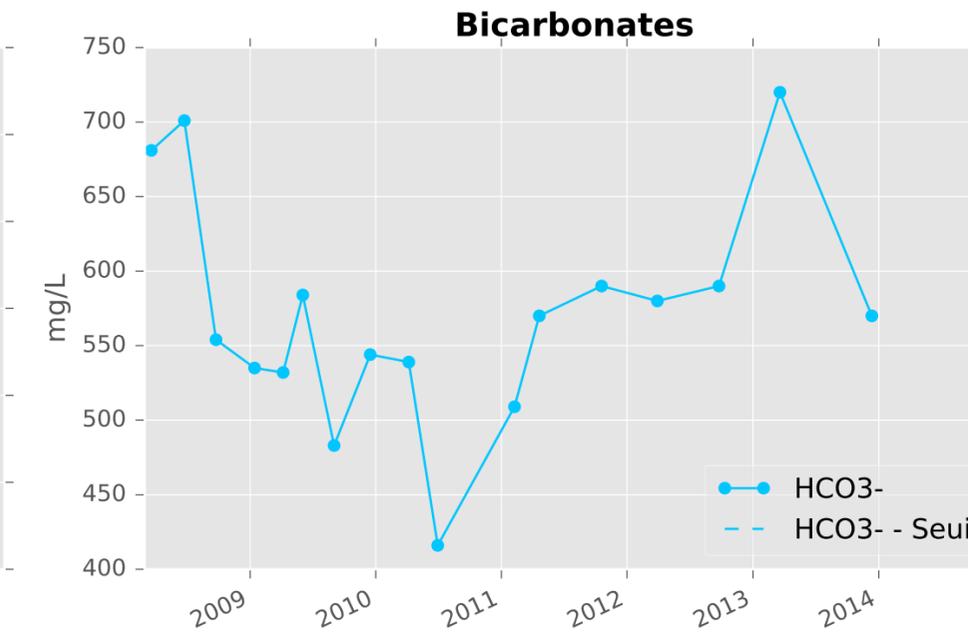
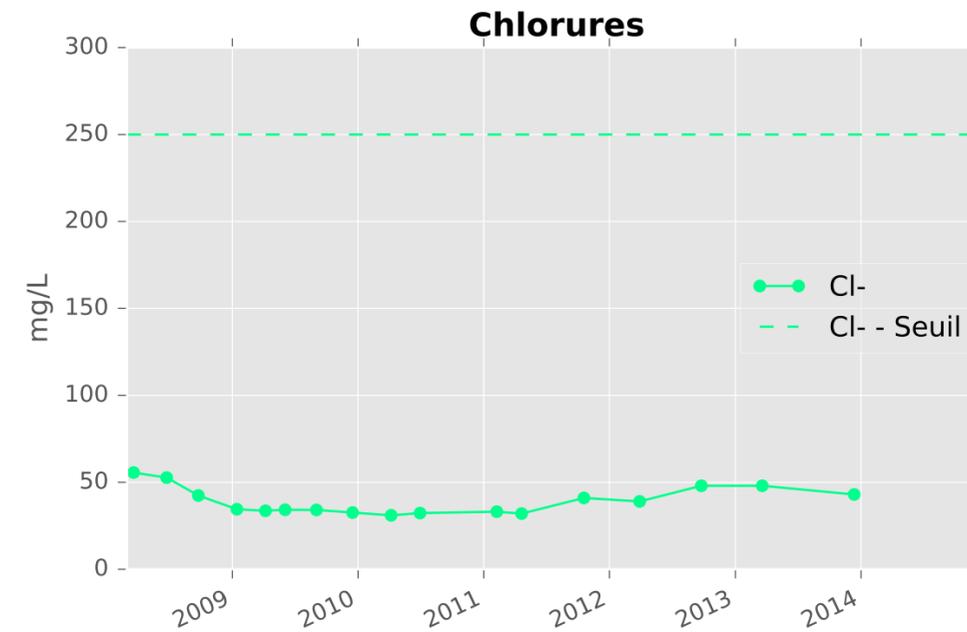
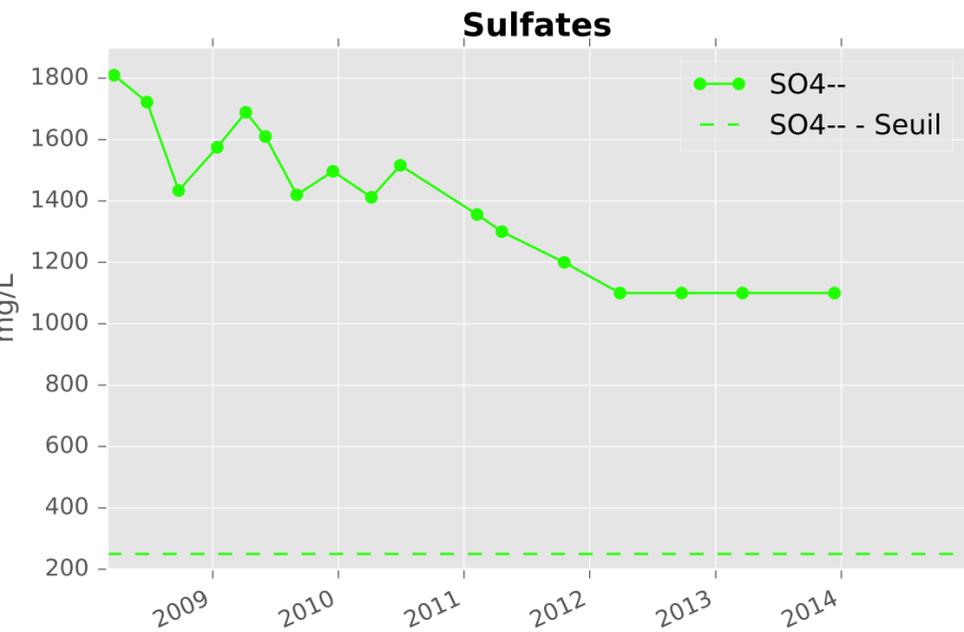
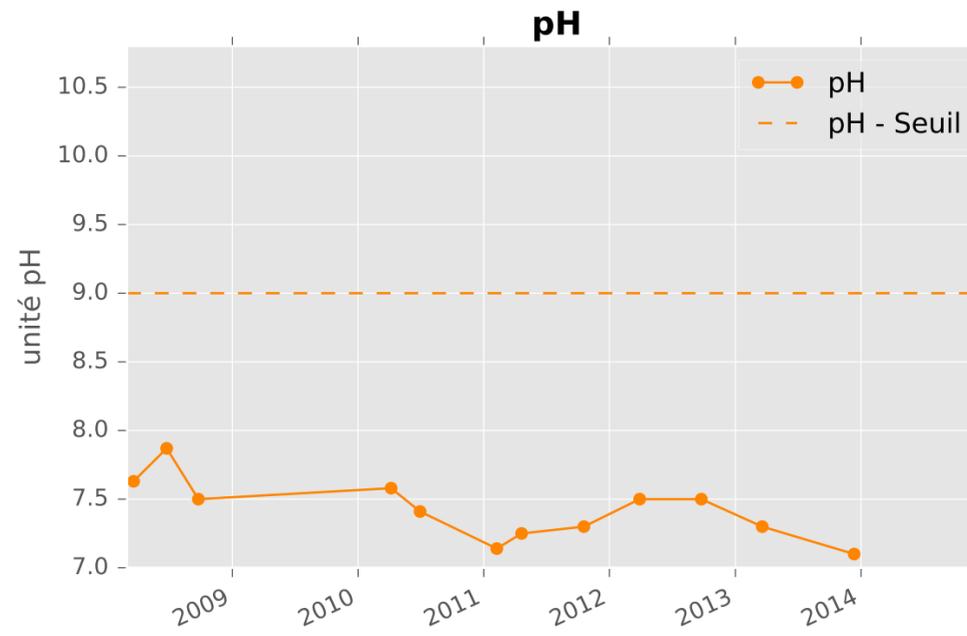
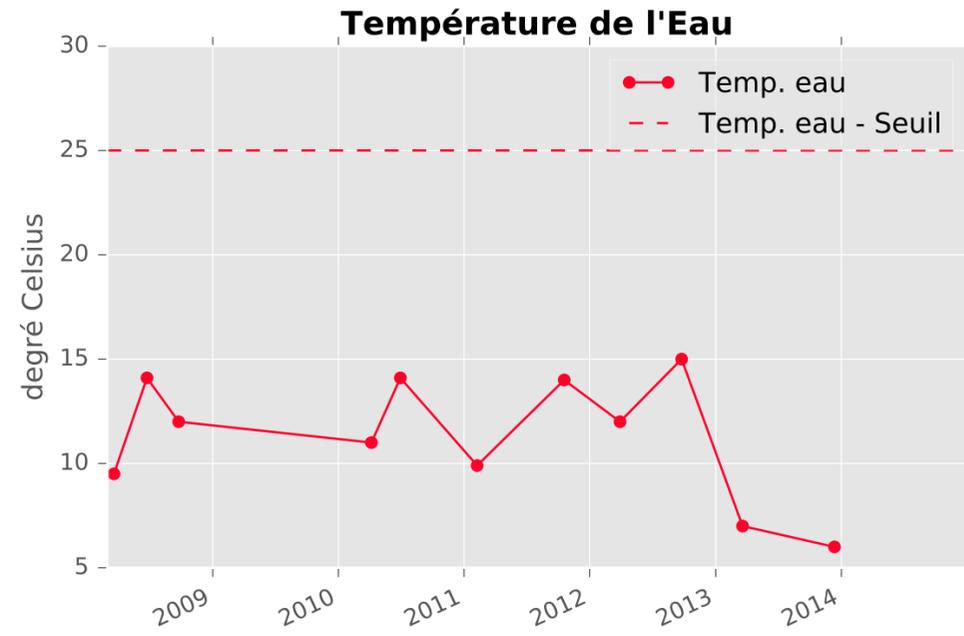
Fer



CO2 libre

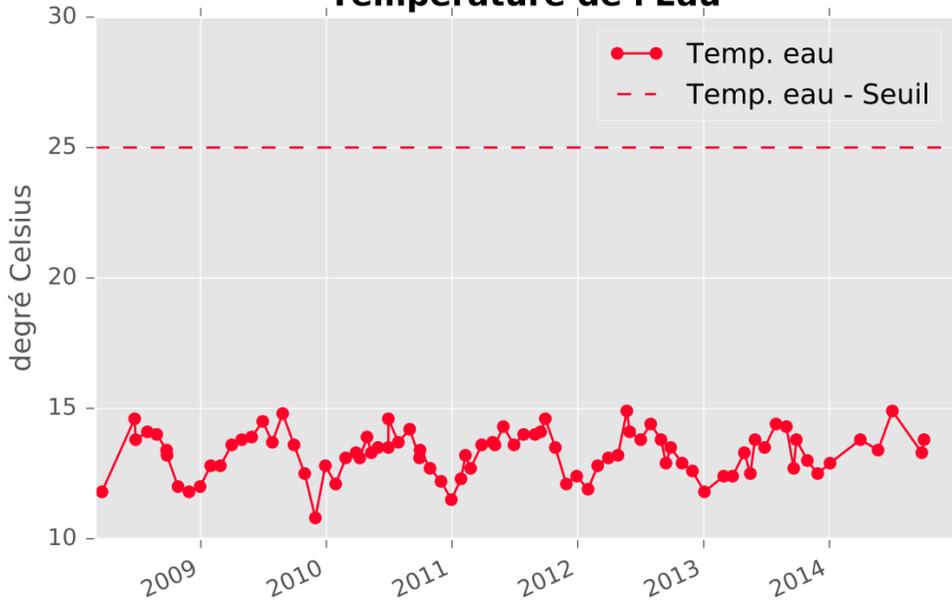


RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0171 - N11 - Piézomètre Cheminée Sud

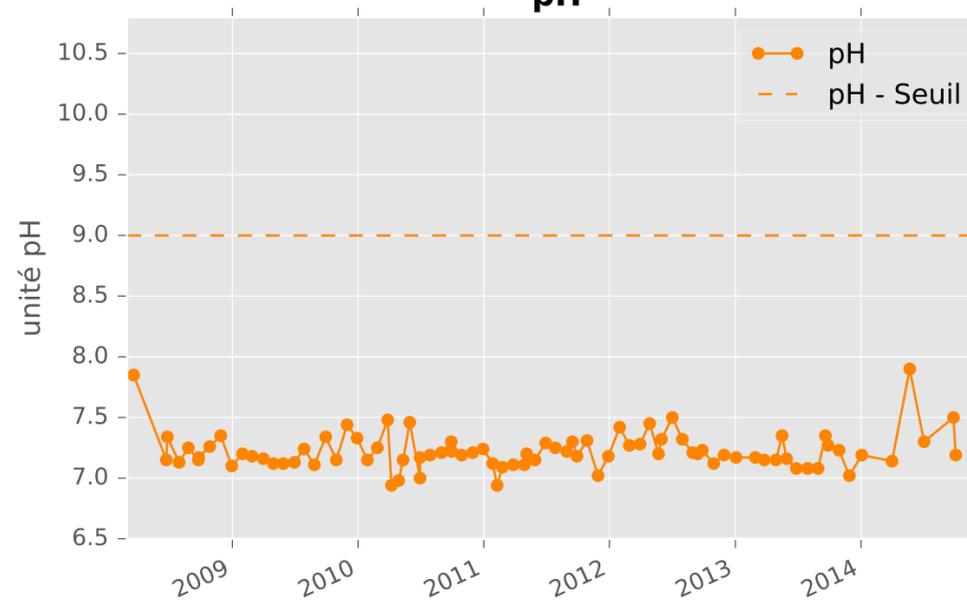


RESERVOIR MINIER NORD - 01138X0184 - N14b - Galerie des eaux de Knutange (La Paix)

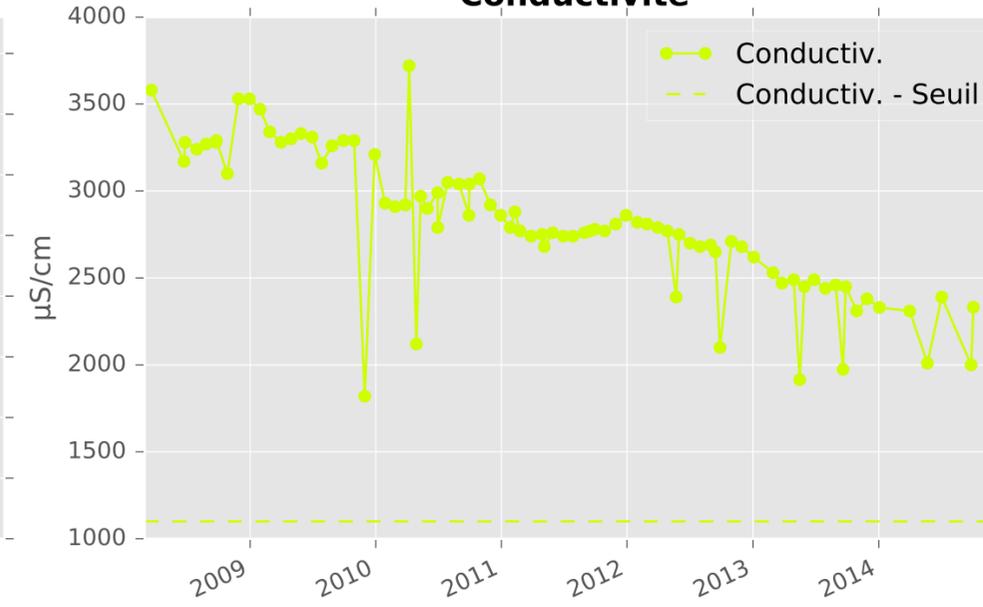
Température de l'Eau



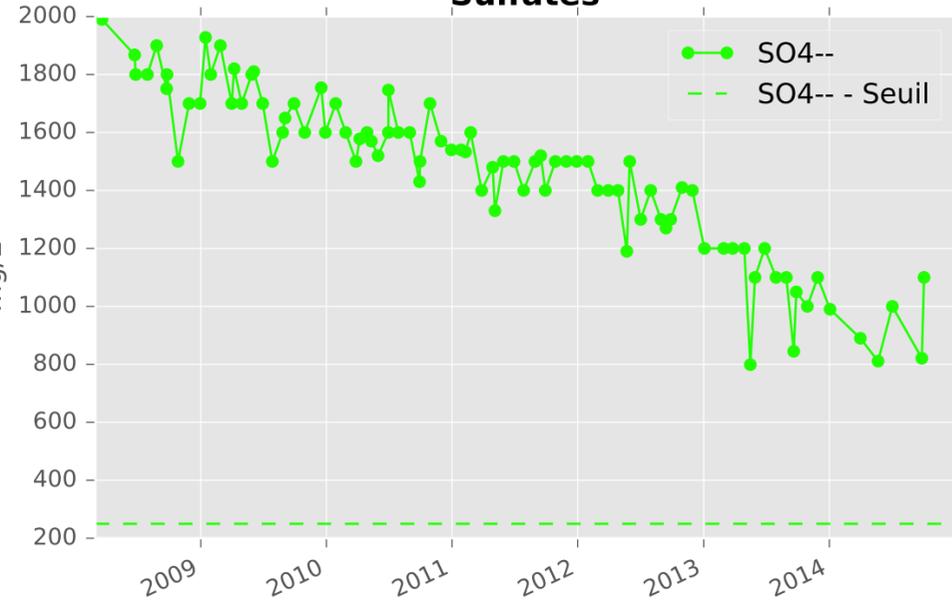
pH



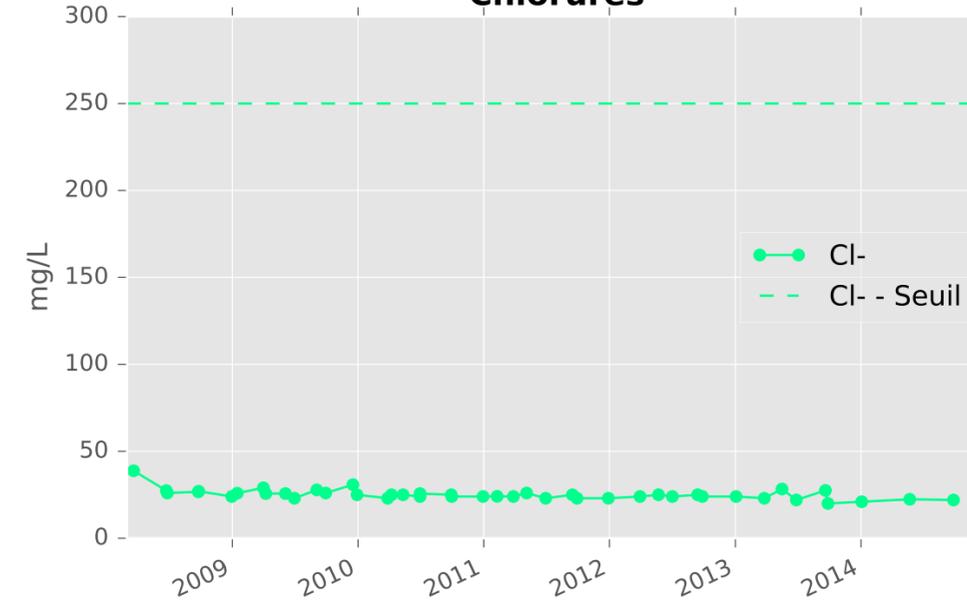
Conductivité



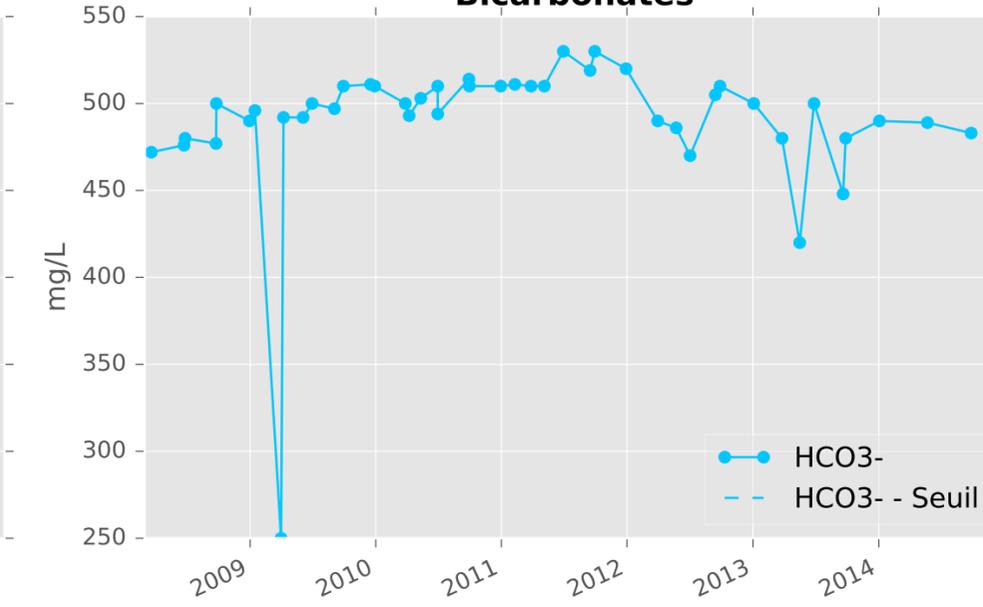
Sulfates



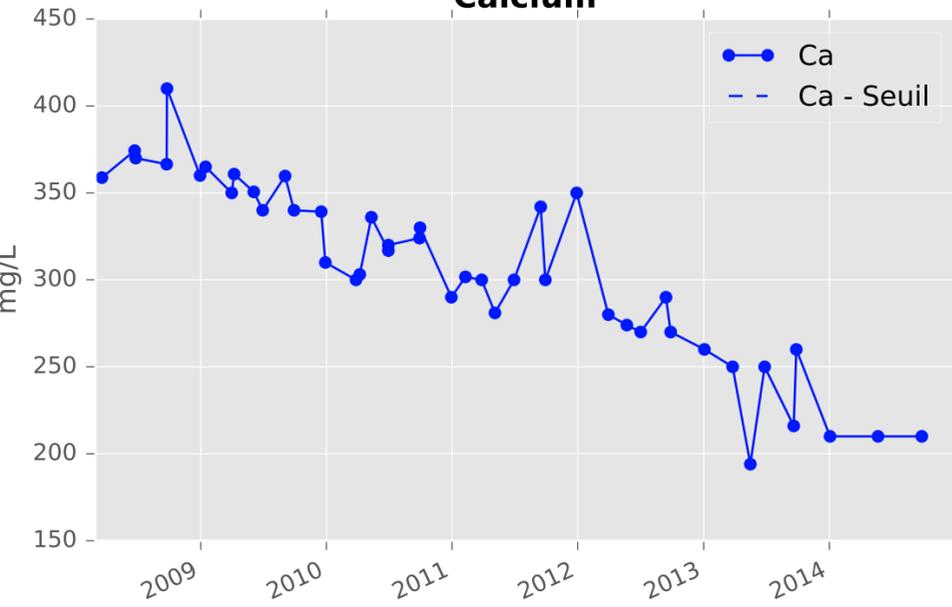
Chlorures



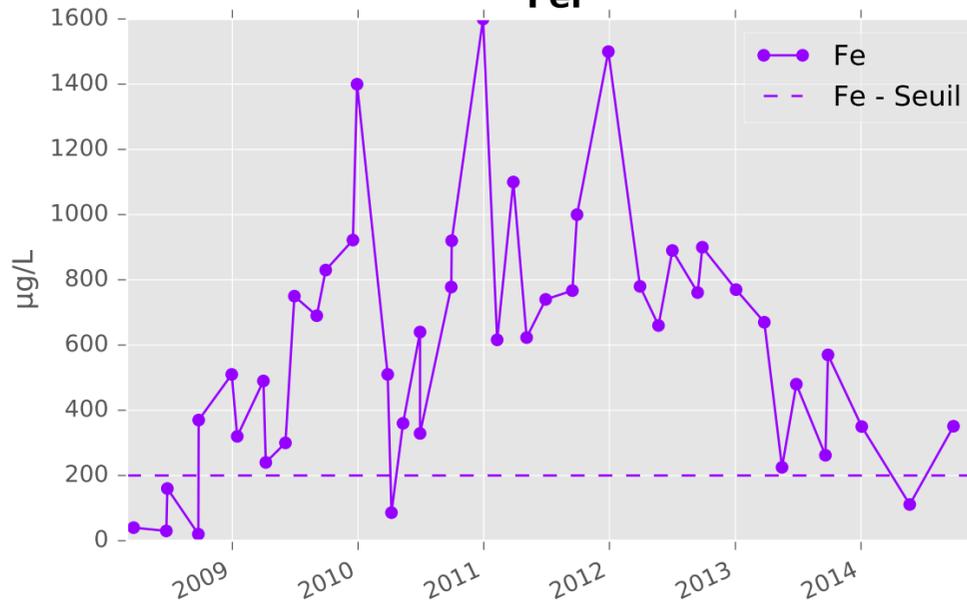
Bicarbonates



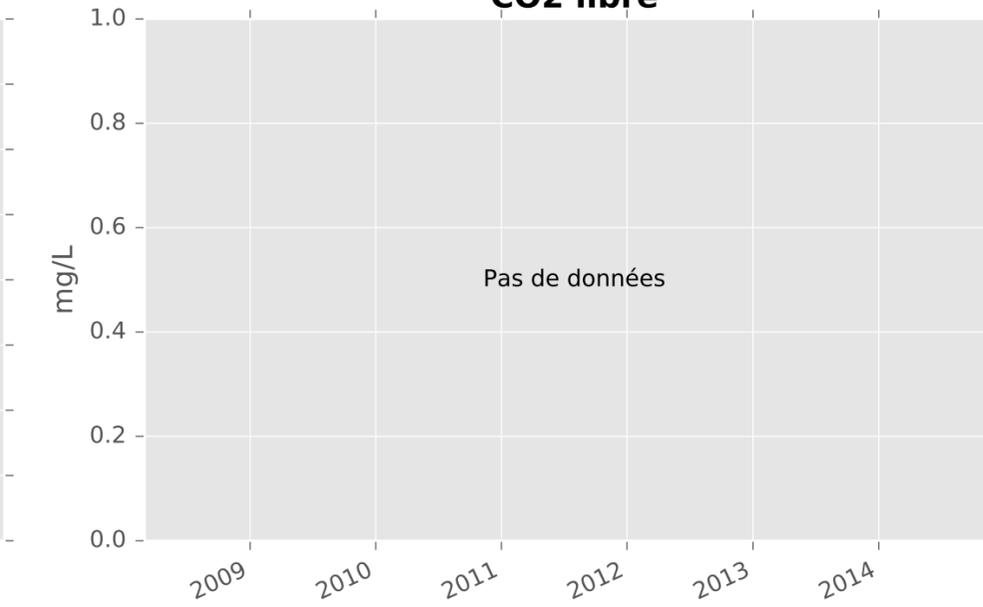
Calcium



Fer

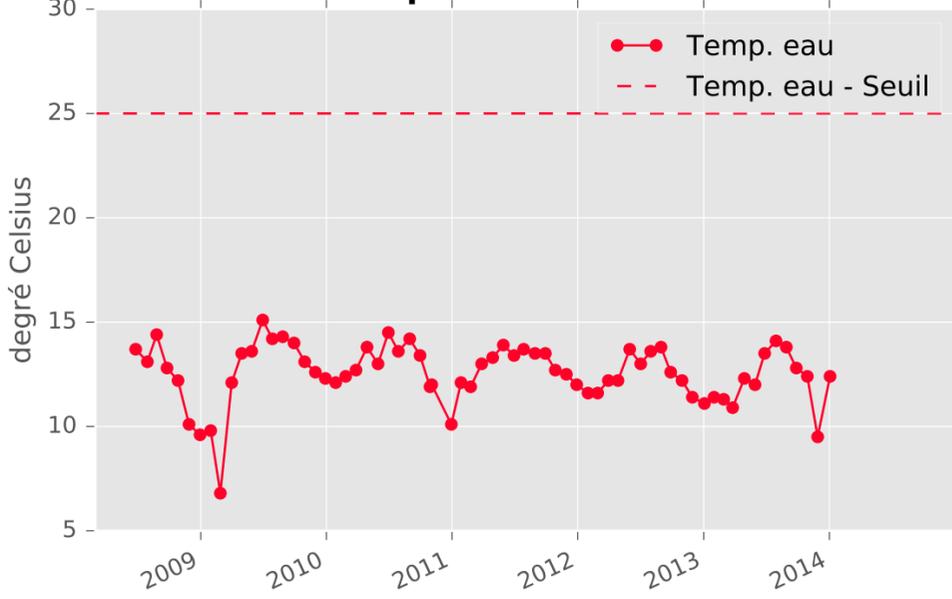


CO2 libre

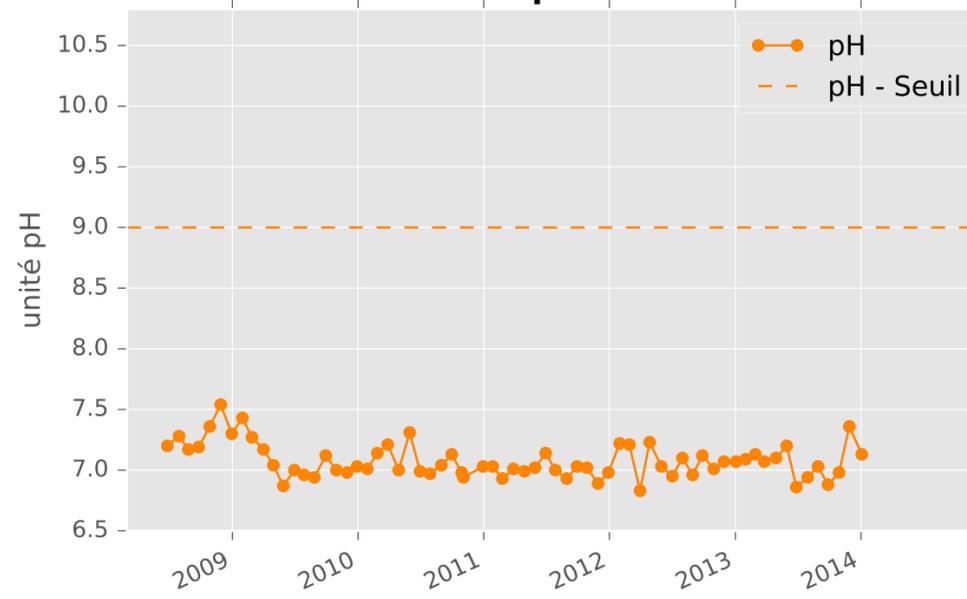


RESERVOIR MINIER NORD - 01138X0147- N18 - Galerie de Metzange (Charles)

