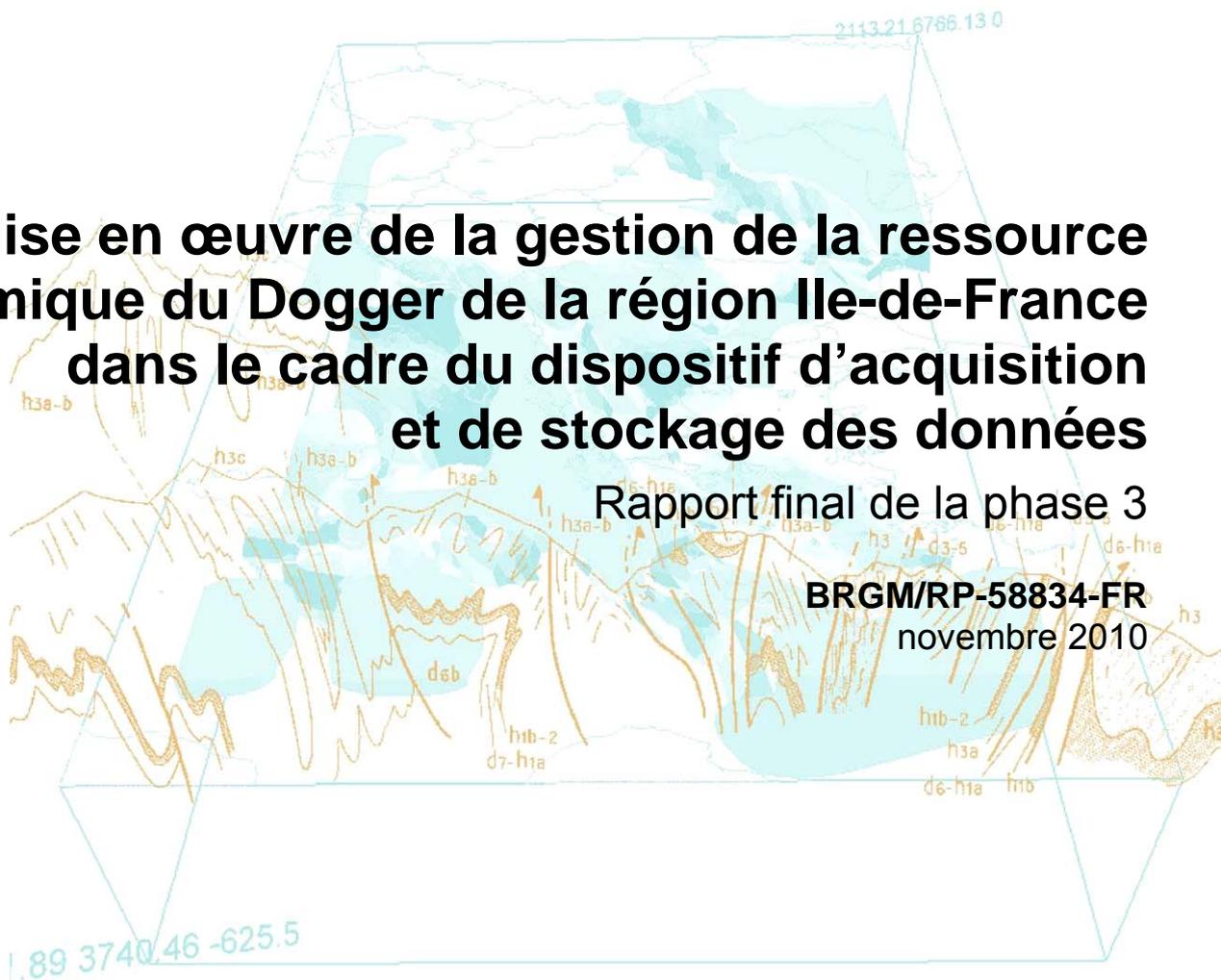




# Mise en œuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données

Rapport final de la phase 3

BRGM/RP-58834-FR  
novembre 2010





# Mise en œuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données

Rapport final de la phase 3

BRGM/RP-58834-FR  
novembre 2010

V. Hamm, C. Castillo, M. Le Brun, O. Goyeneche  
Avec la collaboration de  
S. Lopez, I. Ignatiadis, M. Azaroual et J.F. Malon

**Vérificateur :**  
Nom : J.C. MARTIN  
Date : 17 janvier 2011  
Signature : 

**Approbateur :**  
Nom : R. VERNIER  
Date : 18/01/2011  
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

**Mots-clés** : Géothermie, Réservoir géothermique, Ile-de-France, Bassin Parisien, Dogger, Doublet de forages, Triplet de forages, Modélisation hydro-thermique et géochimique d'un réservoir, Base de données.

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

**Hamm V., Castillo C., Le Brun M., Goyeneche O.** (2010) – Mise en œuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données - Rapport final de la phase 3. BRGM/RP-58834-FR, 153 p., 34 fig., 5 tabl., 11 ann.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Ce rapport est le document final prévu à l'échéance de la Convention ADEME-BRGM n° 0705C0040 du 8 juillet 2007 et de son avenant n° 1 du 4 août 2009, dont l'objet est la mise en œuvre d'un Observatoire de données exploitant la Base Dogger élaborée antérieurement. Cette convention constitue la phase 3 du programme de « Gestion du Dogger ».

Le rapport fait un point d'avancement sur les deux séquences prévues dans le programme de la phase 3 du projet, à savoir :

- Le fonctionnement de la Base Dogger et notamment la collecte des données d'exploitation **des 34 sites géothermiques en activités** de la région parisienne par l'envoi formel et régulier par les exploitants des sites considérés, de fichiers Excel dédiés, le tri et la validation de ces données par les deux bureaux d'étude sous-sol dûment mandatés pour cette mission. Enfin, cette séquence du programme prévoit la mise en œuvre de requêtes de routine pour l'intégration de ces données dans la base Oracle du BRGM et leurs extraction par les ingénieurs chargés de modélisation du Dogger, dans un format conforme à leurs attentes.
- L'interprétation des données collectées sur la période 2005 - 2009 et la modélisation du réservoir, selon les deux axes retenus :
  - La poursuite, entamée dans le cadre de la phase 2 du projet, de la compréhension des **processus géochimiques** majeurs pouvant être à l'origine du concept de précurseurs chimiques de percée thermique aux puits producteurs des doublets. Ce travail est également l'occasion de mesurer l'évolution géochimique du fluide du Dogger sous l'effet d'une exploitation continue depuis plus de 25 ans et d'en déterminer les conséquences sur le réservoir et les équipements (corrosion, dépôt) ;
  - La **modélisation hydraulique et thermique** du réservoir du Dogger en termes d'une part, de détermination des interférences hydrauliques entre doublets et de l'extension des bulles froides autour des forages d'injection des doublets dans le Val-de-Marne et la Seine-Saint-Denis à forte densité d'opérations géothermiques puis, d'autre part, d'analyse comparative de divers scénarios de réhabilitation de doublets géothermiques en cas de vétusté ou de manifestation de la percée thermique.

Cette phase du projet pluriannuel de Gestion du Dogger se poursuit en 2010 en utilisant notamment les données quotidiennes d'exploitation qui seront collectées dans la base Dogger par le biais d'un fichier Excel mis en place au cours de cette Phase 3 du projet, sur tous les sites exploités et qui seront renseignés par le personnel exploitant.

## Synthèse des résultats de l'analyse géochimique

De manière synthétique, ce second diagnostic thermodynamique et sa comparaison par rapport aux résultats de la phase 2 du projet, associés aux résultats des travaux antérieurs par les équipes BRGM, fournit les enseignements suivants.

Sur la période d'exploitation (1985-2010) :

- Les sulfures et le fer dissous sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration et de façon indépendante de la température :
  - **La teneur en sulfures dissous** croît progressivement, puis tend à se stabiliser. Cette tendance générale est *a priori* dépendante du débit et des traitements de fond de puits. Ceci laisse envisager un contrôle plutôt cinétique des sulfures.
  - **La teneur en fer dissous** décroît jusqu'en 2001, puis deux tendances se présentent suivant les sites.
    - stabilisation pour une minorité d'opérations ;
    - augmentation progressive pour la majorité des sites examinés. Ce comportement est *a priori* dû aux conditions d'exploitation (chemisage, débit, traitements, etc.). Comme pour les sulfures, le fer est visiblement contrôlé par des processus réactifs sans pour autant satisfaire parfaitement les conditions d'équilibre thermodynamique surtout en présence d'inhibiteur de corrosion-dépôt.
- **Le pH** est globalement stable ( $6 < \text{pH} < 7$ ). Il diminue en moyenne de 0,15 unité les dernières années d'exploitation (après 2001). La création de dépôts et leur vieillissement progressif dans les puits de production semblent être en partie à l'origine de cette diminution. Toutefois, la plus grande contribution pressentie à la diminution du pH est celle du réservoir, qui produirait un fluide de plus en plus acide après recirculation.
- **Le potentiel d'oxydo-réduction** (pe) est différent de celui recalculé à partir du couple ( $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ). Le pe diminue en moyenne de 1,5 unité pour tous les forages (sauf Alfortville et Montgeron pour lesquels le pe est stable). Cette diminution intervient dans les premières années d'exploitation (avant 1990), et se stabilise ensuite.
- La **mackinawite** ( $\text{FeS}$ ) et la **calcite** ( $\text{CaCO}_3$ ) sont les seuls minéraux pour lesquels l'indice de saturation évolue de manière sensible :
  - La **calcite** est saturée pour tous les puits ( $\text{IS} \sim 0$ ). Elle reste néanmoins susceptible de précipiter en cas de dégazage. Ce risque paraît toutefois réduit les dernières années d'exploitation (2001-2009). En effet, la saturation de la calcite tend à diminuer en raison de la chute générale du pH des fluides.
  - La **mackinawite** est saturée ( $-0,5 < \text{IS} < +0,5$ ) à sursaturée ( $\text{IS} > 0,5$ ) pour tous les puits. De plus, malgré la mise en place des traitements de fond de puits, l'évolution de l'IS de la mackinawite épouse celle du Fe(2). Le risque de précipitation de la mackinawite a ainsi globalement augmenté les dernières années d'exploitation, notamment à cause de la baisse généralisée des débits d'exploitation.
- La **calcédoine** ( $\text{SiO}_2$ ) est saturée pour tous les puits ( $\text{IS} \sim 0$ ).

- **L'anhydrite** ( $\text{CaSO}_4$ ) est sous-saturée pour tous les puits ( $-0,6 < \text{IS} < -0,2$ ) sauf pour ceux du secteur Est (Meaux-Beauval 1 et Coulommiers) pour lesquels elle est saturée ( $\text{IS} \sim 0$ ).
- La **fluorite** ( $\text{CaF}_2$ ) est sous-saturée à sursaturée suivant les secteurs.
- La **gibbsite** ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) et le **feldspath potassique** ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) sont saturés ( $-0,5 < \text{IS} < +0,5$ ) à sursaturés ( $\text{IS} > 0,5$ ) pour tous les puits.
- La **sidérite** ( $\text{FeCO}_3$ ) est sous-saturée ( $\text{IS} < -0,5$ ) pour tous les puits.

Les tendances mises en évidence lors des phases 1 et 2 du projet se poursuivent sur la période (2005-2010) pour une part des paramètres analysés (pe, concentrations en majeurs dissous, S(-2) et indices de saturation) et différent pour l'autre part (Fe(2) et pH). Elles paraissent peu dépendantes du secteur géographique dans la mesure où les différences sont *a priori* à rechercher parmi les conditions d'exploitation (**débit**, traitements, travaux, etc.). La saturation de l'anhydrite à l'Est (région de Meaux et de Coulommiers) est la seule spécificité géographique réellement observée.

Lors de la phase 2, il a été montré que certains éléments ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et Si) étaient sensibles à la température du fluide, car contrôlés par des minéraux à comportement prograde ou rétrograde. De plus, au regard des cinétiques de précipitation/dissolution des « minéraux de contrôle » des concentrations de ces éléments en solution, il a été précisé que seul le **silicium** pourrait annoncer l'approche du front froid<sup>1</sup>. Le fait que le calcium ne puisse pas être annonciateur du front froid serait établi, s'il était confirmé que le pH du réservoir a diminué depuis le démarrage des exploitations. En effet, l'augmentation de la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  due au refroidissement de l'eau géothermale serait amplifiée par celle due à l'acidification de l'eau du réservoir. Toutefois, nous ne constatons pas d'augmentation de  $\text{Ca}^{2+}$ , ni de variation de l'alcalinité ( $\text{HCO}_3^-$ ), mais uniquement une chute du pH des fluides en tête de puits, apparemment seul paramètre responsable de la chute de l'IS de la calcite. Parallèlement, les phases qui contrôlent les concentrations en silicium (silicates et aluminosilicates) dans les fluides géothermaux sont « potentiellement indicatrices du refroidissement ». Néanmoins, les données en aluminium étant rares, l'état de saturation de la **calcédoine** reste la fonction active susceptible d'annoncer l'arrivée du front froid dans le domaine du proche puits de production.

Au regard de l'absence de variations de la concentration en silicium et de l'IS de la calcédoine sur la période d'exploitation, **le front froid n'a pas encore, du point de vue de la géochimie, atteint les puits de production examinés**. Cette conclusion semble corroborée par le suivi des paramètres d'exploitation des sites et tout particulièrement la température de production. Toutefois, nous excluons de ces conclusions le site d'Alfortville, où malgré l'absence de variations en silicium et de l'IS

---

<sup>1</sup> Le silicium est contrôlé par la solubilité de minéraux caractérisés par des cinétiques lentes : les silicates et les aluminosilicates. Au contraire, le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et le calcium sont contrôlés par des minéraux à cinétiques rapides (carbonates et sulfates). Il n'est donc pas envisageable d'identifier des évolutions des concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et en Ca, susceptibles d'annoncer l'approche du front froid, à des temps bien antérieurs à son arrivée.

de la calcédoine, la percée thermique, serait confirmée depuis peu par une chute de température mesurée (environ 0,2 °C/an) et par les modélisations hydrodynamiques.

### **Synthèse des résultats de la modélisation hydro-thermique à l'échelle du réservoir**

Le développement de la géothermie dans les départements du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis fait naître de nouveaux projets d'implantation ou de réhabilitation de doublets géothermiques dont les équipements d'exploitation ont vieilli. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte l'évolution de la température du réservoir exploité pour, d'une part, contrôler le recyclage aux puits de production des eaux froides injectées et ainsi anticiper la baisse de température du fluide prélevé et, d'autre part, déterminer l'extension des zones envahies par la baisse de température (bulle froide) pour éviter tout refroidissement prématuré lors de la réalisation de nouvelles opérations.

Le rapport présente trois approches de modélisation du comportement hydraulique et thermique à l'échelle du puits ou de l'ensemble des doublets géothermiques :

- La première approche, basée sur une représentation mathématique simplifiée, considère chaque puits injecteur avec un écoulement de type « piston » sans tenir compte du puits producteur et des puits voisins. La bulle est représentée par un cercle centrée sur le puits injecteur, la surface du cercle donne la zone envahie par la baisse de température. Cette approche très simplifiée permet d'avoir un ordre de grandeur rapide de la progression du front froid et de le mettre en relation avec des aménagements de type réseau de chaleur en surface.
- La seconde approche, basée sur un modèle hydrodynamique, considère **un calcul du déplacement de particules d'eau froide**. L'ensemble des puits ainsi que l'hétérogénéité du milieu (perméabilité, épaisseur productive) sont pris en compte dans le modèle. Ce calcul permet de **préciser les interférences hydrauliques entre doublets et vers quel puits seront recyclées les eaux froides injectées**. L'extension des bulles (zone envahie par les particules) est plus précise du fait que chaque doublet est pris dans son environnement réel.
- La troisième approche est basée également sur un modèle hydrodynamique auquel sont ajoutés **les processus de transfert thermique**. À la différence du modèle précédent, la température du milieu est calculée en chaque maille du modèle **et permet notamment de tenir compte du stock de chaleur contenu dans les épontes qui va ralentir le refroidissement du réservoir**. Cette dernière approche, plus précise mais aussi la plus lourde en termes de mise en œuvre et de calcul, a permis **de réaliser une cartographie de l'extension des bulles froides à fin 2010 et une prévision à fin 2020 ainsi que de sortir des courbes d'évolution de la température du fluide à chaque puits de production**.

Les résultats des modélisations montrent que les principales interférences entre doublets ont lieu dans le département du Val-de-Marne où la concentration des opérations est la plus forte, **notamment pour les doublets de Maisons-Alfort I et II, Alfortville, Créteil et des doublets de Cachan I et II, L'Hay-Les-Roses, Fresnes, Chevilly-Larue, Thiais, Orly I et II**. En Seine-Saint-Denis où de nombreux doublets

sont arrêtés et généralement plus espacés les uns des autres, ce sont uniquement les doublets de La Courneuve Nord et Sud qui interfèrent.

Au niveau de l'évolution de la température modélisée au puits de production de chaque doublet, les résultats montrent que 6 puits devraient présenter une baisse de température supérieure ou égale à 1 °C actuellement. Ces doublets sont : Maisons-Alfort I, Alfortville, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-Les-Roses et Champigny-sur-Marne. **Ceux qui, selon le modèle, présentent une courbe de décroissance de température la plus marquée (en moyenne 0,15 °C/an) sont Alfortville et l'Hay-Les-Roses.** Il est à noter que le suivi régulier de la température en tête de puits producteur par les bureaux d'étude sous-sol montre qu'actuellement seul le site d'Alfortville a une température du fluide prélevé en cours de décroissance (à notre connaissance au moment de la finalisation du rapport).



## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Fonctionnement de la Base Dogger</b> .....	<b>15</b>
2.1. ÉTAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNÉES .....	15
2.2. ÉTAT DU PROCESSUS D'UTILISATION DE LA BASE .....	17
2.3. CONCLUSION ET SUITE À DONNER.....	17
<b>3. Interprétation et modélisation du réservoir du Dogger</b> .....	<b>19</b>
3.1. DIAGNOSTIC CHIMIQUE ET THERMODYNAMIQUE DES FLUIDES DU DOGGER.....	19
3.1.1.Évolution des concentrations en tête de puits de production .....	20
3.1.2.Évolution du potentiel redox (Pe) et du ph .....	27
3.1.3.Évolution de l'état d'équilibre thermodynamique .....	31
3.1.4.Conclusion de l'étude géochimique .....	36
3.1.5.Simulation du parcours d'un kilogramme d'eau géothermale depuis sa mise en production .....	37
3.2. MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET THERMIQUE DU RÉSERVOIR DU DOGGER ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS .....	41
3.2.1.Problématique liée à l'augmentation de la densité d'opérations géothermiques exploitant par doublet la ressource du Dogger dans la région parisienne .....	41
3.2.2.Calcul du champ de température par méthode analytique .....	43
3.2.3.Calcul du champ de température par méthode numérique (logiciel MARTHE) .....	45
3.2.4.Conclusions sur la modélisation .....	67
<b>4. Conclusion</b> .....	<b>71</b>
<b>5. Bibliographie</b> .....	<b>73</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 :	Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GMX5 (Meaux Beauval 1, Est).....	21
Figure 2 :	Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	22
Figure 3 :	Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).....	23
Figure 4 :	Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	23
Figure 5 :	Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GCL1 (Clichy-sous-Bois, SSD).....	24
Figure 6 :	Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GRO2 (Ris-Orangis, Sud).....	25
Figure 7 :	Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GCO1 (Coulommiers, Est).....	26
Figure 8 :	Évolution du pH et du pe. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).....	27
Figure 9 :	Évolution du pH et du pe. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	28
Figure 10 :	Évolution du pH. Forages de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est), GAL2 (Alfortville, VDM) et GCO1 (Coulommiers, secteur EST).....	28
Figure 11 :	Comparaison des évolutions du pe et des concentrations en fer a) et en sulfures b) dissous. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).....	30
Figure 12 :	Comparaison des évolutions du pe et des concentrations a) en fer et b) en sulfures dissous. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	31
Figure 13 :	Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêt en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).....	32
Figure 14 :	Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêt en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	33
Figure 15 :	Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).....	35
Figure 16 :	Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	35
Figure 17 :	Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GRO2 (Ris-Orangis, Sud).....	36

Figure 18 : Domaine d'étude (rectangle de 30 km sur 44 km) avec localisation des doublets (noir : doublets en exploitation, rouge : doublets arrêtés). .....	40
Figure 19 : A : Représentation schématique de la structure verticale du réservoir par interprétation du profil flowmétrique à l'échelle du puits - B : Structure verticale simplifiée utilisée à l'échelle du modèle .....	48
Figure 20 : Trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs de la Seine-St-Denis (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage du doublet de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976). .....	52
Figure 21 : Trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs du Val-de-Marne (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage du doublet de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976). .....	53
Figure 22 : Définition de 11 sous-modèles pour le calcul thermique.....	55
Figure 23 : Évolution de la température aux puits producteurs en Seine-St-Denis.....	56
Figure 24 : Évolution de la température aux puits producteurs dans le Val-de-Marne .....	57
Figure 25 : Évolution de la température aux puits producteurs de Villiers-Le-Bel-Gonesse et Garges-Les-Gonesse (Nord de la Seine-St-Denis).....	58
Figure 26 : Évolution de la température aux puits producteurs de Villeneuve-La-Garenne, La Courneuve Sud et Nord (Ouest de la Seine-St-Denis) .....	59
Figure 27 : Évolution de la température aux puits producteurs de Tremblay-en-France, Aulnay RDV, Aulnay VGS, Clichy-sous-Bois, Sevran, Blanc-Mesnil et Bondy (Seine-Saint-Denis) .....	60
Figure 28 : Évolution de la température au puits producteur de Chelles (sud-est Seine-Saint-Denis).....	61
Figure 29 : Évolution de la température aux puits producteurs de Bonneui-sur-Marnel, Créteil-Mont-Mesly, Sucy-en-Brie (Val de Marne).....	62
Figure 30 : Évolution de la température aux puits producteurs d'Alfortville et de Maisons-Alfort I et II (Val de Marne) .....	63
Figure 31 : Évolution de la température aux puits producteur de Cachan I et II, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-les-Roses, Orly I et II, Thiais (Val de Marne).....	64
Figure 32 : Évolution de la température aux puits producteur de Vigneux-sur-Seine et Montgeron (Val de Marne).....	65
Figure 33 : Évolution de la température aux puits producteurs de Champigny-sur-Marne, Villeneuve-Saint-Georges et Epinay-sous-Sénart (Val de Marne).....	66
Figure 34 : Évolution de la température au puits producteur d'Ivry (Val de Marne).....	67

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Les sites géothermiques et le nombre de données d'exploitation fournies. ....	16
Tableau 2 : Caractéristiques générales des sites géothermiques considérés (d'après les analyses de fin de sondage, base Dogger). ....	20
Tableau 3 : Exploitations géothermiques au Dogger en région Parisienne.....	42
Tableau 4 : Récapitulatif des rayons thermiques pour chaque opération (34 doublets) .....	44
Tableau 5 : Débits (m <sup>3</sup> /h) et températures (°C) de réinjection d'hiver (QSC et TSC) et d'été (QSHC et TSHC) pour les doublets du Val-de-Marne et de Seine-St-Denis .....	47

## Liste des annexes

Annexe 1 : Rappels nécessaires pour comprendre les évolutions des concentrations en fer et en sulfures dissous observées en tête de puits.....	79
Annexe 2 : Évolution des concentrations en éléments dissous .....	87
Annexe 3 : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous.....	95
Annexe 4 : Évolution du pH et du pe.....	99
Annexe 5 ; Évolution des indices de saturation des minéraux d'intérêts ciblés.....	111
Annexe 6 : Cartes des limites d'extension des « bulles froides » à fin 2010 dans les conditions de calcul développées au § 3.2.2 .....	119
Annexe 7.; Exemples de chroniques de débits et températures résultant de l'exploitation des doublets.....	125
Annexe 8.; Régionalisation des paramètres du réservoir .....	133
Annexe 9 : Cartes de températures et des limites d'extension des « bulles froides » à fin 2000, 2010 et 2020 dans les conditions de calcul développées au § 3.2.3 .....	139
Annexe 10 : Présentation du courrier de relance envoyé par le BRGM aux maîtres d'ouvrage des 33 opérations en cours d'exploitation en Ile-de-France et du fichier Excel à renseigner en données d'exploitation.....	145
Annexe 11 : Rapport – Contribution à la modélisation hydraulique et thermique du réservoir du Dogger.....	151

# 1. Introduction

Le projet de « Gestion du réservoir du Dogger » a pour but de fournir aux pouvoirs publics, aux maîtres d'ouvrages des opérations géothermiques de la région parisienne, à leurs exploitants ou délégataires et aux bureaux d'études associés, une méthode pour une prévision à moyen et long termes de la durée de vie des opérations de chauffage par géothermie de réseaux de chaleur urbains.

Le projet «Gestion du réservoir du Dogger – Phase 3 » fait suite aux deux phases qui l'ont précédé :

- **Phase 1** de octobre 2001 à novembre 2002 : Conception générale et construction de la base de données dite Base DOGGER ;
- **Phase 2** de décembre 2002 à mars 2005 : Intégration des données disponibles et conception d'une méthode d'interprétation.

La Phase 3 du projet, dont l'objectif est la mise en place d'un « Observatoire du réservoir du Dogger », prévoit de procéder à l'amélioration de la connaissance du comportement de cet aquifère qui ne peut pas faire l'objet d'une observation directe. Il doit également permettre aux maîtres d'ouvrage ou à leurs délégataires d'anticiper, autant que possible, la dégradation pressentie de la capacité thermique du réservoir au droit de chaque doublet (percée thermique) et de leur permettre d'être prêts à prendre les mesures adaptées. Enfin, il doit permettre aux autorités administratives de la DRIEE de disposer d'un outil fiable pour instruire les arrêtés de recherche ou d'exploitation d'opérations nouvelles ou de réhabilitation.

Cette phase du projet est subdivisée en deux séquences, au niveau du cahier des charges de l'étude et dans la convention BRGM/ADEME à laquelle il se réfère :

- fonctionnement de la Base DOGGER avec acquisition pérenne des données d'exploitation des ouvrages et conditions d'utilisation de la Base ;
- interprétation et modélisation du réservoir à partir des données renseignées dans la Base, tant du point de vue hydrodynamique et thermique que géochimique.

Il convient en outre de noter que, dans le cadre de la présente phase du projet, un travail de modélisation complémentaire, intitulé étude de « Modélisations de l'impact thermique et hydraulique pour différents scénarios de réhabilitation par triplet ou doublet d'un doublet géothermique type du Dogger », a été initié (cf. Annexe 11). Ce document, qui est joint en annexe au présent rapport d'avancement, est le résultat d'une première phase de réflexion sur la réhabilitation d'un doublet géothermique au Dogger. La comparaison entre les différentes solutions de réhabilitation retenues sera étayée, dans un second temps, par l'apport de deux autres critères prenant en compte les bilans énergétiques et les surfaces d'emprise de la bulle froide normalisées par rapport à l'installation initiale en doublet.



## 2. Fonctionnement de la Base Dogger

La phase 2 du projet, dont le rapport a été publié en mars 2005 sous le titre « Mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France » (référence : BRGM/RP-53782-FR), a été consacrée à la mise en place d'une méthodologie de collecte des données de fonctionnement de la boucle géothermale auprès des exploitants de 21 (15 sites exploités par la société Dalkia et 6 sites par Elyo) des 33 sites géothermiques de la région parisienne (sur 34, Melun l'Almont n'ayant pas souhaité s'associer au projet).

Dans la présente séquence de la phase 3 du projet, a été mis en place l'extension d'acquisition des données à l'ensemble des paramètres de fonctionnement (14 paramètres dans le cas d'un doublet et 19, dans le cas d'un triplet, répartis en 5 rubriques : pression, température, débit, puissance électrique, vitesse de corrosion).

Dans cette séquence, il s'agit également de finaliser par le biais de « routines » appropriées les modes d'administration pour l'alimentation et l'utilisation de la Base Dogger.

### 2.1. ÉTAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNÉES

Le temps écoulé entre les prises de contact établies au début de l'année 2005 avec les deux sociétés d'exploitation contractuellement engagées sur le plus grand nombre de sites de la région parisienne et la date de notification du début de la phase 3 du projet, le 8 octobre 2007, n'a pas permis de mobiliser les bureaux d'étude sous-sol et les exploitants dans l'application des procédures arrêtées.

Il a donc été nécessaire de reprendre ce travail selon la procédure suivante :

1. obtenir des deux bureaux d'étude sous-sol un état des lieux précis des capteurs disponibles sur chaque site pour la collecte des paramètres souhaités, en distinguant les sites dotés d'une Gestion Technique Centralisée (GTC) équipée de moyens de télésurveillance permettant d'obtenir par extraction les informations au pas horaire, des sites où les relevés sont réalisés manuellement (mains courantes) et qui nécessiteront le transfert des données sur un fichier Excel dédié ;
2. intégrer les données issues du télésuivi des installations géothermiques, lequel a fonctionné entre 1989 et 1993 environ ;
3. récupérer les données d'exploitation non intégrées à la Base Dogger entre le 1<sup>er</sup> janvier 2005 et le 31 décembre 2009 ;
4. enfin, mettre en service, dès le 1<sup>er</sup> janvier 2010, en concertation avec les maîtres d'ouvrages et leurs exploitants, la collecte régulière des données sur l'ensemble des sites géothermiques de la région parisienne.

Pour y parvenir, une commande de sous-traitance a été passée par le BRGM, dans le cadre du projet, le 31 juillet 2009 à GPC I&P et le 5 août 2009 à CFG Services, afin de mettre en œuvre les actions 1, 3 et 4 ci-dessus.

On trouvera en Annexe 10 au présent rapport, un courrier type, élaboré en commun par le Département Géothermie du BRGM et les bureaux d'études sous-sol, ainsi qu'un tableau au format Excel des données à collecter par les exploitants des sites.

Des routines d'intégration des données dans les différentes tables ont été élaborées pour alimenter la Base Dogger, à partir des relevés issus des sites géothermiques.

L'action n° 2, ci-dessus, a été réalisée à partir des bandes magnétiques contenant les fichiers de valeurs collectés au cours des années 1989 à 1994. Ce travail sur une période donnée d'acquisition sert de test au processus d'acquisition continue des données d'exploitation, quelles que soient la nature et l'origine des fichiers de données transmis au BRGM via les sociétés de service du sous-sol.

On trouvera dans le tableau n° 1 suivant l'état statistique des données recueillies dans le cadre de l'action n° 3 et sur la figure 18 la localisation des doublets.

Période de PRODUCTION 2005-2009	
Site	Nombre de mesures
ALFORTVILLE	29
CHAMPIGNY-sur-MARNE	892
CHEVILLY-LARUE	23 690
CLICHY-SOUS-BOIS	1 832
COULOMMIERS	2 630
FRESNES	1 859
LE BLANC MESNIL	258
L'HAY-LES-ROSES	35 969
MEAUX BEAUVAL 1	1 835
MEAUX BEAUVAL 2	1 827
MEAUX COLLINET	1 805
MEAUX HOPITAL	1 810
MONTGERON	1 575
ORLY 1 GAZIER	1 837
ORLY 2 LE NOUVELET	1 837
RIS ORANGIS	16
SUCY-EN-BRIE	468
THIAIS	1 848
VIGNEUX-SUR-SEINE	1

Tableau 1 : Les sites géothermiques et le nombre de données d'exploitation fournies.

Chaque valeur du tableau correspond au nombre d'enregistrements journaliers de données d'exploitation reçues de la part des exploitants sur la période considérée. Elles ne prennent pas en compte les valeurs mesurées par les bureaux d'étude sous-sol en charge, par contrat, de l'application des arrêtés préfectoraux d'exploitation.

Pour certaines opérations (Chevilly-Larue, l'Hay-les-Roses), la présence d'une GTC a autorisé l'envoi de valeurs au pas horaire grâce à la mise en place d'une routine d'extraction automatique réalisée par le maître d'ouvrage de l'opération.

Sur la période considérée, la norme aurait été la réception de 1 825 séries de valeurs journalières. Au pas horaire, cette norme est de 43 800 valeurs, sur la base de 24 séries de valeurs par jour. Dans ces conditions, on peut noter que :

- seuls 19 sites sur les 34 en exploitation en Ile-de-France ont fait parvenir des données, soit un taux de 56 % ;
- 10 sites, ont fait parvenir des données au pas journalier correspondant à la norme ;
- 7 sites ont fait parvenir des données en nombre inférieur, voire très inférieur, à la norme au pas journalier. On notera, parmi ceux-ci, le site d'Alfortville qui est identifié, dans le chapitre 3.2 ci-après, comme le seul site où la percée thermique semble avérée à mi-2010 ;
- 2 sites ont fait parvenir des données au pas horaire.

## **2.2. ÉTAT DU PROCESSUS D'UTILISATION DE LA BASE**

Des routines d'extraction des données contenues dans la base sont en cours de construction. Elles permettront à chacun des utilisateurs, notamment aux modélisateurs, de disposer d'informations fiables et suffisamment nombreuses pour affiner les modèles hydrodynamiques et géochimiques développés.

## **2.3. CONCLUSION ET SUITE À DONNER**

Le processus engagé dans le cadre de l'action 4 présentée ci-avant, sera poursuivi au cours de l'année 2010 du programme de « Gestion du Dogger -2010 ». Dans le cadre de ce programme :

- les routines d'intégration et d'extraction des données sont expérimentées, adaptées le cas échéant et validées ;
- un travail continu de collaboration avec les maîtres d'ouvrage et leurs exploitants est entrepris, avec l'aide des bureaux d'études sous-sol concernés, pour obtenir l'envoi régulier des données d'exploitations. À savoir : envoi en fin de mois de données journalières au Bureau d'Etudes sous-sol en charge du suivi d'exploitation du site puis, après vérification, corrections éventuelles et validation, envoi trimestriel au BRGM par les BE sous-sol. Ce travail est réalisé avec l'appui de l'ADEME et de la DRIEE Ile-de-France ;
- les données ainsi récoltées au cours de l'année 2010 et des années ultérieures, seront utilisées pour affiner les modèles hydrodynamiques et géochimiques du Dogger qui permettront une gestion thermique et géochimique de l'aquifère de plus en plus précise au fur et à mesure des années.



## 3. Interprétation et modélisation du réservoir du Dogger

### 3.1. DIAGNOSTIC CHIMIQUE ET THERMODYNAMIQUE DES FLUIDES DU DOGGER

Ce second diagnostic géochimique des fluides du Dogger du Bassin parisien s'inscrit dans la continuité du précédent travail réalisé sur ce sujet par Goyénèche *et al.* en 2005 (Phase 2 du Projet « Gestion du Dogger » BRGM/RP-53782-FR). La démarche employée en phase 2 pour interpréter les données chimiques a ainsi été reprise et prolongée sur la période 2005-2009. En outre, elle a été étendue à trois sites géothermiques supplémentaires (Montgeron (91), Champigny-sur-Marne (94) et Meaux-Beauval 1 (77)), afin de prendre en compte la variabilité spatiale et les éventuelles interférences<sup>2</sup> entre doublets. L'examen comprend donc un diagnostic physico-chimique (température, pH, pe et concentrations de certains éléments chimiques dissous) et un diagnostic thermodynamique de sept fluides géothermiques appartenant à quatre secteurs géographiques différents (soit en moyenne deux sites par secteur).

Les données relatives à la chimie des fluides exploités proviennent des mesures périodiques effectuées en **tête de puits de production** et consignées dans diverses tables (exploitation, événements, analyse et corrosion) de la base Dogger. Mettre en évidence d'éventuelles évolutions physico-chimiques intervenues depuis la mise en production des sites géothermiques, et ainsi identifier le(s) traceur(s) chimique(s) réactif(s) ou non susceptible(s) d'annoncer l'arrivée du front froid dans le voisinage du puits de production reste l'objectif de cette analyse. Le diagnostic géochimique réalisé en phase 2 a permis de mettre en évidence des tendances évolutives. Il s'agit donc de voir si ces tendances se confirment.

Les sept sites géothermiques considérés sont :

- Ris-Orangis (91) et Montgeron (91) pour le secteur Sud ;
- Alfortville (94) et Champigny-sur-Marne (94) pour le secteur Val-de-Marne (VDM) ;
- Coulommiers (77) et Meaux-Beauval 1 (77) pour le secteur Est ;
- Clichy-sous-Bois (93) pour le secteur de la Seine-Saint-Denis (SSD).

Compte tenu des données disponibles lors du démarrage de la phase 3, le site d'Alfortville a été préféré à celui de Créteil (94) traité lors de la phase 2 et aucun site supplémentaire n'a pu être examiné pour le département SSD. Le Tableau 2 donne

---

<sup>2</sup> La densité des ouvrages géothermiques peut être forte suivant le secteur considéré (cf. Val-de-Marne). Or, la forte densité des ouvrages s'accompagne d'une forte proximité des opérations, d'où l'existence de nombreuses interférences (Goyénèche *et al.*, 2004).

quelques caractéristiques des sites étudiés. On remarquera que la teneur initiale en sulfures en tête de puits de production du site de Clichy-sous-Bois est nettement supérieure (entre 1 et 2 ordres de grandeur) à celle des autres sites. Cette caractéristique (teneur en sulfures initialement élevée) est commune à tous les sites géothermiques de la SSD. En fait, il s'avère qu'au démarrage des exploitations géothermiques, les fluides produits par les sites de la Seine-Saint-Denis étaient chimiquement plus réduits (le Dogger y étant plus confiné) que ceux produits par les sites situés à l'Est et plus au Sud du Bassin parisien. Ceci a été démontré par Fouillac *et al.* (1986, 1990), Ignatiadis *et al.* (1991, 1995, 1998) et Ignatiadis (1994). Rappelons que la réduction des sulfates est la principale source de sulfures dans les fluides du Dogger (Annexe 1).

Secteur	Site géothermique	Ouvrage	Interférences	Température de production (°C)	Teneur initiale en sulfures dissous (mg/L)
Sud	Ris-Orangis	GRO 2	Non	68 - 71	0,1
	Montgeron	GMO 2	Non	69 - 72	2,3
VDM	Alfortville	GAL 2	Oui	71 - 74	3,1
	Champigny	GCHM 1	Non	75 - 77	2,5
Est	Coulommiers	GCO 1	Non	81 - 84	0,2
	Meaux-Beauval 1	GMX 5	Oui	74 - 77	0,2
SSD	Clichy-sous-Bois	GCL 1	Non	69 - 72	23,8

Tableau 2 : Caractéristiques générales des sites géothermiques considérés (d'après les analyses de fin de sondage, base Dogger).

Les illustrations présentées dans le corps du rapport ne portent pas sur tous les sites examinés. En effet, le choix a été fait de se focaliser sur deux sites caractéristiques du comportement d'ensemble (Meaux-Beauval 1 et Alfortville) et d'en présenter les exceptions. Les illustrations ne figurant pas dans le corps du texte sont disponibles en annexes (2 à 5).

### 3.1.1. Évolution des concentrations en tête de puits de production

La Figure 1 et la Figure 2 montrent respectivement l'évolution des concentrations en éléments chimiques dissous dans les fluides de Meaux-Beauval 1 et d'Alfortville.

Exception faite du fer et des sulfures, toutes les espèces chimiques dissoutes sont stables depuis le démarrage de la production (1981-1987). On remarquera que les données en aluminium et en manganèse sont rares (Figure 1, Figure 2 et annexe 2). La conclusion précédente ne s'applique donc pas à ces deux espèces.

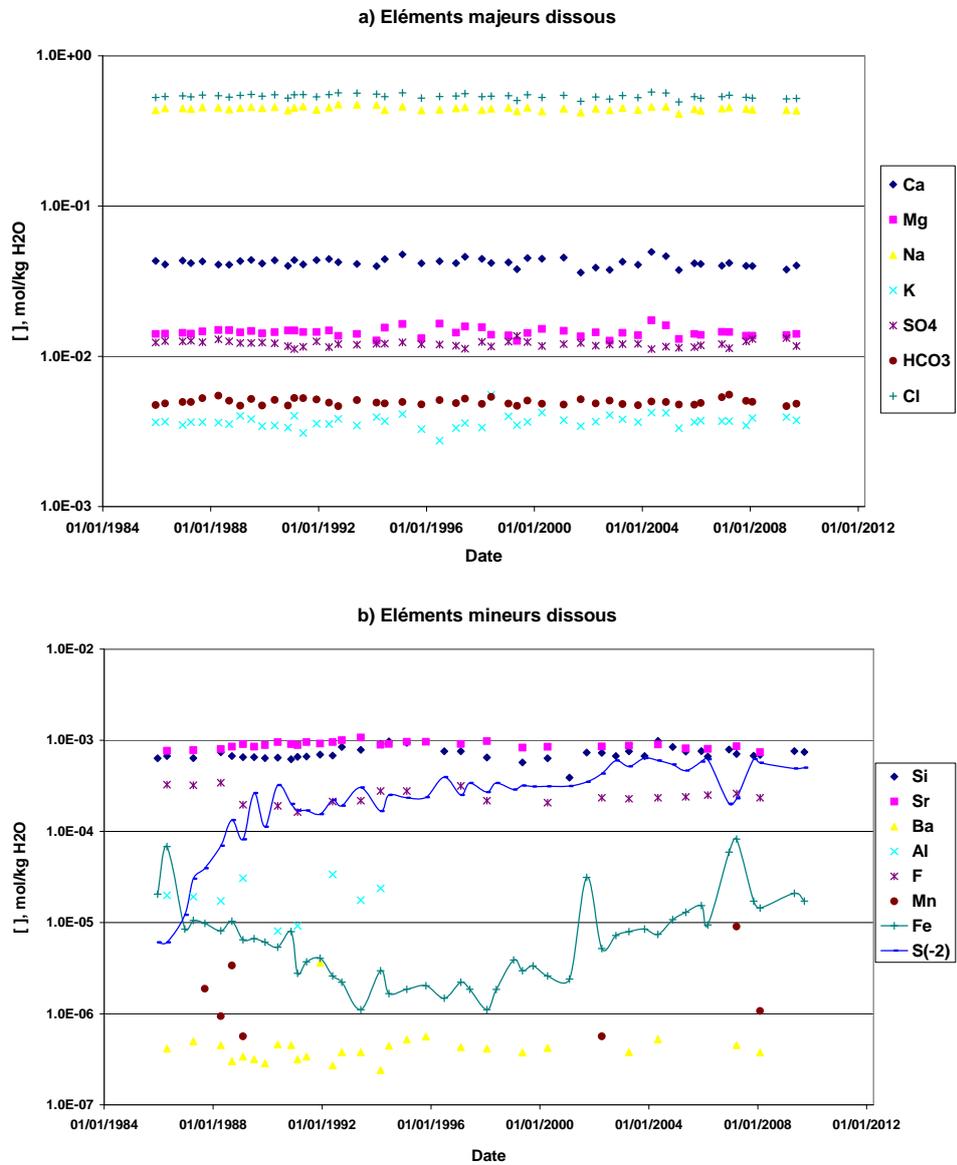


Figure 1 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous.  
Forage de production GMX5 (Meaux Beauval 1, Est).