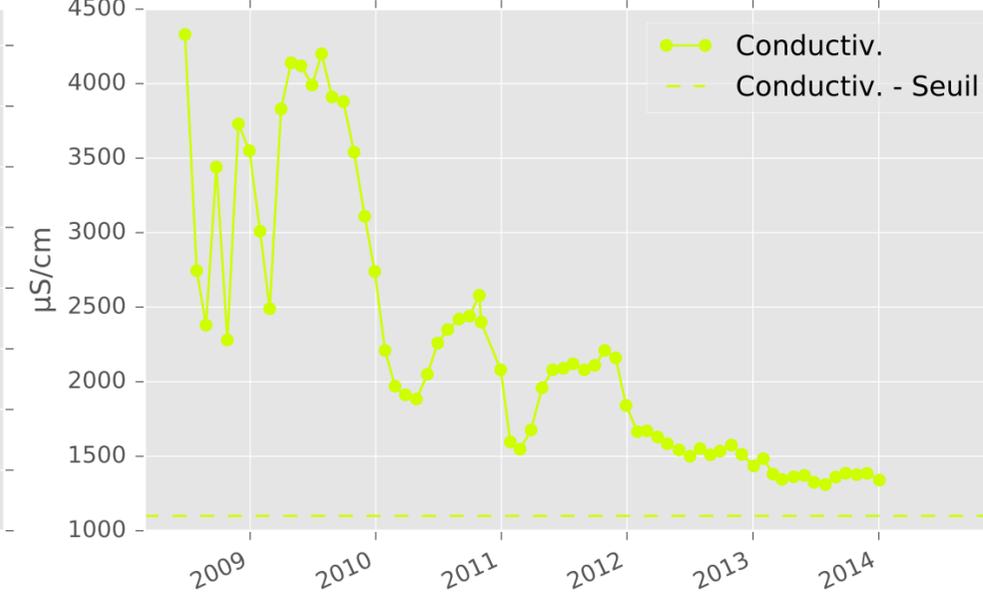
Température de l'Eau



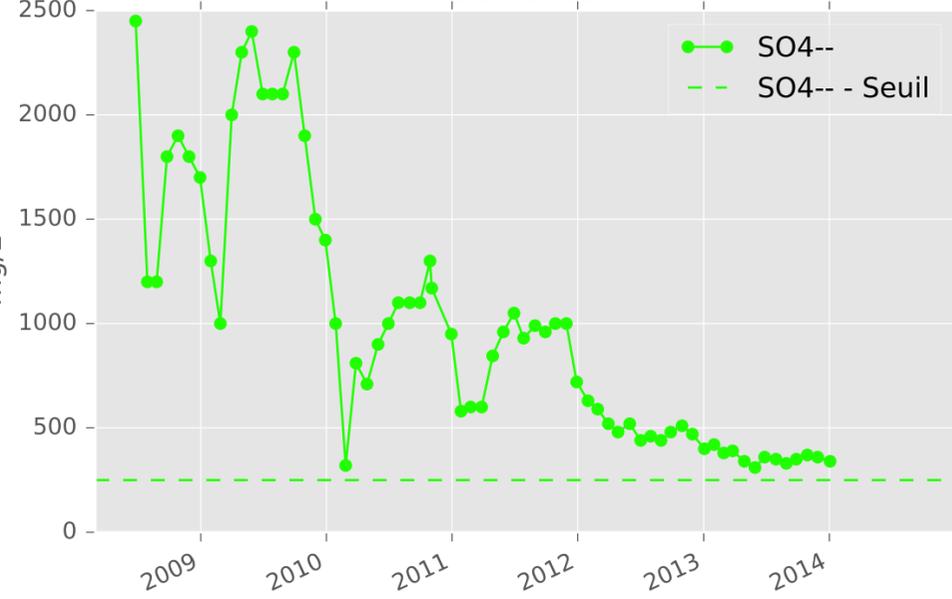
pH



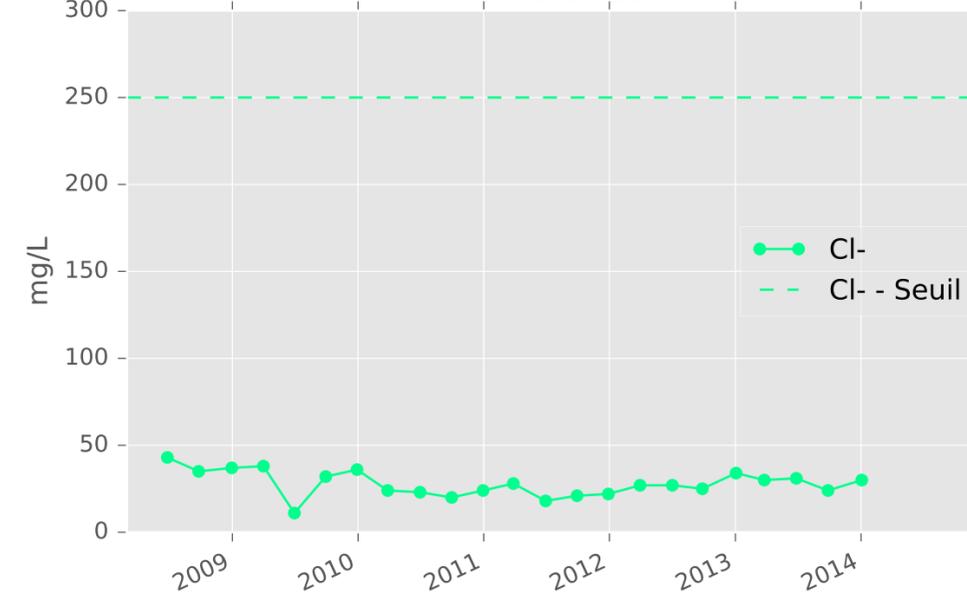
Conductivité



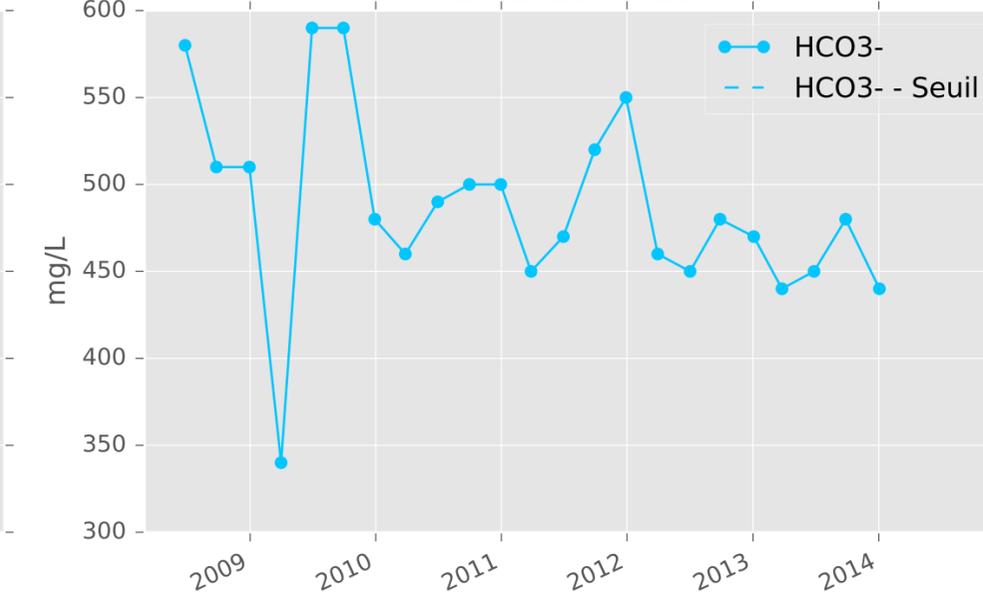
Sulfates



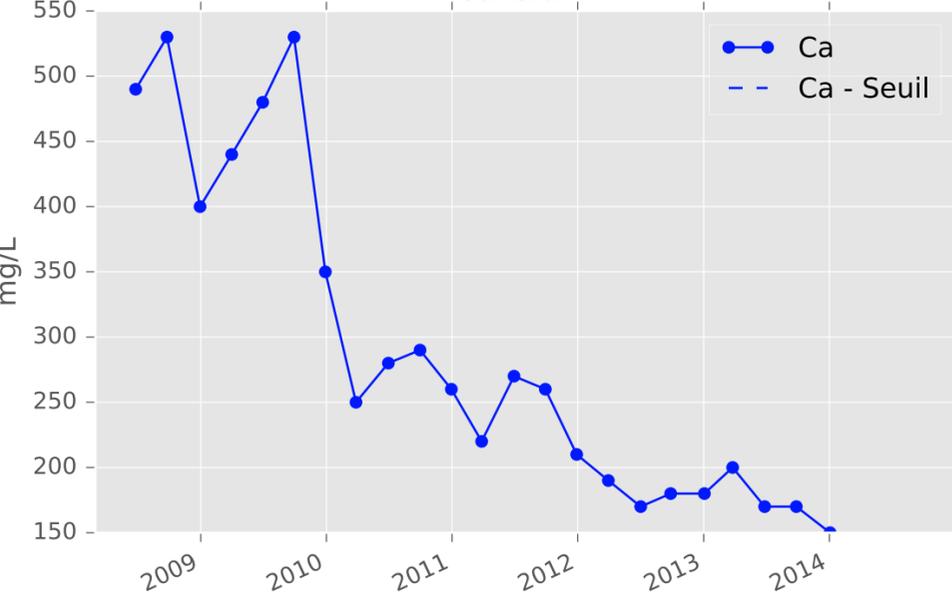
Chlorures



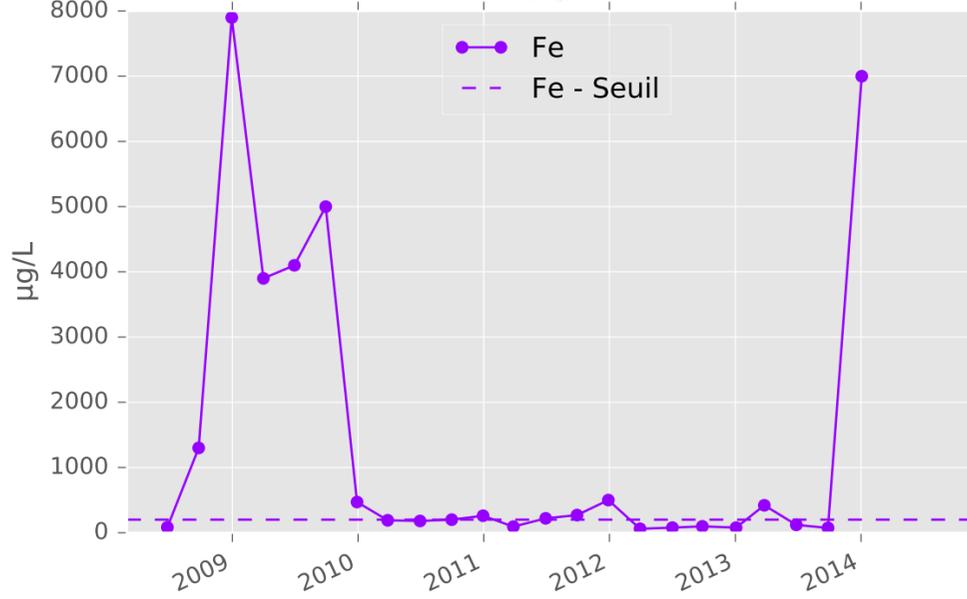
Bicarbonates



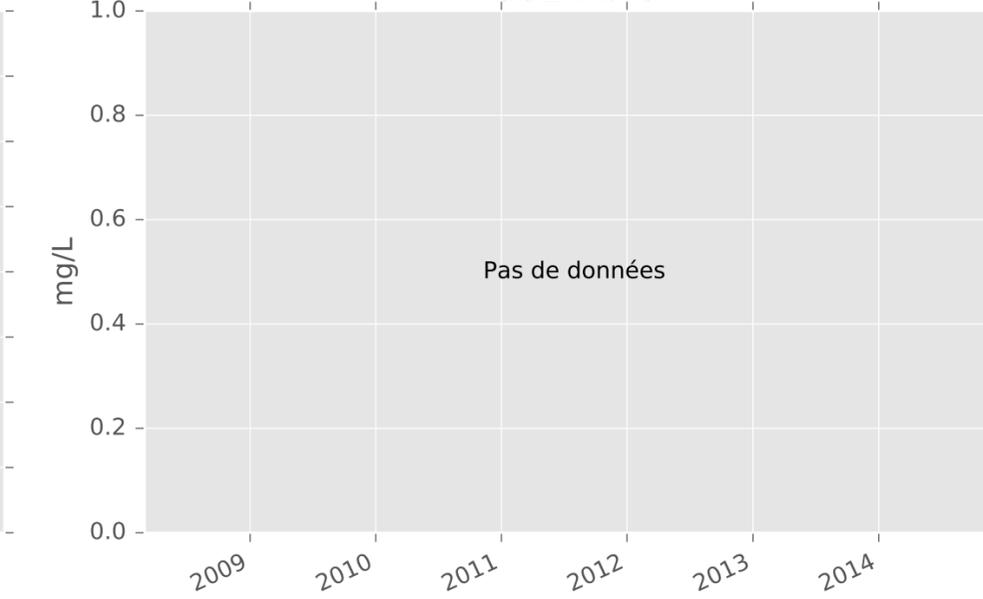
Calcium



Fer

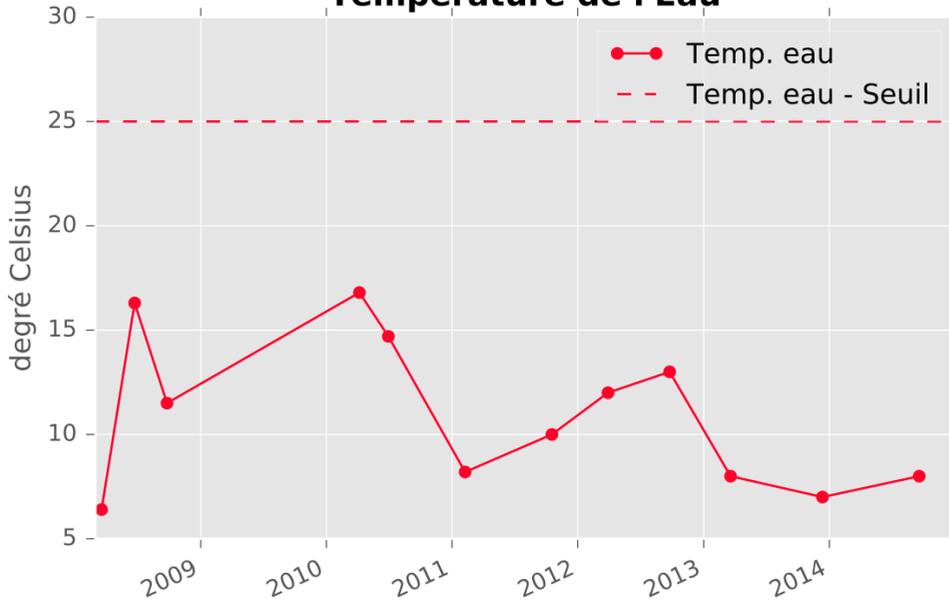


CO2 libre

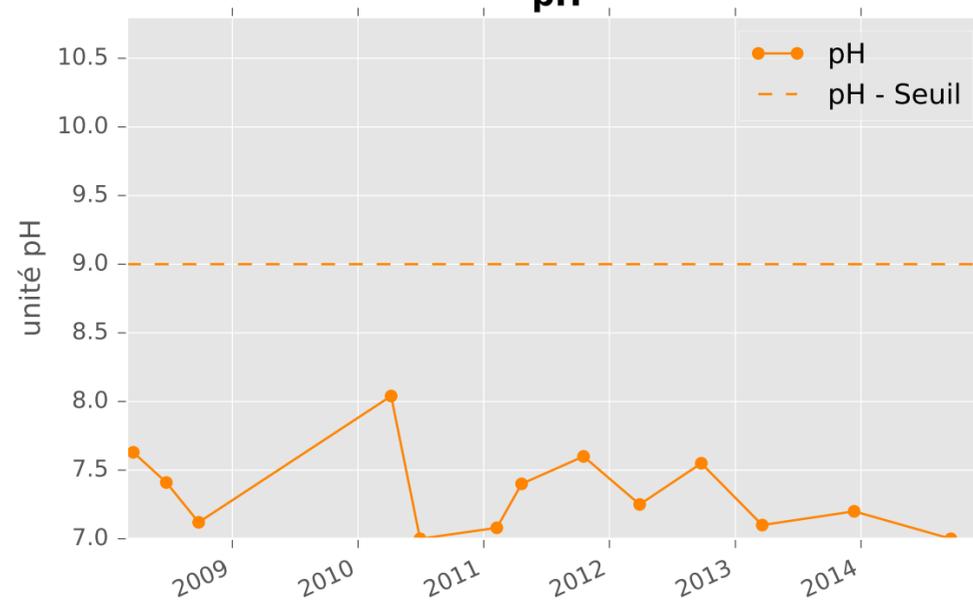


RESERVOIR MINIER NORD - 01137X0182 - N3BIS - Puits Ferdinand Jaune

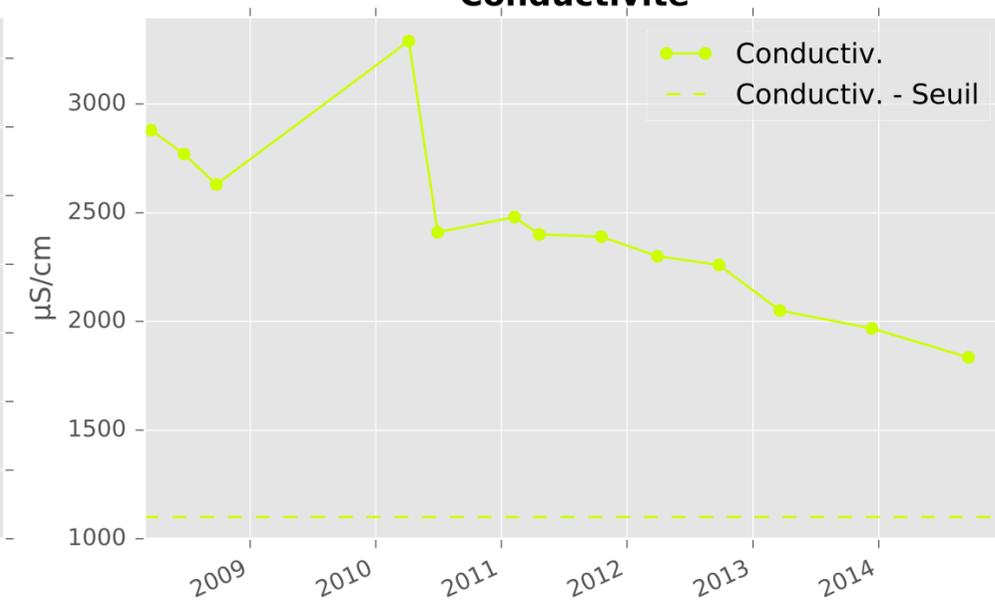
Température de l'Eau



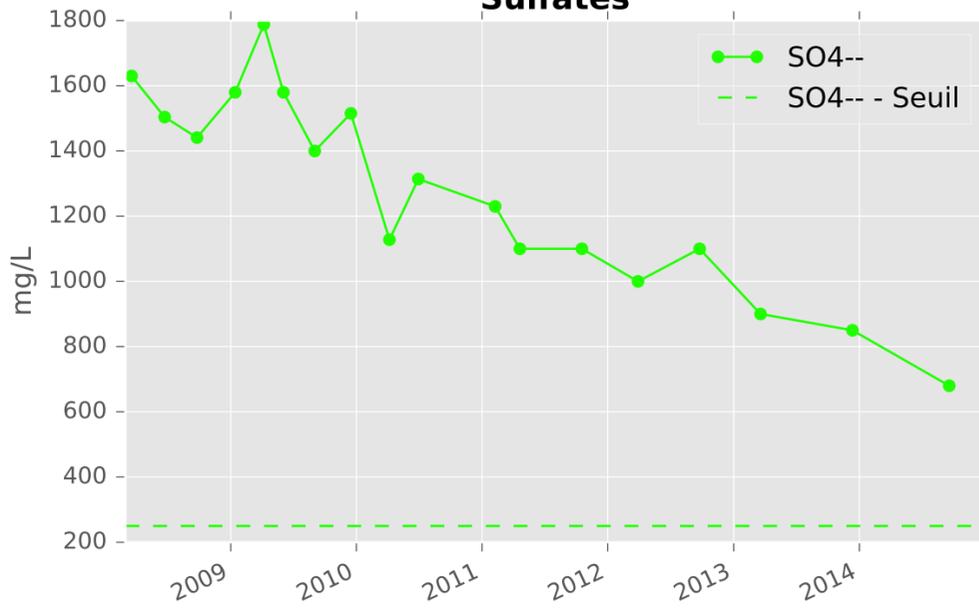
pH



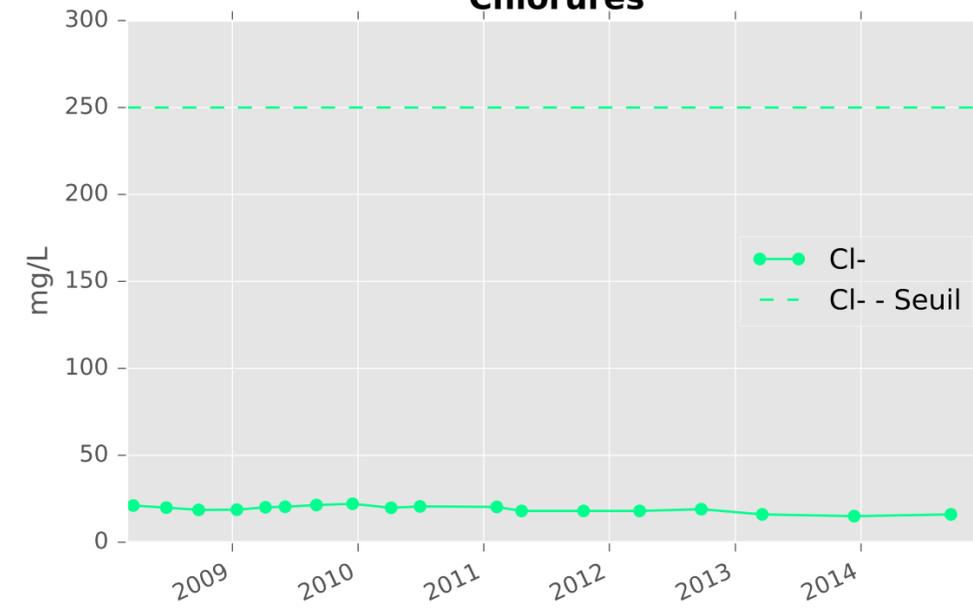
Conductivité



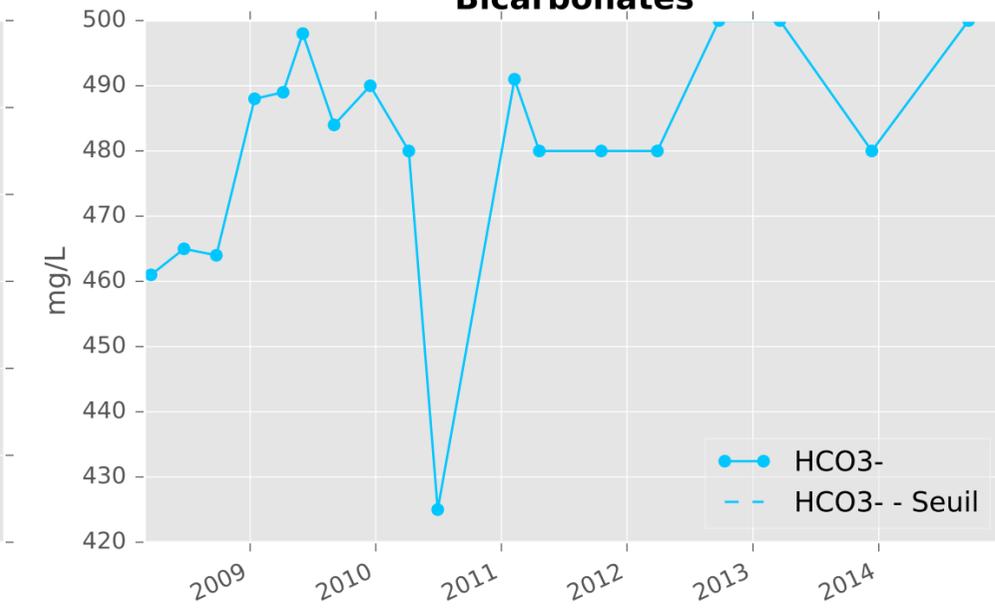
Sulfates



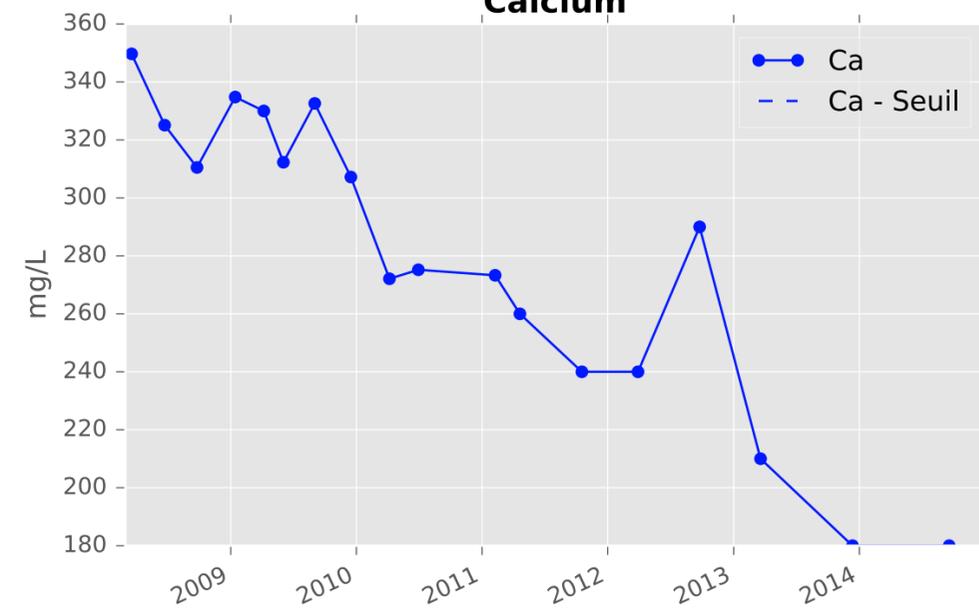
Chlorures



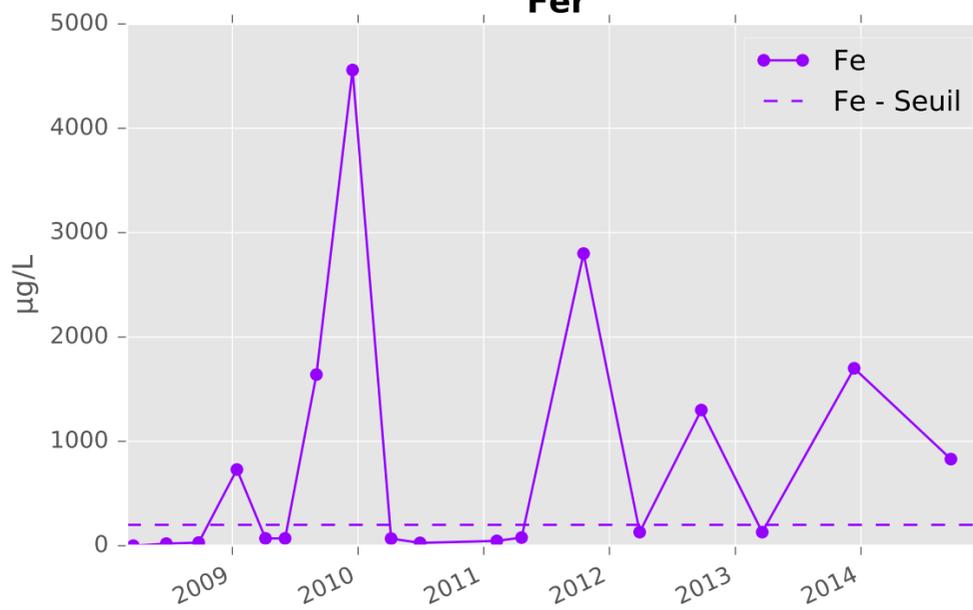
Bicarbonates



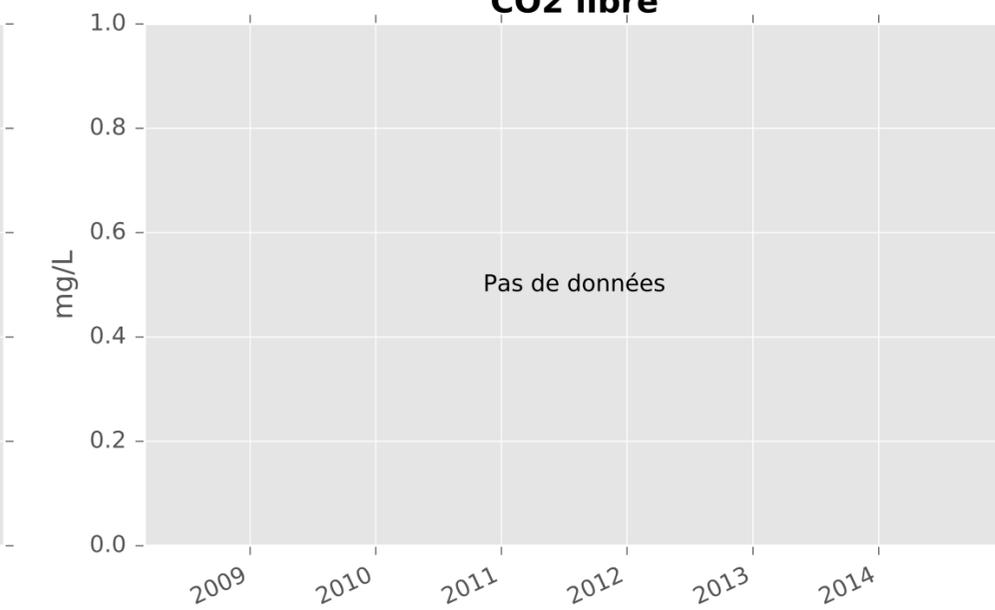
Calcium



Fer

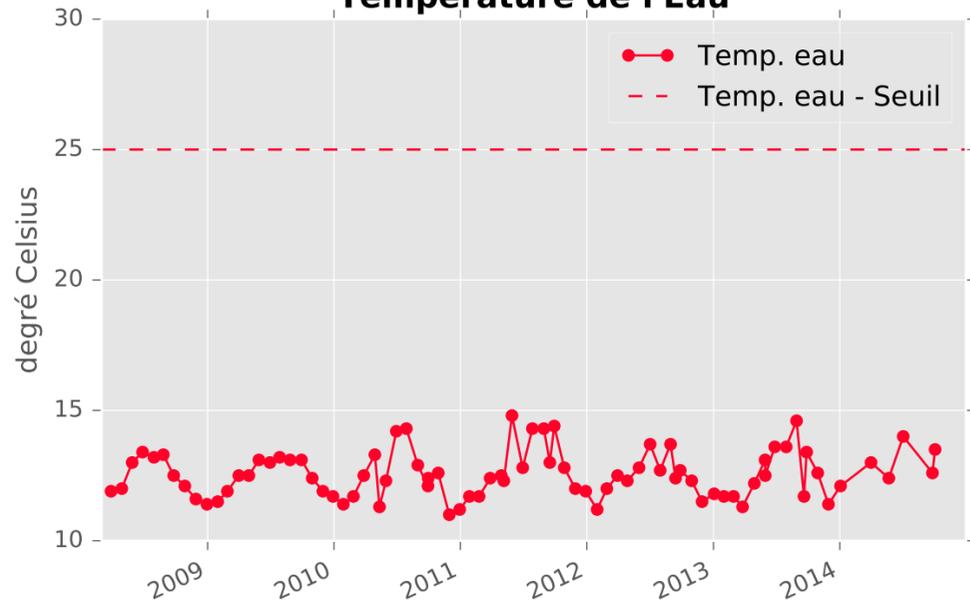


CO2 libre

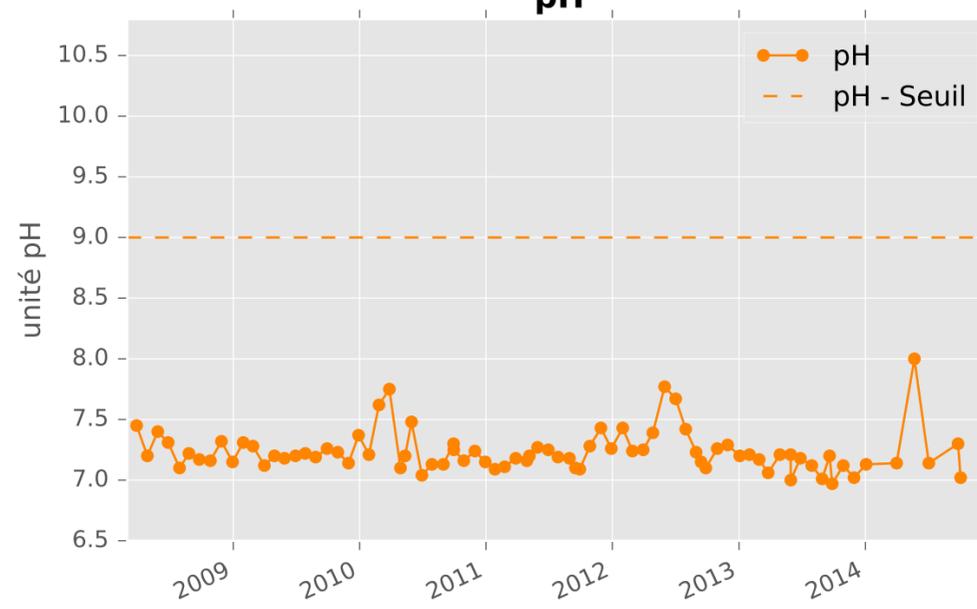


RESERVOIR MINIER SUD - 01374X0273 - S4 - Galerie du chenal de Moyeuvre

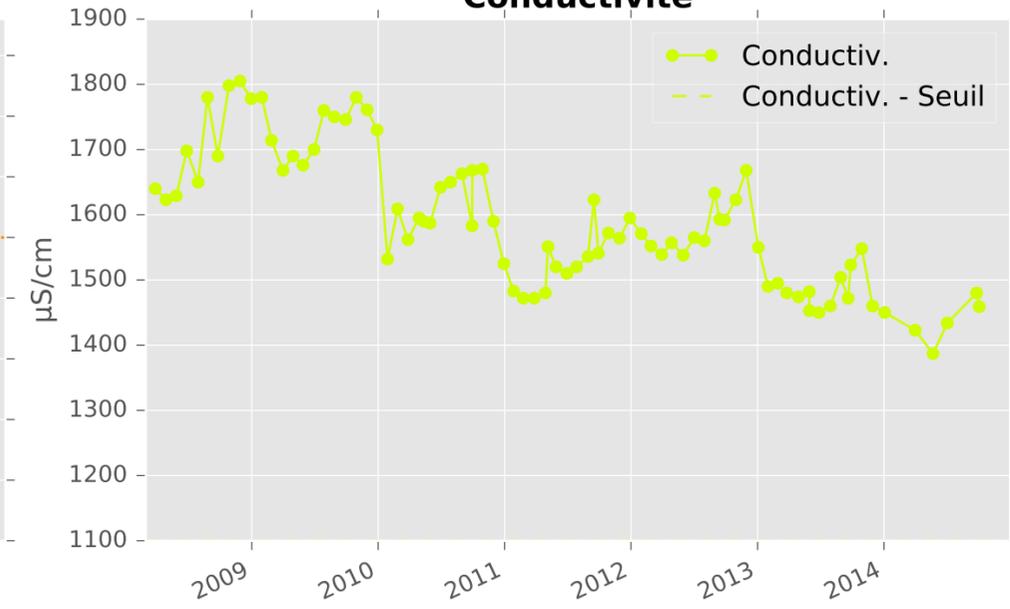
Température de l'Eau



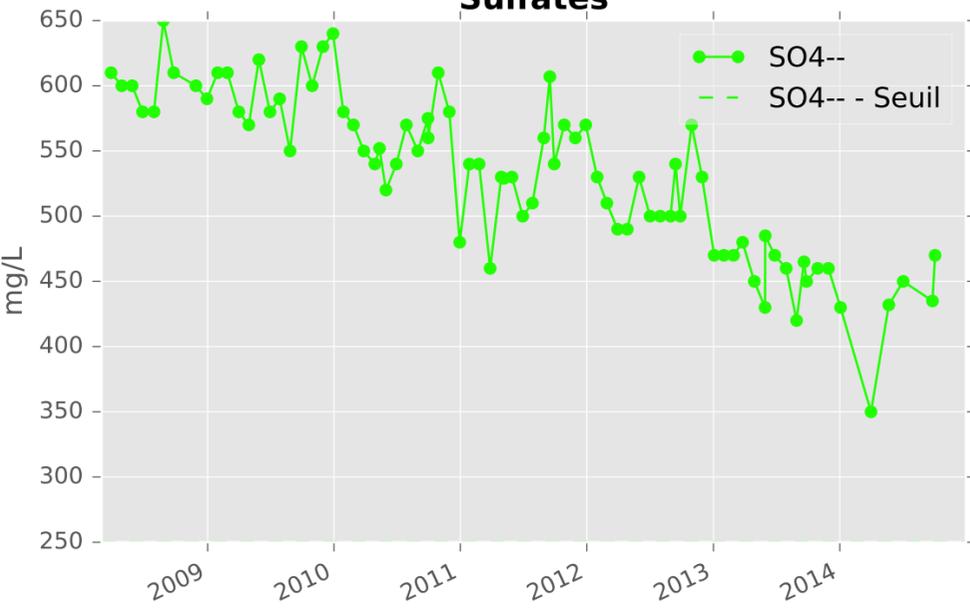
pH



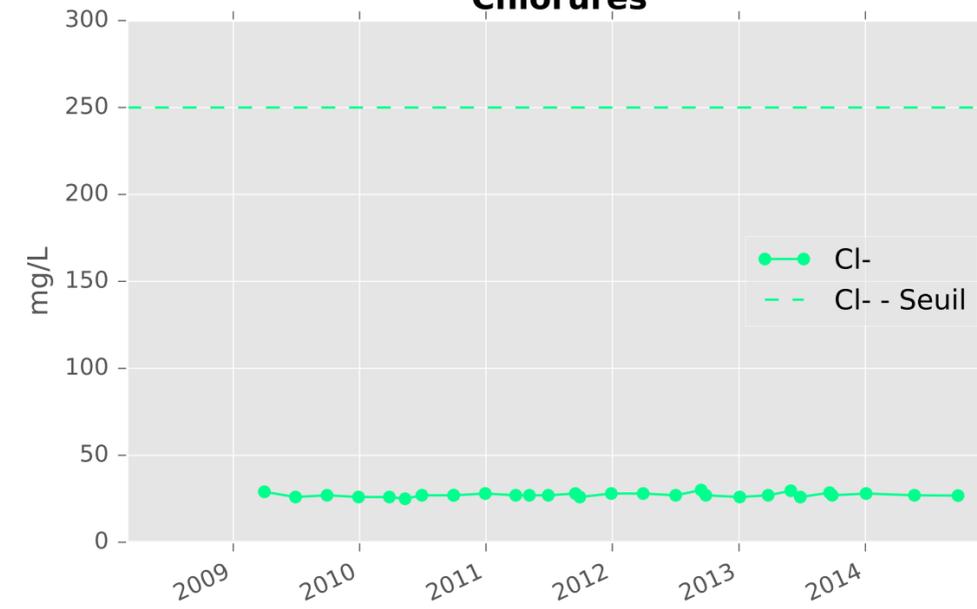
Conductivité



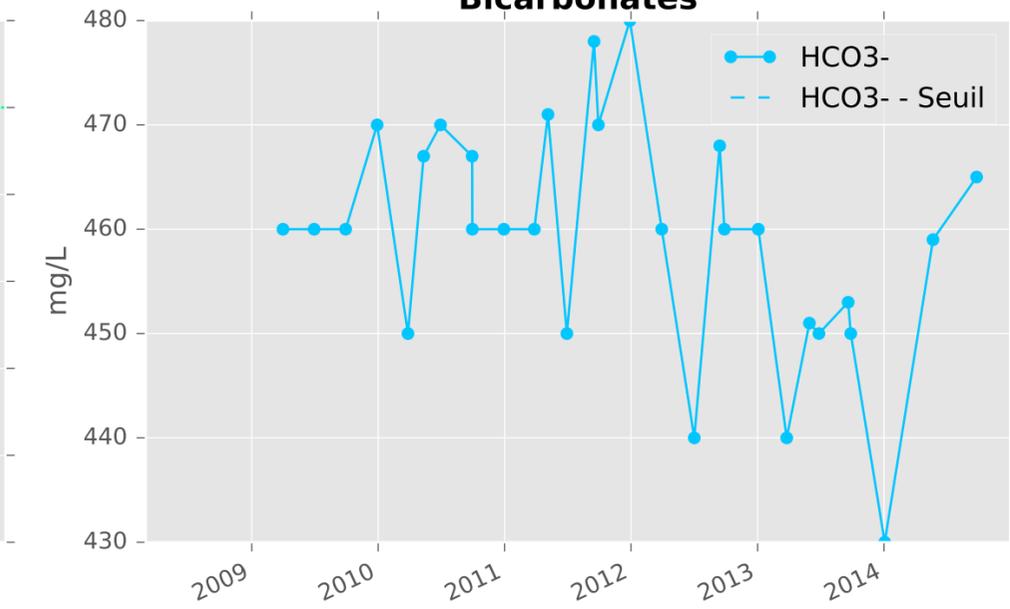
Sulfates



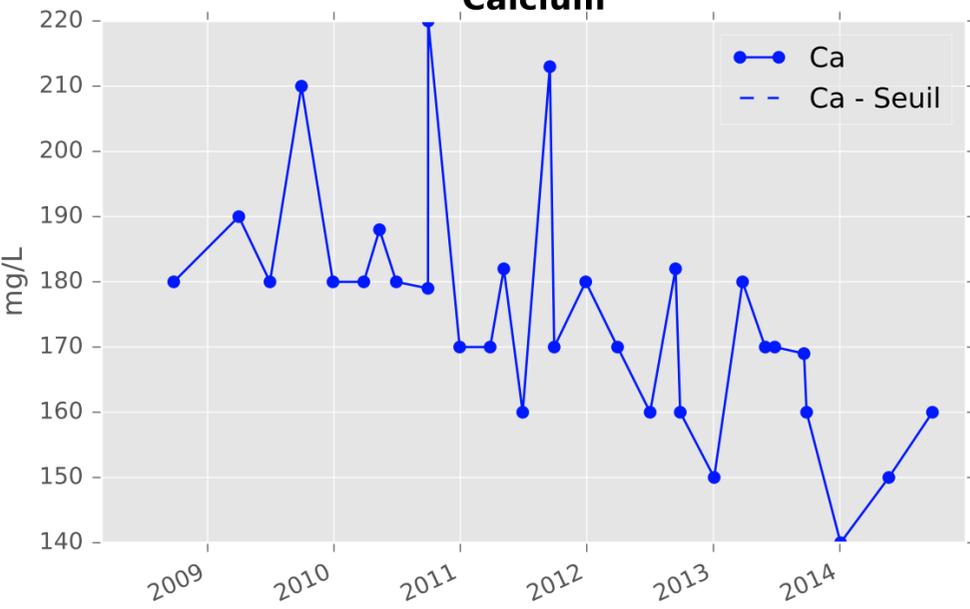
Chlorures



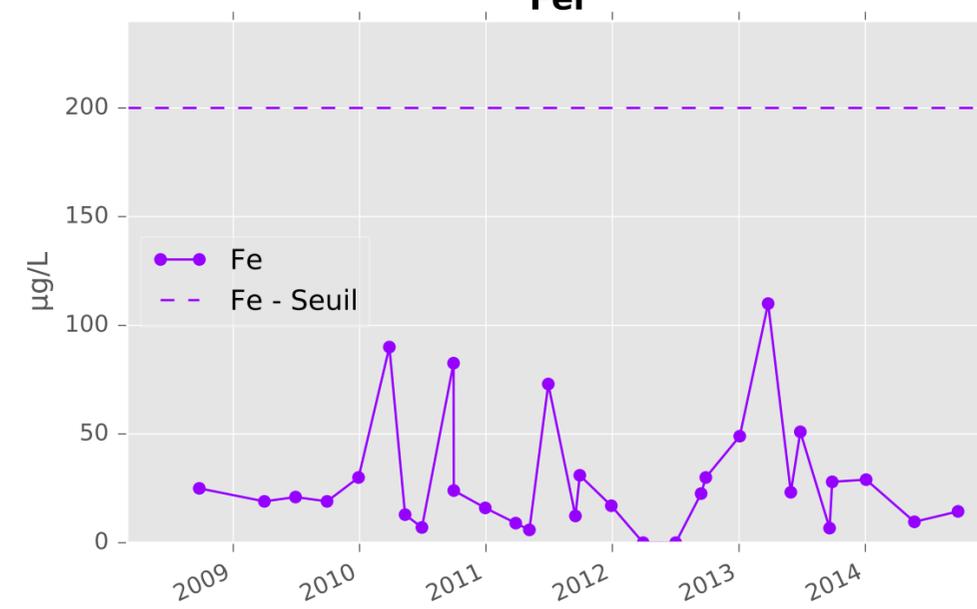
Bicarbonates



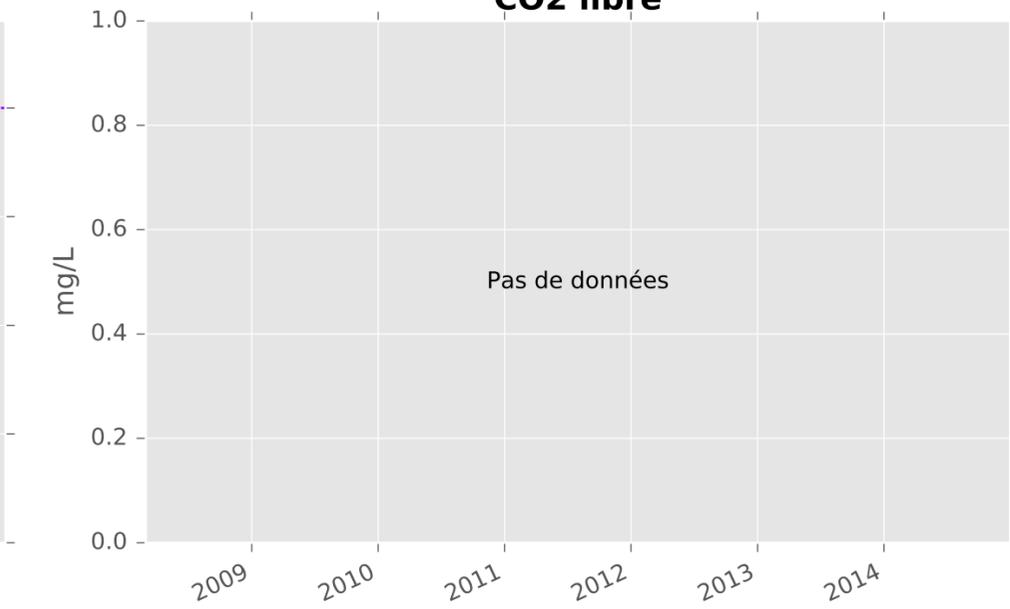
Calcium



Fer

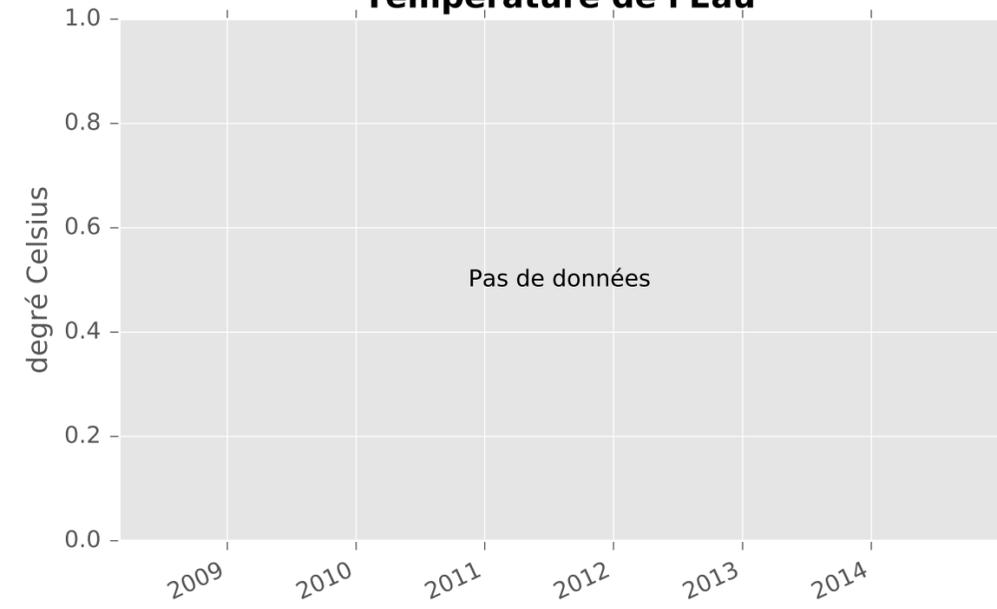


CO2 libre

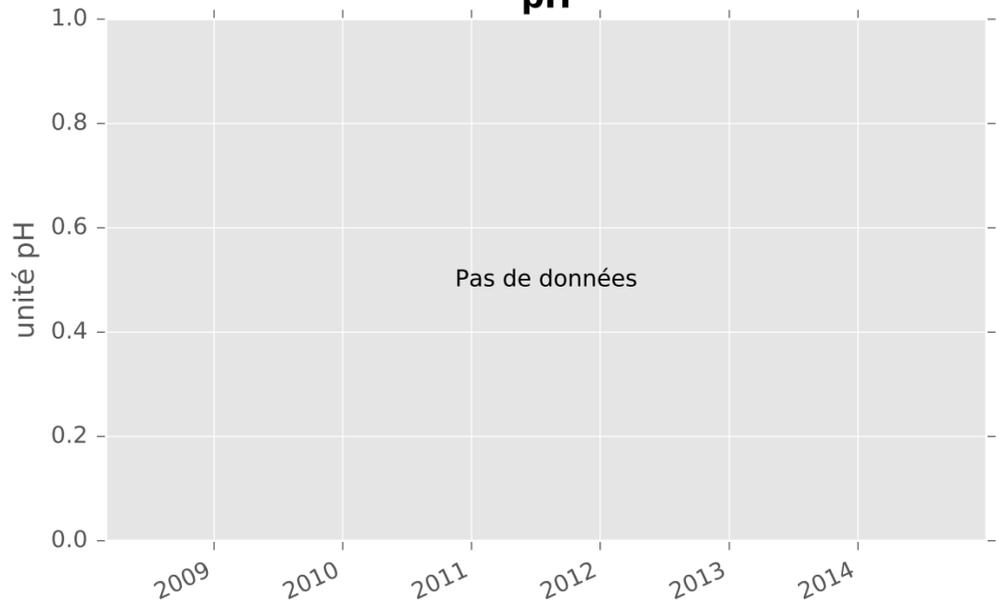


RESERVOIR MINIER SUD - 01374X0234 - S5 - Galerie du tunnel de Moyeuvre

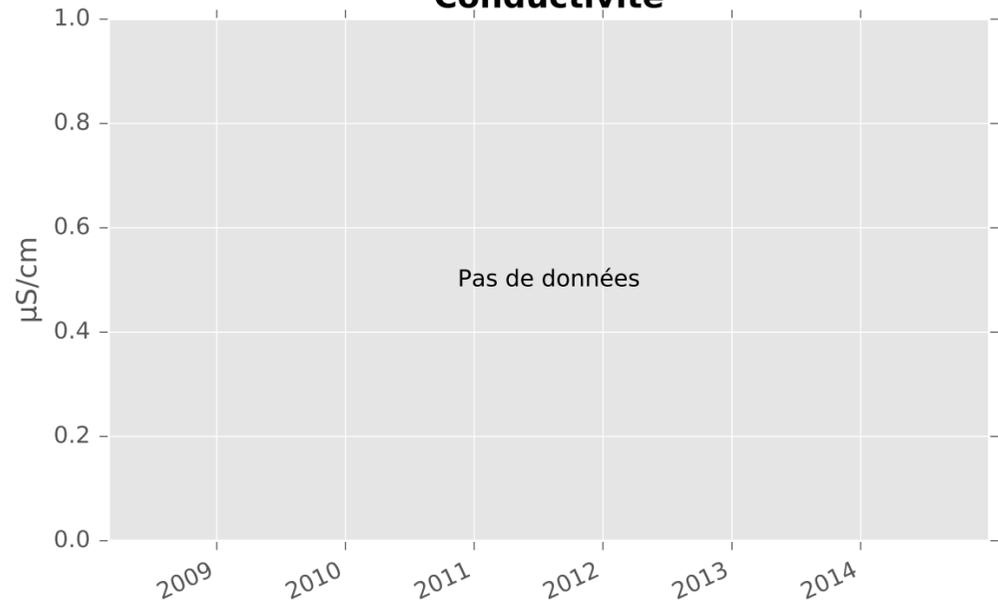
Température de l'Eau



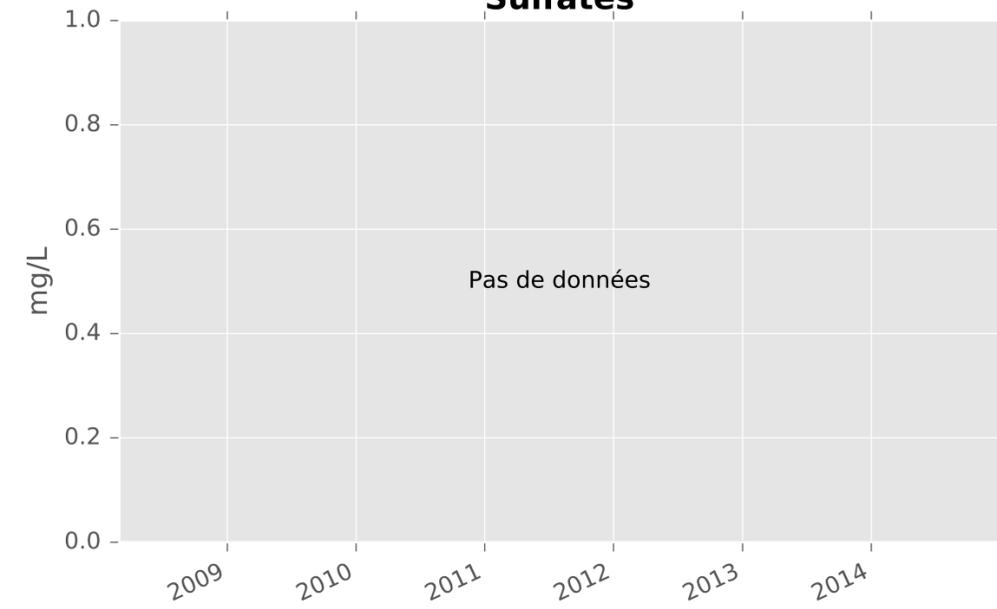
pH



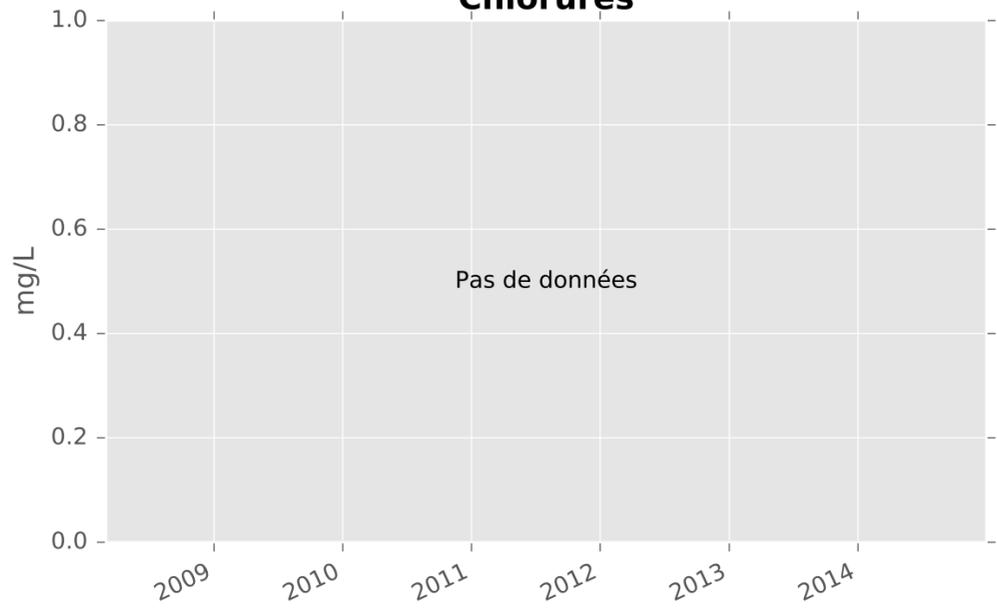
Conductivité



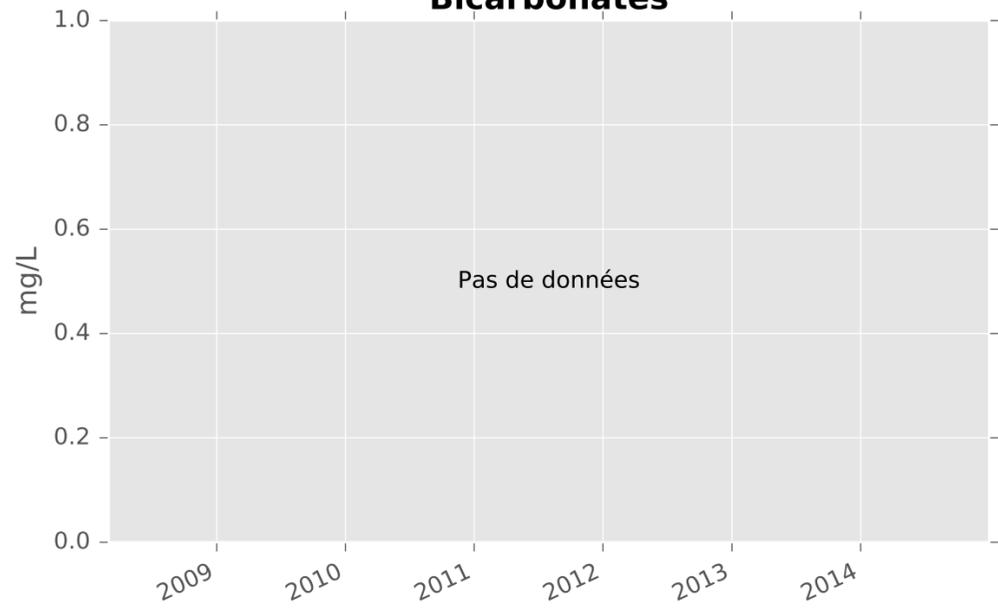
Sulfates



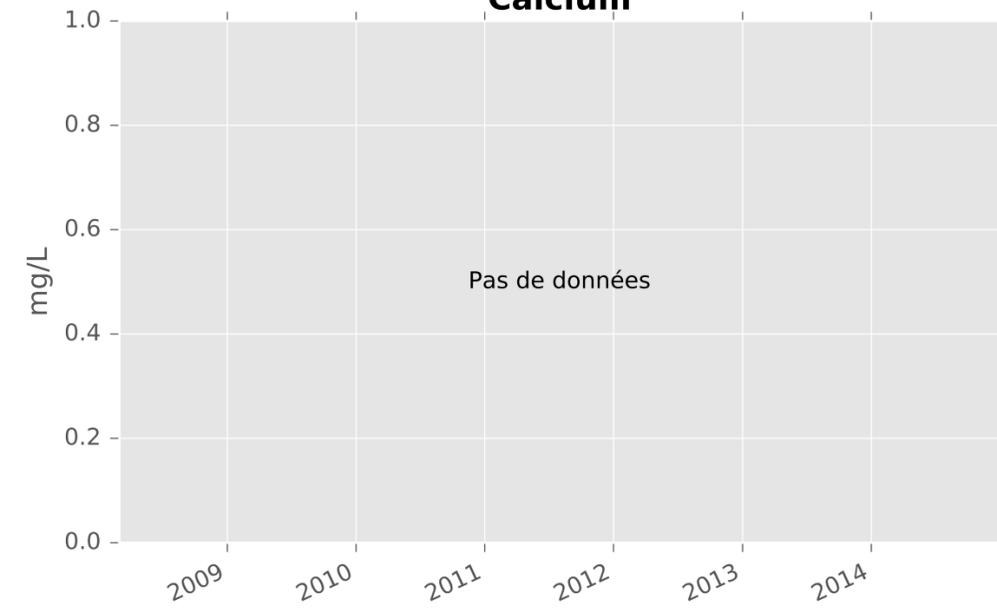
Chlorures



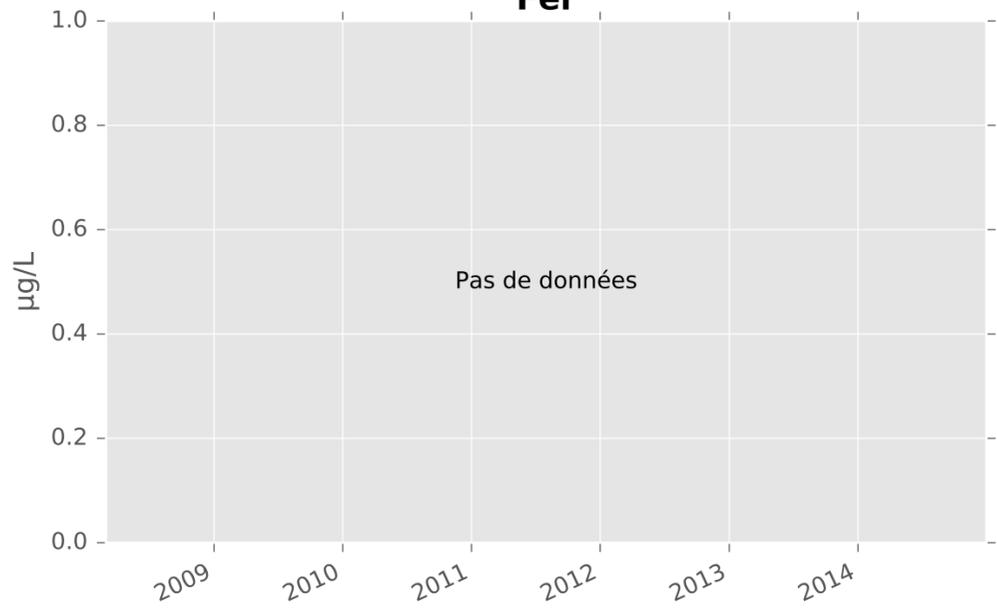
Bicarbonates



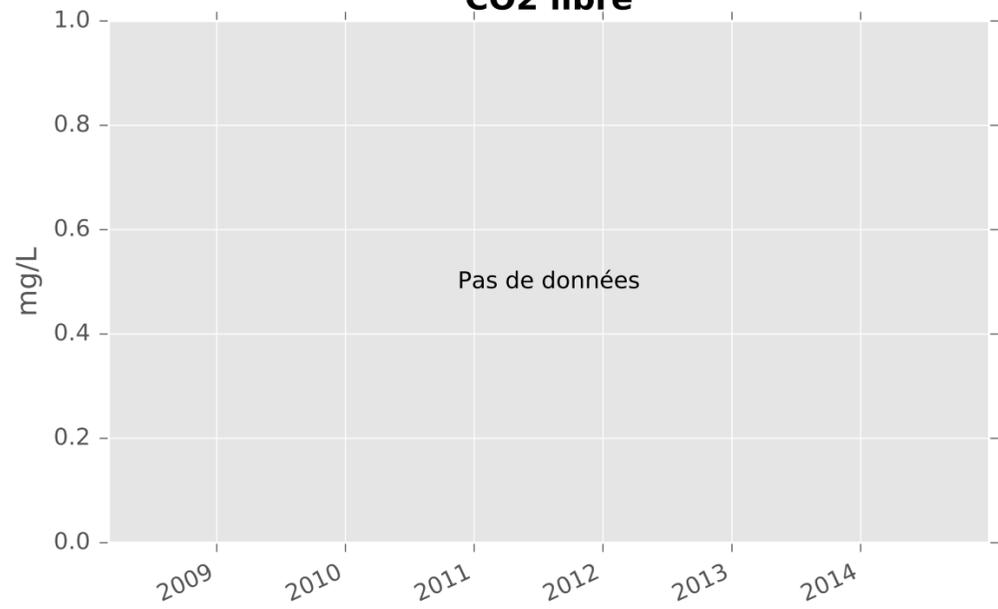
Calcium



Fer

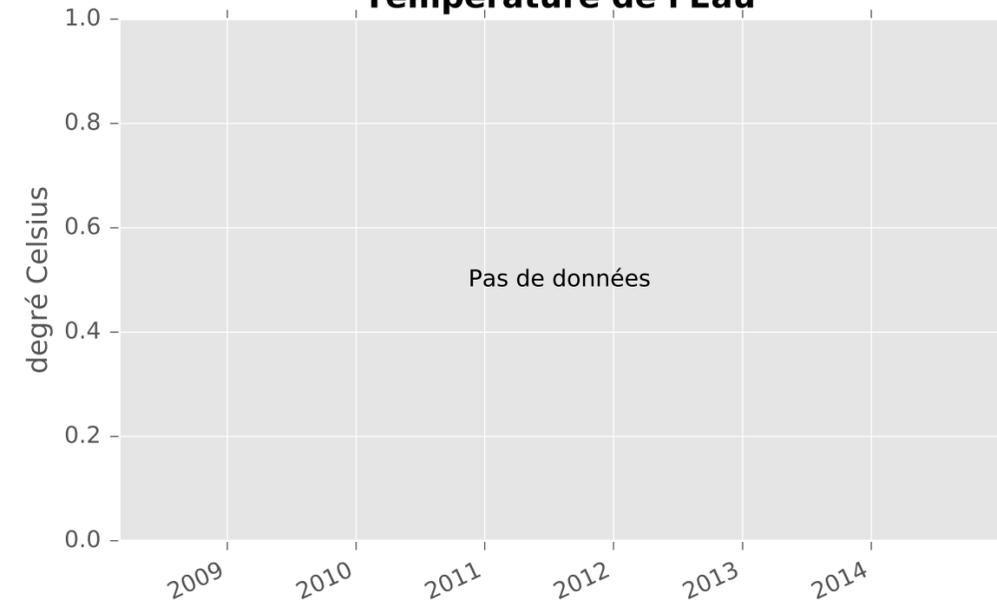


CO2 libre

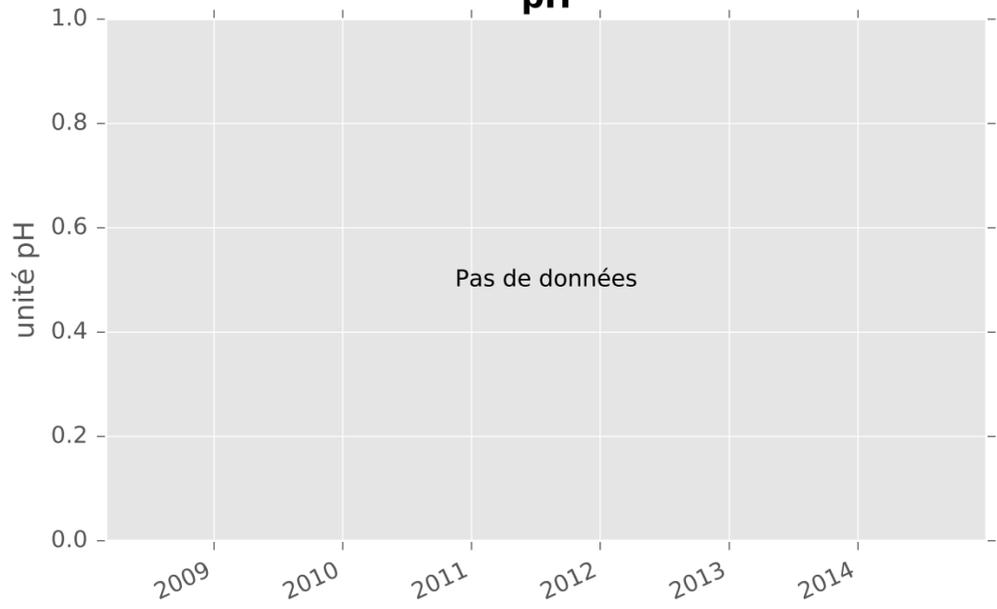


RESERVOIR MINIER SUD - 01378X0121 - S23 - Puits Roncourt I (AEP)