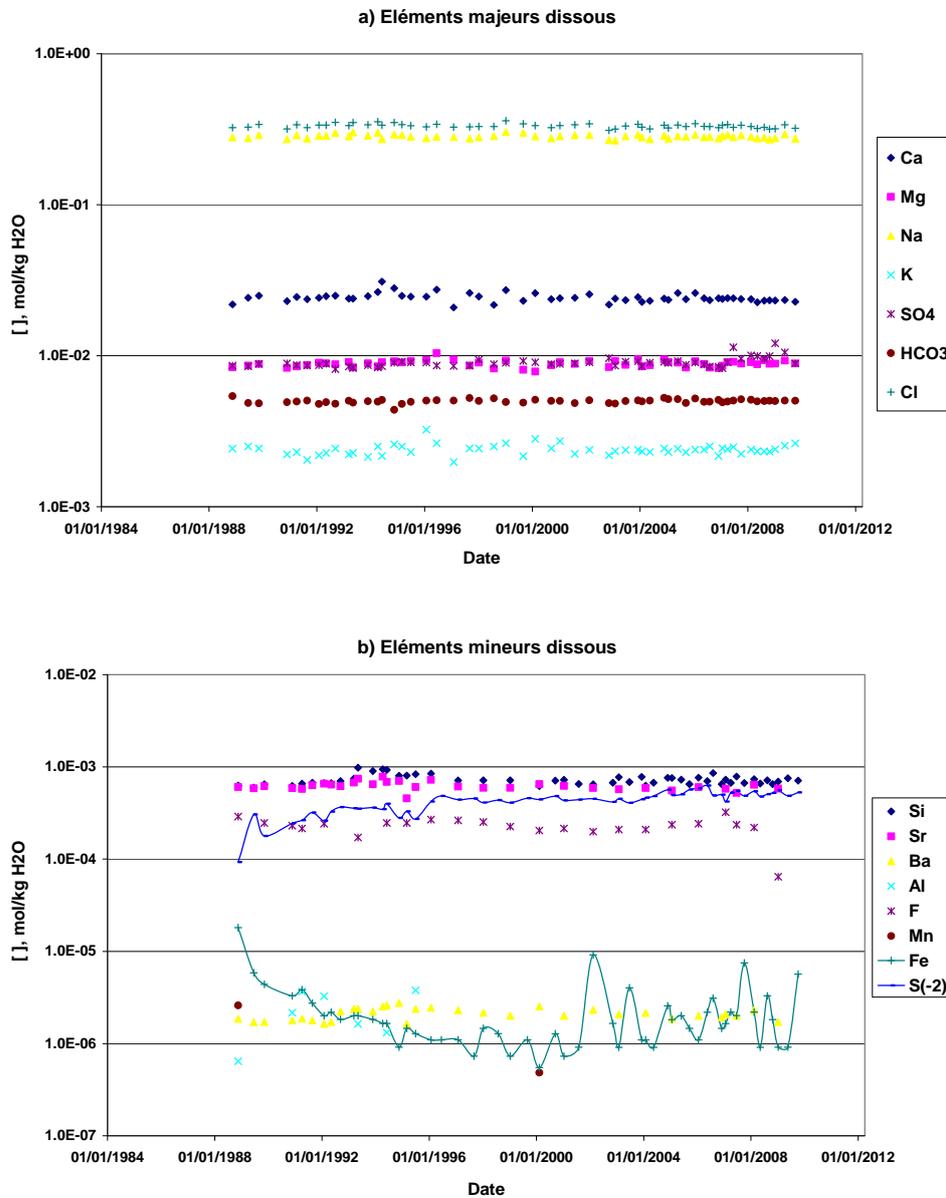


Figure 2 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous.  
Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

Les figures suivantes (Figure 3, Figure 4, Figure 5 et Figure 7) se focalisent sur l'évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous dans les fluides examinés.

L'annexe 1 donne des informations essentielles sur les phénomènes pouvant contrôler les concentrations en sulfures et en fer dissous dans les fluides géothermaux. On se référera à cette annexe pour comprendre au mieux les interprétations qui suivent.

### Évolution des teneurs en sulfures dissous

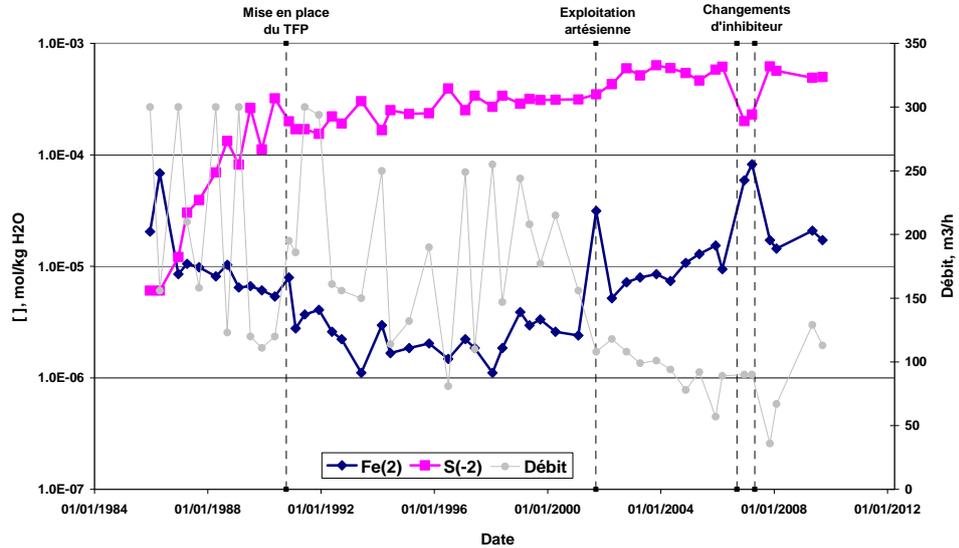


Figure 3 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous.  
Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

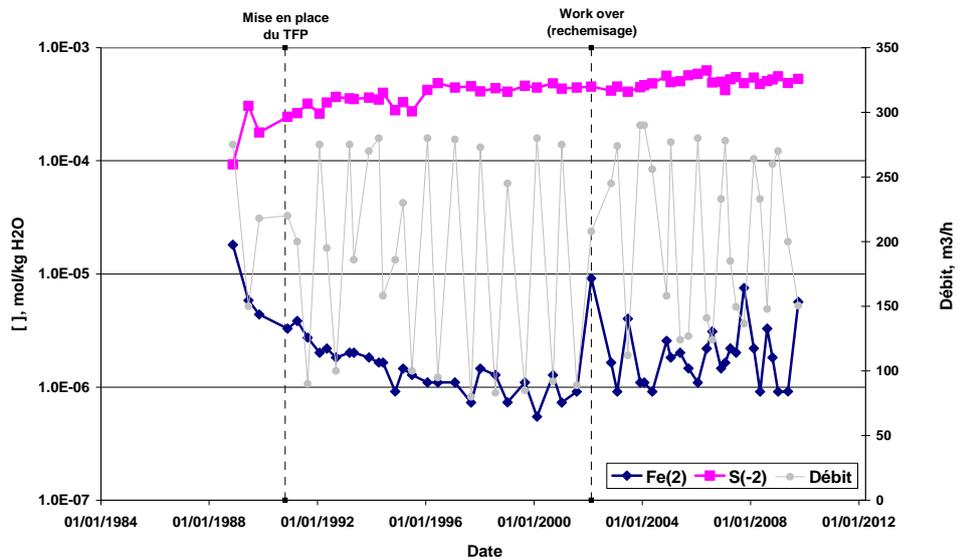


Figure 4 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous.  
Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

**L'évolution des concentrations en sulfures** est globalement similaire, quel que soit le site considéré. La quasi-totalité des fluides géothermaux étudiés montrent ainsi une croissance progressive des teneurs en sulfures suivie d'une stabilisation. En revanche, l'ampleur de cette variation diffère suivant le site examiné. Ainsi, depuis leur mise en production, l'eau du forage GMX5 de Meaux-Beauval 1 a vu sa concentration en

sulfures multipliée par 100 environ ( $10^{-5}$  à  $10^{-3}$  mol/kg) tandis que celle du forage GAL2 d'Alfortville ( $10^{-4}$  à  $10^{-3}$ ) seulement par 6 environ (Figure 3 et Figure 4).

Les évolutions des concentrations en sulfures des fluides géothermaux des forages GCL1 de Clichy-sous-Bois et GRO2 de Ris-Orangis diffèrent quelque peu.

La Figure 5 montre que la teneur en sulfures du site de **Clichy-sous-Bois**, déjà initialement forte (secteur SSD), augmente progressivement mais très légèrement jusqu'en décembre 2006. Cette augmentation était due à une activité bactérienne sur les tubages du puits de production. Depuis 2007, la teneur en sulfures décroît légèrement. Sa valeur actuelle est ainsi égale à celle de novembre 1986 (soit  $7,1 \cdot 10^{-4}$  mol/kg  $H_2O$ ). La diminution du débit (de  $75 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ) est probablement la cause de cette décroissance. En effet, la réduction du débit se traduit généralement par une augmentation des phénomènes de corrosion (augmentation de la teneur en fer dissous) et de dépôt (diminution des teneurs en fer dissous et en sulfures dissous) dans les tubages (Ignatiadis *et al.*, 1998). Or, on notera que la décroissance de la teneur en sulfures observée est associée à une croissance de la concentration en fer dissous (de  $1 \cdot 10^{-6}$  à  $1 \cdot 10^{-5}$  mol/kg  $H_2O$ ). La quantité de fer dissous demeure élevée malgré la précipitation de sulfures de fer dans les tubages, car la corrosion est assurément importante. La nature et la composition des traitements de fond de puits (bactéricides par exemple<sup>3</sup>) est une deuxième cause possible de cette décroissance de la teneur en sulfures.

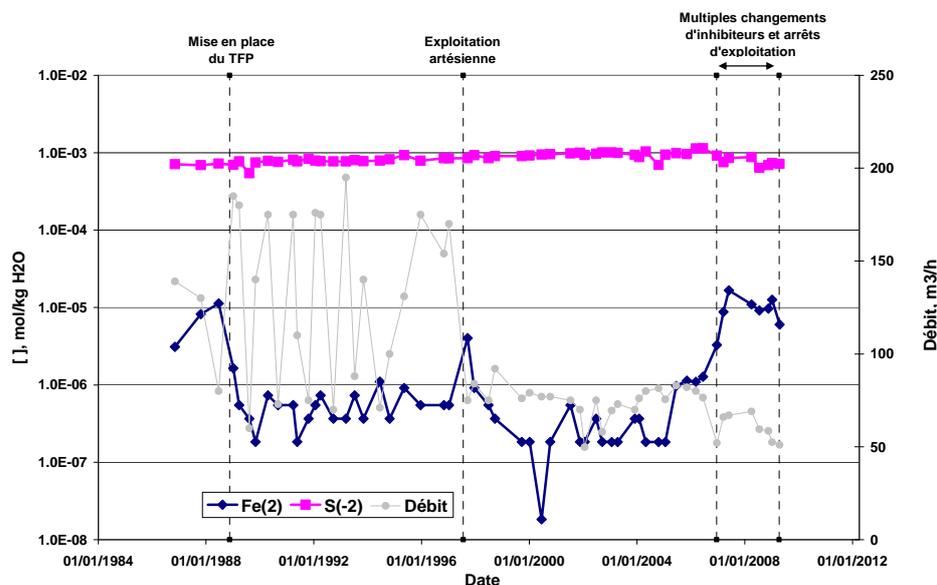


Figure 5 : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous.  
Forage de production GCL1 (Clichy-sous-Bois, SSD).

<sup>3</sup> Les inhibiteurs de corrosion-dépôt peuvent être bactériostatiques aux dosages pratiqués actuellement (5 – 10 mg/l) et à très forte concentration bactéricides (> 20 mg/l) (Ignatiadis *et al.*, 1996). Pour information, la concentration injectée en décembre 2006 était supérieure à 26 mg/l.

Dans le cas du fluide de **Ris-Orangis**, la situation est différente. La concentration en sulfures croît depuis 1985 ; elle a été multipliée par 50 environ. Cependant, contrairement au cas des autres sites des secteurs Sud, Est et VDM, cette évolution n'est pas régulière. Ainsi, on peut y observer quatre phases successives dont l'existence est à relier *a priori* aux variations du débit (Figure 6). En ce sens, on remarquera que la concentration en sulfures dissous dans le fluide de Ris-Orangis augmente progressivement dès lors que le débit est stabilisé ou diminue (phase 3) comme on peut l'observer, par exemple, sur le forage GAL2 d'Alfortville (Figure 4 et Figure 6). Comme dans le cas du site de Clichy-sous-Bois, la diminution de la teneur en sulfures (phase 4) est à relier à la réduction du débit d'exploitation (de 120 m<sup>3</sup>/h à 50 m<sup>3</sup>/h : passage en artésien) qui se traduit à nouveau par une reprise de phénomènes de dépôt/corrosion importants malgré le traitement par inhibiteur (Ignatiadis *et al.*, 1998).

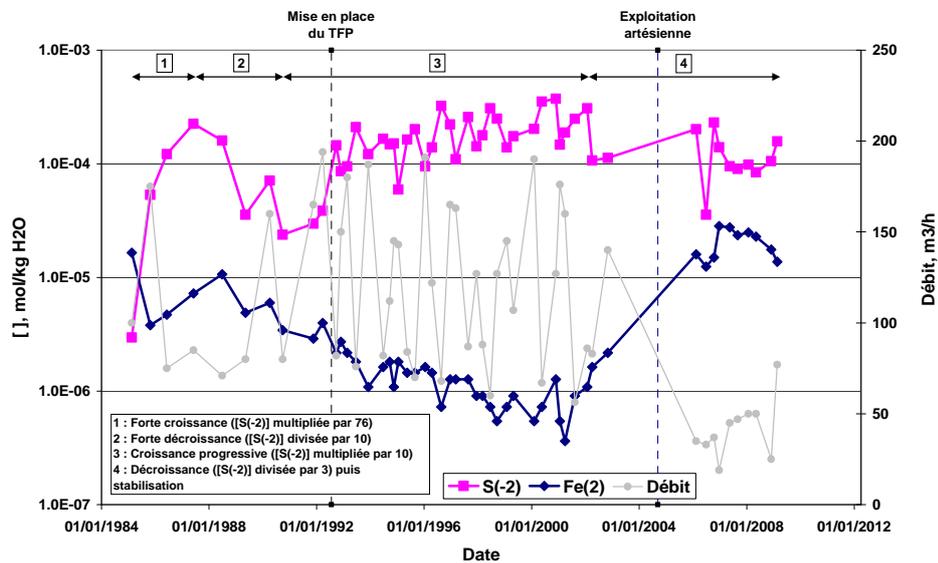


Figure 6 : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GRO2 (Ris-Orangis, Sud).

### Évolution des teneurs en fer dissous

Jusqu'en 2001, la concentration en **fer dissous** décroît dans tous les fluides étudiés. Les deux principales causes de cette décroissance étaient :

- l'augmentation progressive de la teneur en sulfures dissous dans les fluides (les sulfures précipitent le fer qu'il provient du réservoir ou de la corrosion) ;
- la mise en place dans les puits de production des systèmes de traitement par inhibiteur de corrosion-dépôt.

Depuis 2001, on peut observer deux tendances (Figure 3, Figure 4, Figure 5, Figure 7 et annexe 3). La concentration en fer dissous :

1. augmente progressivement (c'est le cas de la majorité des forages examinés). La diminution du débit (passage en artésien de certains doublets) est *a priori* une des raisons de cette croissance (Figure 3 et annexe 3) (Ignatiadis *et al.*, 1998). Cette tendance peut être accentuée lors d'arrêt d'exploitation (débit nul) ou des périodes sans traitement ou sous traitement. En effet, sur la Figure 5, on peut constater que la chute de débit ne s'accompagne pas immédiatement d'une élévation de la concentration en fer dissous dans le fluide. Cette augmentation semble effectivement plutôt initiée par les multiples changements d'inhibiteurs et arrêts d'exploitation intervenant quelques années après le passage en artésien de l'exploitation. L'exemple de Clichy-sous-Bois est celui d'une exploitation devenue artésienne. Néanmoins, on peut facilement imaginer que les traitements de fond de puits puissent impacter de la même manière la concentration en fer dissous des exploitations géothermiques classiques telles que celle de Champigny-sur-Marne par exemple (annexe 3). En revanche, dans le cas du site d'Alfortville (Figure 4), la raison de l'augmentation en fer dissous est probablement à rechercher autour des conséquences du rechemisage de la chambre de pompage réalisé en été 2002 sur les phénomènes de corrosion/dépôts. Après le rechemisage, les échanges de fer entre le fluide produit et le tubage du puits rechemisé ont été modifiés. Ainsi, alors qu'elle a atteint un niveau très faible ( $1,0 \cdot 10^{-6}$  mol/kg H<sub>2</sub>O), la teneur en fer dissous commence à varier en fonction du débit d'exploitation traduisant le fait qu'une partie du fer mesurée en tête de puits provient des tubages. En conséquence, on peut imaginer que la teneur en fer mesurée en tête du puits de production d'Alfortville avant son rechemisage était proche de celle du réservoir. Toutefois, ce site devrait être surveillé plus particulièrement, parce qu'il est sujet d'interférences pouvant amener du fer particulaire ou des sulfures de fer particuliers provenant du réservoir.
2. tend à se stabiliser (c'est le cas pour les forages de Coulommiers (Figure 7) et de Montgeron (annexe 3)). Dans le cas du site de Coulommiers, on notera la légère dépendance de la teneur en fer dissous au débit d'exploitation.

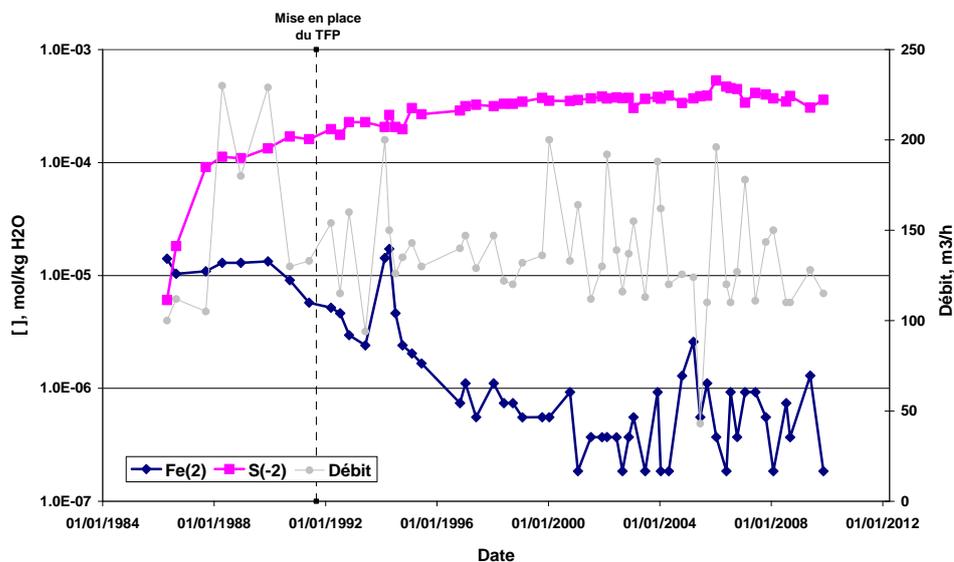


Figure 7 : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous.  
Forage de production GCO1 (Coulommiers, Est).

### 3.1.2. Évolution du potentiel redox (Pe) et du ph

Rappelons que le potentiel redox (ou d'oxydo-réduction) est mesuré (en V) à l'aide d'une électrode en métal inerte et inattaquable (plaque ou fil de platine) et d'une électrode de référence, le plus souvent une électrode de Ag/AgCl. Il est exprimé par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH)<sup>4</sup>. Le potentiel redox mesuré représente le pseudo-équilibre des réactions redox (couples oxydants/réducteurs) au niveau de l'électrode de platine. Il faut distinguer le potentiel redox mesuré et le potentiel Eh, qui est une grandeur thermodynamique que la mesure tente d'approcher. Le pe est lié au Eh par la relation :

$$pe = \frac{F}{2,3RT} Eh$$

où les paramètres F, R et T représentent respectivement la constante de Faraday (96 490 C/mol), la constante des gaz parfaits (8,314 J/mol.K) et la température du fluide (K).

La Figure 8 et la Figure 9 présentent respectivement l'évolution du pH, du pe<sup>5</sup> et du pe(HS<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) recalculé à l'aide du couple sulfure/sulfate des fluides de Meaux-Beauval 1 et d'Alfortville.

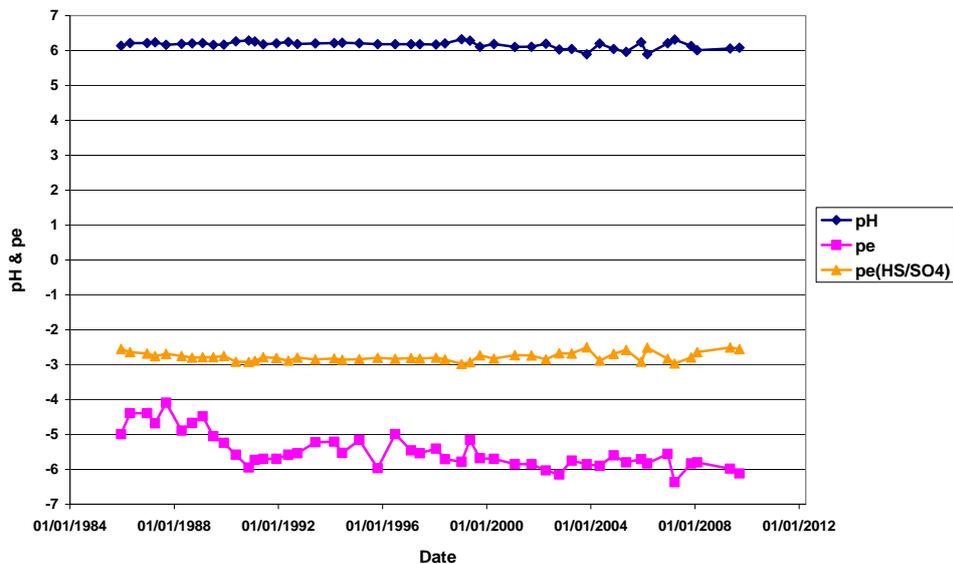


Figure 8 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

<sup>4</sup> Par exemple, lorsque l'électrode de référence est une électrode Ag/AgCl, 0,197 V sont ajoutés à la valeur mesurée pour obtenir la valeur du potentiel redox par rapport à l'ENH.

<sup>5</sup> Le pe est calculé à l'aide de l'équation indiquée ci-dessus, le potentiel redox mesuré étant pris égal au potentiel Eh.

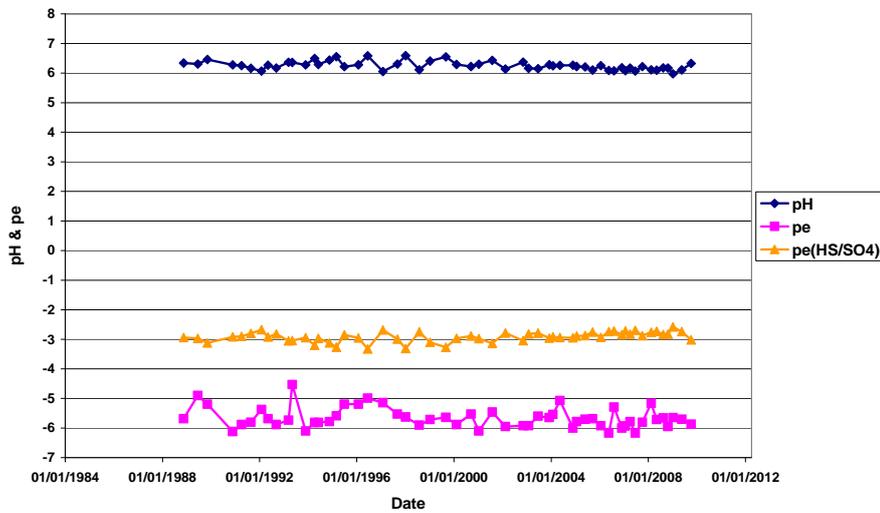


Figure 9 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

### Évolution du pH des fluides

Le pH est relativement stable depuis le début des exploitations pour tous les sites étudiés (Figure 8 et Figure 9). Néanmoins, la Figure 10 montre que dans les dernières années d'exploitation (après 2001 en général), il diminue en moyenne de 0,15 ( $\pm 0,05$ ) unité dans tous les fluides examinés, exception faite du fluide de Coulommiers. En effet, dans le cas du site de Coulommiers, le pH poursuit sa décroissance depuis 1986. Ainsi, sur la période 1986-2009, il a diminué d'environ 0,5 unité (Figure 10).

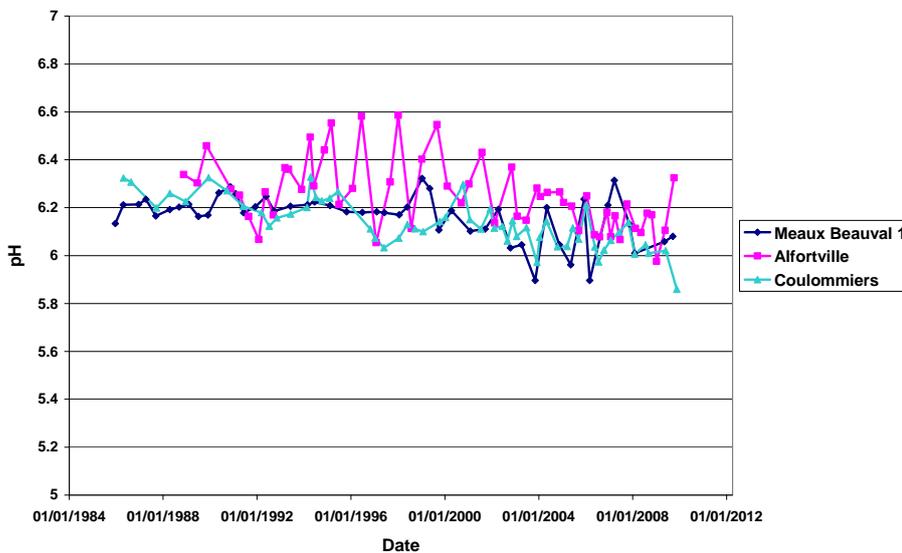
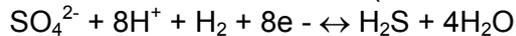


Figure 10 : Évolution du pH. Forages de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est), GAL2 (Alfortville, VDM) et GCO1 (Coulommiers, secteur EST).

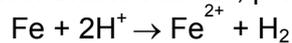
Les phénomènes majeurs susceptibles d'influencer le pH des fluides géothermaux sont au nombre de quatre :

- la réduction bactérienne des sulfates en sulfures (consommation de  $H^+$  ;  $pH \uparrow$ ) :

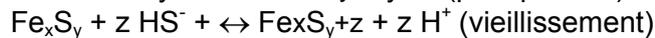


avec la dissociation de  $H_2S$  en  $HS^-$  selon :  $H_2S \leftrightarrow HS^- + H^+$  ;

- la corrosion des tubages (consommation de  $H^+$  ;  $pH \uparrow$ )



- la précipitation de sulfures de fer et leurs vieillissements (production de  $H^+$  ;  $pH \downarrow$ ) :



Au contraire, la dissolution des dépôts selon  $Fe_xS_y + y H^+ \leftrightarrow x Fe^{2+} + y HS^-$  consomme des protons.

- le dégazage de  $CO_2$  (consommation de  $H^+$  ;  $pH \uparrow$ ) :



La précipitation de sulfures de fer et leur vieillissement progressif sont les seuls processus pouvant expliquer la diminution du pH (augmentation de la teneur en  $H^+$ ) observée sur tous les sites étudiés. Il est important de préciser que cette interprétation ne tient pas compte de la contribution en protons du réservoir. Or, il est probable que le pH du réservoir est diminué depuis le démarrage des exploitations géothermiques. En effet, depuis leur mise en production, les forages géothermiques (injecteur et producteur) ont généré d'énormes quantités de sulfures ( $HS^-$ ) en grande partie réinjectées dans le réservoir (plusieurs dizaines voire des centaines de tonnes par an) pouvant ainsi y précipiter le fer dissous et autres cations présents, et en conséquence, y produire des protons et faire diminuer le pH du fluide produit de nouveau.

### **Évolution du pe des fluides**

Depuis le démarrage des exploitations, le **pe** montre une diminution moyenne de 1,5 ( $\pm 0,5$ ) unité pour la quasi-totalité des sites étudiés (Figure 8). Plus précisément, cette diminution intervient lors des premières années d'exploitation (avant 1990 en général). Par la suite, le pe se stabilise. Seules exceptions à ce comportement, les sites d'Alfortville et de Montgeron pour lesquels le pe est globalement stable. Comme observé lors de la phase 2, on remarquera que le pe (recalculé) est globalement très stable sur l'ensemble des doublets (Figure 8 et Figure 9).

La Figure 11 et la Figure 12 présentent les évolutions du pe et du  $\log [Fe(2)]$  et celles du pe et du  $\log [S(-2)]$  pour les sites de Meaux-Beauval 1 et d'Alfortville. Le pe est globalement corrélé avec la concentration en  $Fe(2)$  et anti-corrélé avec la concentration en  $S(-2)$ . Ceci est encore une preuve de l'interdépendance de ces paramètres comme cela a été montré par Peyrot *et al.* (1995) et Ignatiadis et Peyrot (1995).

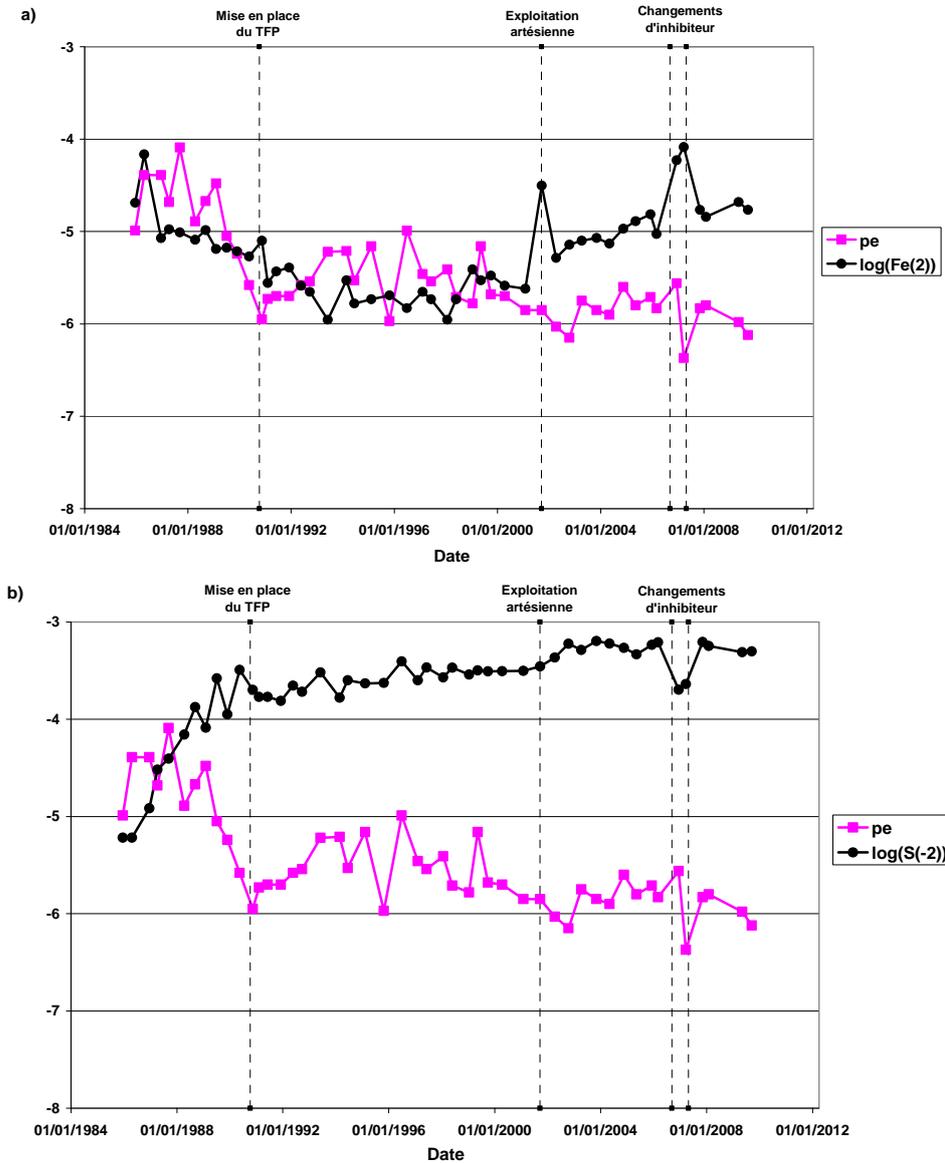


Figure 11 : Comparaison des évolutions du  $pe$  et des concentrations en fer a) et en sulfures b) dissous. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

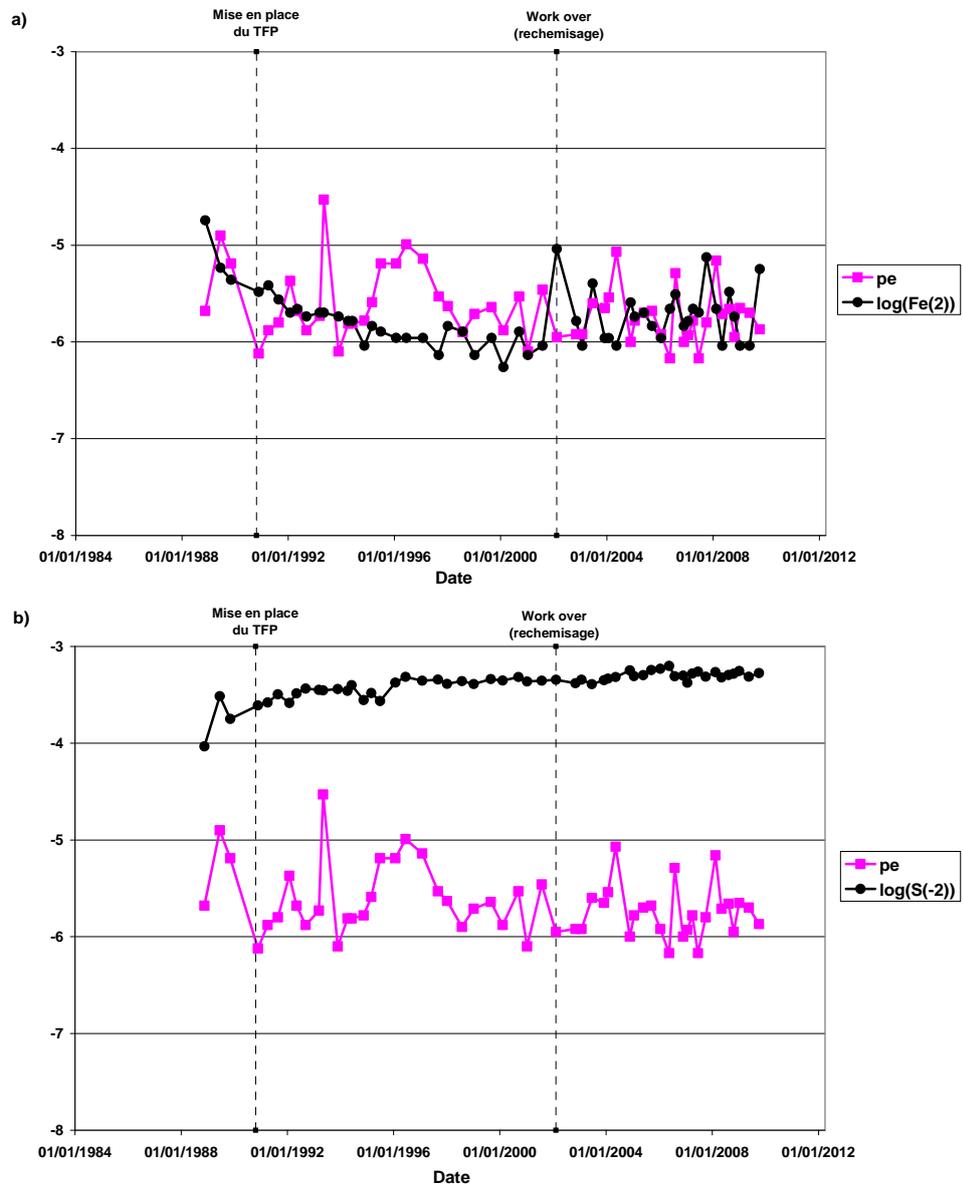


Figure 12 : Comparaison des évolutions du pe et des concentrations a) en fer et b) en sulfures dissous. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

### 3.1.3. Évolution de l'état d'équilibre thermodynamique

Les figures suivantes montrent l'évolution de l'**indice de saturation (IS)** de quelques minéraux existant dans le réservoir du Dogger et/ou susceptibles de précipiter sous forme de dépôts dans les forages et dans les échangeurs géothermiques des différents sites étudiés.

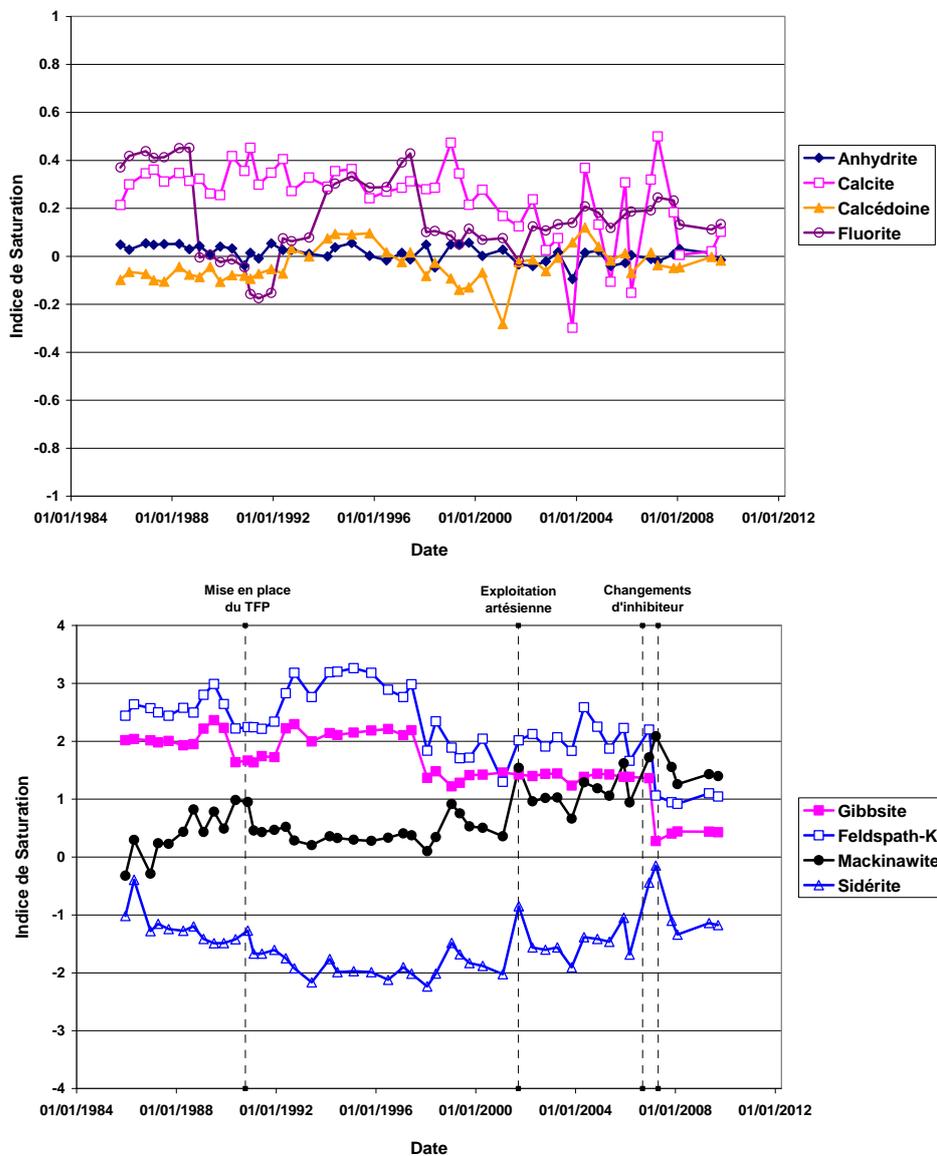


Figure 13 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêt en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

Le comportement de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) est relativement instable suivant le forage considéré (c'est le cas notamment des forages d'Alfortville et de Champigny-sur-Marne), probablement à cause des problèmes de dégazage du fluide ( $\text{CO}_2$  notamment) assez fréquents dans ce type de système (Goyénèche *et al.*, 2005).