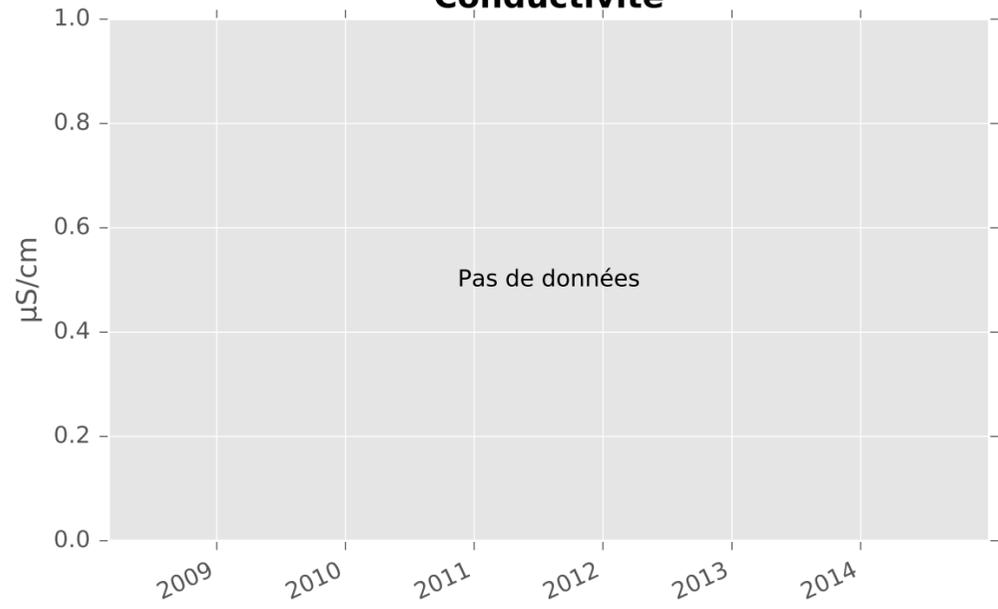
Température de l'Eau



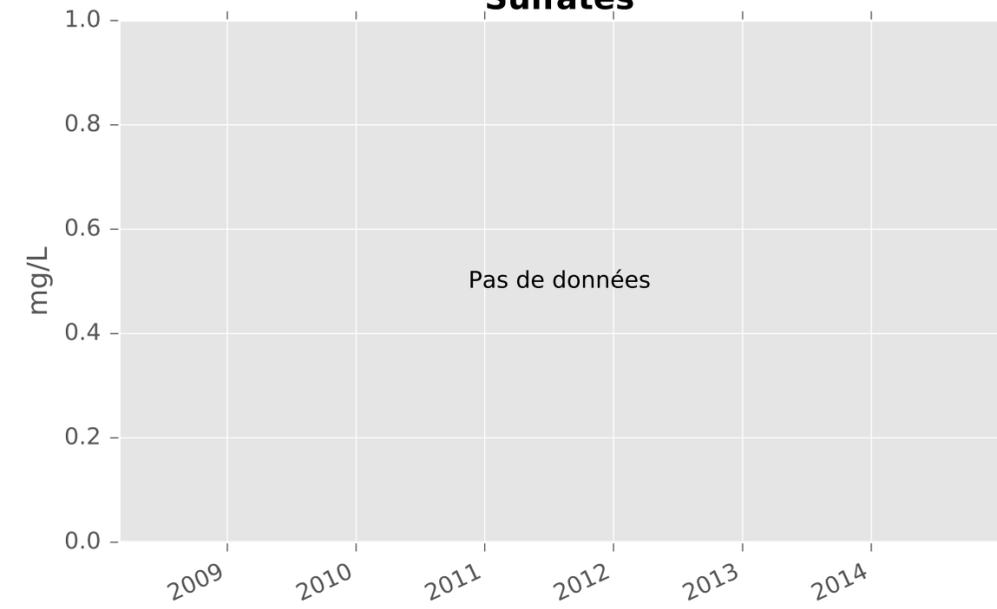
pH



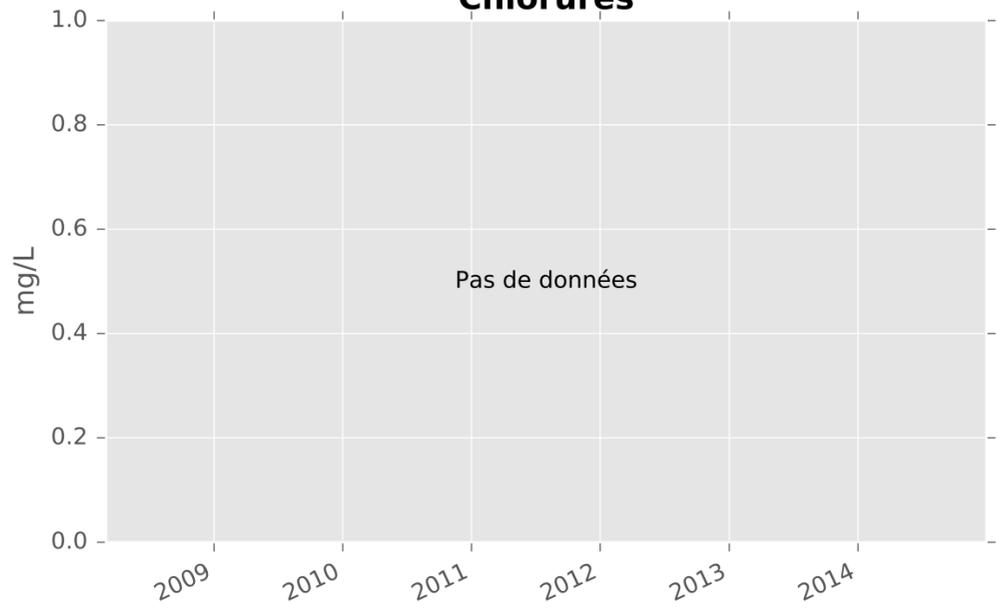
Conductivité



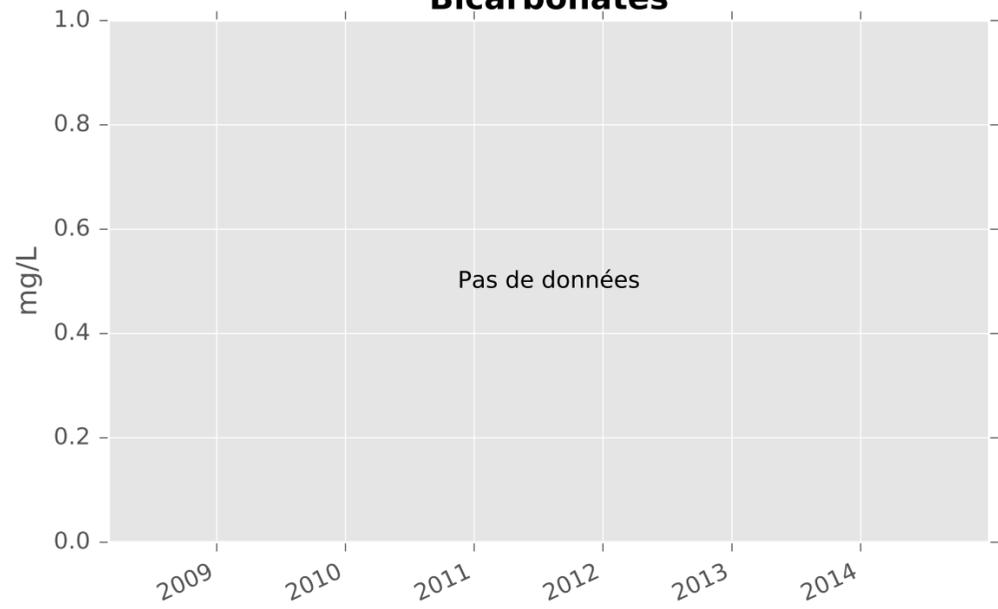
Sulfates



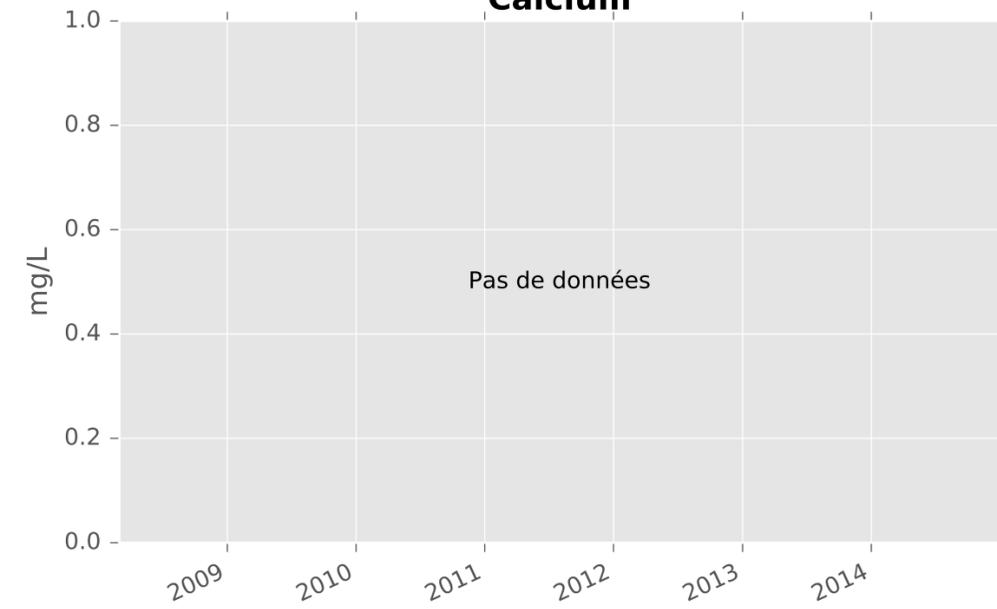
Chlorures



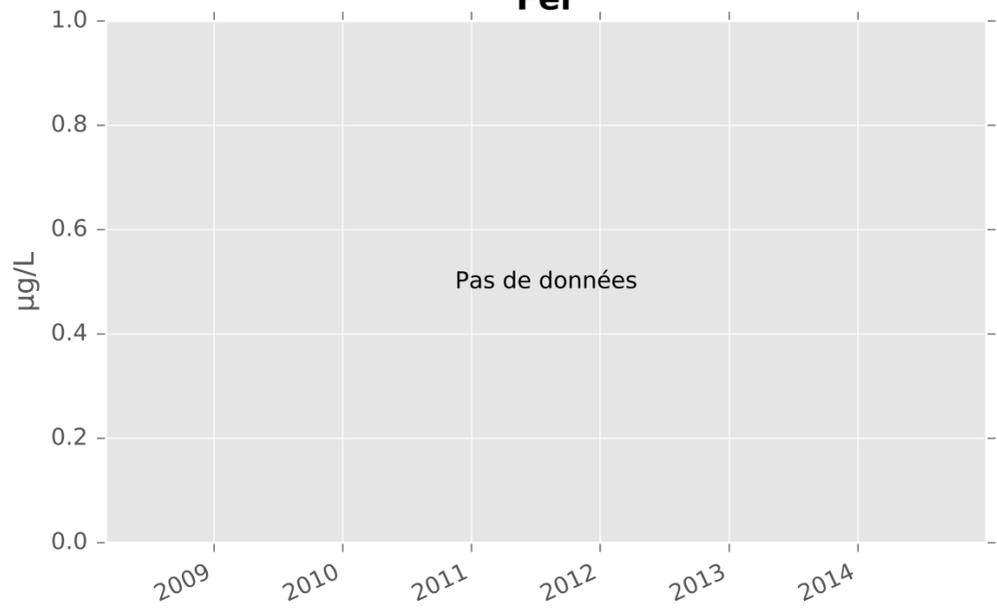
Bicarbonates



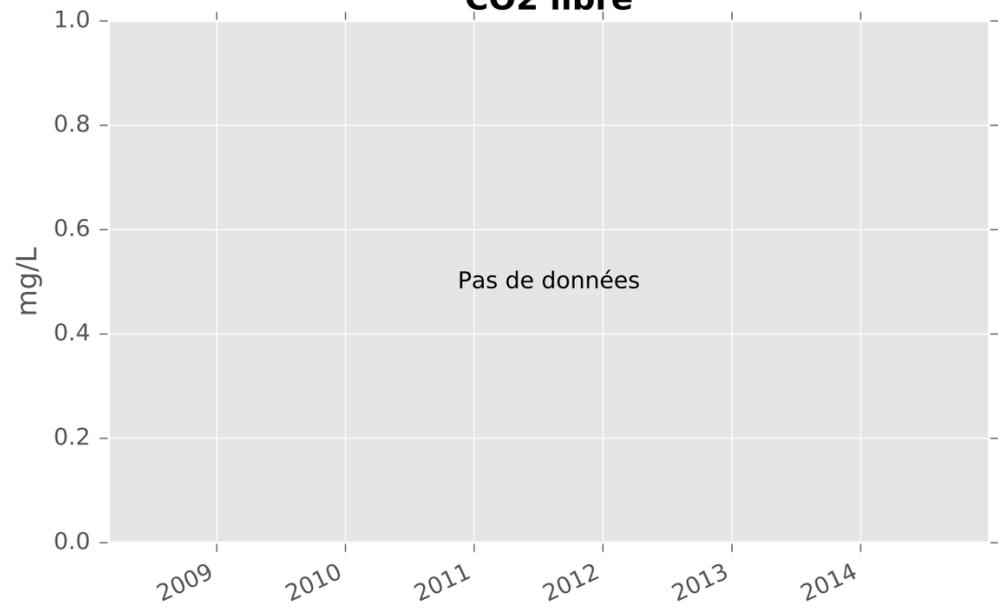
Calcium



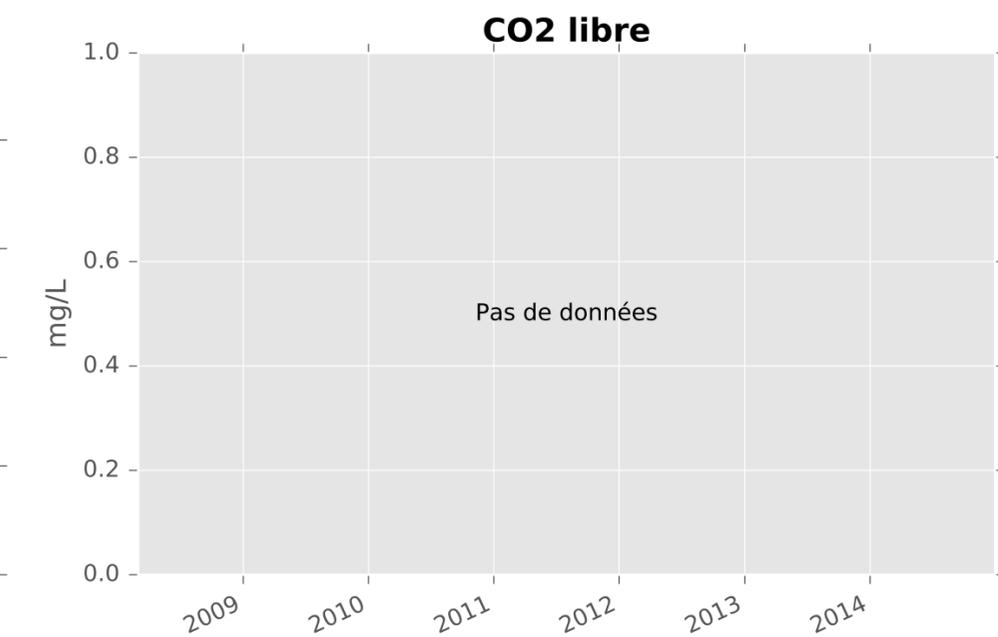
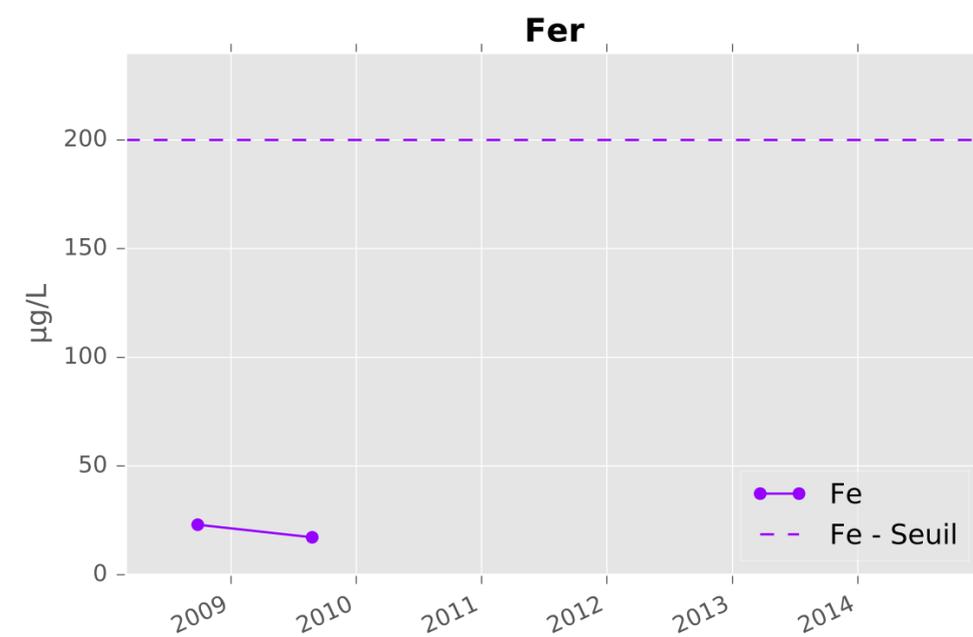
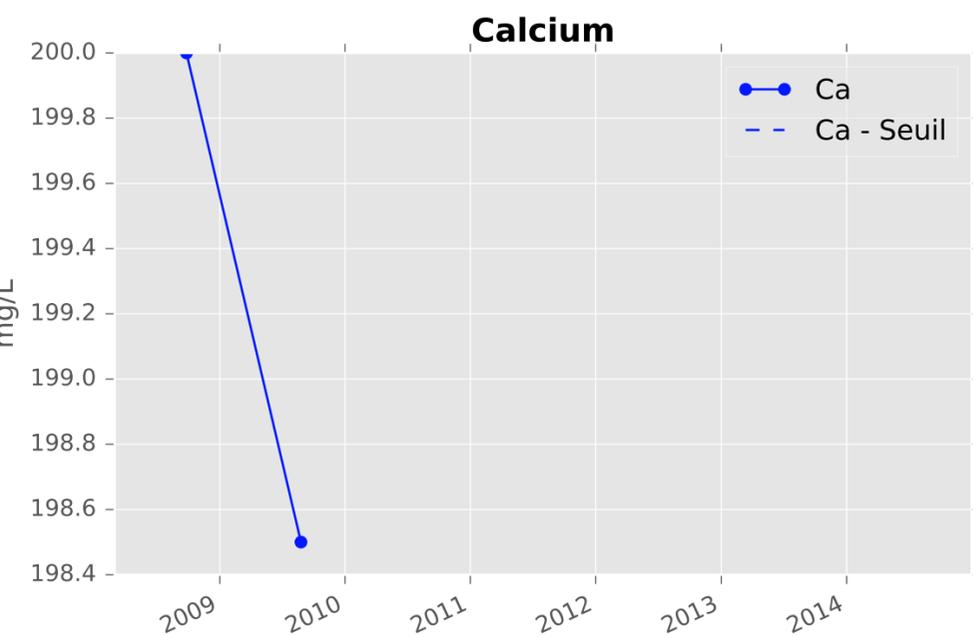
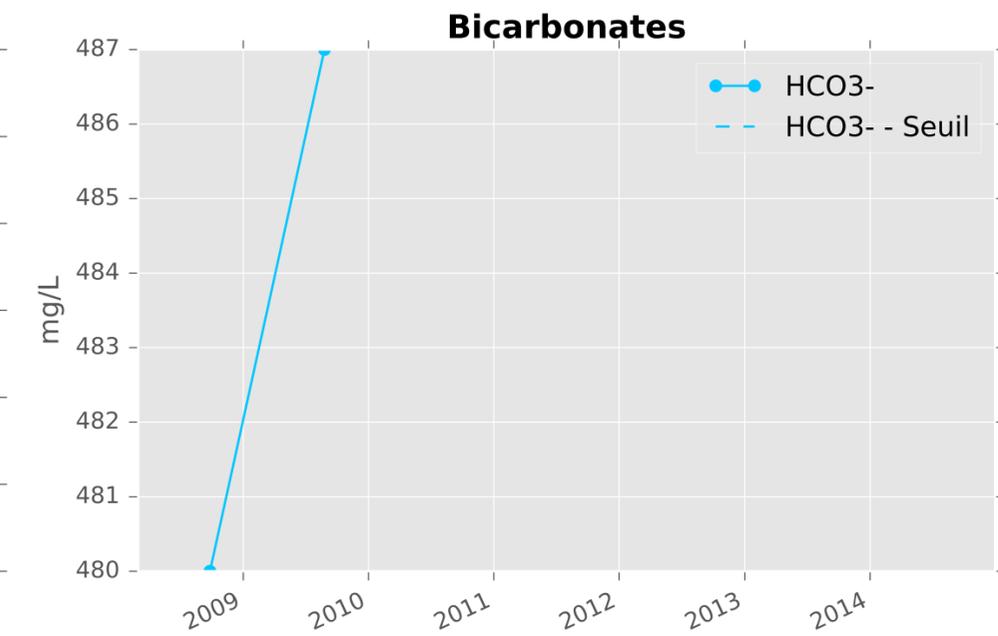
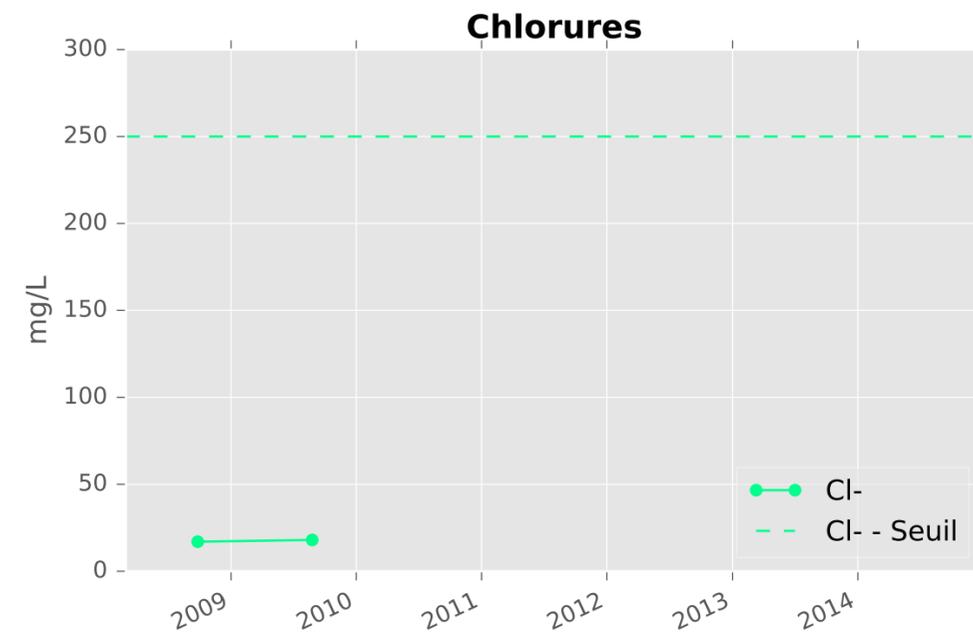
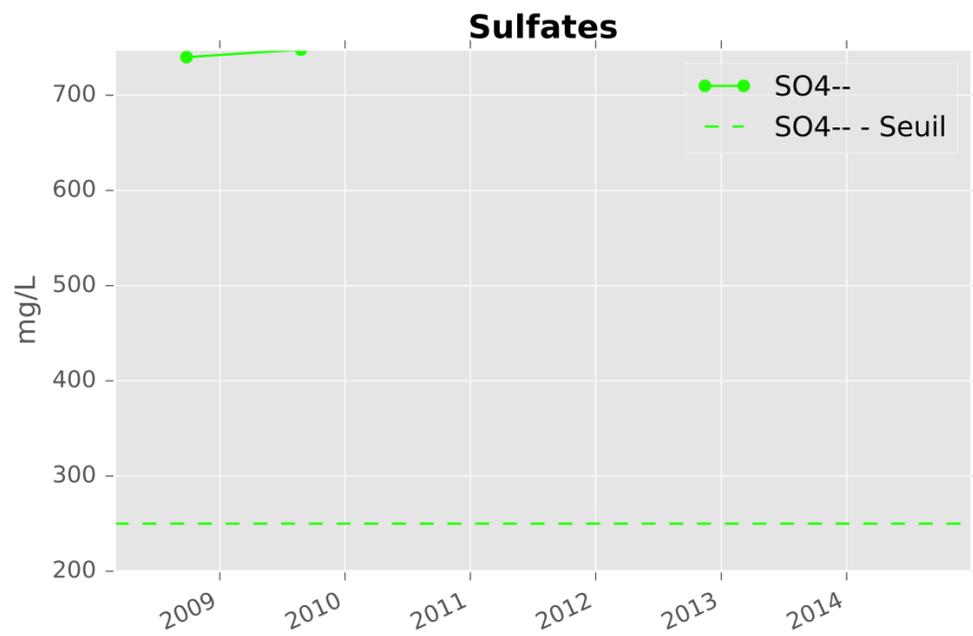
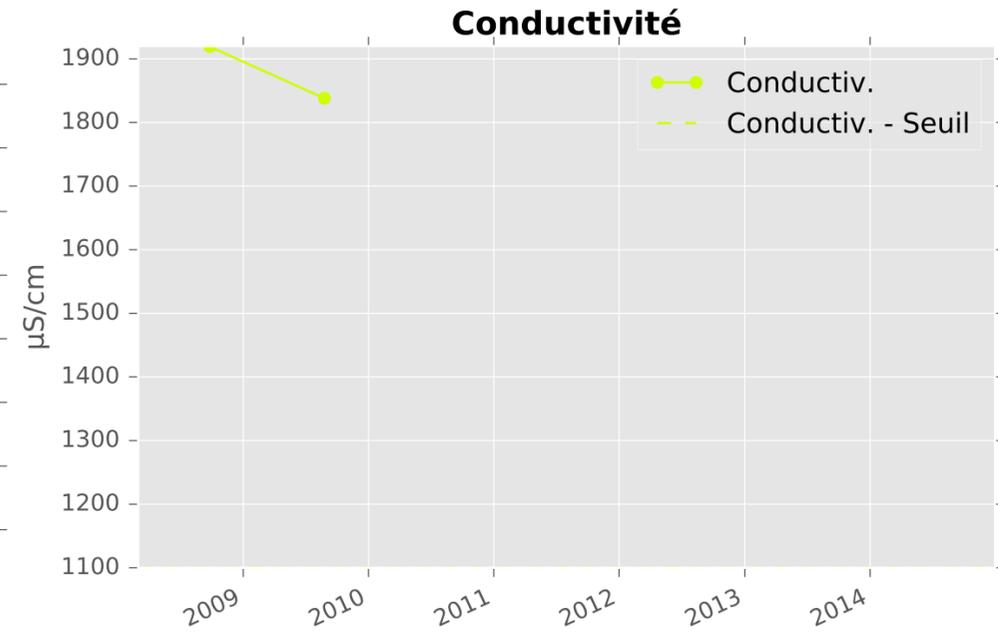
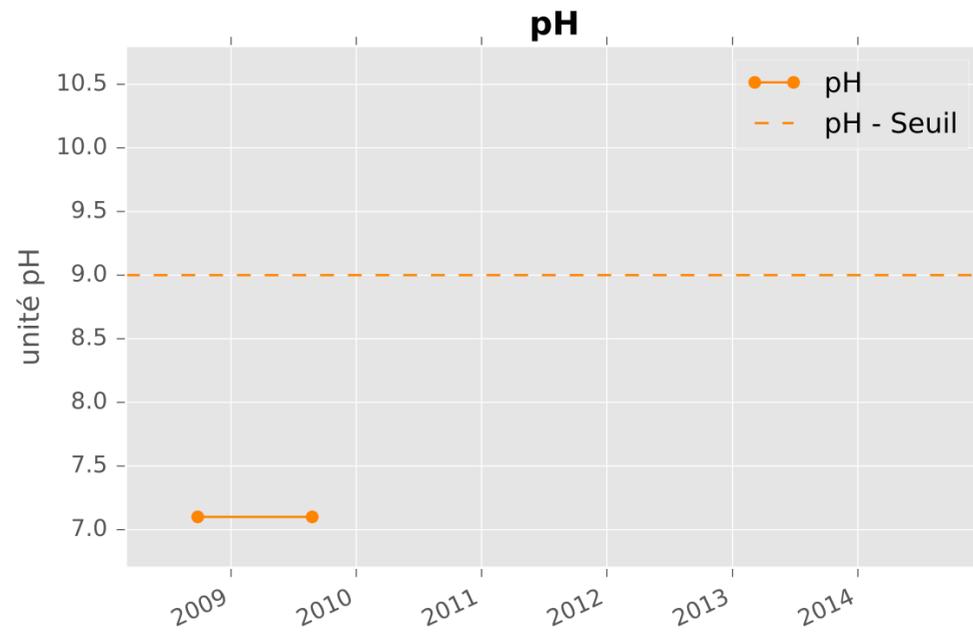
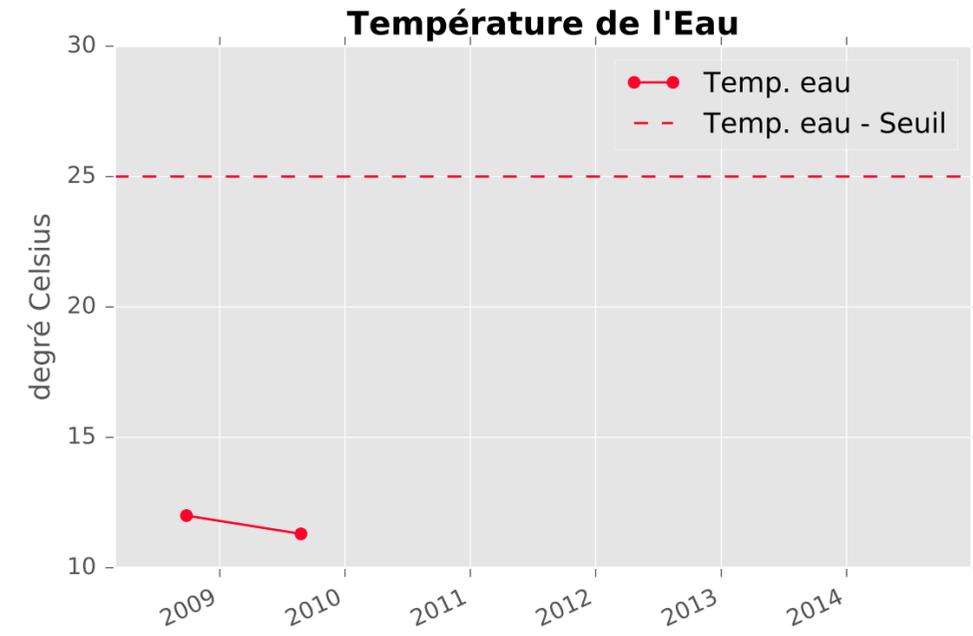
Fer