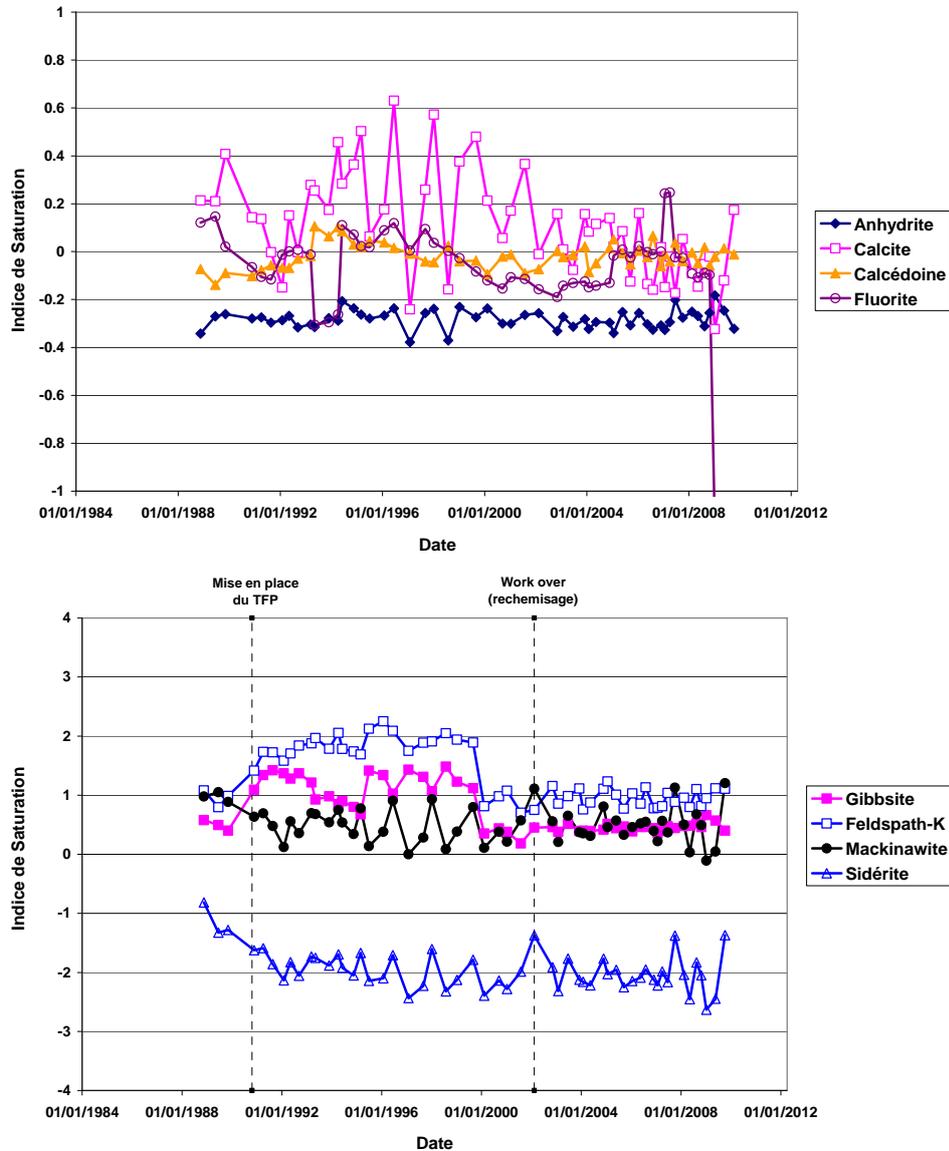


Figure 14 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêt en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

Néanmoins, sur la période considérée, la calcite est globalement saturée (IS ~ 0) dans tous les fluides examinés. On peut donc supposer qu'elle présente un risque ponctuel de précipitation, à l'occasion de dégazages<sup>6</sup>, dans tous les forages de production étudiés. Les dernières années de production, ce risque paraît néanmoins réduit du fait de la chute généralisée du pH dans les fluides (diminution de la saturation de la

<sup>6</sup> Rappel : le dégazage de CO<sub>2</sub> selon  $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  consomme des protons augmentant ainsi le pH et, par conséquent, la saturation de la calcite selon la réaction  $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ .

calcite). C'est le cas notamment pour les sites de Clichy-sous-Bois, d'Alfortville et de Montgeron pour lesquels la calcite est par moment sous-saturée ( $IS < 0$ ) (Figure 13 et Figure 14 et annexe 5).

Les indices de saturation de la **calcédoine** ( $SiO_2$ ) et de l'**anhydrite** ( $CaSO_4$ ) sont stables depuis le début des exploitations pour tous les sites (Figure 13 et Figure 14). La calcédoine est ainsi proche de l'équilibre thermodynamique ( $IS \sim 0$ ). L'anhydrite est saturée dans les fluides de Meaux-Beauval 1 et de Coulommiers et sous-saturée dans les autres fluides étudiés ( $-0,6 < IS < -0,2$ ).

Le comportement de la **fluorite** ( $CaF_2$ ) diffère selon le forage considéré. Ainsi, la fluorite est sous-saturée dans les fluides du secteur Sud et de la Seine-Saint-Denis, saturée dans ceux du Val-de-Marne et sursaturée dans ceux de l'Est. En revanche, aucune évolution nette de son IS n'est perceptible sur la période observée (Figure 13, Figure 14 et annexe 5).

La **gibbsite** ( $Al(OH)_3$ ), le **feldspath potassique** ( $KAlSi_3O_8$ ) et la **mackinawite** ( $FeS$ ) sont saturés ( $IS = \pm 0,5$ ) à sursaturés ( $IS > 0,5$ ) pour tous les forages étudiés (Figure 13 et Figure 14). Il semblerait ainsi que la mackinawite puisse précipiter pouvant générer des problèmes de dépôts et de corrosion sous dépôt<sup>7</sup> (Amalhay et Ignatiadis, 1996, 1998 ; Ignatiadis *et al.*, 1998) sur tous les sites examinés.

Depuis la mise en place des traitements de fond de puits, l'évolution de l'indice de saturation de la mackinawite épouse exactement celle du Fe(2) pour tous les sites étudiés (exception faite de Ris-Orangis). En revanche, avant la mise en place de ces traitements, l'évolution de l'indice de saturation de la mackinawite peut être identique à celle du S(-2) (c'est le cas pour les sites du secteur Est) ou à celle du Fe(2). La stabilisation de la teneur en sulfures dissous est probablement la raison de ces deux comportements « initiaux » antagonistes, l'indice de saturation de la mackinawite ne dépendant plus que de la teneur en fer une fois la concentration en sulfures stable. Le cas du site de Ris-Orangis semble confirmer cette hypothèse. En 2009, la concentration en sulfures dissous de ce site n'avait pas encore atteint de palier. Or, on remarquera que, pour ce site, l'indice de saturation de la mackinawite varie parallèlement à la teneur en sulfures dissous depuis la mise en production (Figure 15, Figure 16 et Figure 17).

Depuis le démarrage de la production, la **sidérite** est sous-saturée ( $IS < -0,5$ ) dans tous les fluides examinés. Le risque de précipitation de la sidérite est donc minime (Figure 13 et Figure 14). Parcours d'un kilogramme d'eau produit par un puits de production d'un doublet type du Dogger parisien

---

<sup>7</sup> Les dépôts de mackinawite sont conducteurs. Ils ne protègent donc pas de la corrosion contrairement aux dépôts préalable de sulfures de fer amorphes ( $FeS$ ).

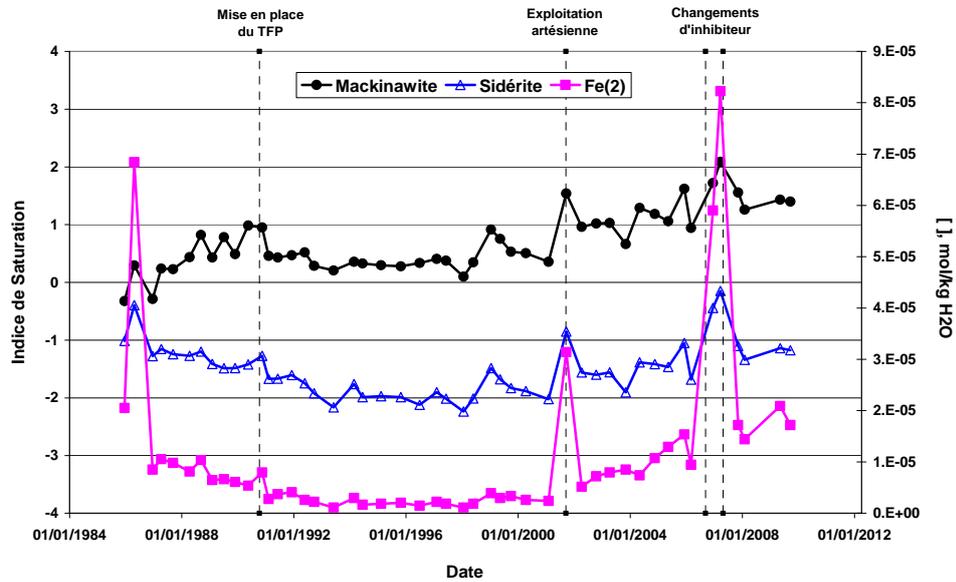


Figure 15 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

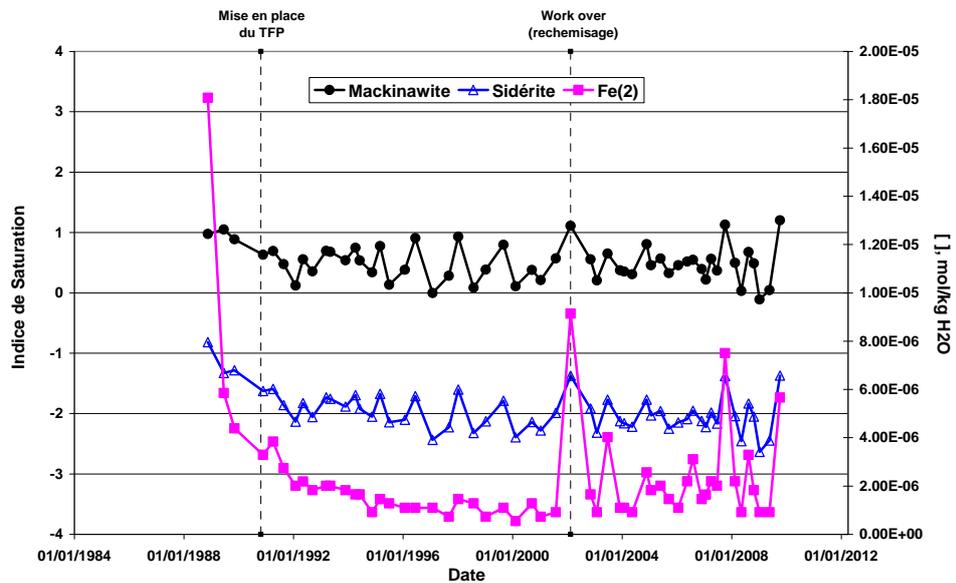


Figure 16 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

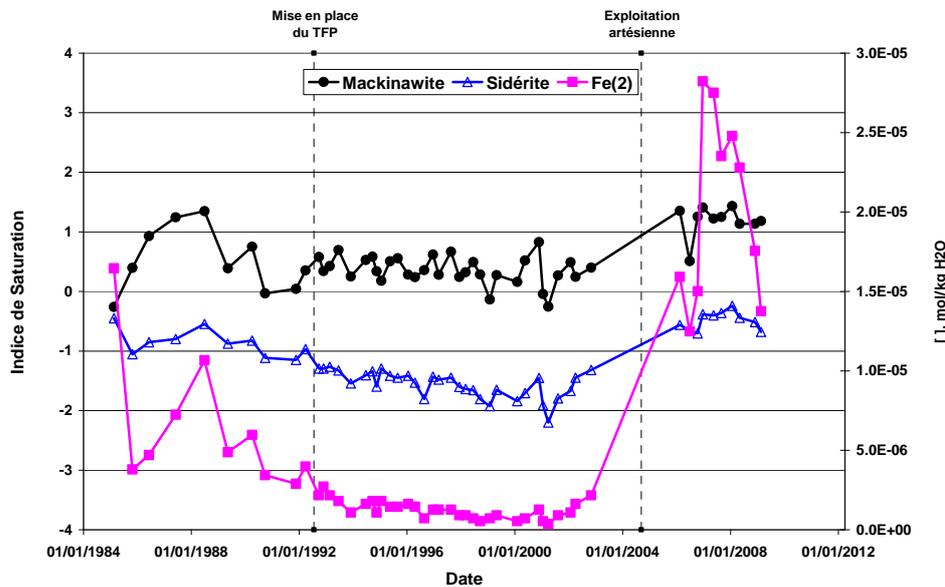


Figure 17 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GRO2 (Ris-Orangis, Sud).

### 3.1.4. Conclusion de l'étude géochimique

Le diagnostic thermodynamique, réalisé à travers plusieurs phases du projet Dogger et de projets antérieurs réalisés par les équipes BRGM, fournit des résultats très intéressants sur le fonctionnement physico-chimique et les annonciateurs de la progression du front froid dans le domaine du proche puits. Ainsi, sur la période d'exploitation (1985-2010), les tendances suivantes ont été mises en évidence :

- les sulfures et le fer dissous sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration et de façon indépendante de la température ;
- le pH est globalement stable ( $6 < \text{pH} < 7$ ). Il diminue en moyenne de 0,15 unité les dernières années d'exploitation (après 2001). Vu le caractère très intégrateur de ce paramètre, également, très dépendant du pouvoir tampon des fluides du Dogger et de la matrice rocheuse carbonatée, il est délicat d'affirmer de façon certaine que cette tendance est une vraie acidification du réservoir. Il est proposé, dans une étape ultérieure, d'analyser de façon plus détaillée les différentes réactions acido-basiques impliquées dans le contrôle du pH du fluide du Dogger ;
- le pe diminue en moyenne de 1,5 unité pour tous les forages (sauf Alfortville et Montgeron pour lesquels le pe est stable). Cette diminution intervient dans les premières années d'exploitation (avant 1990), ensuite le pe se stabilise ;
- la calcédoine ( $\text{SiO}_2$ ) est saturée pour tous les forages (IS  $\sim 0$ ).

Enfin, les tendances mises en évidence lors des phases 1 et 2 (Goyénèche *et al.*, 2004 et 2005) se poursuivent sur la période (2005-2010) pour une part des paramètres analysés (pe, concentrations en majeurs dissous, S(-2) et indices de saturation) et

diffèrent pour l'autre part (Fe(2) et pH). Elles paraissent peu dépendantes du secteur géographique. En effet, les différences sont *a priori* à rechercher parmi les conditions d'exploitation (**débit**, traitements, travaux, etc.). La saturation de l'anhydrite à l'Est (région de Meaux et de Coulommiers) est la seule spécificité géographique réellement observée.

Lors de la phase 2 de l'étude de gestion du Dogger, il a été précisé que seul le **silicium** pourrait annoncer l'approche du front froid<sup>8</sup> (Goyénèche *et al.*, 2005) au regard des cinétiques de précipitation/dissolution des « minéraux de contrôle » des concentrations des éléments en solution. Le fait que le calcium ne puisse pas être annonciateur du front froid serait confirmé, s'il s'avère que le pH du réservoir, qui a diminué en moyenne de 1,5 unités depuis le démarrage des exploitations, est généralisé sur l'ensemble des doublets.

Enfin, l'état de saturation de la **calcédoine** reste la fonction active susceptible d'annoncer l'arrivée du front froid dans le domaine du proche puits de production (Goyénèche *et al.*, 2005).

### 3.1.5. Simulation du parcours d'un kilogramme d'eau géothermale depuis sa mise en production

***En résumé et afin de synthétiser les grandes phases d'évolution de la chimie des eaux du Dogger depuis la mise en exploitation intensive de cet aquifère*** (début des années 80), considérons précisément le ***parcours d'un kilogramme d'eau produit au cours du temps par un puits de production d'un doublet type*** (faible teneur initiale en sulfure) du Dogger parisien en intégrant la chronologie des phénomènes entre 1985 (date conventionnelle du début d'exploitation) et aujourd'hui (2010) :

#### **1985-1990 : début de production à l'arrivée des problèmes majeurs d'exploitation**

Le kilogramme du fluide natif du Dogger (avec son fer dissous « réservoir » relativement important, ses sulfures absents ou peu abondants et un pH et pe initiaux) rencontre le tubage en acier ordinaire des puits producteur et injecteur, les corrode (consommation de H<sup>+</sup> et production de Fe<sup>2+</sup> et d'H<sub>2</sub>), ce qui, en fonction de la teneur en sulfures, engendre la précipitation de dépôts (FeS) avec légère restitution de H<sup>+</sup> sur les tubages des deux puits.

Peu à peu et sous l'effet de températures propices, notamment dans le puits injecteur, une activité bactérienne se développe sur les parois des deux puits, qui produit du sulfure HS<sup>-</sup> (consommation d'acidité), dont la teneur varie en fonction du débit

---

<sup>8</sup> Le silicium est contrôlé par la solubilité de minéraux caractérisés par des cinétiques lentes : les silicates et les aluminosilicates. Au contraire, le bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et le calcium sont contrôlés par des minéraux à cinétiques rapides (carbonates et sulfates). Il n'est donc pas envisageable d'identifier des évolutions des concentrations en HCO<sub>3</sub> et en Ca, susceptibles d'annoncer l'approche du front froid, à des temps bien antérieurs à son arrivée.

d'exploitation (preuve que cette activité est localisée sur les parois des tubages des puits). Parallèlement, le teneur en fer en tête du puits de production décroît, du fait de la précipitation du fer  $Fe^{2+}$  en sulfure de fer ( $FeS$  ou  $Fe_xS_y$ ) par le sulfure de plus en plus produit.

Rappelons que les ingénieurs du début d'exploitation pensaient que l'indicateur le plus pertinent de percée chimique du front froid serait le **calcium**. En effet, le réservoir du Dogger du Bassin parisien étant carbonaté oolithique, ses fluides étaient initialement tous saturés par rapport à la calcite. Ainsi, d'après eux, le refroidissement du réservoir, consécutif à l'injection d'eau plus froide pendant des nombreuses années, y aurait conduit à la sous-saturation de la calcite, qui aurait libéré du calcium. En conséquence, la teneur en calcium mesurée en tête du puits de production aurait été de plus à plus forte et tracerait l'approche de ce front froid dans le domaine du proche puits de production.

### **1990-2000 : apogée et résolution des problèmes majeurs d'exploitation par traitements en fond de puits de production.**

L'activité bactérienne se stabilise (teneur en sulfures stable en tête de puits à débit constant) avec poursuite de la précipitation de dépôt tant que la corrosion est active, même sous traitement par inhibiteur. Par ailleurs, la teneur en fer en tête des puits de production décroît et se stabilise à des valeurs très faibles, comme attendu, du fait de l'augmentation de la teneur en sulfure avec lequel elle est liée via le minéral qui contrôle leur solubilité (Peyrot *et al.*, 1995 ; Ignatiadis et Peyrot, 1995) : la mackinawite.

Durant cette période, la sulfato-réduction bactérienne, arrivée à son apogée dans les puits de production et d'injection, a généré d'énormes quantités de sulfures, en grande partie réinjectées dans le réservoir (entre 5 et 150 tonnes de sulfures par an, selon le débit d'exploitation du doublet). Ce processus s'est concrétisé par l'augmentation progressive de la teneur, dite « réservoir », des sulfures, notable au fil des années. Le sulfure est avéré être un bon indicateur de la recirculation du fluide dans la boucle géothermale (percée chimique). Cela a été mis en évidence grâce à des outils géochimiques (via les évolutions des teneurs en sulfure et des isotopes du soufre en fonction du débit, Ignatiadis, 1994 ; Ignatiadis *et al.*, 1996b, 1998), mais également grâce à la modélisation hydrodynamique (Matray et Menzoz, 1996)

Par ailleurs, il n'a été détecté ni de baisse généralisée de la température de production ni d'augmentation de la teneur en calcium en tête des puits de production.

### **2000-2010 : reprise des problèmes de corrosion et traitement à faire évoluer**

Sur cette période, alors que les sulfures restent stables et invariants avec le débit d'exploitation, les fluides produits sont de plus en plus acides, et le fer dissous augmente, montrant que les phénomènes de corrosion-dépôt se poursuivraient, et cela malgré les traitements par inhibiteurs.

Tous les facteurs aggravants sont aujourd'hui réunis pour que les phénomènes de corrosion-dépôts reprennent : fluide minéralisé chloruré, suffisamment sulfuré et plus acide. Les raisons de cette reprise sont donc multiples, les principales étant la nature

du fluide, la diminution du débit (facteur déjà présenté comme déterminant pour la corrosion dépôt par Ignatiadis *et al.*, 1998), et surtout l'acidification du fluide.

La raison principale de l'acidification du fluide survenue sur cette période serait la forte précipitation de sulfures de fer dans le réservoir. En effet, au cours de son parcours entre le puits injecteur et le puits producteur, le fluide, désormais enrichi en sulfures du fait de l'activité bactérienne, précipite le fer et les autres cations dissous dans le réservoir, libérant ainsi des protons  $H^+$ .

Sur cette période la saturation de la calcite diminue (fait avéré). On pourrait penser que cette diminution de la saturation est en lien direct avec le refroidissement du fluide. Or, aucune augmentation de la teneur en calcium n'est encore perceptible comme précurseur de la percée chimique du front froid.

L'acidification du fluide du réservoir fait que le calcium n'est pas un bon indicateur de l'arrivée du front froid confirmant ainsi les conclusions du rapport final de la phase Dogger 2 (Goyénèche *et al.*, 2005).

Il a été montré que certains éléments ( $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  et Si) étaient sensibles à la température du fluide, car contrôlés par des minéraux à comportement prograde ou rétrograde. De plus, au regard des cinétiques de précipitation/dissolution des « minéraux de contrôle » des concentrations de ces éléments en solution, il a été précisé que seul le **silicium** pourrait annoncer l'approche du front froid<sup>9</sup> (Goyénèche *et al.*, 2005). Le fait que le calcium ne puisse pas être annonciateur du front froid serait confirmé, s'il s'avère que le pH du réservoir a diminué depuis le démarrage de l'exploitation du Dogger. Parallèlement, les phases qui contrôlent les concentrations en silicium (silicates et aluminosilicates) dans les fluides géothermaux sont « potentiellement indicatrices du refroidissement ». Néanmoins, les données en aluminium étant rares, la **calcédoine** reste la phase susceptible d'annoncer l'arrivée du front froid dans le domaine du proche puits de production (Goyénèche *et al.*, 2005).

---

<sup>9</sup> Le silicium est contrôlé par la solubilité de minéraux caractérisés par des cinétiques lentes : les silicates et les aluminosilicates. Au contraire, le bicarbonate ( $HCO_3^-$ ) et le calcium sont contrôlés par des minéraux à cinétiques rapides (carbonates et sulfates). Il n'est donc pas envisageable d'identifier des évolutions des concentrations en  $HCO_3^-$  et en Ca, susceptibles d'annoncer l'approche du front froid, à des temps bien antérieurs à son arrivée.

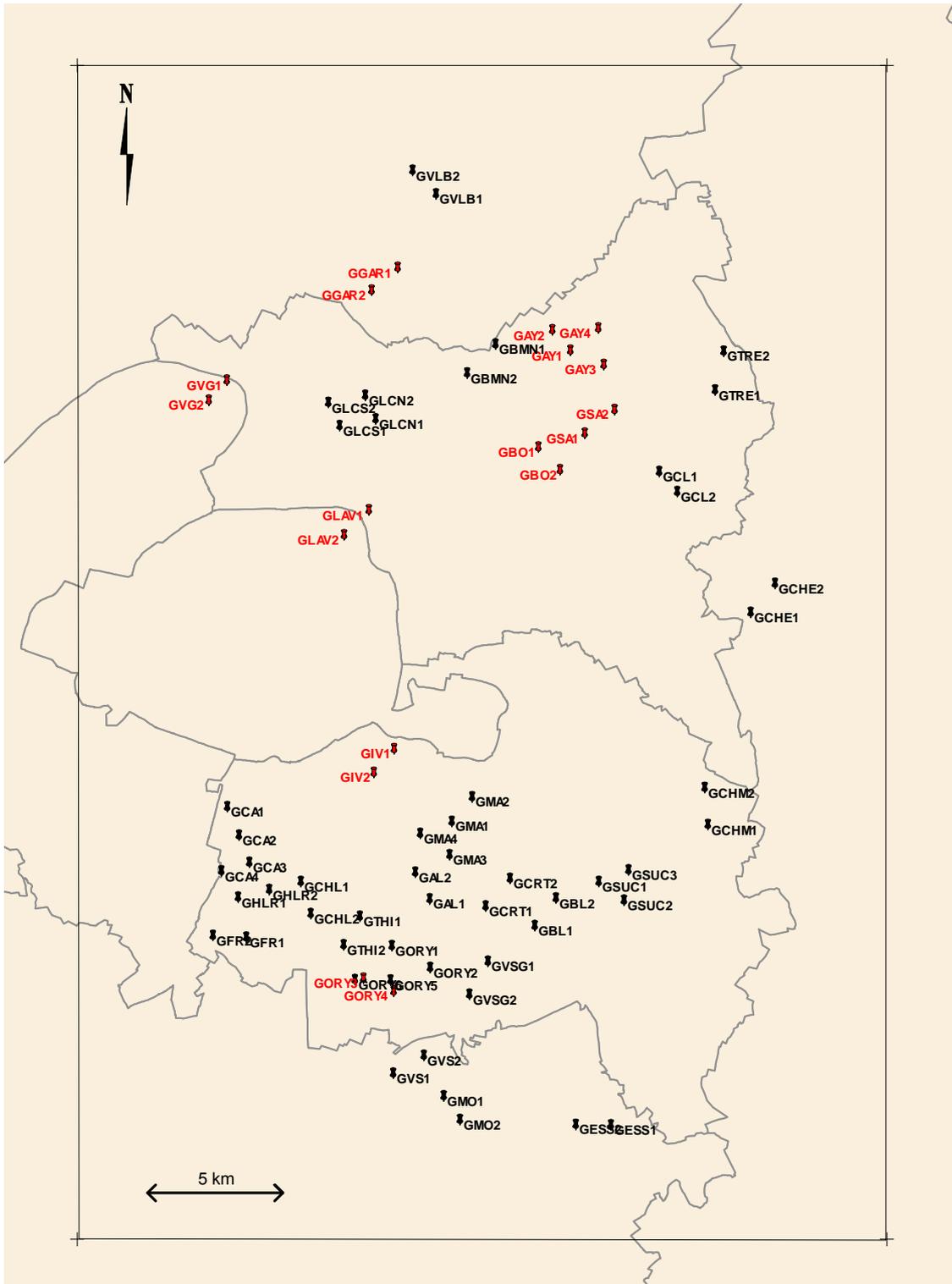


Figure 18 : Domaine d'étude (rectangle de 30 km sur 44 km) avec localisation des doublets (noir : doublets en exploitation, rouge : doublets arrêtés).

## 3.2. MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET THERMIQUE DU RÉSERVOIR DU DOGGER ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### 3.2.1. Problématique liée à l'augmentation de la densité d'opérations géothermiques exploitant par doublet la ressource du Dogger dans la région parisienne

#### *Exploitation du stock de chaleur du réservoir du Dogger sous la région parisienne*

- **Domaine de l'étude du Val-de-Marne et Seine-Saint-Denis**

L'alimentation des réseaux de chaleur urbains par géothermie est la plus développée, en région parisienne, dans les départements du Val-de-Marne et de la Seine-Saint-Denis. Ces deux départements comptent 32 opérations dont **26 en exploitation** pour un total de 34 opérations en exploitation sur l'ensemble de la région parisienne (cf. tableau 2).

La taille du domaine de l'étude hydraulique et thermique est fixée de manière à prendre en compte les doublets géothermiques situés dans ces deux départements et ceux, en périphérie, dont le fonctionnement influence l'environnement proche des doublets étudiés. Ainsi, le domaine étudié est délimité par un rectangle de 44 km x 30 km (Figure 18).

- **Mode d'exploitation et contrainte**

L'exploitation de la ressource par la technique du doublet implique de refroidir, à travers un échangeur, le fluide prélevé en profondeur au puits de production et de le réinjecter dans le réservoir, créant ainsi un panache de fluide plus froid se développant autour du puits injecteur. Le gradient naturel de température dans le réservoir ne permet pas la régénération de ce stock de chaleur à l'échelle du temps d'exploitation.

La progression du panache refroidi dépend du régime d'exploitation (débit et température d'injection), de celui des opérations voisines et du comportement du réservoir. L'arrivée de ce front froid au puits producteur correspond au temps de percée et marque le début de la décroissance en température du fluide produit. La courbe de décroissance en température permet de prévoir la durée de vie de l'opération.

Nom des exploitations	Producteurs	Injecteurs	Département	Nom	Date mise en service
Achères	GACH1	GACH2	78	Yvelines	déc-83
La Celle Saint Cloud	GLC1	GLC2	78	Yvelines	avr-83
Beauvais	GBVS1	GBVS2	60	Oise	oct-82
Creil	GCR3&4	GCR1&2	60	Oise	oct-76
Creil le Plateau	GCR5	GCR6	60	Oise	oct-83
Cergy	GCY1	GCY2	95	Val d'Oise	juil-82
Garges les Gonesses	GGAR2	GGAR1	95	Val d'Oise	oct-84
Chatenay Malabry	GCTM2	GCTM1	92	Hauts de Seine	oct-84
Epernay	GEPE1	GEPE2	51	Marne	févr-83
Evry	GEV1	GEV2	91	Essonne	juil-83
La Porte Saint Cloud	GPSC2	GPSC1	75	Paris	août-84
La Villette	GLAV2	GLAV1	75	Paris	non exploité
Fontainebleau	GFO1	GFO2	77	Seine et Marne	déc-83
Melun l'Almont	GMEL2	GMEL1	77	Seine et Marne	71
Vaux le Penil	GVLP1	GVLP2	77	Seine et Marne	déc-83
Villeneuve la Garenne	GVG2	GVG1	92	Hauts de Seine	76
Melun l'Almont	GMEL4	GMEL3	77	Seine et Marne	88 pour GMEL3 et 96 pour GMEL4
Ris Orangis	GRO2	GRO1	91	Essonne	oct-83
Le Mée sur Seine	GLMS1	GLMS2	77	Seine et Marne	78
Meaux Beauval 1	GMX5	GMX6	77	Seine et Marne	oct-83
Meaux Beauval 2	GMX8	GMX7	77	Seine et Marne	avr-84
Meaux Collinet	GMX1	GMX2	77	Seine et Marne	oct-82
Meaux Hopital	GMX3	GMX4	77	Seine et Marne	juil-83
Coulommiers	GCO1	GCO2	77	Seine et Marne	nov-81
Alfortville	GAL2	GAL1	94	Val de Marne	oct-87
Bonneuil sur Marne	GBL1	GBL2	94	Val de Marne	janv-87
Cachan 1	GCA3	GCA1	94	Val de Marne	oct-85
Cachan2	GCA4	GCA2	94	Val de Marne	déc-85
Champigny	GCHM1	GCHM2	94	Val de Marne	déc-85
Chevilly Larue	GCHL2	GCHL1	94	Val de Marne	oct-85
Creteil Mont Mesly	GCRT1	GCRT2	94	Val de Marne	oct-85
Epinay sous Sénart	GESS2	GESS1	94	Val de Marne	oct-84
Fresnes	GFR2	GFR1	94	Val de Marne	janv-87
L'Hay les Roses	GHLR2	GHLR1	94	Val de Marne	oct-85
Maisons Alfort 1	GMA1	GMA2	94	Val de Marne	juil-85
Maisons Alfort 2	GMA3	GMA4	94	Val de Marne	oct-86
Montgeron	GMO2	GMO1	94	Val de Marne	nov-82
Orly I Gazier	GORY2	GORY1	94	Val de Marne	janv-84
Orly II Le Nouvelet 1	GORY3	GORY4	94	Val de Marne	janv-87
Orly II Le Nouvelet 2	GORY6	GORY5	94	Val de Marne	janv-08
Sucy en brie	GSUC1	GSUC2	94	Val de Marne	oct-84
Thiais	GTH1	GTH2	94	Val de Marne	juil-86
Vigneux sur Seine	GVS1	GVS2	94	Val de Marne	oct-85
Villeneuve St Georges	GVSG1	GVSG2	94	Val de Marne	oct-87
Ivry sur Seine	GIV2	GIV1	94	Val de Marne	janv-84
La Courneuve Sud	GLCS1	GLCS2	93	Seine St Denis	mai-82
La Courneuve Nord	GLCN2	GLCN1	93	Seine St Denis	févr-83
Le Blanc Mesnil	GBMN1	GBMN2	93	Seine St Denis	nov-83
Tremblay	GTRE1	GTRE2	93	Seine St Denis	oct-84
Chelles	GCHE1	GCHE2	93	Seine St Denis	déc-86
Clichy sous Bois	GCL1	GCL2	93	Seine St Denis	nov-82
Villiers le Bel	GVLB1	GVLB2	93	Seine St Denis	oct-85
Bondy	GBO2	GBO1	93	Seine St Denis	nov-84
Aulnay sous Bois RDV	GAY1	GAY2	93	Seine St Denis	févr-82
Aulnay sous Bois VGS	GAY3	GAY4	93	Seine St Denis	oct-84
Sevran	GSA1	GSA2	93	Seine St Denis	sept-83

Tableau 3 : Exploitations géothermiques au Dogger en région Parisienne  
(en fond jaune les doublets du Val-de-Marne et en fond vert les doublets de Seine-Saint-Denis – en rouge les doublets arrêtés).

## Gestion de la ressource et des opérations

Le développement de la géothermie dans les départements du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis fait naître de nouveaux projets d'implantation ou de réhabilitation de doublets géothermiques dont les équipements d'exploitation ont vieilli.

Le dimensionnement du doublet (espacement des puits d'injection et de production, débits de prélèvement, température de réinjection) ainsi que l'organisation des différents doublets à la profondeur du réservoir doivent prendre en compte l'évolution du champ de température pour contrôler le recyclage du fluide injecté aux puits de production et la baisse de température du fluide prélevé.

Le calcul du champ des charges hydrauliques et celui des températures dans le réservoir depuis la mise en service du premier doublet en 1976 (Villeneuve-la-Garenne en Seine-Saint-Denis) jusqu'à aujourd'hui ainsi qu'un calcul prévisionnel à 2020, permet de dresser une carte des zones refroidies et de celles encore potentiellement exploitables pour le prélèvement de chaleur. Par ailleurs, ces résultats permettent d'anticiper la percée thermique aux doublets encore en exploitation et, par conséquent, constituent un outil d'aide au renouvellement d'opérations géothermiques.

### **3.2.2. Calcul du champ de température par méthode analytique**

#### ***Hypothèses simplificatrices pour la résolution des équations de transfert thermique***

La méthode analytique permet, par approche simplifiée du système, de représenter l'avancée du front thermique par un cercle centré sur le puits injecteur.

Elle s'appuie sur trois hypothèses principales :

- le puits est considéré comme un puits unique sans interférences avec les puits voisins ;
- le front thermique est de type piston (cylindre dont le rayon augmente dans le temps) avec un front raide entre la température de réservoir et la température d'injection ;
- le rôle tampon des épontes n'est pas pris en compte, ce qui maximise l'impact thermique dans le réservoir.

#### ***Méthode de calcul***

- **Source des données**

Les données nécessaires au calcul sont les chroniques des débits d'injection au cours du temps de fonctionnement du doublet, l'épaisseur de la zone saturée au niveau du puits injecteur et les capacités calorifiques de la roche et du fluide.

Ces données sont extraites des précédents travaux sur la caractérisation du réservoir et de la base Dogger qui contient les informations provenant, soit des mains courantes fournies par l'exploitant, soit des données issues du dispositif de télésuivi qui existait dans la période 1990 -1993 pour certains doublets, soit, enfin, des essais par paliers effectués par les sociétés de service CFG Services et GPC I&P.

- **Traitement des données**

Pour chaque site, les chroniques de débit d'injection sont reconstituées et le calcul des volumes cumulés d'eau froide injectée est effectué.

Les rayons thermiques sont ensuite calculés à partir de la formule analytique ci-dessous basée sur la vitesse de Darcy des particules d'eau refroidie.

Nom	Code	Rayon thermique (m)	Diamètre thermique (m)
Aulnay sous Bois	GAY2	509	1018
Aulnay Gros Saule	GAY4	676	1352
Bondy	GBO1	453	906
Garges les Gonesses	GGAR1	430	860
Ivry	GIV1	403	806
Sevran	GSA2	494	988
Villeneuve la Garenne	GVG1	491	982
Alfortville	GAL1	1329	2658
Bonneuil	GBL2	777	1554
Cachan 1	GCA1	1163	2326
Cachan 2	GCA2	818	1636
Champigny	GCHM2	867	1734
Chatenay Malabry	GTM1	606	1212
Chelles	GCHE2	994	1988
Chevilly Larue	GCHL1	1092	2184
Clichy sous Bois	GCL2	854	1708
Creteil MontMesly	GRT2	833	1666
Epinay sous Senart	GESS1	949	1898
Fresnes	GFR1	840	1680
L'Hay les roses	GHLR1	1789	3578
La Courneuve Nord	GLCN1	722	1444
La Courneuve Sud	GLCS2	703	1406
Le Blanc Mesnil	GBMN2	917	1834
Maison Alfort 1	GMA2	927	1854
Maison Alfort 2	GMA4	1122	2244
Montgeron	GMO1	614	1228
Orly 1	GORY3	872	1744
Orly 2	GORY4	1192	2384
Suvy en Brie	GSUC2	742	1484
Thiais	GTHI2	1213	2426
Tremblay	GTR2	901	1802
Vigneux sur seine	GVS2	1284	2568
Villeneuve St Georges	GVSG2	806	1612
Villiers Le Bel	GVLB2	821	1642

Tableau 4 : Récapitulatif des rayons thermiques pour chaque opération (34 doublets)

$$R_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_F * V}{\gamma_A * \Pi * e}}$$

avec :  $\gamma_F$  et  $\gamma_A$  la capacité calorifique du fluide et la capacité calorifique de l'aquifère ( $J/m^3/^\circ C$ ),  $e$  l'épaisseur mouillée de l'aquifère (m),  $V$  le volume de fluide injecté ( $m^3$ ).

Les rayons calculés pour chaque opération sont regroupés dans le tableau ci-avant (Tableau 4)

### **Cartes associées aux réseaux de chaleur**

Les bulles thermiques représentées sur les cartes en Annexe 6 ne tiennent pas compte du réchauffement des bulles des doublets ayant cessé de fonctionner avant 2009. Chacune des bulles représente l'état thermique au droit du doublet au moment où il s'est arrêté.

La première carte montre la position géographique des bulles dans les départements de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne ; la deuxième indique en complément les réseaux de chaleur mis en lumière par l'étude sur la relance de la géothermie en Ile-de-France ; la troisième carte fait ressortir les limites de communes sur le territoire de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne.

Pour certains doublets, comme celui de l'Hay-les-Roses ou celui de Thiais, la percée thermique semble être déjà avérée alors qu'aucune baisse significative n'est relevée sur les installations. Cette hypertrophie de la position du front thermique par la méthode analytique est inhérente aux approximations réalisées pour cette méthode de calcul. Elle dépend pour beaucoup de l'épaisseur de réservoir choisie qui est celle prise au droit de l'injecteur pour moyenniser les paramètres dans le contexte analytique. Dans le calcul numérique cette épaisseur est variable autour du puits et est interpolée entre puits par méthode géostatistique. **Néanmoins, cette approche simplifiée permet d'avoir un ordre de grandeur rapide de la progression du front froid et de le mettre en relation avec des aménagements de type réseau en surface.**

### **3.2.3. Calcul du champ de température par méthode numérique (logiciel MARTHE)**

#### **Méthode de calcul**

La méthode numérique permet de résoudre, par discrétisation spatiale et temporelle des opérateurs, l'équation de convection et de diffusion de la chaleur sur un domaine initialement maillé. Cette méthode a l'avantage de pouvoir résoudre des problèmes complexes mais a aussi ses limites du fait de la nécessité de discrétiser horizontalement et verticalement le domaine d'étude pour résoudre l'écoulement et le transport d'énergie. Le domaine d'étude, qui englobe les doublets de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, recouvre un rectangle de 1 320  $km^2$ .

La zone d'étude est trop importante pour effectuer un calcul thermique avec une résolution spatiale suffisante (horizontalement et verticalement), associée à un temps de résolution raisonnable. L'approche retenue est la suivante :

- La première étape consiste à calculer les écoulements sur la totalité de la zone d'étude appelée par la suite modèle régional (pas de discrétisation vertical nécessaire pour ce calcul hydraulique, discrétisation horizontale avec des mailles uniformes de 25 m de coté, 2112000 mailles au total). Ce premier calcul des charges hydrauliques a pour but de déterminer les doublets qui potentiellement peuvent interagir entre eux et ainsi déterminer des sous-ensembles de doublets pour le calcul thermique. Pour ce faire un calcul des trajectoires des particules de froid est réalisé en transitoire jusqu'à 2020.
- La seconde étape consiste à résoudre le champ de température dans les sous-modèles ainsi déterminés (7 pour le Val-de-Marne et 4 pour la Seine-Saint-Denis) dont les conditions aux limites en charge sont issues du modèle hydraulique global. Ces sous-modèles sont discrétisés avec la même taille de maille horizontale que le modèle régional, mais ont par ailleurs une discrétisation verticale pour représenter correctement les transferts thermiques entre épontes et niveaux aquifères.
- La dernière étape permet d'intégrer le calcul du champ de température dans le modèle régional pour obtenir la cartographie des « bulles froides » dans le réservoir à l'échelle des deux départements.