CO2 libre

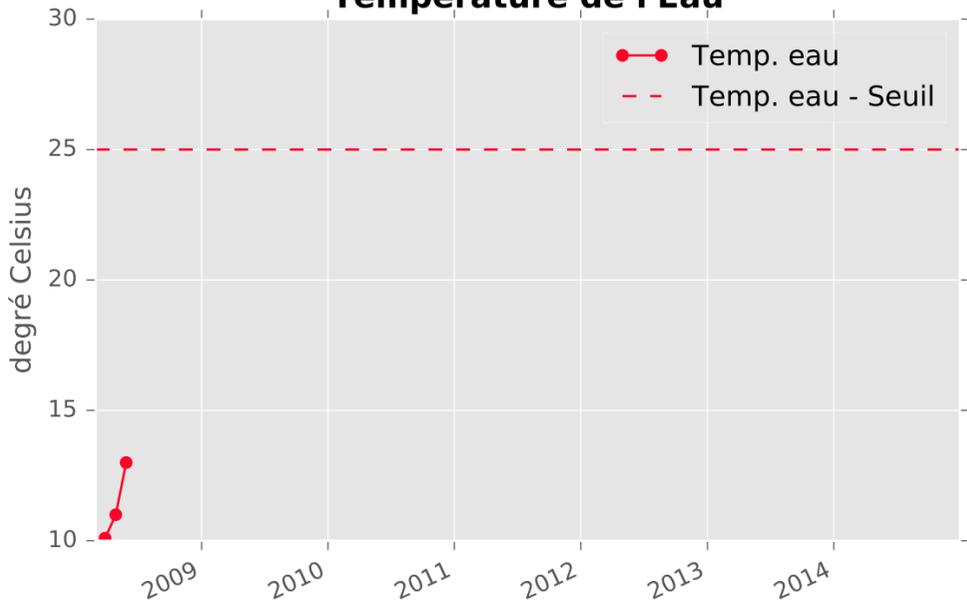


RESERVOIR MINIER et CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0027 - C18 - Source Chapelle (fuites Centre)

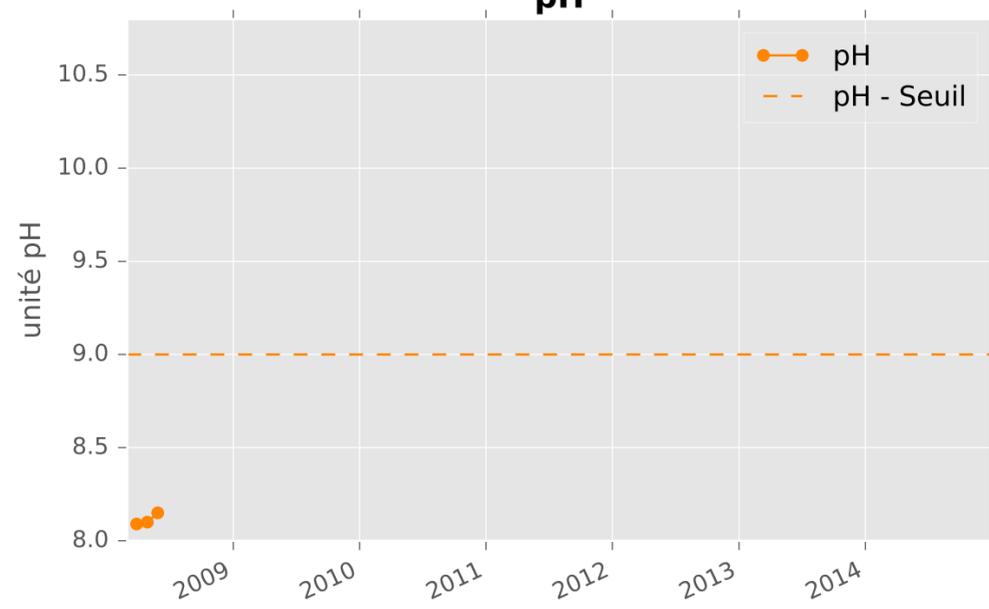


RESERVOIR MINIER et CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0175 - C20 - Conroy confluence Chevillon

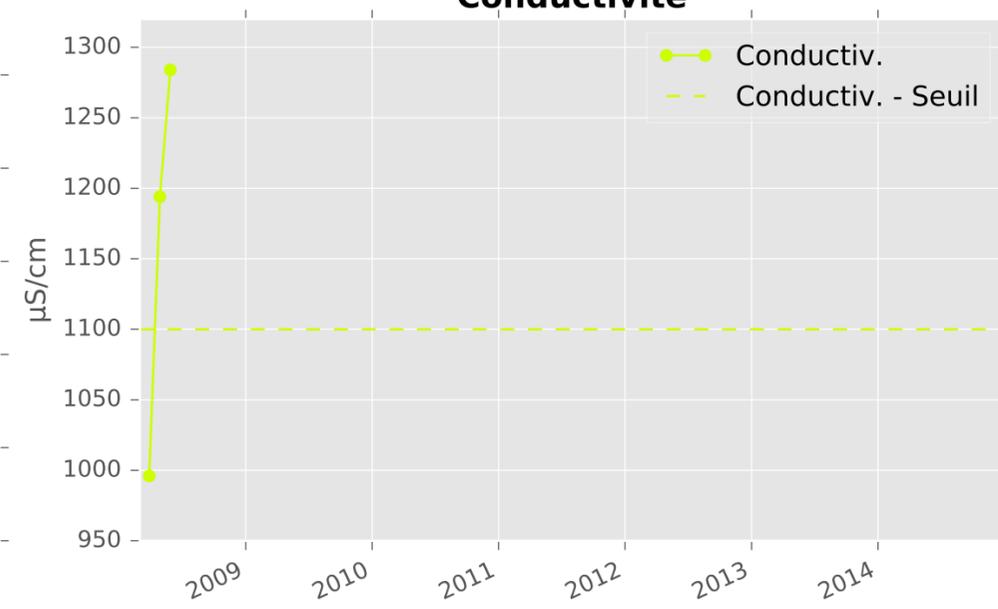
Température de l'Eau



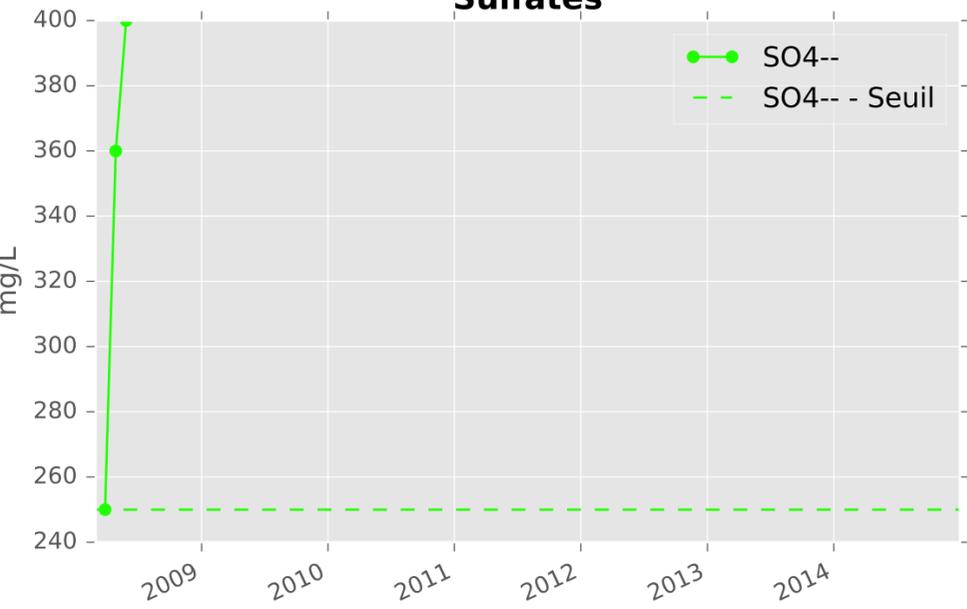
pH



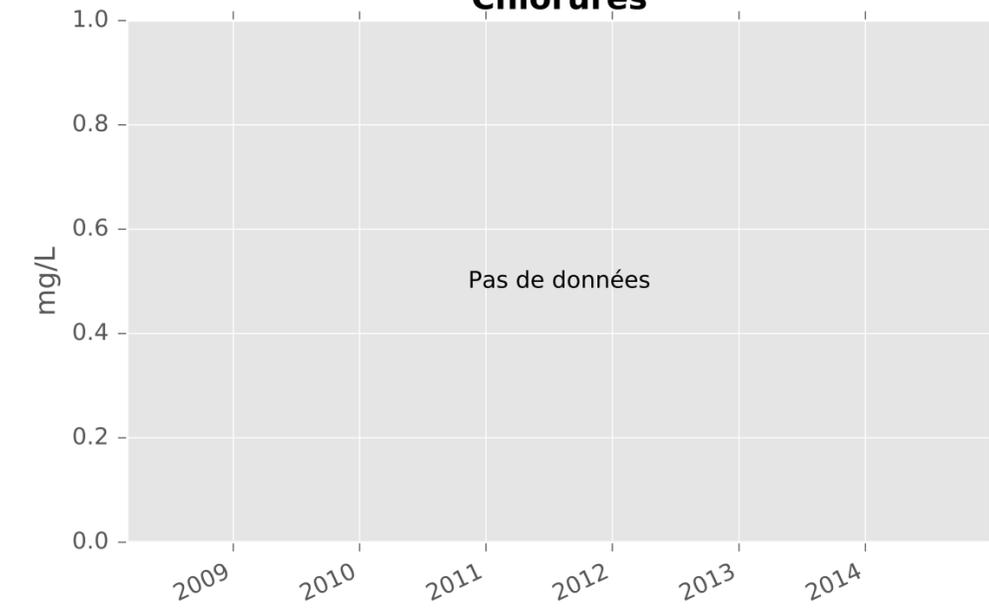
Conductivité



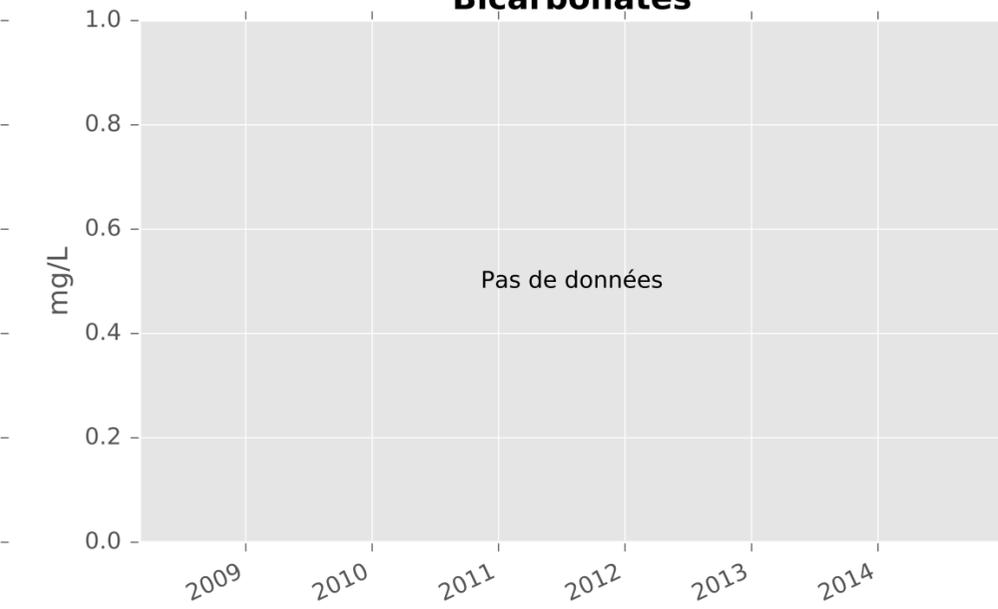
Sulfates



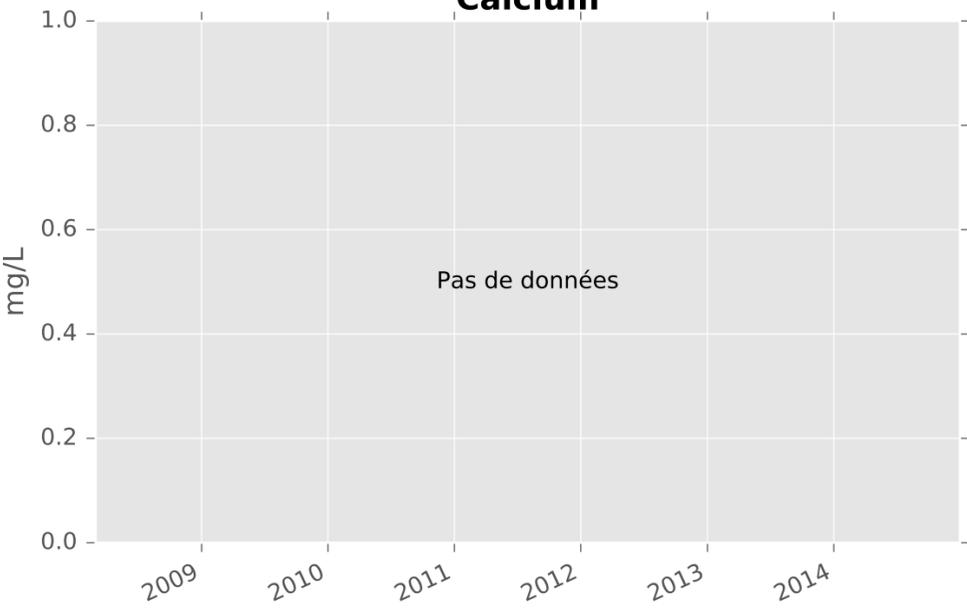
Chlorures



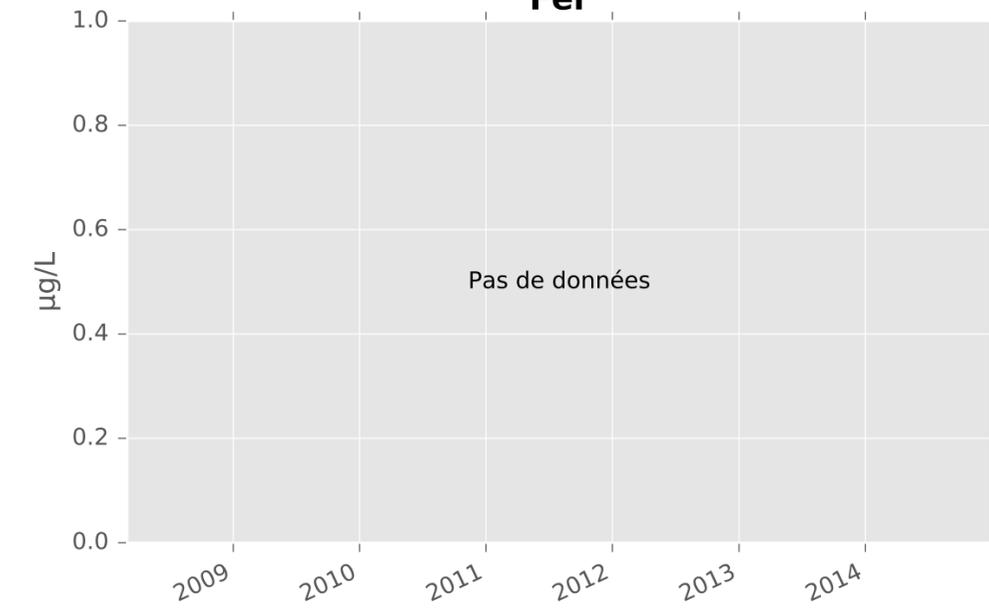
Bicarbonates



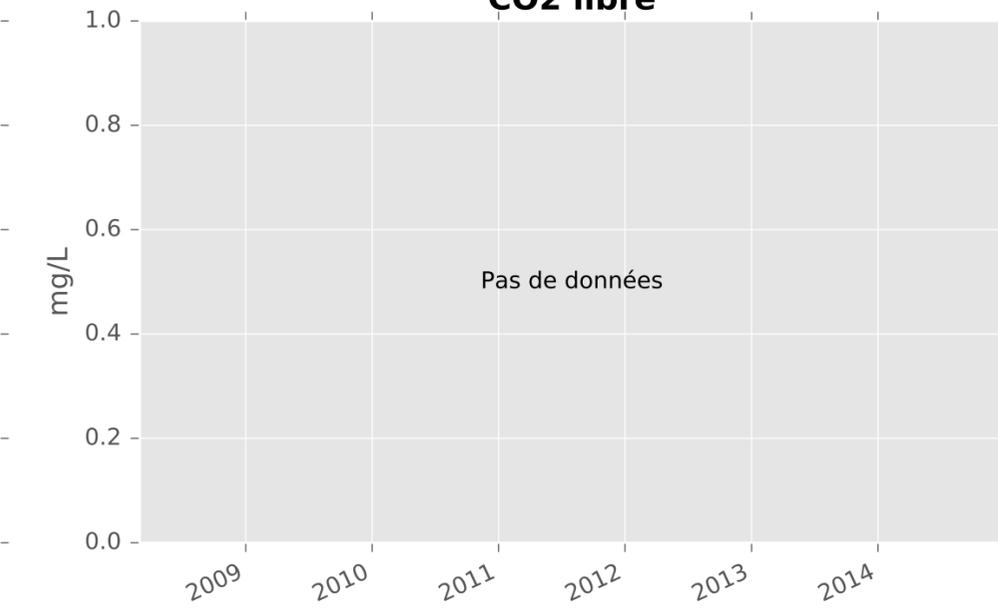
Calcium



Fer

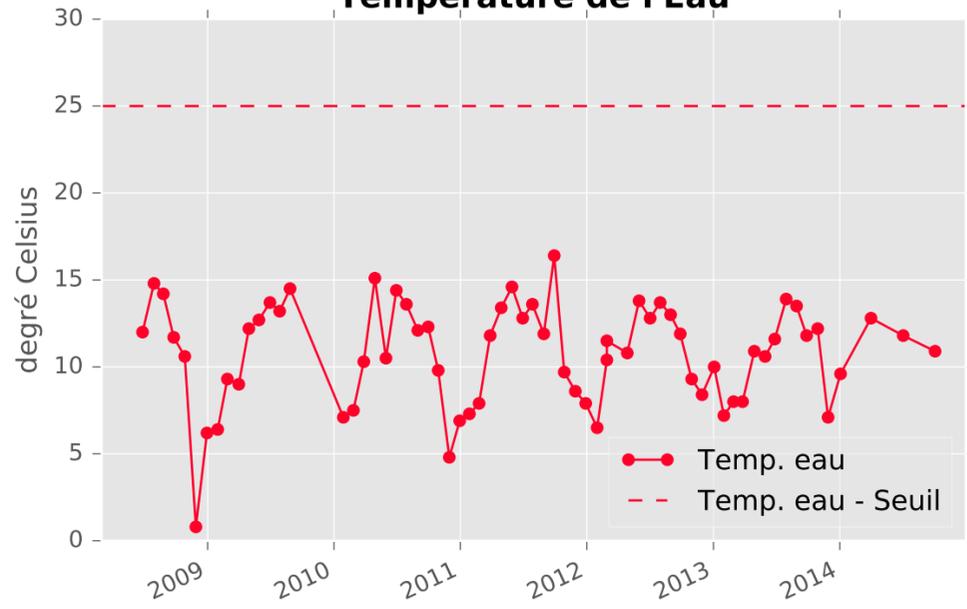


CO2 libre

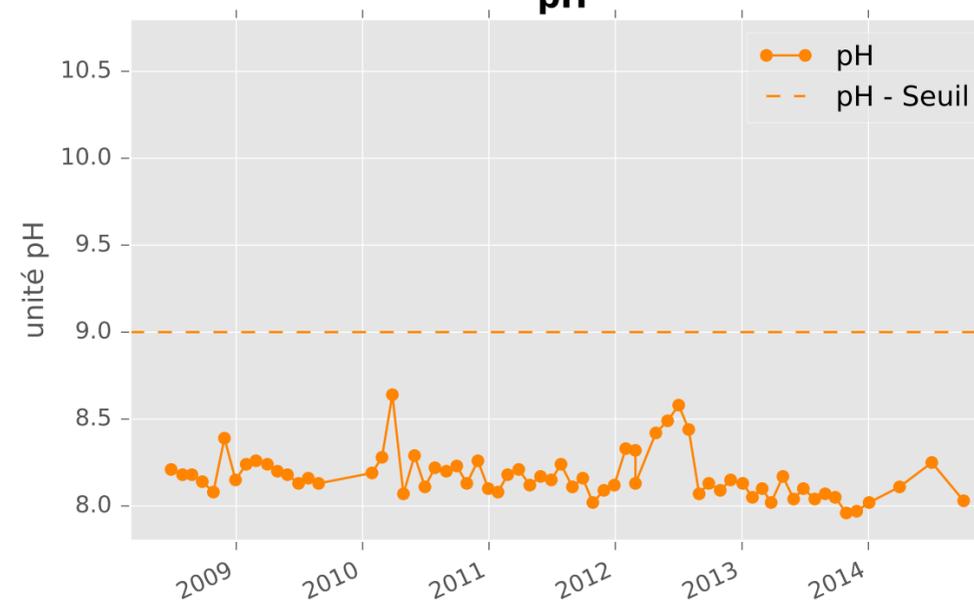


RESERVOIR MINIER et CALCAIRES DU DOGGER CENTRE - 01373X0176 - C21 - Conroy station hydrométrique

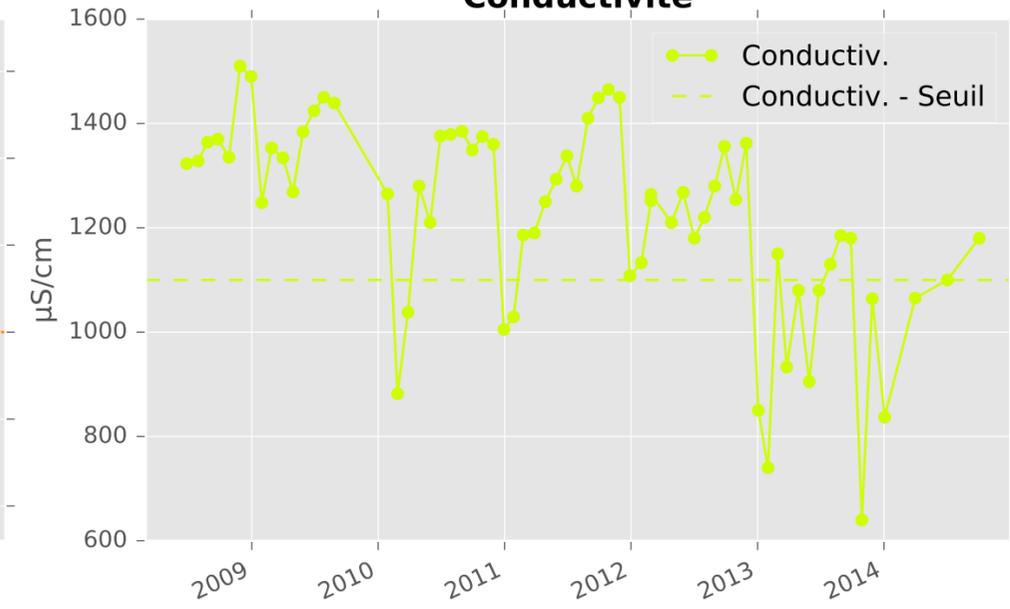
Température de l'Eau



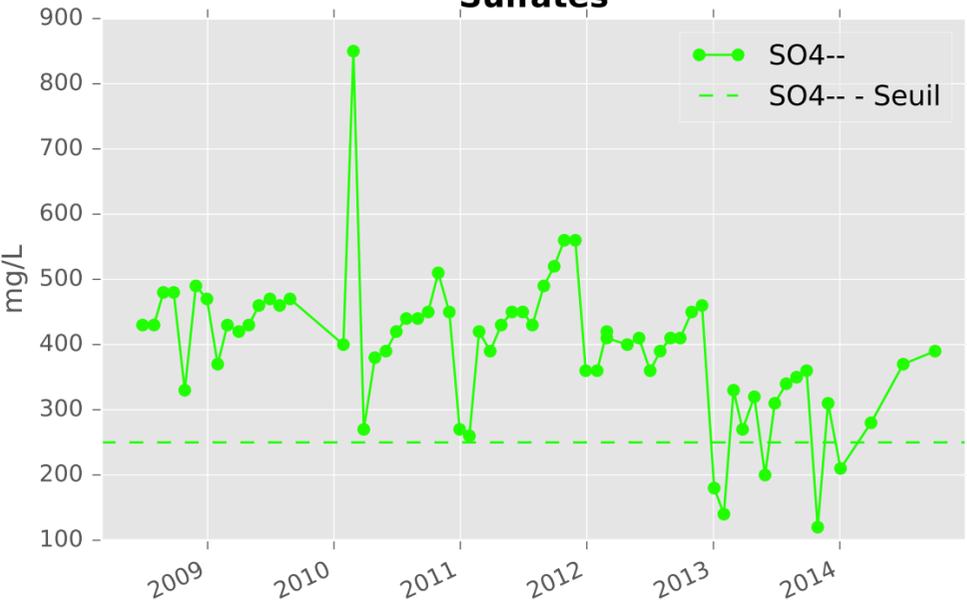
pH



Conductivité



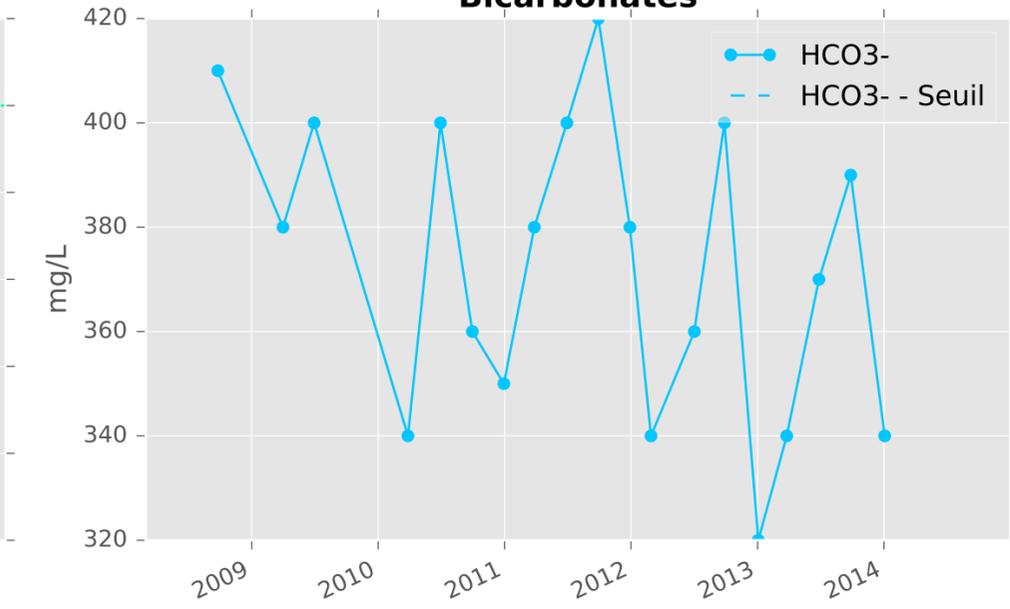
Sulfates



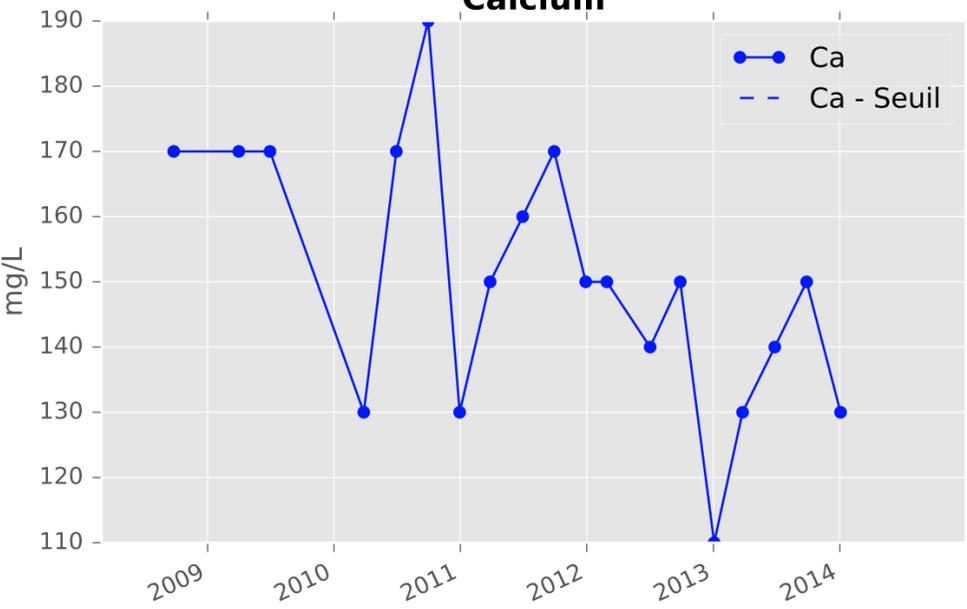
Chlorures



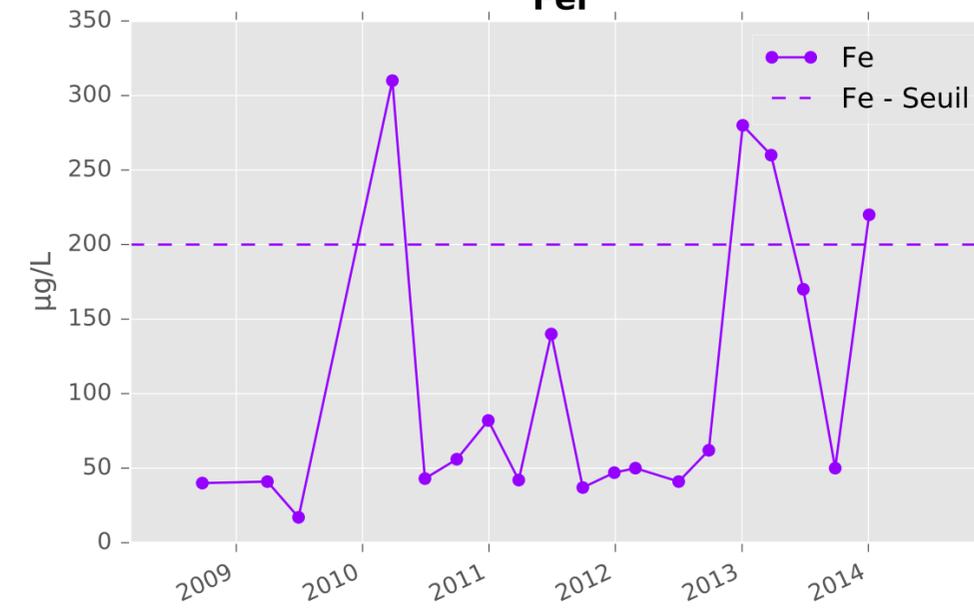
Bicarbonates



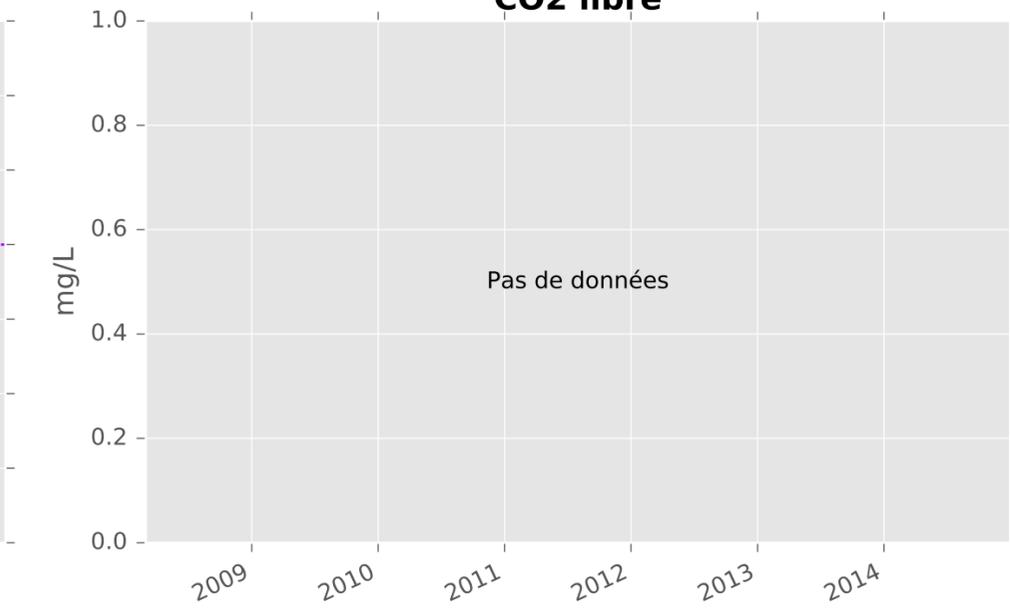
Calcium



Fer

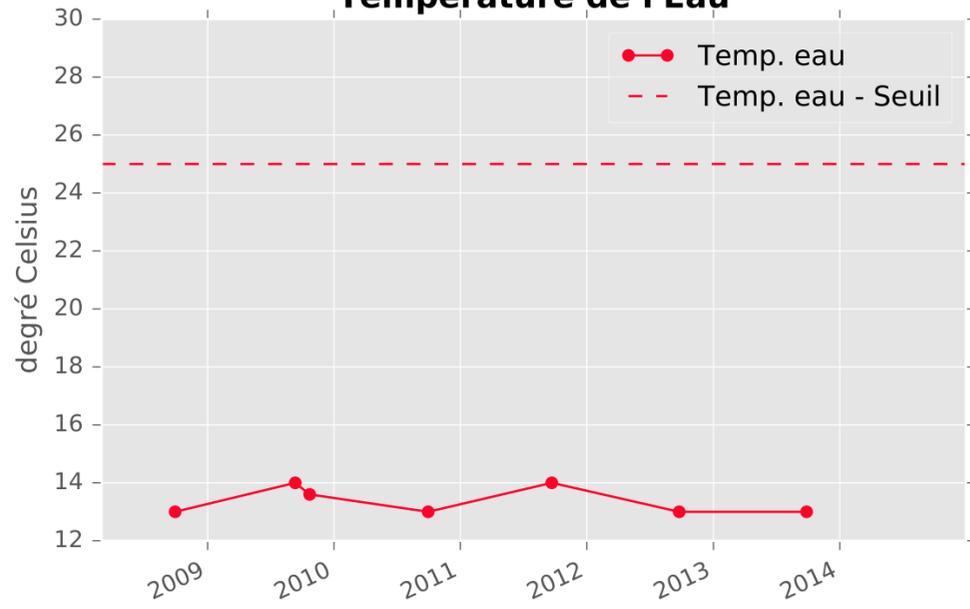


CO2 libre

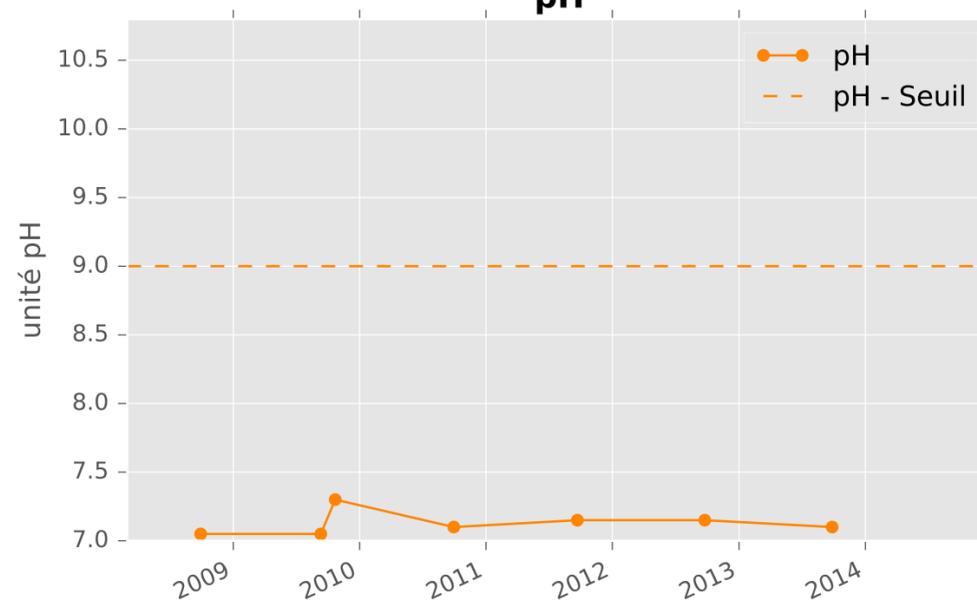


RESERVOIR MINIER et CALCAIRES DU DOGGER SUD - 01377X0211 - S14 - Piézomètre M1 Paradis aval