### ***Caractérisation des données d'exploitation***

Une étape importante dans la modélisation de l'impact thermique des doublets sur le réservoir est la connaissance de leurs chroniques d'exploitation en termes de débit et de température de réinjection. Les historiques d'exploitation de chacune des opérations ont été reconstitués à partir des données disponibles dans la base Dogger. Les chroniques appliquées dans le modèle sont en général des créneaux avec un débit d'été (de juin à septembre) et un débit d'hiver (d'octobre à mai) qui correspondent respectivement à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et de chauffage et d'ECS. Les variations de débit et de température observées au cours de ces deux épisodes annuels sont, de fait, non négligeables. Pour les doublets où les informations sont plus sommaires (notamment les doublets arrêtés), un débit moyen sur l'année a été utilisé.

Les figures en Annexe 7 montrent des exemples de chroniques de débits et de températures pour des doublets du Val-de-Marne et de la Seine-Saint-Denis. Le tableau 5 résume pour chaque doublet le débit et la température d'injection d'été et d'hiver appliqués dans le modèle. Les doublets en typographie rouge dans le tableau correspondent aux doublets arrêtés. Le doublet de la Villette, foré en septembre 1983, figure comme indication dans le tableau mais il n'a jamais été exploité. Pour certains doublets, les créneaux été/hiver sont modifiés dans le temps lorsque les données montrent une variation importante du débit à un moment donné de la vie d'exploitation du doublet. Pour les doublets arrêtés de Sevrans et Garges-Les-Gonesses, la température de réinjection moyenne a été estimée à partir de la connaissance du débit et de l'énergie thermique prélevés. Pour les doublets arrêtés de Bondy et de

Villeneuve-La-Garenne, les données de température, tant hivernale qu'estivale, sont estimées à partir de celles indiquées dans l'étude de faisabilité du doublet.

Doubléts du Val de Marne	Injecteur	Producteur	QSC	QSHC	TSC	TSHC
ALFORTVILLE	GAL1	GAL2	230.8	93.1	43.5	60.4
BONNEUIL-SUR-MARNE (<jan 2010)	GBL2	GBL1	203.0	129.4	52.5	67.4
BONNEUIL-SUR-MARNE (>jan 2010)	GBL2	GBL1	104.0	84.0	38.0	50.0
CACHAN 1	GCA1	GCA3	137.1	58.2	48.8	58.8
CACHAN 2	GCA2	GCA4	156.4	69.7	45.4	59.8
CHAMPIGNY	GCHM2	GCHM1	262.4	201.8	43.5	62.7
CHEVILLY-LARUE	GCHL1	GCHL2	253.5	140.5	43.6	55.5
CRETEIL MONT MESLY	GCRT2	GCRT1	235.0	118.7	46.9	71.7
FRESNES (<1993)	GFR1	GFR2	165.4	79.5	45.1	45.1
FRESNES (>1993)	GFR1	GFR2	183.9	183.9	48.7	63.5
L'HAY-LES-ROSES (<1993)	GHLR1	GHLR2	119.4	60.5	45.9	53.7
L'HAY-LES-ROSES(>1993)	GHLR1	GHLR2	247.9	160.0	45.9	53.7
IVRY-SUR-SEINE	GIV1	GIV2	115.0	49.0	25.0	10.0
MAISON ALFORT 1	GMA2	GMA1	239.9	122.8	52.1	63.6
MAISON ALFORT 2	GMA4	GMA3	194.2	96.7	49.7	66.2
ORLY 1 GAZIER (<1998)	GORY1	GORY2	115.6	84.0	46.6	64.0
ORLY 1 GAZIER (>1998)	GORY1	GORY2	65.0	65.0	46.6	64.0
ORLY 2 LE NOUVELET	GORY4	GORY3	215.7	192.2	47.7	69.3
ORLY 2 LE NOUVELET(>jan 2008)	GORY5	GORY6	261.2	261.2	47.7	69.3
SUCY-EN-BRIE	GSUC2	GSUC1	145.1	114.8	55.9	77.1
SUCY-EN-BRIE (>oct 2008)	GSUC2&GSUC3	GSUC3	202.0	202.0	55.9	77.1
THIAIS	GTHI2	GTHI1	212.1	80.6	44.5	59.5
VILLENEUVE ST-GEORGES	GVSG2	GVSG1	232.3	92.8	47.1	55.4
VIGNEUX-SUR-SEINE	GVS2	GVS1	130.9	92.7	51.6	57.4
MONTGERON	GMO1	GMO2	107.3	93.0	43.7	53.0
EPINAY-SOUS-SENART	GESS1	GESS2	159.3	127.0	42.5	59.3
Doubléts de Seine St Denis	Injecteur	Producteur	QSC	QSHC	TSC	TSHC
AULNAY-SOUS-BOIS-RDV	GAY2	GAY1	144.2	106.4	43.1	47.4
AULNAY-SOUS-BOIS-VGS (<juin90)	GAY4	GAY3	118.0	118.0	47.1	57.3
AULNAY-SOUS-BOIS-VGS (>juin90)	GAY4	GAY3	34.0	34.0	47.1	57.3
BONDY	GBO1	GBO2	165.0	165.0	30.0	40.0
CHELLES	GCHE2	GCHE1	141.0	128.7	47.6	54.2
CLICHY-SOUS-BOIS(<mai1997)	GCL2	GCL1	154.5	80.0	44.7	54.3
CLICHY-SOUS-BOIS(>mai1997)	GCL2	GCL1	76.0	76.0	44.7	54.3
GARGES-LES-GONESSE	GGAR1	GGAR2	242.0	242.0	47.6	47.6
LA COURNEUVE NORD	GLCN1	GLCN2	148.2	99.9	40.8	49.7
LA COURNEUVE SUD (<oct 2002)	GLCS2	GLCS1	130.1	130.1	42.7	47.8
LA COURNEUVE SUD (>oct 2002)	GLCS2	GLCS1	78.2	78.2	42.7	47.8
LA-VILLETTE	GLAV1	GLAV2	0.0	0.0		
LE BLANC MESNIL (<2004)	GBMN2	GBMN1	152.9	152.9	48.4	65.0
LE BLANC MESNIL (>2004)	GBMN2	GBMN1	49.0	49.0	60.0	60.0
SEVRAN	GSA2	GSA1	174.0	174.0	33.0	33.0
TREMBLAY-EN-FRANCE	GTRE2	GTRE1	202.3	129.0	47.4	59.7
VILLENEUVE-LA-GARENNE	GVG1	GVG2	56.0	56.0	30.0	40.0
VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	GVLB2	GVLB1	172.8	172.8	51.5	65.0

Tableau 5 : Débits ( $m^3/h$ ) et températures ( $^{\circ}C$ ) de réinjection d'hiver (QSC et TSC) et d'été (QSHC et TSHC) pour les doublets du Val-de-Marne et de Seine-St-Denis

## Caractérisation du réservoir

- Représentation des couches réservoir et des épontes

L'interprétation des flowmètres (profils de débitmétrie) permet de dégager un grand nombre d'informations quant à la structure verticale du réservoir vis-à-vis de la

production. Elle permet notamment de localiser les niveaux producteurs et d'identifier leur contribution individuelle au débit total, ainsi que leur épaisseur. Ainsi, à partir de l'analyse des profils de flowmètres des puits, on peut construire un modèle schématique du réservoir constitué de niveaux producteurs entrecoupés par des couches imperméables (épontes) mais qui jouent un rôle thermique du fait de la chaleur emmagasinée dans la roche. La difficulté est d'extrapoler un modèle à l'échelle de plusieurs doublets du fait de la très grande hétérogénéité des niveaux producteurs identifiés qui varient entre 2 et 17 suivant le puits considéré. En conséquence, la structure du modèle utilisée repose sur les hypothèses suivantes :

- Les niveaux producteurs identifiés dans chaque puits sont cumulés pour avoir une épaisseur productrice globale pour le puits considéré ;
- La même opération est appliquée pour les épontes intermédiaires qui sont regroupées en une seule éponte ;
- La discrétisation verticale est ensuite réalisée de la manière suivante : la couche réservoir est scindée en deux parties symétriques (débit et épaisseur équivalents dans chaque couche) séparée par l'éponte intermédiaire cumulée, selon le modèle « sandwich » décrit par Antics et al. - 2005 (cf. figure 19). Par ailleurs, les deux niveaux réservoirs ainsi que les épontes intermédiaire, supérieure et inférieure, sont discrétisées pour modéliser les flux thermiques aux surfaces de contact réservoir/éponte. Du fait de la symétrie, seule le demi-espace est modélisé (ce qui permet de réduire d'un facteur 2 la taille du maillage et d'optimiser les temps de calcul).

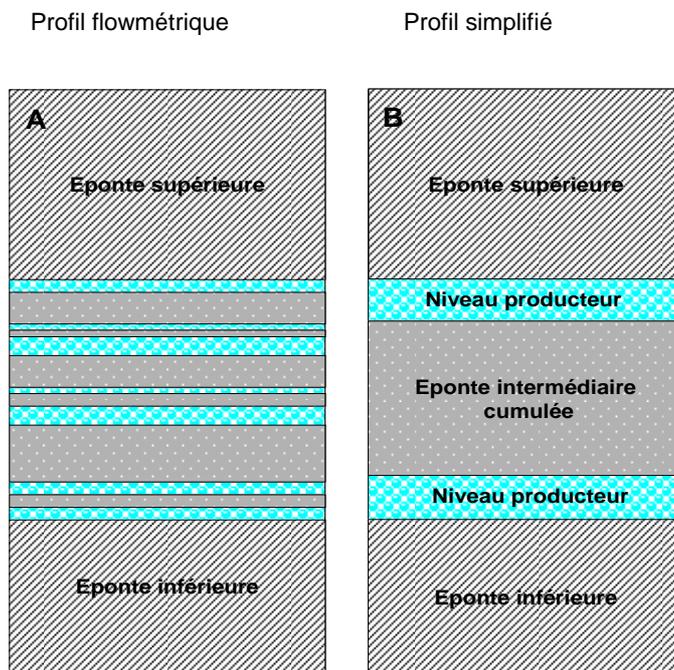


Figure 1 : A : Représentation schématique de la structure verticale du réservoir par interprétation du profil flowmétrique à l'échelle du puits - B : Structure verticale simplifiée utilisée à l'échelle du modèle

- **Propriétés hydrauliques et thermiques du réservoir et leur régionalisation**

Les propriétés qui sont associées aux niveaux réservoirs et aux épontes sont, d'une part, les propriétés hydrauliques (transmissivité, porosité, emmagasinement spécifique, dispersivité) et, d'autre part, les propriétés thermiques (capacités calorifiques volumiques et conductivités thermiques de la roche et du fluide, dispersivité thermique).

La **transmissivité** est obtenue par essai de production et correspond à une transmissivité globale pour l'ensemble des niveaux producteurs du puits. On peut ensuite en déduire la perméabilité intrinsèque qui est le rapport de la transmissivité sur l'épaisseur productrice cumulée. La **porosité** est obtenue par interprétation des logs de diagraphie et est estimée par niveau, dont on peut ensuite déduire une porosité globale pour l'ensemble des niveaux producteurs. Porosité et transmissivité sont donc des paramètres mesurés en chacun des puits. On dispose par contre, de peu d'informations sur les paramètres thermiques (capacité calorifique et conductivité thermique). Au début des années 80 (Menjot *et al.*, 1996), des mesures de conductivité avaient été réalisées sur échantillons saturés sur le seul forage carotté d'Aulnay-Sous-Bois et donnaient une conductivité thermique moyenne correspondant à l'ensemble roche et eau de 2,5 W/m/°K.

La dispersivité du milieu (en m) exprime l'hétérogénéité locale du champ de vitesse. Elle intervient dans le terme de dispersion cinématique qui est fonction linéaire de la vitesse de Darcy. Cette grandeur peut être obtenue par essai de traçage. On aboutit alors à la dispersivité pour le traceur chimique qui est comparable à la dispersivité thermique (Sauty *et al.*, 1982). Dans le cas du Dogger, on ne dispose pas de mesure directe de la dispersivité. Il existe différentes formules empiriques qui donnent un ordre de grandeur de cette dernière (plus précisément de la dispersivité longitudinale dans la direction principale de l'écoulement). Ainsi, on peut appliquer une relation linéaire avec la dispersivité longitudinale égale à 1/10 de la longueur caractéristique de l'écoulement (ici la distance entre les puits d'injection et de production). Pour une distance moyenne d'écartement du doublet de 1 km, on aboutit à un ordre de grandeur de 100 m. Mais il existe aussi d'autres formules comme celle de Xu et Eckstein (1995) qui exprime la dispersivité longitudinale en fonction d'une relation puissance du logarithme décimal de la longueur caractéristique de l'écoulement ( $\alpha = 0.83 * [\text{Log}(L)]^{2.414}$ ). En appliquant cette formule on aboutit à un ordre de grandeur de 10 m pour une longueur caractéristique de 1 km. La dispersion thermique cinématique du milieu étant le produit de la dispersivité et de la capacité calorifique volumique de l'eau par la vitesse de Darcy, elle joue un rôle essentiellement dans la zone réservoir proche du puits. Plus on s'éloigne du puits, plus la vitesse diminue et le terme de dispersion devient négligeable. L'ordre de grandeur retenu pour les simulations numériques est de 20 m pour la dispersivité longitudinale et 10 m pour la dispersivité transversale (verticale à la direction principale de l'écoulement).

La **température initiale du réservoir** est mesurée dans le puits au cours de l'essai de production (mesure dynamique). Elle correspond à la température moyenne de production à la profondeur barycentrique de production. Elle est caractéristique de la température locale de la ressource exploitée.

Pour construire un modèle à l'échelle des départements de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, il est nécessaire de régionaliser les propriétés hydrauliques, thermiques et la température initiale du réservoir. Pour les propriétés thermiques, ces dernières sont prises comme uniformes sur l'ensemble du domaine car non mesurées directement dans les puits. Pour les propriétés hydrauliques, comme la transmissivité (essai de puits), l'épaisseur productive cumulée, l'épaisseur des épontes intermédiaires cumulée (interprétation du profil de flowmètre) et la température initiale, ces paramètres sont interpolés entre les puits par méthode géostatistique. Le modèle utilisant directement la donnée de perméabilité (et non celle de la transmissivité) cette dernière est déduite du rapport transmissivité sur épaisseur productrice.

Ces paramètres sont ainsi déterminés sur une grille régulière qui est celle utilisée par le modèle (taille de grille de 25 m). Les cartes obtenues sont présentées en Annexe 8.

### ***Modélisation du fonctionnement hydraulique des doublets du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis***

- **Méthode de calcul**

Une première simulation de l'extension du front froid autour des puits injecteurs est réalisée à partir du calcul des trajectoires. Il s'agit de déterminer la position des particules d'eau froide au cours du temps et depuis le début de l'injection. Le calcul des trajectoires se faisant pour une vitesse effective (vitesse de Darcy rapportée à la section des interstices du milieu, considérés comme effectivement traversés par l'eau en mouvement uniforme), il est nécessaire de la transformer en vitesse de déplacement du front thermique qui tient compte, non plus de la porosité du milieu, mais des capacités calorifiques volumiques de l'eau et de l'ensemble eau - roche. Ainsi, on considère une porosité fictive du réservoir équivalente au rapport des capacités calorifiques volumiques de l'aquifère (eau et roche) et de l'eau. Pour les ordres de grandeur au Dogger (porosité de 15 %, capacité calorifique volumique de la roche aquifère de 2.5 MJ/m<sup>3</sup>/°K et capacité calorifique volumique de l'eau de 4,2 MJ/m<sup>3</sup>/°K) on obtient une porosité fictive de 60 %. Dans les faits, cela se traduit par une vitesse d'avancée du front thermique de l'ordre de 4 fois moins rapide que celle pour un traceur chimique.

Ce calcul donne une première approche de l'ampleur des zones envahies par l'eau froide dans l'aquifère du Dogger. En particulier, il met en évidence les interférences hydrauliques entre puits injecteur et producteur de doublets voisins (particules d'eau froide se déplaçant d'un injecteur vers le producteur d'un autre doublet). Par contre, comme ce calcul ne résout pas le champ de température, le refroidissement du réservoir n'est pas quantifié. Par ailleurs, il maximise la zone envahie car il ne tient pas compte de la chaleur emmagasinée dans les épontes qui vont tamponner le refroidissement du réservoir.

- **Application au modèle des doublets du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis**

Les figures 20 et 21 montrent, respectivement pour le secteur de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne, le trajet emprunté par les particules d'eau froide au cours du temps pour chacun des puits injecteurs (depuis la mise en service du doublet jusqu'en 2020). On

distingue ainsi les doublets qui sont isolés de ceux qui ont de fortes interactions avec les doublets voisins.

Dans le secteur de la Seine-Saint-Denis, sur les sept doublets encore en exploitation (Chelles, Clichy-sous-Bois, La Courneuve Nord et Sud, Le Blanc-Mesnil, Tremblay-en-France et Villiers-le-Bel-Gonesse), seuls les doublets de la Courneuve Nord (GLCN) et Sud (GLCS) interagissent mutuellement. Pour les doublets arrêtés de Villeneuve-La-Garenne (GVG), Garges-les-Gonesse (GGAR), Aulnay-Roses des Vents (GAY1&2) et Gros Saule (GAY3&4), Sevran (GSA) et Bondy (GBO), le calcul montre que les trajectoires n'évoluent quasiment plus depuis l'arrêt d'exploitation. Pour ceux-ci, seul l'écoulement induit par les doublets en exploitation peut encore induire un déplacement des particules mais de façon moins importante.

Dans le secteur du Val-de-Marne où les doublets sont plus concentrés, les interactions entre doublets sont plus nombreuses. Ainsi, on peut noter que le puits producteur de Maisons-Alfort I (GMA1) interagit avec l'injecteur de Maisons-Alfort II (GMA4). Il en est de même pour le puits producteur de Maisons-Alfort II (GMA3) qui interagit avec l'injecteur d'Alfortville (GAL1) et aussi, mais de façon moindre, avec celui de Créteil (GCRT2). Le puits producteur d'Alfortville (GAL2), quant à lui, interagit avec l'injecteur de Maisons-Alfort II (GMA4) et celui de Créteil (GCRT1) avec l'injecteur d'Alfortville (GAL1). Les doublets de Créteil (GCRT) et de Bonneuil-sur-Marne (GBL), qui sont relativement proches, ne montrent pas d'interactions directes du fait que les deux injecteurs sont positionnés l'un à côté de l'autre.

Plus à l'ouest, les puits producteurs de Cachan I (GCA3) et II (GCA4) interagissent avec l'injecteur de Cachan II (GCA2) et celui de l'Hay-Les-Roses (GHLR1). Le puits producteur de l'Hay-Les-Roses (GHLR2) interagit avec les injecteurs de Chevilly-La-Rue (GCHL1) et Fresnes (GFR1). Inversement, le puits producteur de Fresnes (GFR2) interagit avec l'injecteur de l'Hay-Les-Roses (GHLR1) et le producteur de Chevilly-La-Rue (GCHL2) avec l'injecteur de Fresnes (GFR1) et dans une plus grande proportion avec celui de Thiais (GTH2). Enfin, le puits producteur de Thiais (GTH1) a également une forte interaction avec l'injecteur d'Orly I (GORY1). Le doublet d'Orly I est particulier dans le sens que le puits producteur (GORY2) semble dissocié du puits injecteur (GORY1), les trajectoires arrivant au puits producteur proviennent de l'injecteur d'Orly II, Nouvelet 1 (GORY4). En fait, cette particularité s'explique, d'une part, par le faible débit d'exploitation à Orly I (débit artésien) comparé à celui de Thiais, et d'autre part, par le fort débit de l'injecteur d'Orly II qui joue un rôle de barrage entre le producteur et l'injecteur d'Orly I. Enfin, le puits producteur d'Orly II (GORY3) interagit avec l'injecteur d'Orly I et celui de Thiais. Les doublets de Vigneux-sur-Seine (GVS) et Montgeron (GMO) interagissent faiblement entre eux, les trajectoires sont un peu déformées autour des puits injecteurs. Les autres doublets du Val-de-Marne (Villeneuve-St-Georges, Epinay-sous-Sénart, Sucy-en-Brie, Champigny-sur-Marne, Ivry) présentent un fonctionnement proche du doublet isolé (fonctionnement en triplet pour Sucy-en-Brie depuis octobre 2008).