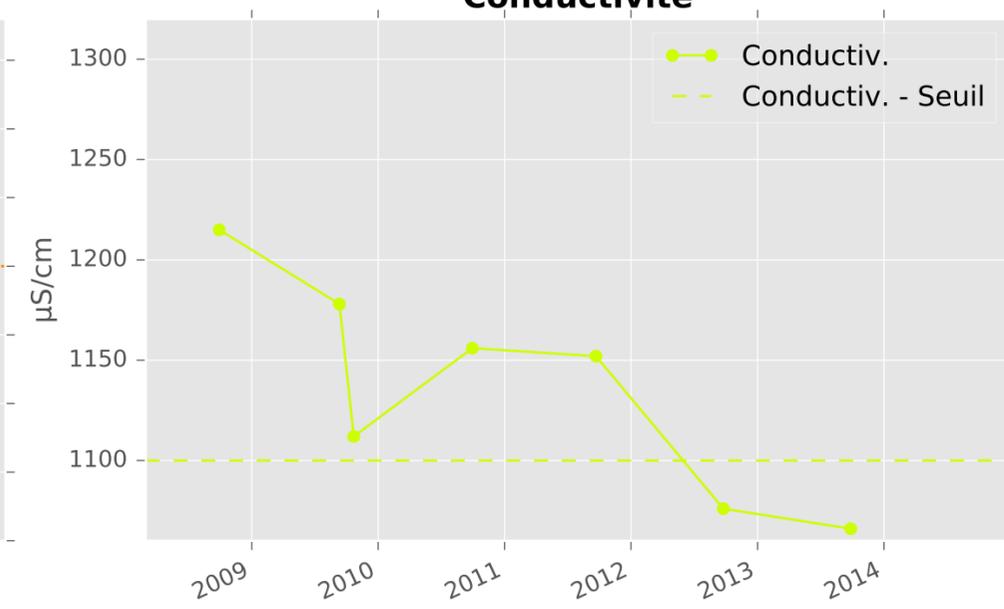
Température de l'Eau



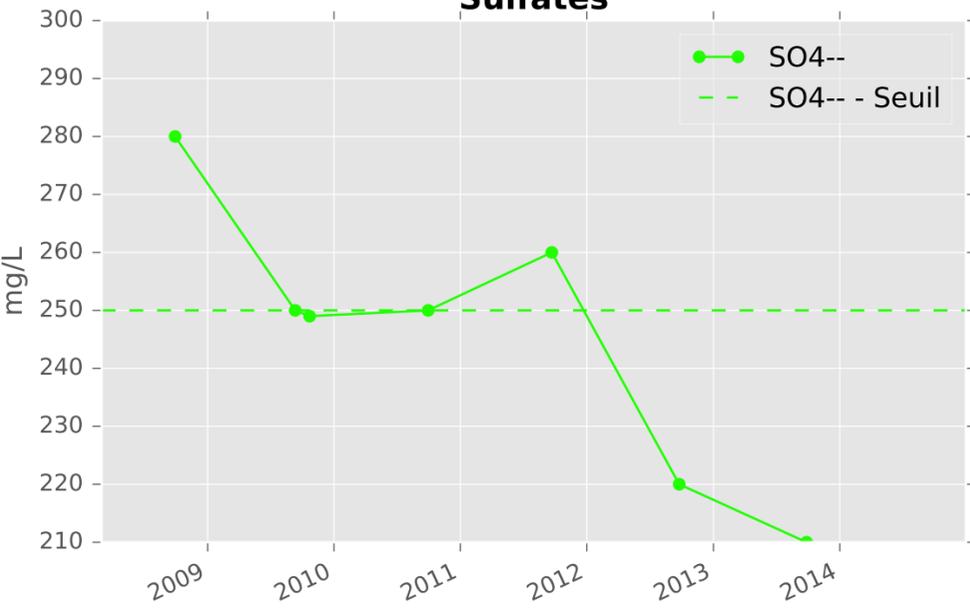
pH



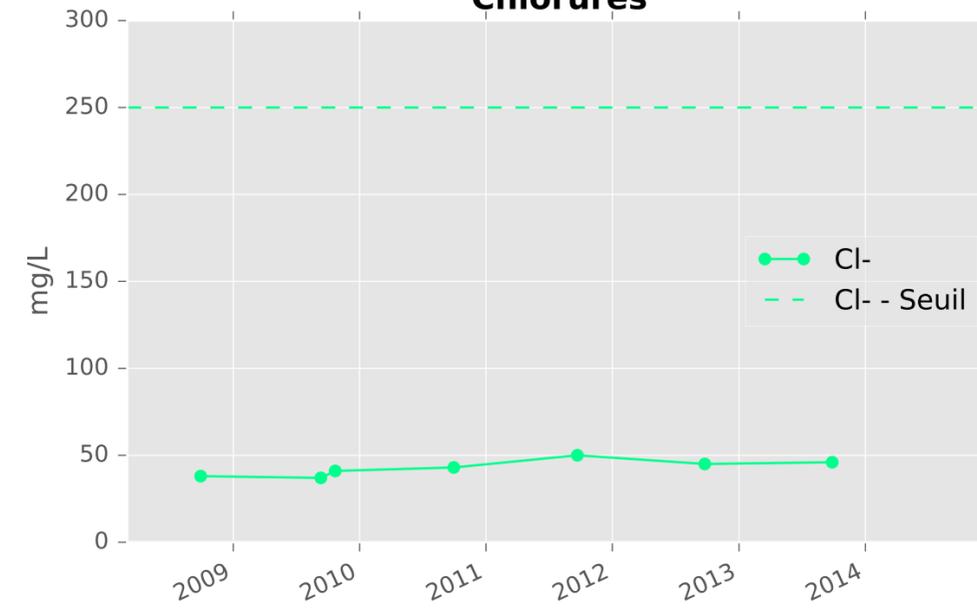
Conductivité



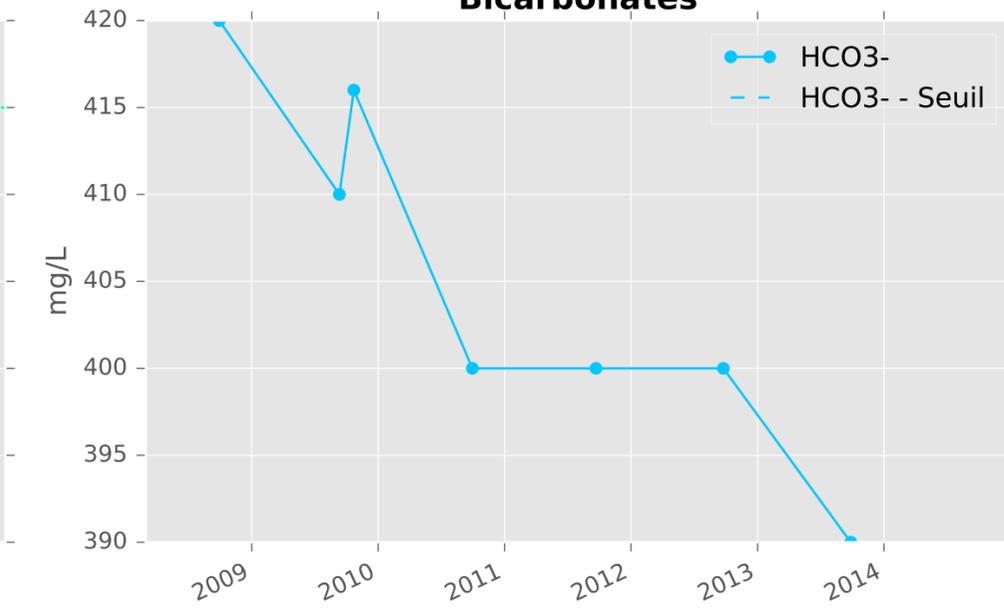
Sulfates



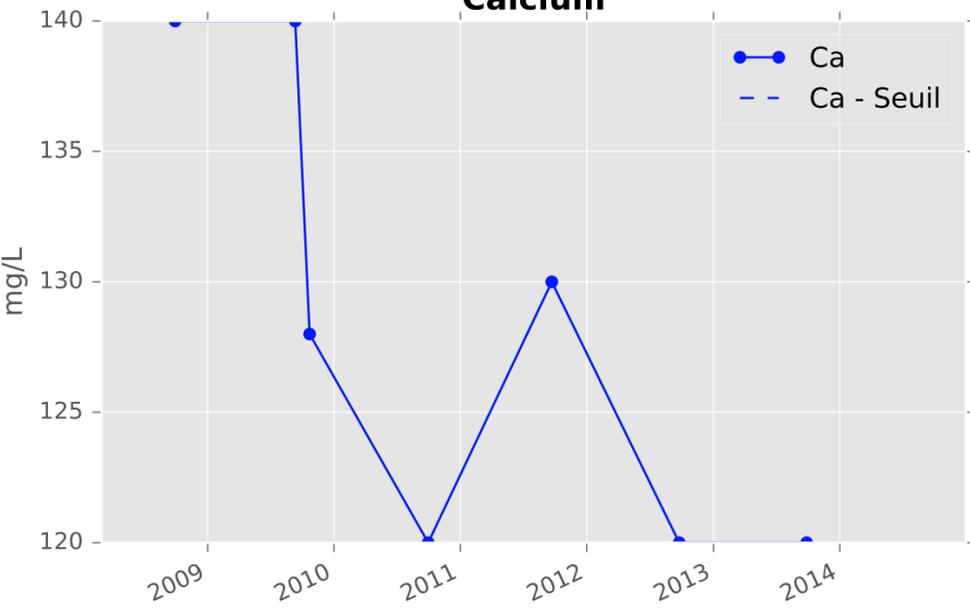
Chlorures



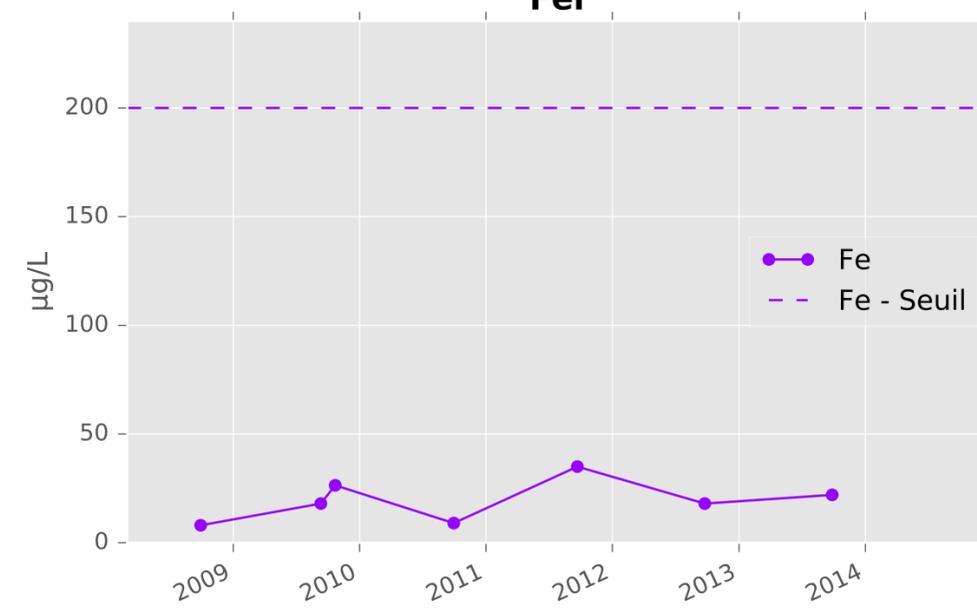
Bicarbonates



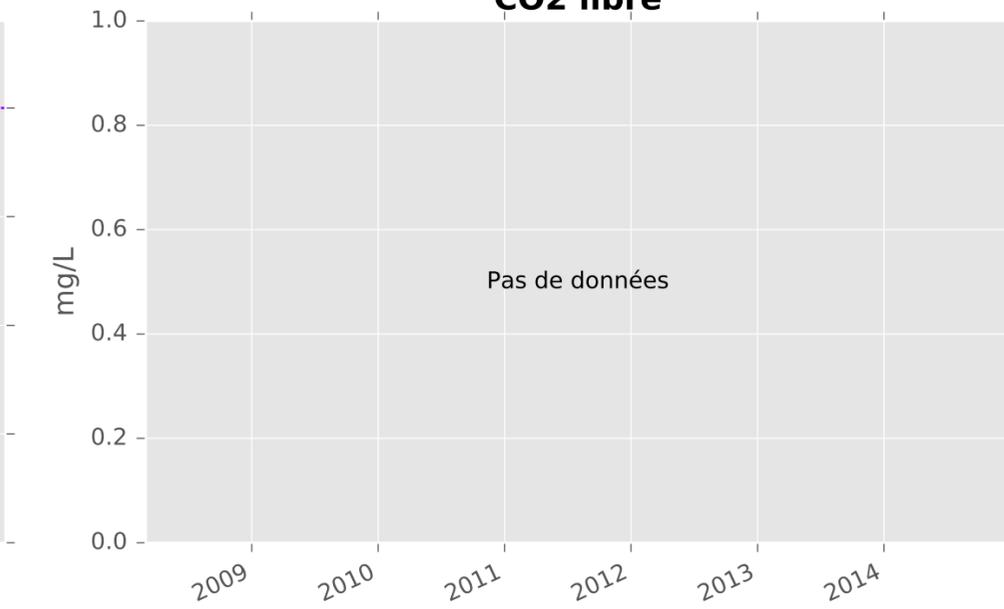
Calcium



Fer



CO2 libre



Annexe 4 : Calcul du potentiel géothermique intrinsèque du bassin ferrifère lorrain

Cette annexe 4 contient 1 tableau, 1 note et 7 cartes :

- le tableau de croisement des grilles élémentaires regroupées par maille 500 m x 500 m,
- une note d'accompagnement de la grille cartographique du potentiel géothermique, décrivant la table attributaire du fichier numérique,
- la grille du potentiel géothermique calculée à la maille de 500 x 500 m grâce au tableau de croisement et superposée aux zones urbanisées,
- la grille du potentiel géothermique calculée à la maille de 500 x 500 m grâce au tableau de croisement et superposée aux zones urbanisées et aux zonages réglementaires « géothermie de minime importance » et « périmètres de protection des captages d'eau potable »,
- la grille à la maille de 500 x 500 m des zonages réglementaires « géothermie de minime importance » et « périmètres de protection des captages d'eau potable ».
- la grille regroupée à la maille 500 x 500 m du type de milieu créé par les travaux miniers (cette grille intervient dans le calcul du potentiel géothermique),
- la grille regroupée à la maille 500 x 500 m de la profondeur du toit des travaux miniers (cette grille intervient dans le calcul du potentiel géothermique),
- la grille regroupée à la maille 500 x 500 m de la température théorique de l'eau dans les travaux miniers ennoyés (cette température est liée au gradient géothermique, cette grille intervient dans le calcul du potentiel géothermique),
- la grille regroupée à la maille 500 x 500 m de la profondeur du niveau de l'eau dans les ouvrages d'accès aux réservoirs miniers existants ou futurs (cette grille n'intervient pas dans le calcul du potentiel géothermique),

Nota bene : la grille de température théorique en fonction de la profondeur des travaux miniers (due au gradient géothermique) est retenue dans le calcul du potentiel géothermique, mais elle est associée à une incertitude sur la température réelle à attendre, qui dépend principalement du taux de renouvellement de l'eau au point de captage de la ressource géothermique.

*Cette incertitude a été évaluée sur la base des statistiques sur les écarts mesurés à la température théorique (cf. § 4.1.4) : ainsi, **la gamme de température possible en un point quelconque de la grille de température théorique doit être calculée avec la formule suivante :***

gamme de température possible = température théorique -1,7°C +/- 2,4 °C.

Note d'accompagnement de la grille cartographique du potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain

La grille cartographique du potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers du bassin ferrifère lorrain a été définie au pas de 500 m. Elle est directement calquée sur la grille réalisée dans le cadre de la cartographie nationale du zonage réglementaire de la géothermie de minime importance. Elle a été créée dans le système géodésique officiel en France, le réseau géodésique français 1993 (RGF93) et répond à la directive INSPIRE.

Cette grille (couche cartographique fournie sur le CD-ROM joint au format « .tab » de Mapinfo 8.5 et au format shapefile ou "fichier de formes" de Arcgis 10.2.2) fournit par unité spatiale (la maille de 500 m x 500 m) les informations concernant le potentiel géothermique. La table attributaire comprend, outre les champs obligatoires OBJECTID et Shape, les champs suivants (cf. l'extrait de la table attributaire ci-après) :

- **Maille** (entier long) : identifiant unique de chaque maille de 500 m x 500 m à l'échelle nationale ;
- **X_RGF93 et Y_RGF93** (entier long) : coordonnées de localisation (en mètres) du centre de chaque maille dans le système RGF93 ;
- **Z_NGF** (entier court) : altitude moyenne du sol dans la maille ; elle correspond à la moyenne des valeurs du MNT IGN au pas de 25 m sur chaque maille de 500 m x 500 m ;
- **Champs relatifs au critère de température dans le réservoir minier :**
 - o **Temp_min** (double) : température minimum théorique (°C)
 - o **Temp_max** (double) : température maximum théorique (°C)
 - o **Temp_moy** (double) : température moyenne théorique (°C)
 - o **Note_Temp** (entier court) : note attribuée à la température moyenne théorique
 - o **Pond_Temp** (entier court) : facteur de pondération attribué au critère température
 - o **Notf_Temp** (entier court) : note finale (note x facteur de pondération) attribuée à la température
- **Champs relatifs au critère de milieu lié au type de travaux miniers :**
 - o **Milieu** (texte 50 caractères) : type de milieu avec 3 valeurs possibles (« Vide (non effondré) », « Vide et poreux (mixte) » et « Poreux (effondré) »)
 - o **Acces** (texte 50 caractères) : S'il y a présence d'un accès existant au réservoir minier, la valeur est « Accès existant (galerie, puits) », sinon le champ est vide
 - o **Note_Milie** (entier court) : note attribuée au type de milieu
 - o **Pond_Milie** (entier court) : facteur de pondération attribué au critère milieu
 - o **Notf_Milie** (entier court) : note finale (note x facteur de pondération) attribuée au milieu

- **Champs relatifs au critère de profondeur d'accès à la ressource :**
 - **Prof_min** (entier court) : profondeur minimum d'accès à la ressource (m)
 - **Prof_max** (entier court) : profondeur maximum d'accès à la ressource (m)
 - **Prof_moy** (double) : profondeur moyenne d'accès à la ressource (m)
 - **Note_Prof** (entier court) : note attribuée à la profondeur moyenne
 - **Pond_Prof** (entier court) : facteur de pondération attribué au critère profondeur
 - **Notf_Prof** (entier court) : note finale (note x facteur de pondération) attribuée à la profondeur

- **Champs relatifs à la profondeur de l'eau (surface piézométrique) :**
 - **Pr_eaumin** (double) : profondeur minimum de l'eau (m)
 - **Pr_eamax** (double) : profondeur maximum de l'eau (m)
 - **Pr_eaumoy** (double) : profondeur moyenne de l'eau (m)

- **Exist_Eau** (entier court) : s'il y a présence d'eau (travaux miniers ennoyés), la valeur vaut 1, sinon le champ est vide

- **Champs relatifs au potentiel géothermique intrinsèque calculé :**
 - **Somme** (entier court) : valeur du potentiel géothermique intrinsèque (somme des notes pondérées des 3 critères)
 - **Classe** (entier court) : classe de potentiel géothermique (valeur de 1 à 6 ; 6 est la valeur du meilleur potentiel)

- **Champs relatifs aux ouvrages existants d'accès à l'eau des réservoirs miniers :**
 - **N_BFL** (texte 3 caractères) : code BFL des points d'accès au réservoir minier et des points d'accès aux petites réserves perchées hors ennoyage
 - **Indice_BSS** (texte 10 caractères) : indice BSS des points d'accès au réservoir minier et des points d'accès aux petites réserves perchées hors ennoyage
 - **Code_BSS** (texte 17 caractères) : code BSS des points d'accès au réservoir minier et des points d'accès aux petites réserves perchées hors ennoyage
 - **CodNat_BSS** (texte 10 caractères) : nouveau code national BSS des points d'accès au réservoir minier et des points d'accès aux petites réserves perchées hors ennoyage
 - **ProfeauOUV** (double) : profondeur d'eau mesurée en 2014 ou 2015 dans les ouvrages d'accès au réservoir minier (m)
 - **TypOuvrage** (texte 30 caractères) : type de l'ouvrage (puits de mine, point de débordement...)

Extrait de la table attributaire de la grille du potentiel géothermique

Grille_BF_500_500m_finale						
OBJECTID *	Shape *	Maille	X RGF93	Y RGF93	Z NGF	
854	Polygone	218360100	913238	6896738	239	
905	Polygone	218397700	907238	6897238	197	
906	Polygone	218397800	907738	6897238	200	
907	Polygone	218397900	908238	6897238	200	
908	Polygone	218398000	908738	6897238	201	

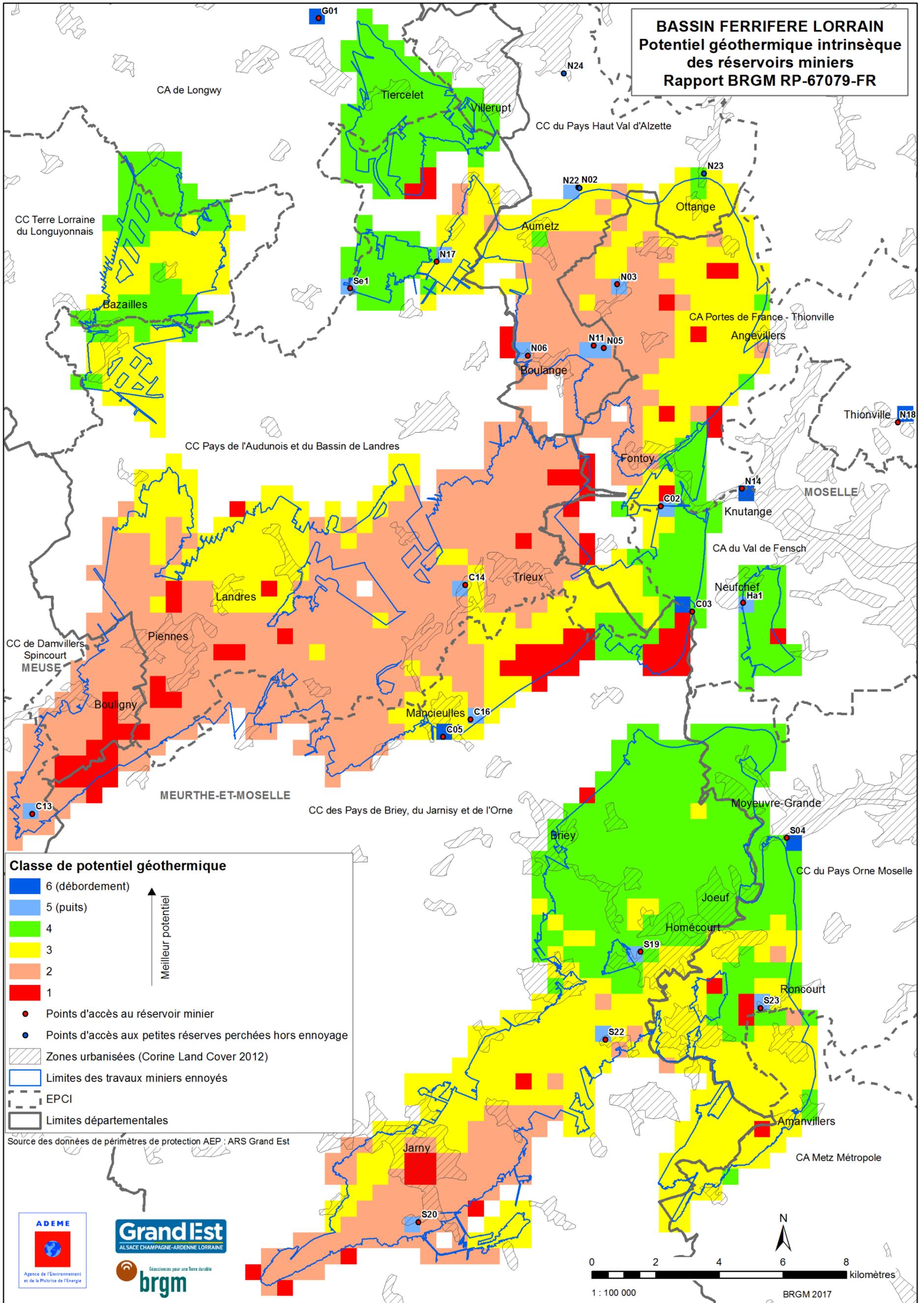
Temp min	Temp max	Temp moy	Note Temp	Pond Temp	Notf Temp
14,2053	15,0347	14,511488	4	1	4
13,7191	16,0929	13,982132	3	1	3
13,8335	16,4075	15,210951	4	1	4
15,3493	16,4075	15,889626	4	1	4
15,3493	16,2645	15,688611	4	1	4

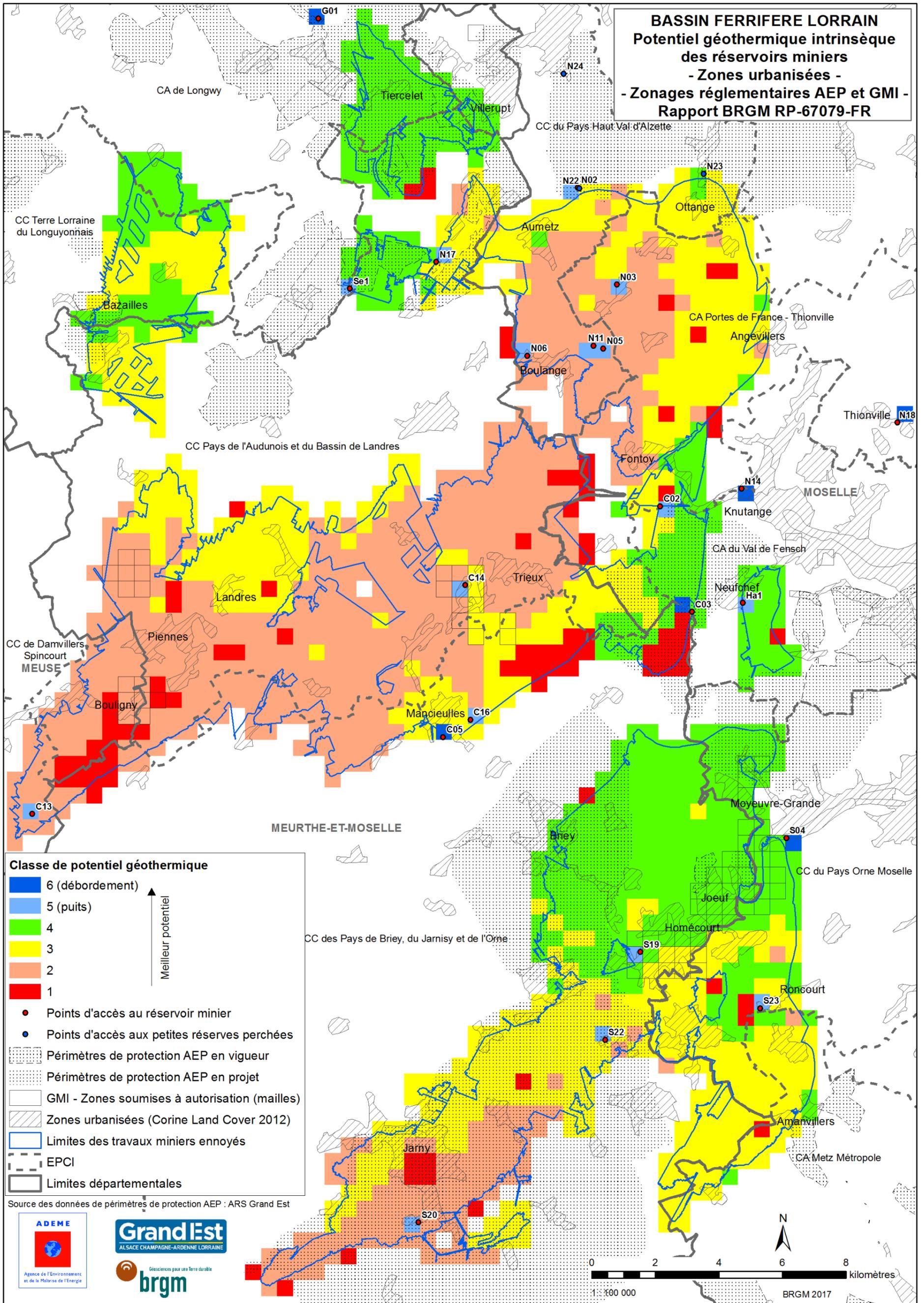
Milieu	Acces	Note Milie	Pond Milie	Notf Milie
Vide (non effondré)		4	1	4
Vide (non effondré)		4	1	4
Vide (non effondré)		4	1	4
Vide (non effondré)		4	1	4
Vide (non effondré)		4	1	4

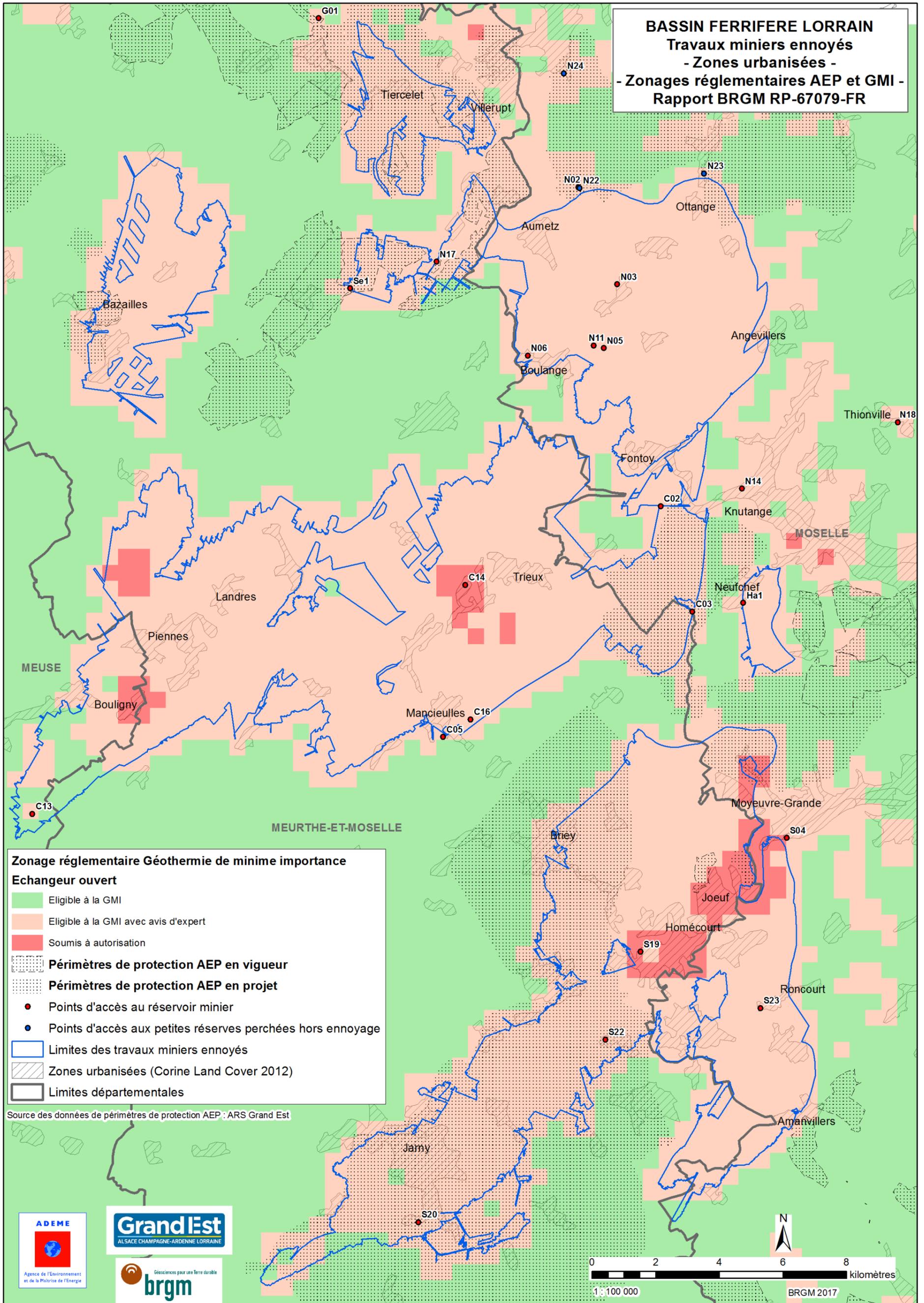
Prof min	Prof max	Prof moy	Note Prof	Pond Prof	Notf Prof
185	214	195,705888	2	3	6
168	251	177,196896	2	3	6
172	262	220,162608	1	3	3
225	262	243,892496	1	3	3
225	257	236,864016	1	3	3

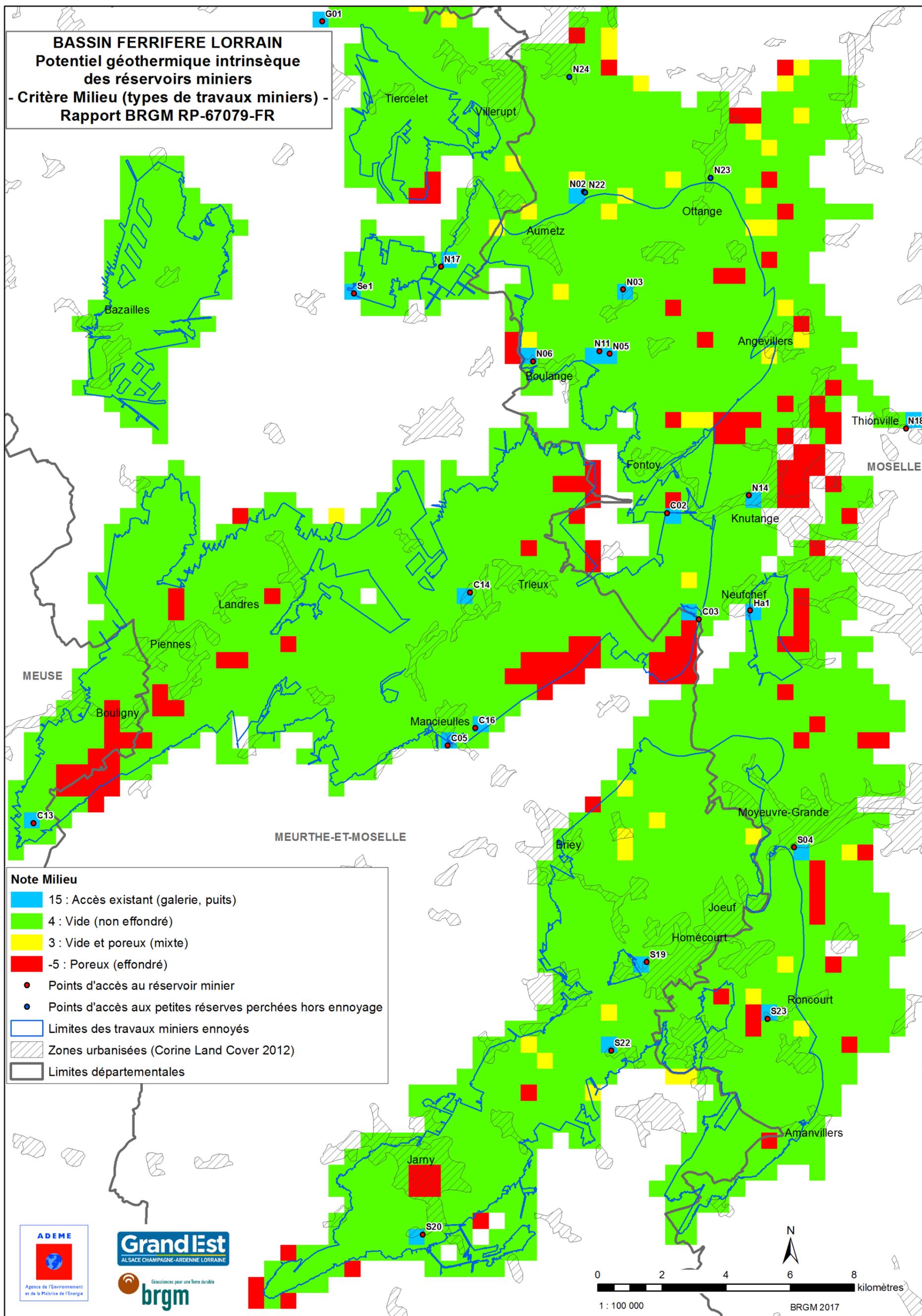
Pr eaumin	Pr eaumax	Pr eaumoy	Exist Eau	Somme	Classe
61,09	67,08	64,189996	1	14	3
23,09	32,09	29,494858	1	13	3
27,09	33,09	31,105	1	11	2
21,09	36,09	30,74	1	11	2
26,09	38,09	32,029998	1	11	2

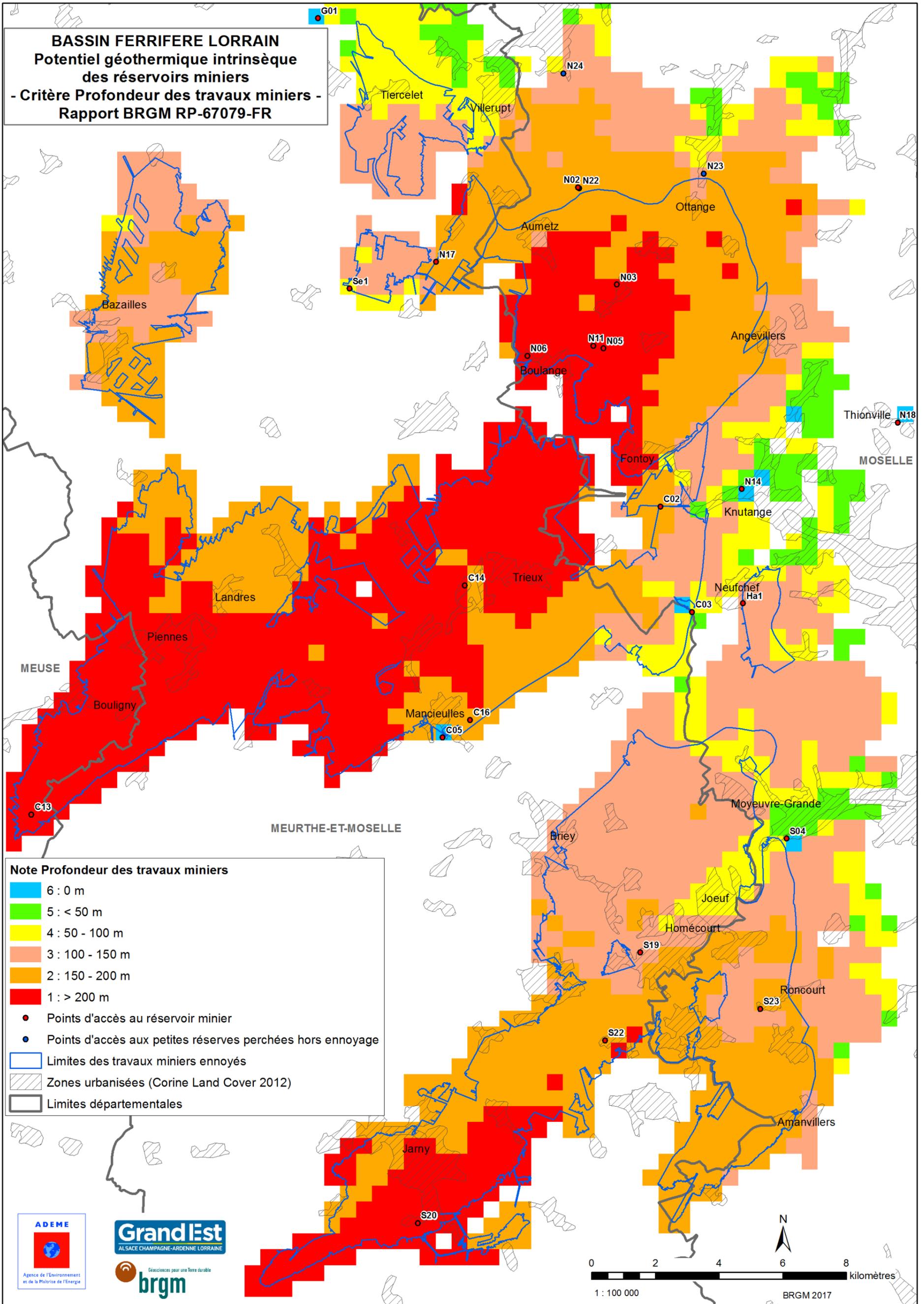
N BFL	Indice BSS	Code BSS	CodNat BSS	ProfeauOUV	TypOuvrage
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>

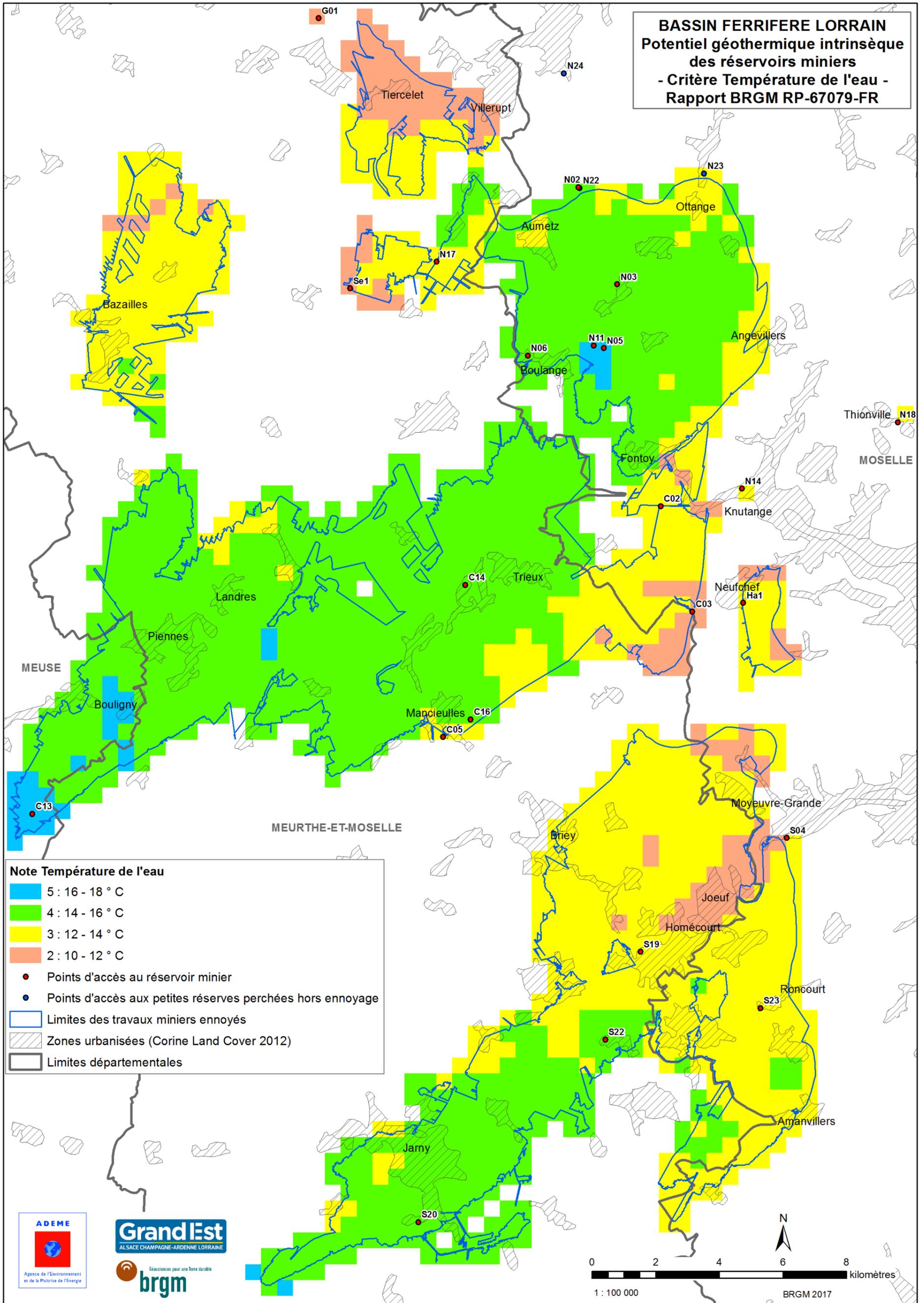


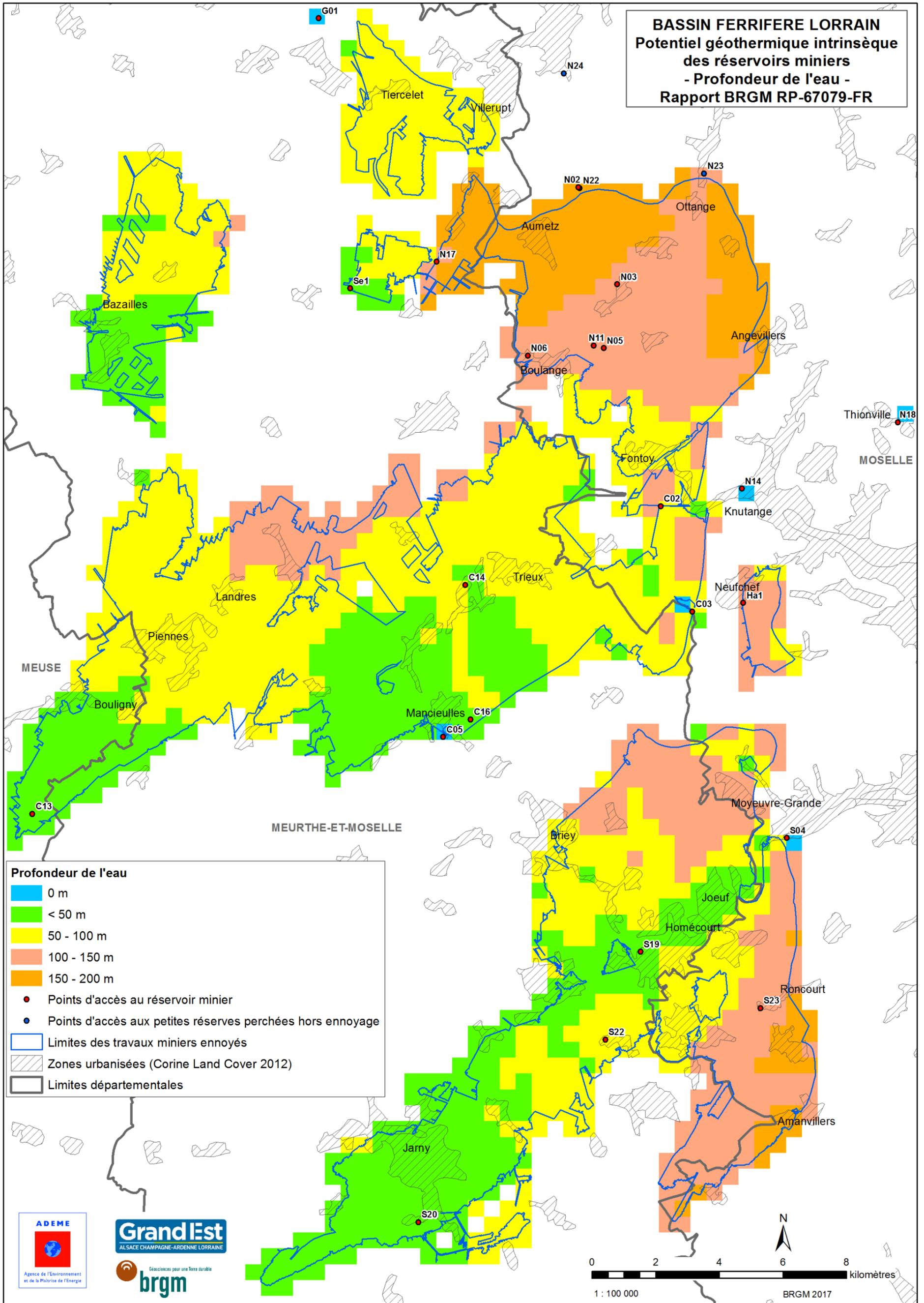












Annexe 5 et CD-ROM joint : Cartes et fiches synthétiques de présentation du potentiel géothermique pour les 10 collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés

Cette annexe 5 contient 10 cartes et 1 CD-ROM joint.

Pour chacune des 10 collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés (communautés d'agglomération ou communautés de communes) une carte du territoire de la collectivité présente :

- les classes de potentiel géothermique des réservoirs miniers accessibles sur le territoire,
- les points d'accès aux réservoirs miniers,
- les périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable (AEP) en vigueur et en projet,
- les zones soumises à autorisation dans le cadre de la géothermie de minime importance,
- les zones urbanisées,
- la limite d'ennoyage des travaux miniers.

Les 10 cartes sont présentées dans l'ordre alphabétique du nom des collectivités territoriales :

- CA Longwy
- CA Metz Métropole
- CA Thionville
- CA Val de Fensch
- CC Audunois
- CC Briey
- CC Damvillers Spincourt
- CC Longuyonnais
- CC Orne Moselle
- CC Pays-Haut Val d'Alzette

En complément, sur le CD-ROM joint au présent rapport, le lecteur trouvera 10 fiches synthétiques numériques au format PDF pour chacune des collectivités territoriales concernées par les réservoirs miniers ennoyés. Ces fiches contiennent la carte présentée ci-dessus et résument l'information présentée dans le présent rapport.

BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers

- CA de Longwy -

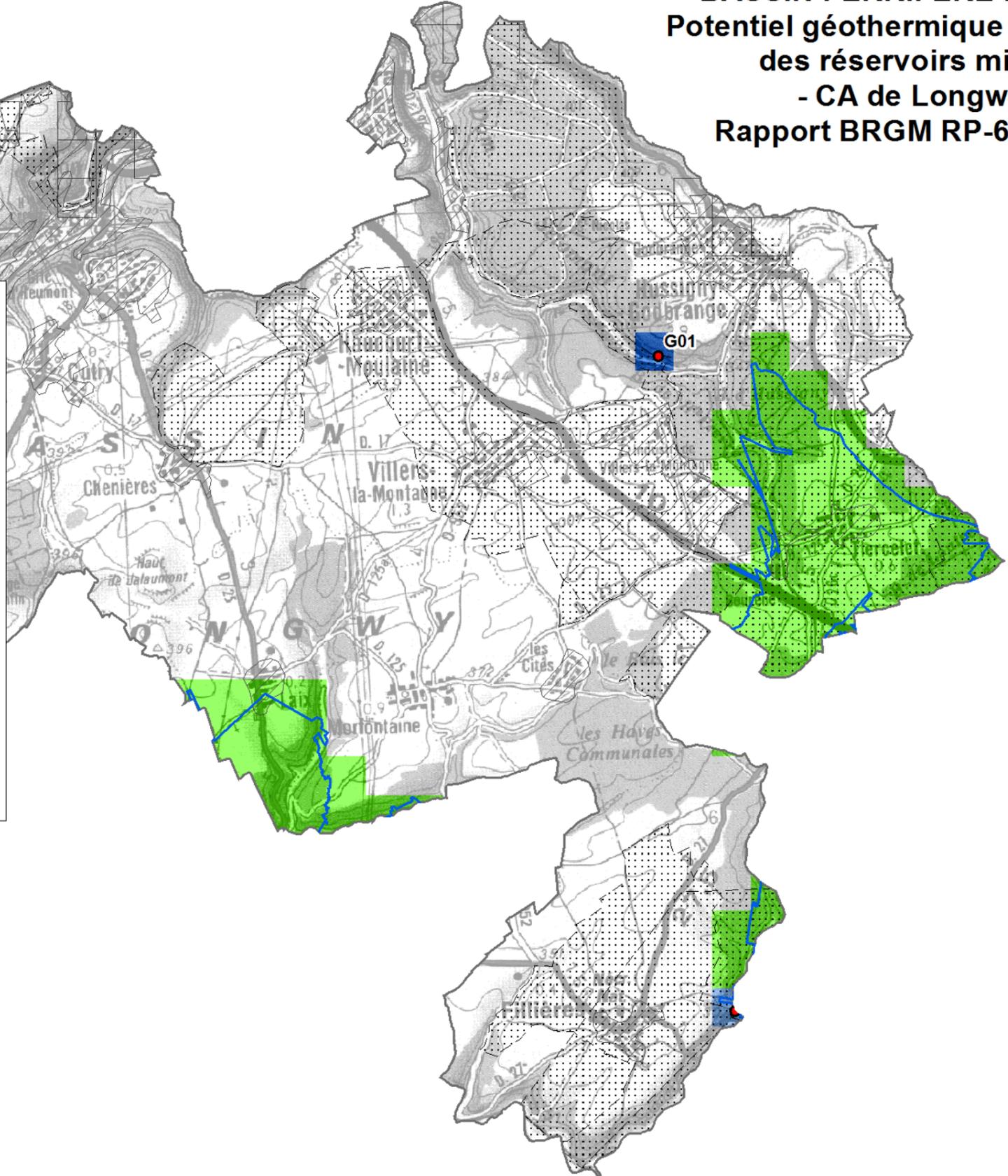
Rapport BRGM RP-67079-FR

Classe de potentiel géothermique

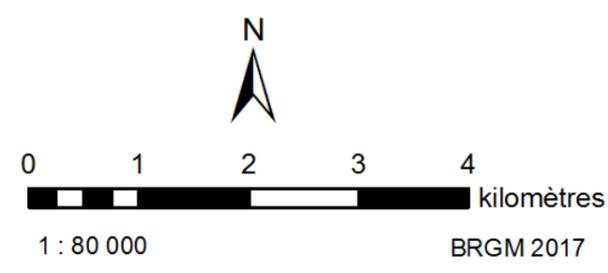
	6 (débordement)
	5 (puits)
	4
	3
	2
	1

↑ Meilleur potentiel

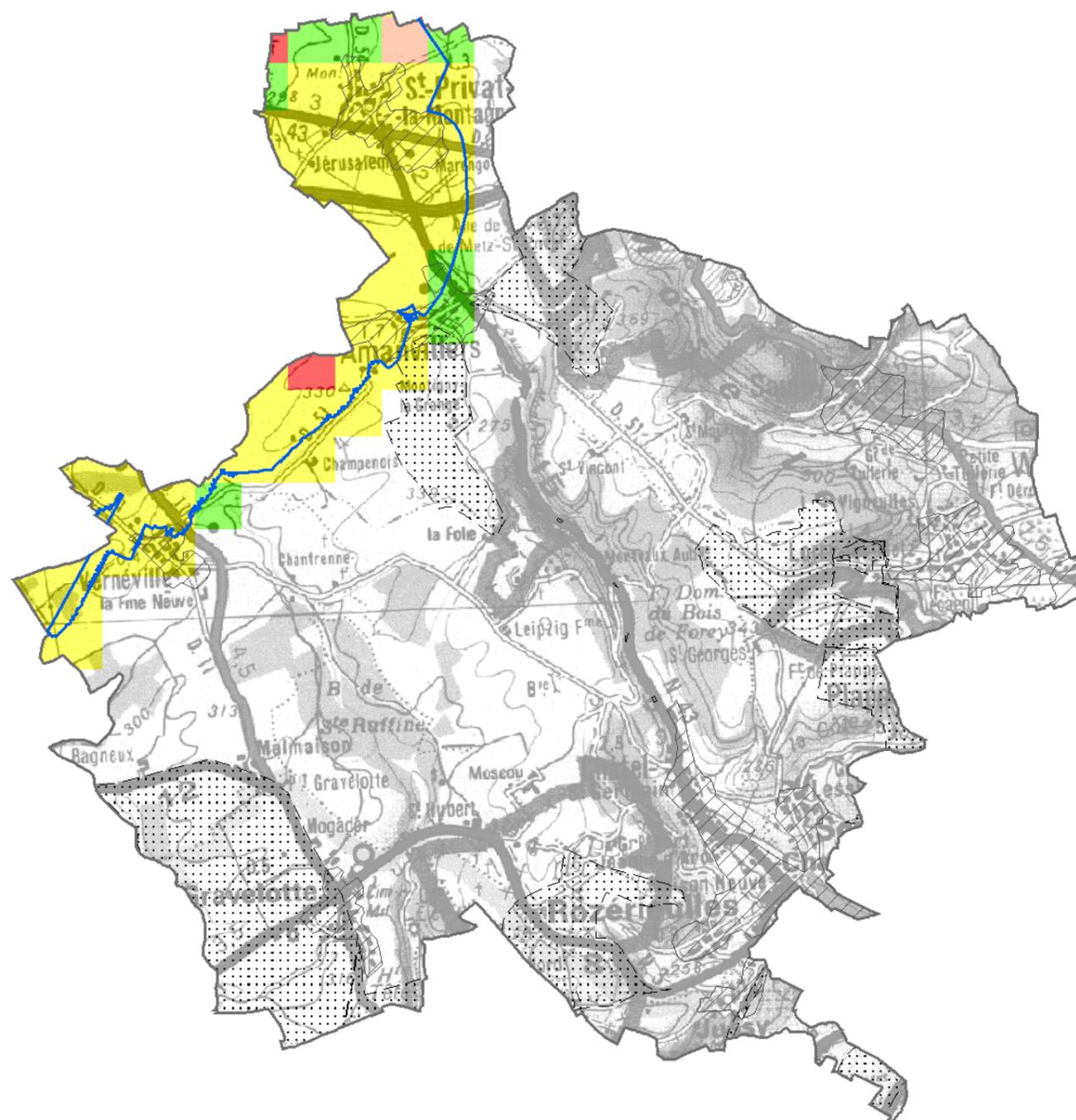
- Points d'accès au réservoir minier
- Périmètres de protection AEP en vigueur
- Périmètres de protection AEP en projet
- GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
- Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
- Limites des travaux miniers envoyés



Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



BASSIN FERRIFERE LORRAIN Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers - CA Metz Métropole - Rapport BRGM RP-67079-FR



Classe de potentiel géothermique

- 6 (débordement)
- 5 (puits)
- 4
- 3
- 2
- 1

● Points d'accès au réservoir minier

Périmètres de protection AEP en vigueur

Périmètres de protection AEP en projet

GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)

Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)

Limites des travaux miniers envoyés

↑
Meilleur potentiel

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017

BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers

- CA Portes de France - Thionville -
Rapport BRGM RP-67079-FR

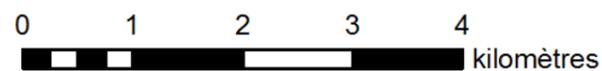
Classe de potentiel géothermique

-  6 (débordement)
-  5 (puits)
-  4
-  3
-  2
-  1

↑
Meilleur potentiel

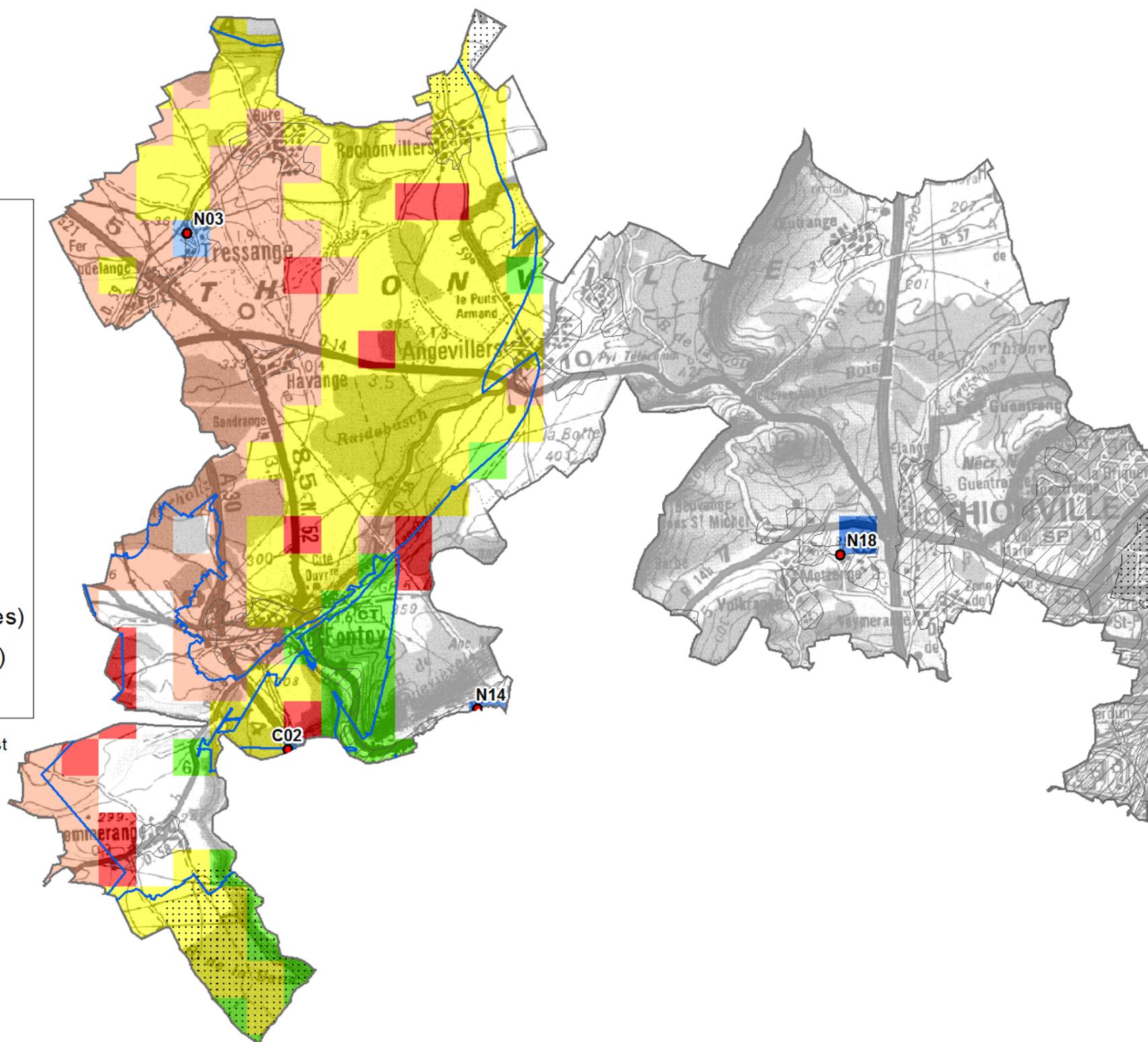
-  Points d'accès au réservoir minier
-  Périmètres de protection AEP en vigueur
-  Périmètres de protection AEP en projet
-  GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
-  Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
-  Limites des travaux miniers envoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017



BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers - CA du Val de Fensch - Rapport BRGM RP-67079-FR

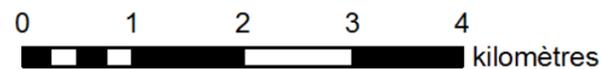
Classe de potentiel géothermique

- 6 (débordement)
- 5 (puits)
- 4
- 3
- 2
- 1

↑
Meilleur potentiel

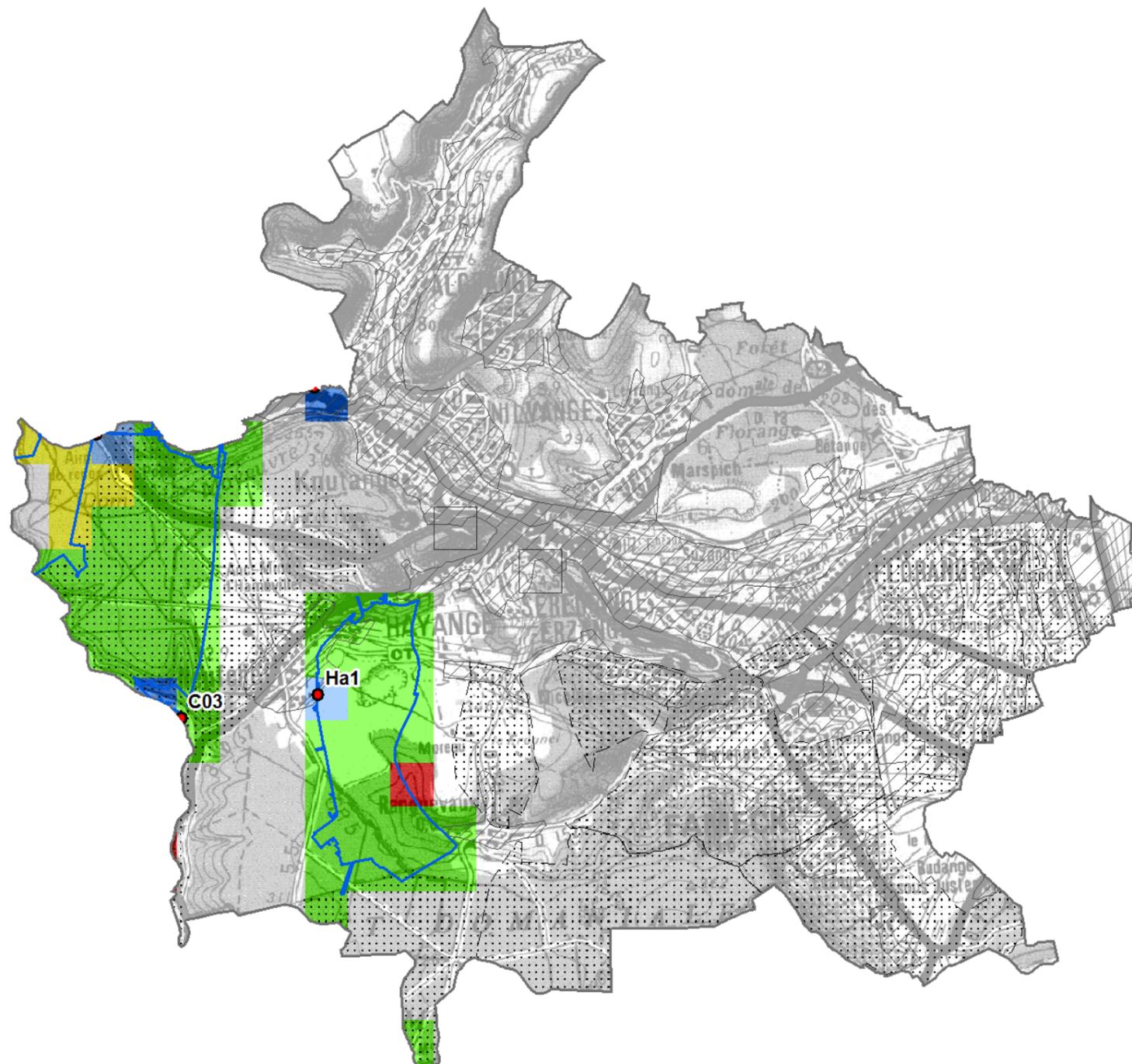
- Points d'accès au réservoir minier
- Périmètres de protection AEP en vigueur
- Périmètres de protection AEP en projet
- GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
- Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
- Limites des travaux miniers envoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est

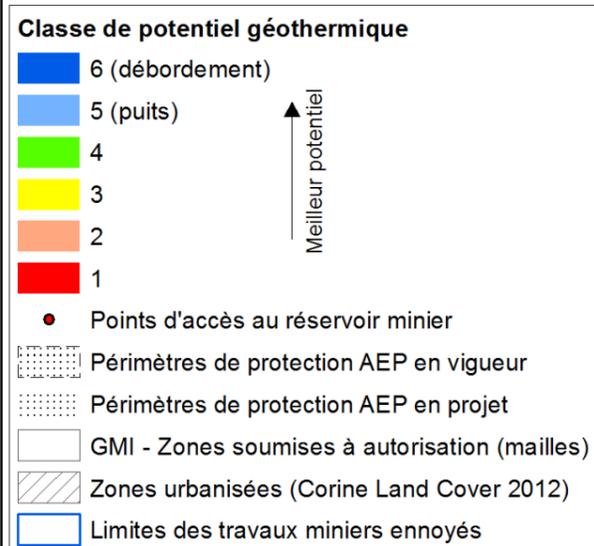


1 : 80 000

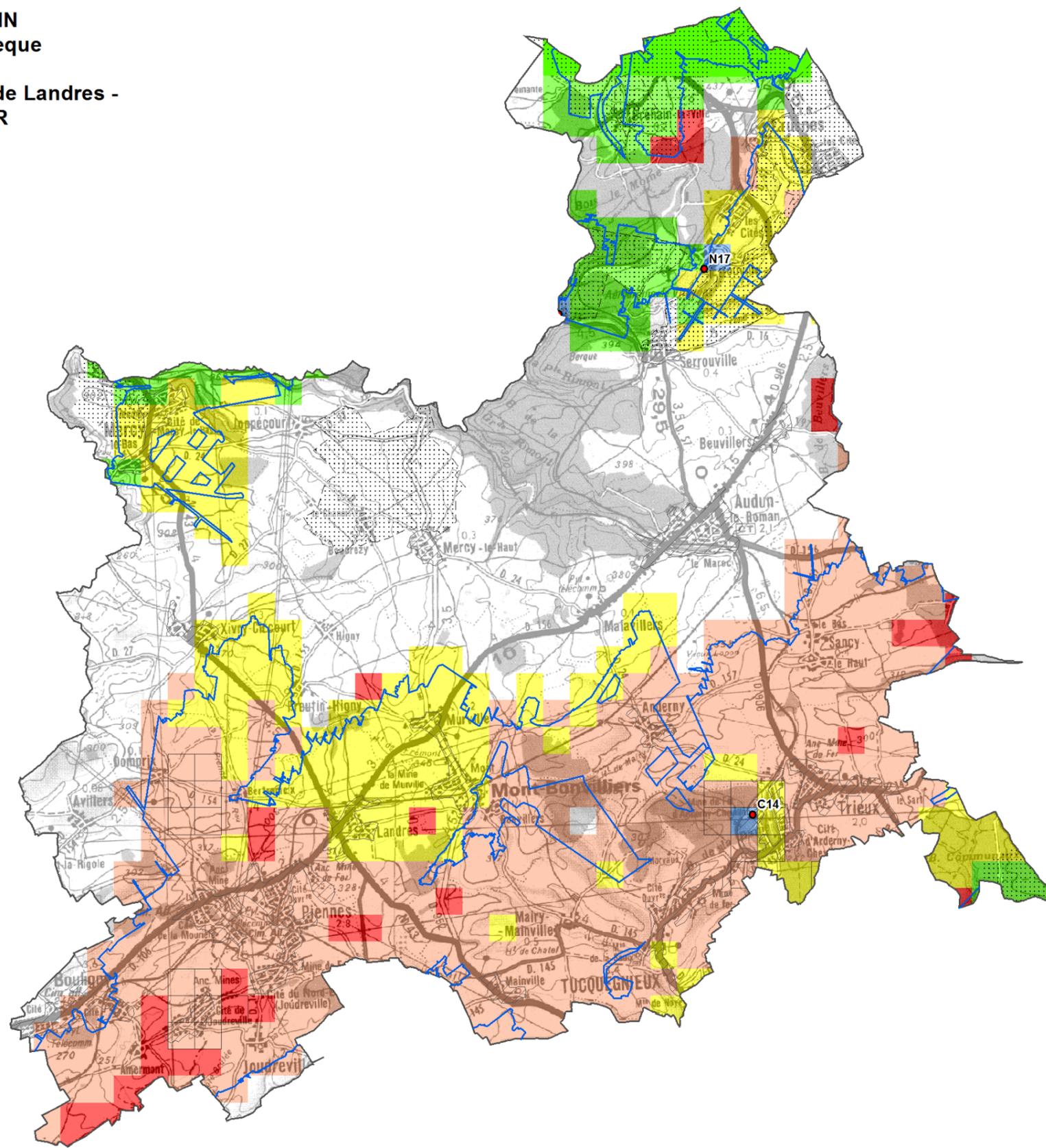
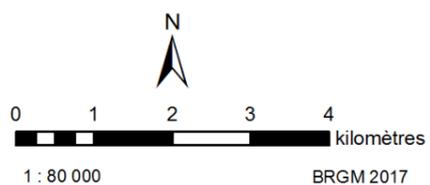
BRGM 2017



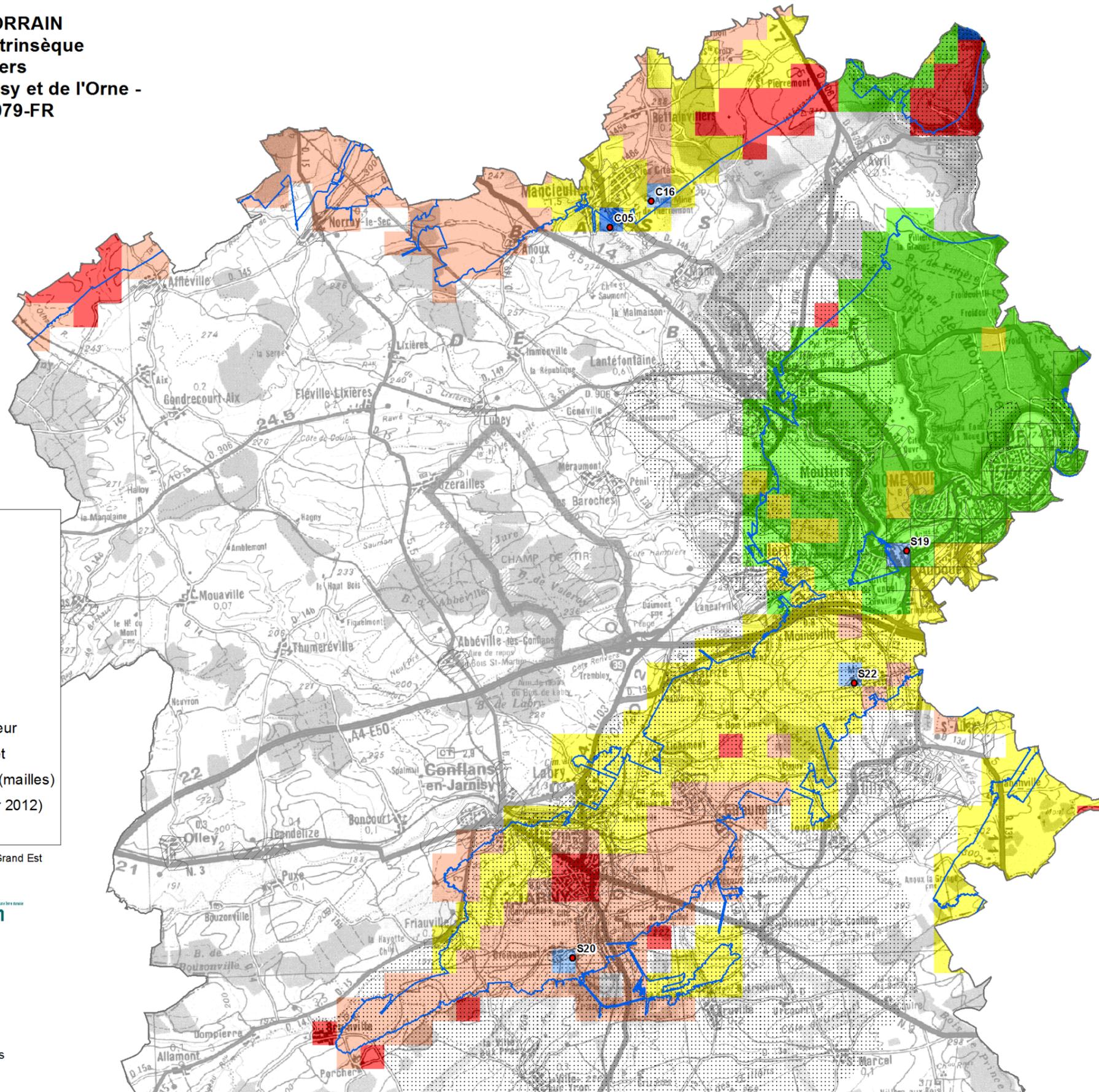
BASSIN FERRIFERE LORRAIN
Potentiel géothermique intrinsèque
des réservoirs miniers
 - CC Pays de l'Audunois et du Bassin de Landres -
 Rapport BRGM RP-67079-FR



Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



BASSIN FERRIFERE LORRAIN
Potentiel géothermique intrinsèque
des réservoirs miniers
 - CC des Pays de Briey, du Jarnisy et de l'Orne -
 Rapport BRGM RP-67079-FR



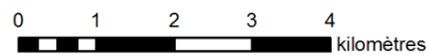
Classe de potentiel géothermique

- 6 (débordement)
- 5 (puits)
- 4
- 3
- 2
- 1

↑
Meilleur potentiel

- Points d'accès au réservoir minier
- ▨ Périmètres de protection AEP en vigueur
- ▨ Périmètres de protection AEP en projet
- ▨ GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
- ▨ Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
- ▭ Limites des travaux miniers envoyés

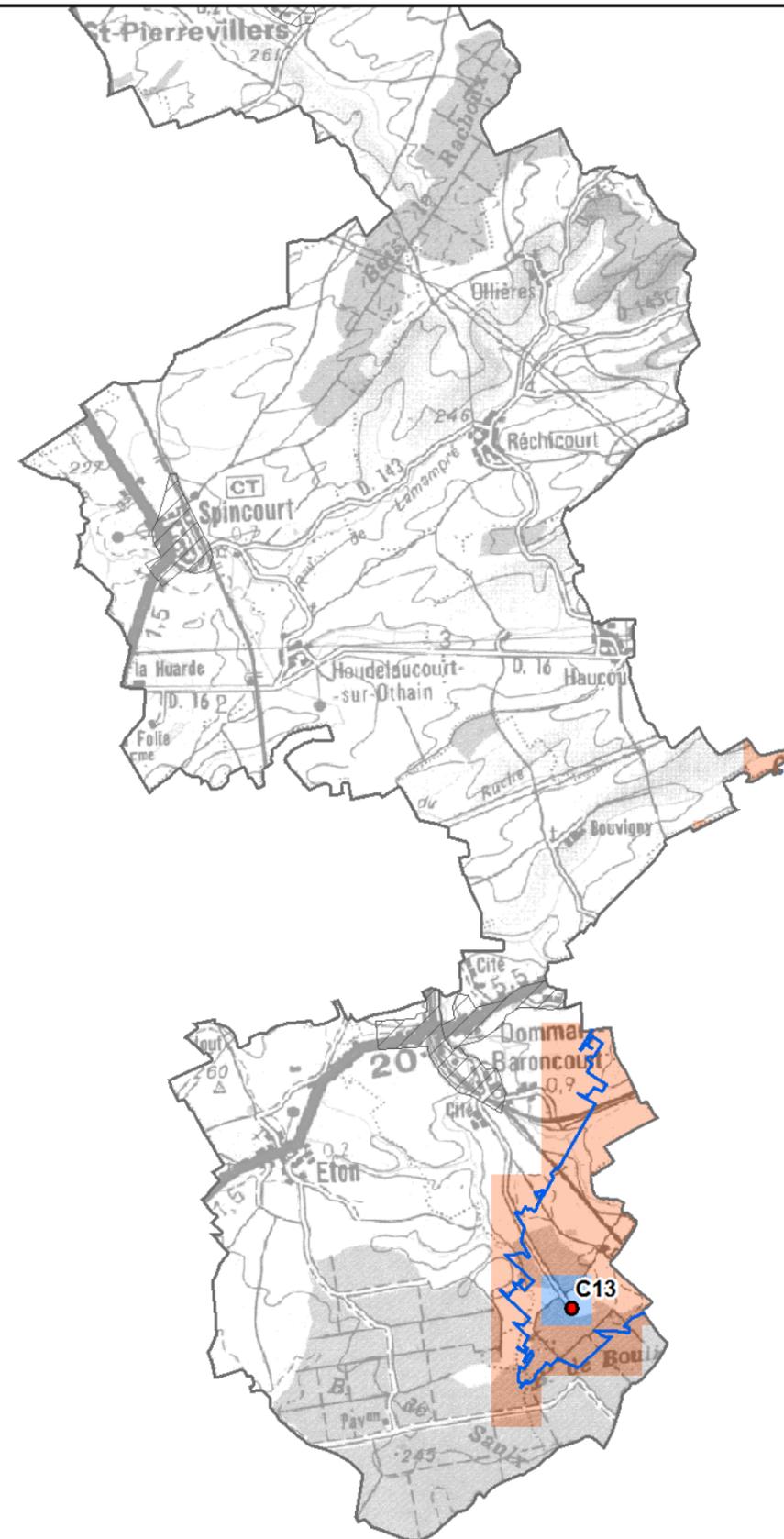
Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017

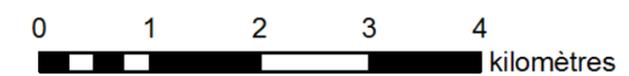
BASSIN FERRIFERE LORRAIN Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers - CC de Damvillers Spincourt - Rapport BRGM RP-67079-FR



Classe de potentiel géothermique

- 6 (débordement)
 - 5 (puits)
 - 4
 - 3
 - 2
 - 1
- ↑
Meilleur potentiel
- Points d'accès au réservoir minier
 - Périmètres de protection AEP en vigueur
 - Périmètres de protection AEP en projet
 - GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
 - Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
 - Limites des travaux miniers envoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017

BASSIN FERRIFERE LORRAIN
Potentiel géothermique intrinsèque
des réservoirs miniers
- CC Terre Lorraine du Longuyonnais -
Rapport BRGM RP-67079-FR

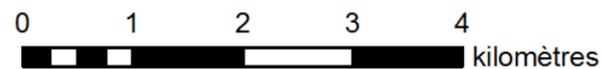
Classe de potentiel géothermique

-  6 (débordement)
-  5 (puits)
-  4
-  3
-  2
-  1

↑
Meilleur potentiel

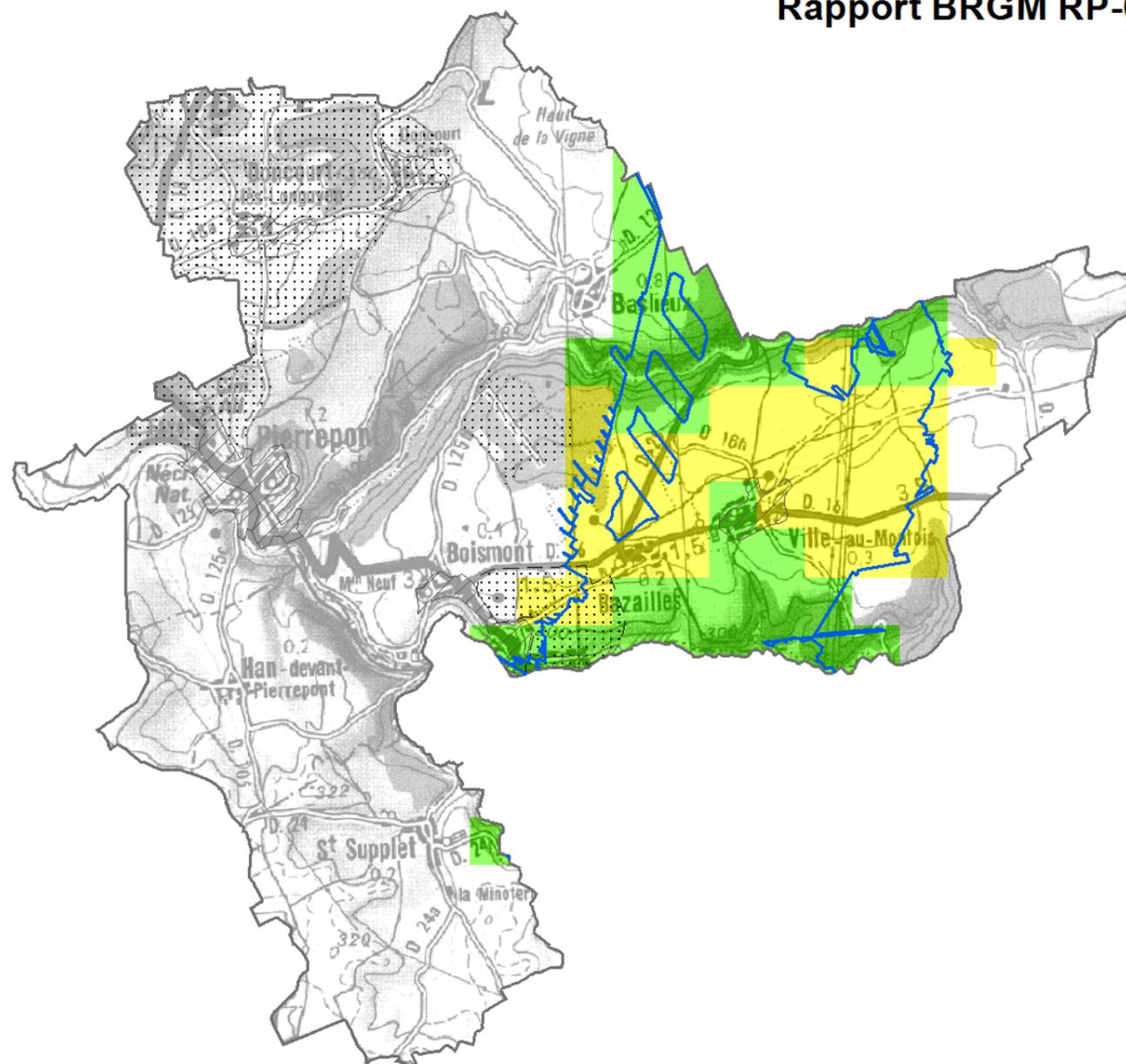
-  Points d'accès au réservoir minier
-  Périmètres de protection AEP en vigueur
-  Périmètres de protection AEP en projet
-  GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
-  Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
-  Limites des travaux miniers envoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017



BASSIN FERRIFERE LORRAIN

Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers

- CC du Pays Orne Moselle -
Rapport BRGM RP-67079-FR

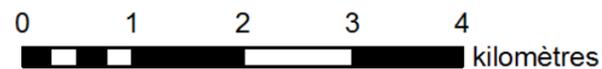
Classe de potentiel géothermique

- 6 (débordement)
- 5 (puits)
- 4
- 3
- 2
- 1

↑
Meilleur potentiel

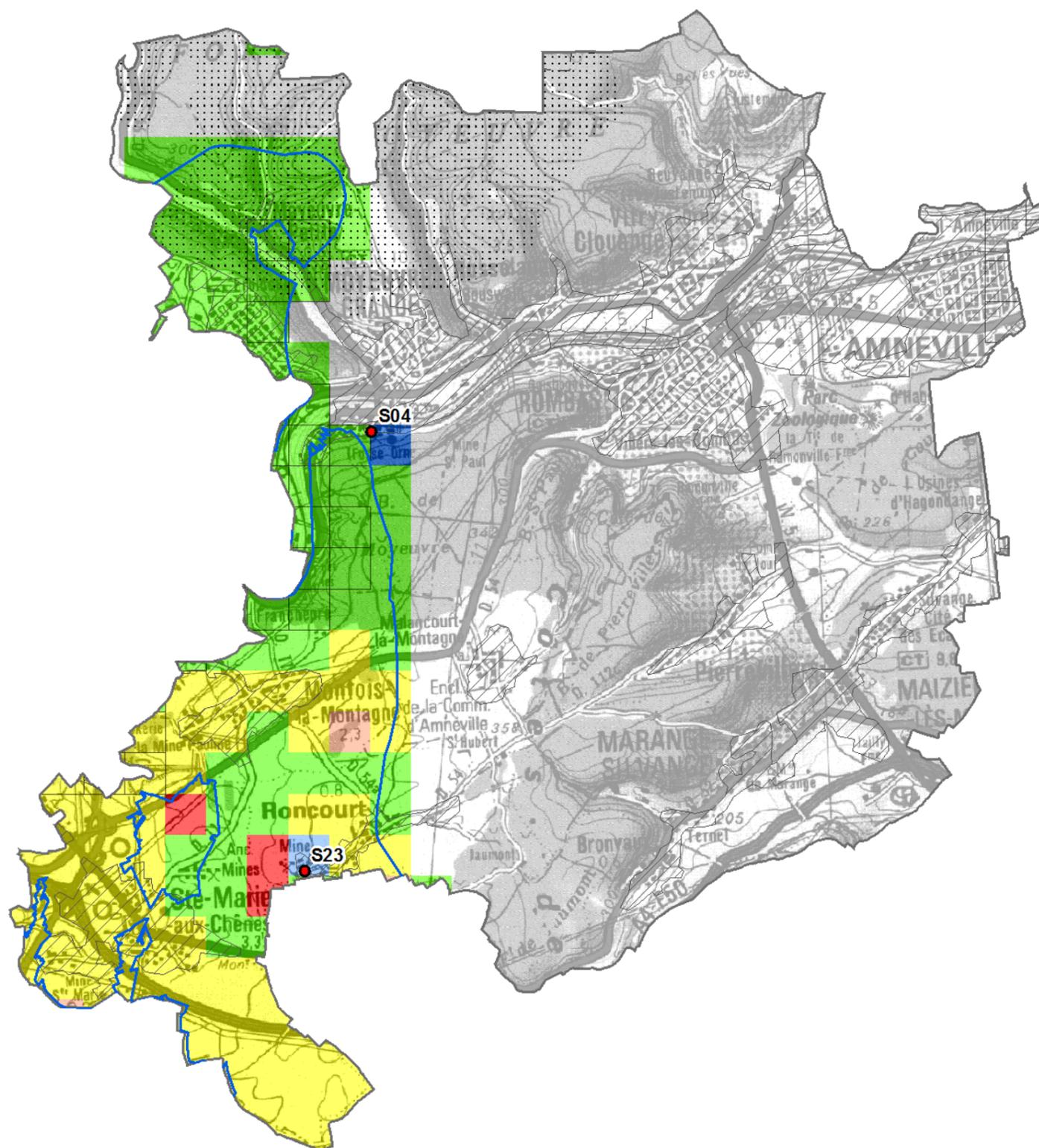
- Points d'accès au réservoir minier
- Périmètres de protection AEP en vigueur
- Périmètres de protection AEP en projet
- GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
- Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
- Limites des travaux miniers envoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017



BASSIN FERRIFERE LORRAIN Potentiel géothermique intrinsèque des réservoirs miniers - CC du Pays Haut Val d'Alzette - Rapport BRGM RP-67079-FR

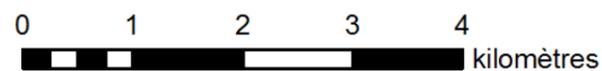
Classe de potentiel géothermique



↑
Meilleur potentiel

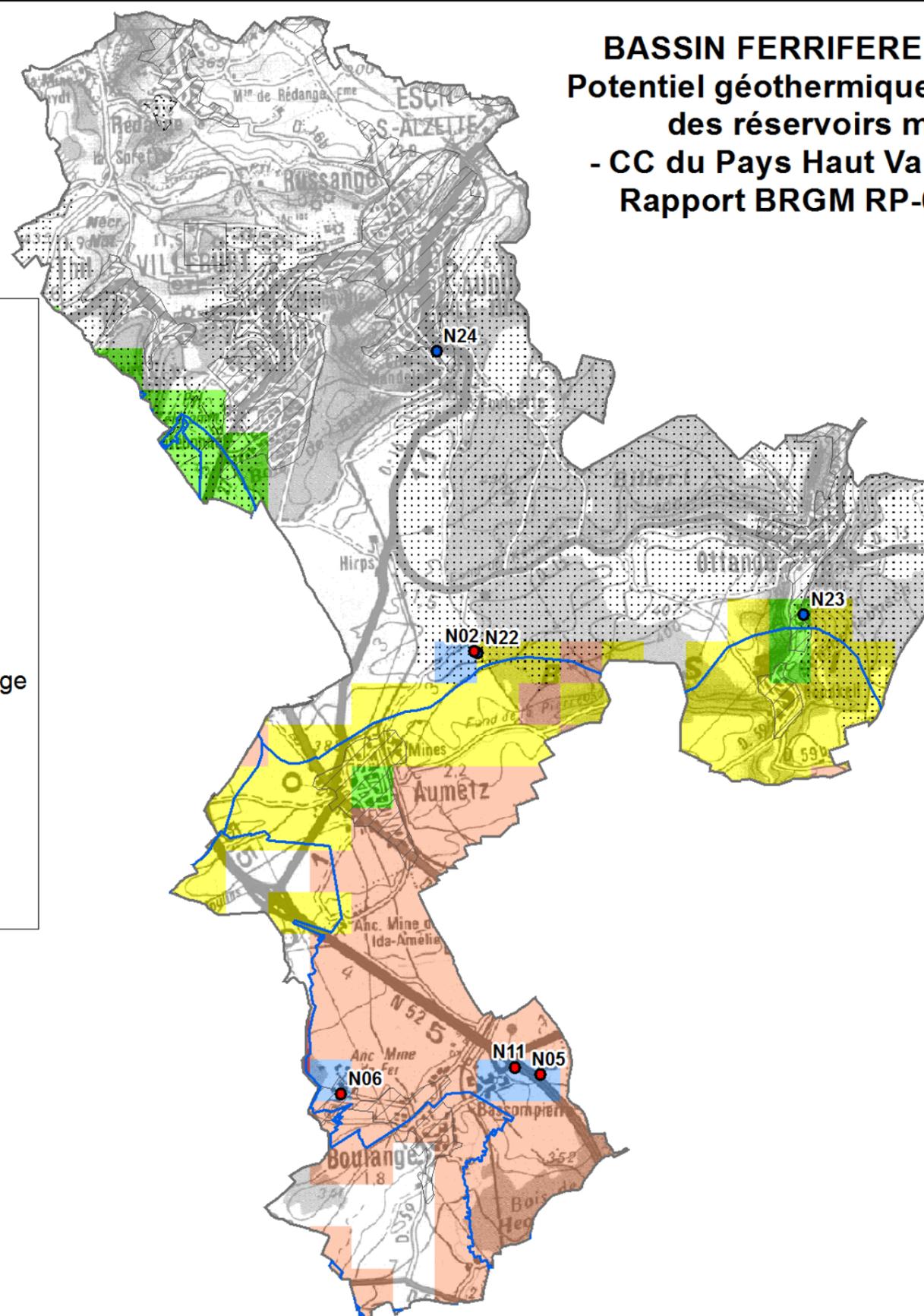
- Points d'accès au réservoir minier
- Points d'accès aux petites réserves perchées hors enoyage
- ▨ Périmètres de protection AEP en vigueur
- ▨ Périmètres de protection AEP en projet
- GMI - Zones soumises à autorisation (mailles)
- ▨ Zones urbanisées (Corine Land Cover 2012)
- ▭ Limites des travaux miniers enoyés

Source des données de périmètres de protection AEP : ARS Grand Est



1 : 80 000

BRGM 2017





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Grand Est
1, avenue du parc de Brabois
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49