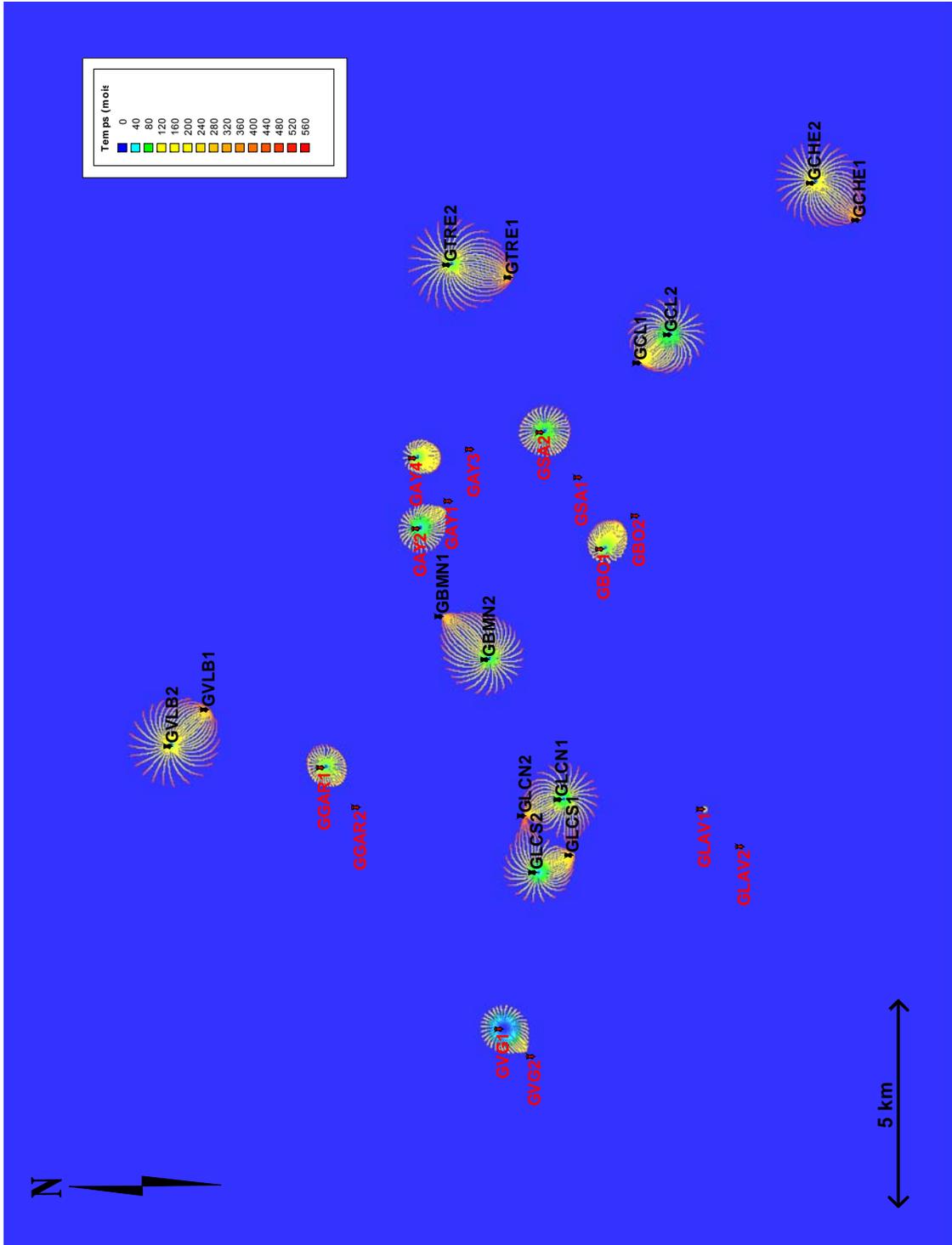


Figure 20 : Trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs de la Seine-St-Denis (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976).

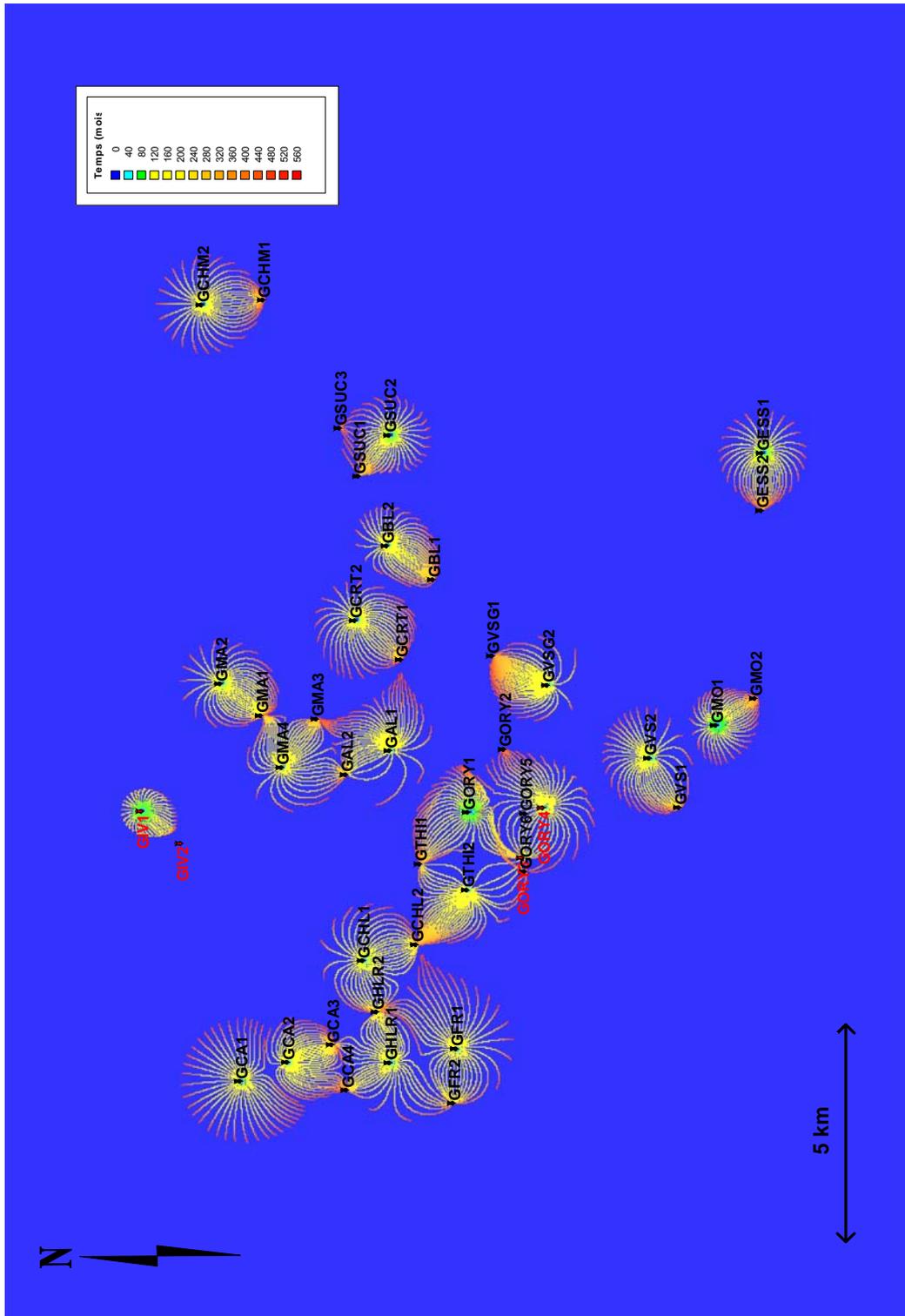


Figure 21 : Trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs du Val-de-Marne (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage du doublet de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976).

## **Modélisation du fonctionnement thermique par groupes de doublets**

### • **Méthodologie**

Suite à l'estimation du comportement du réservoir par calcul hydraulique sur le modèle régional, 11 sous-modèles ont été définis pour la résolution du transport de chaleur. Les mécanismes mis en jeu sont : **la convection** (entraînement des calories ou frigories par circulation du fluide) et la **dispersion hydrodynamique** (traduit l'hétérogénéité locale du champ de vitesse) dans l'aquifère et **la conduction** dans l'aquifère et les épontes (transport de chaleur résultant du gradient de température). L'équation de transport de chaleur est résolue dans chaque maille des sous-modèles ainsi définis (cf. figure 22). Chaque sous-modèle est basé sur la même structure verticale que celle définie dans le paragraphe « **Représentation des couches réservoir et des épontes** », c'est-à-dire de haut en bas :

- une éponte supérieure semi-infinie (épaisseur de 200 m de telle sorte que, au cours de la durée de simulation, la perturbation thermique n'atteint pas cette limite) avec une discrétisation interne verticale composée de 9 couches d'épaisseur 0,5 m à l'interface éponte/aquifère et avec un ratio de 2 ensuite ;
- une couche représentant la moitié de l'épaisseur productrice cumulée et discrétisée en 3 niveaux de 0,5 m d'épaisseur aux interfaces et d'épaisseur centrale correspondant à la demi-épaisseur productrice moins 1 mètre ;
- une éponte intermédiaire représentant la moitié de l'épaisseur cumulée des épontes intermédiaires et discrétisée verticalement en 3 niveaux d'épaisseur 0,5 m à l'interface, 1 m et ensuite variable suivant la demi-épaisseur des épontes calculée lors de l'étude géostatistique.

Cette discrétisation rend compte du demi-espace supérieur de l'ensemble réservoir et éponte (15 niveaux verticaux en tout). Elle repose sur l'hypothèse d'un gradient géothermique linéaire sur la verticale. Le modèle considère une température uniforme sur la verticale, équivalent à celle de la profondeur du réservoir. De ce fait, le refroidissement du réservoir est tamponné de manière équivalente par les épontes supérieure et inférieure, ce qui permet de ne garder que le demi-espace (on rappelle par ailleurs que le réservoir est scindé en deux couches productrices symétriques). Dans le cas réel d'un gradient de température qui augmente linéairement avec la profondeur, le refroidissement à la profondeur productrice serait tamponné de manière dissymétrique avec un gradient de température plus grand, donc un flux de chaleur plus grand (à conductivité thermique équivalente), provenant de l'éponte inférieure que celui provenant de l'éponte supérieure. Le flux thermique moyen est celui qu'on aurait avec une température uniforme sur la verticale, cette hypothèse étant correcte uniquement pour un gradient parfaitement linéaire autour de la zone étudiée.

La discrétisation horizontale est identique à celle du modèle régional, soit des mailles carrées de 25 m de côté. Ainsi, chaque sous-modèle est composé d'un nombre d'éléments hexaèdres différent lié à son extension horizontale (même discrétisation

verticale pour chaque sous-modèle). Le plus petit modèle comprend 124.200 hexaèdres et, le plus grand, 1 984 605 hexaèdres.

Les conditions aux limites de chaque sous-modèle sont des charges imposées, variables dans le temps, issues du modèle hydraulique régional.

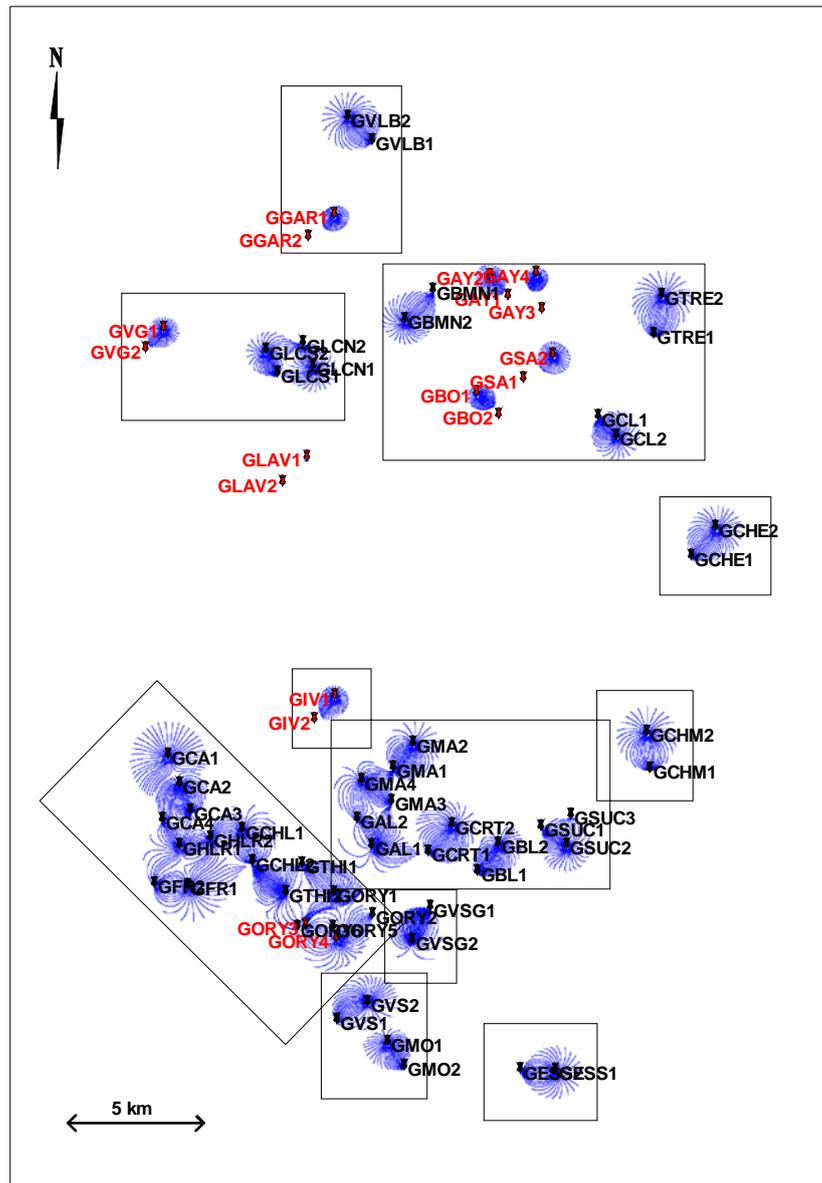


Figure 22 : Définition de 11 sous-modèles pour le calcul thermique

### • Résultats

Les simulations numériques pour la thermique sont menées jusqu'en 2020, afin de quantifier l'impact thermique actuel des opérations géothermiques sur l'aquifère du

Dogger mais aussi d'avoir une cartographie prévisionnelle dans 10 ans, dans l'hypothèse où l'exploitation des opérations ne serait pas modifiée (pas d'arrêt de puits ou de réalisation de nouvelles opérations). Deux types de résultats sont présentés :

- d'une part, une cartographie des « bulles froides » dans l'aquifère du Dogger à fin 2000, 2010 et 2020. Ces cartes ont pour but de quantifier les surfaces impactées autour des doublets en termes de refroidissement de la ressource en vue de mieux gérer l'implantation de futures opérations au Dogger ;
- d'autre part, l'évolution temporelle de la température aux puits de production des doublets depuis le démarrage de l'exploitation jusqu'en 2020. Ces courbes ont pour but d'analyser, doublet par doublet, l'observation actuelle d'une décroissance progressive de la température du fluide prélevé correspondant au début du recyclage des eaux refroidies provenant des puits d'injection.

Les cartes des « fronts froids » dans le réservoir du Dogger sont représentées en Annexe 9. Les figures 23 et 24 montrent l'évolution de la température aux puits producteurs respectivement pour les doublets de Seine-St-Denis et du Val-de-Marne. Une analyse plus précise par sous-domaine est donnée ensuite pour chacun des doublets étudiés.

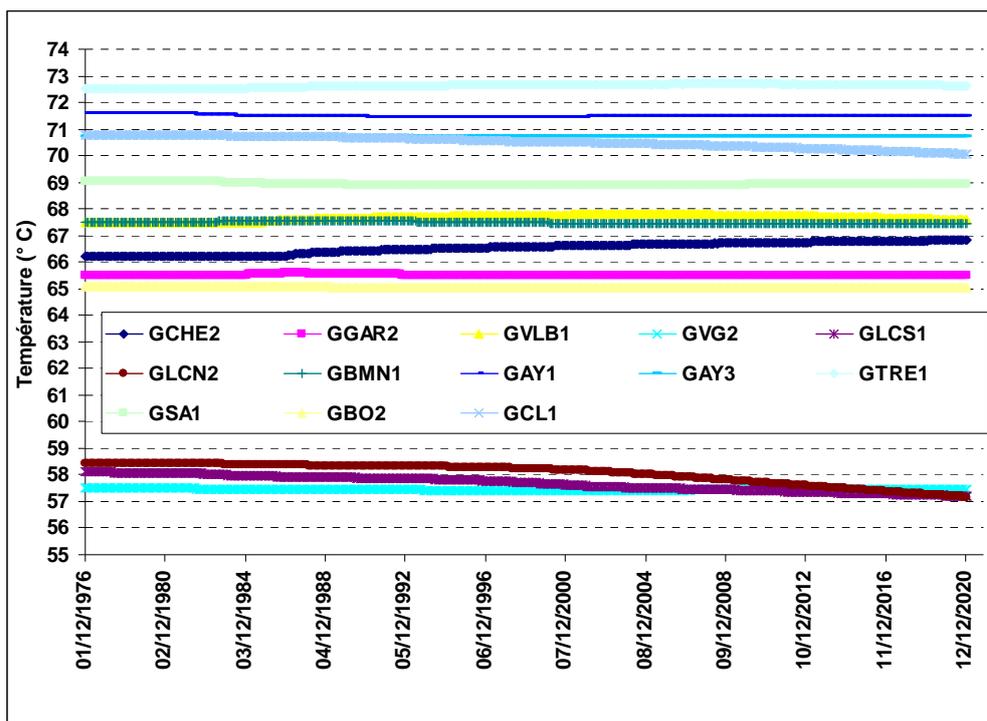


Figure 23 : Évolution de la température aux puits producteurs en Seine-Saint-Denis.

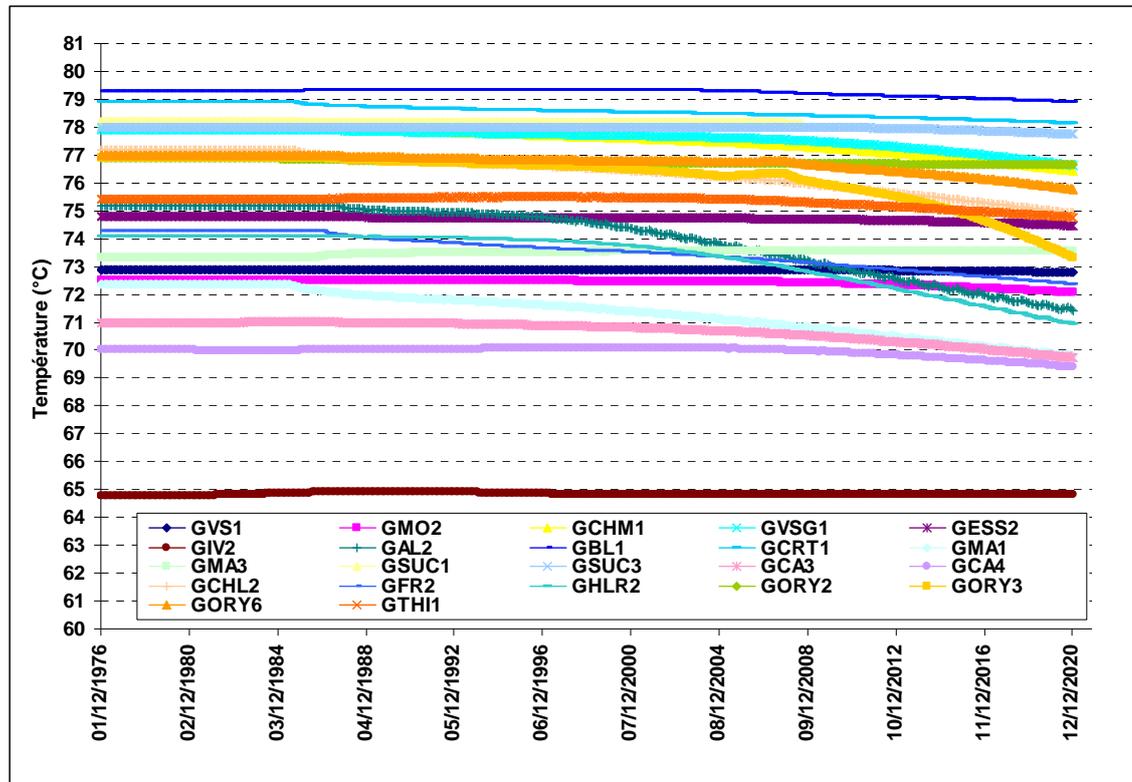


Figure 24 : Évolution de la température aux puits producteurs dans le Val-de-Marne

- **Doublets de Villiers-Le-Bel-Gonesse et de Garges-les-Gonesse (figure 25)**

La figure 25 présente l'évolution de la température aux puits producteurs. Sur la durée de la simulation, il n'y a pas de refroidissement mesurable dans ces puits. Pour le puits producteurs de **Villiers-le-Bel-Gonesse** (GVLB1), la légère remontée de température lors de la mise en service du doublet en octobre 1985, est due à une température initiale du réservoir plus chaude entre les deux puits du doublet qu'au puits producteur. La température du volume de fluide exploitée est ici comprise entre 67.5°C pour le producteur et 69°C à l'injecteur. Ainsi la mise en fonction de l'exploitation peut provoquer une modification locale de la température autour du puits producteur qui résulte du mélange de fluide géothermique en provenance de différentes parties du réservoir qui ne sont pas toutes initialement à la même température. Le puits de **Garges-les-Gonesse** (GGAR2) est à l'arrêt depuis septembre 1987.

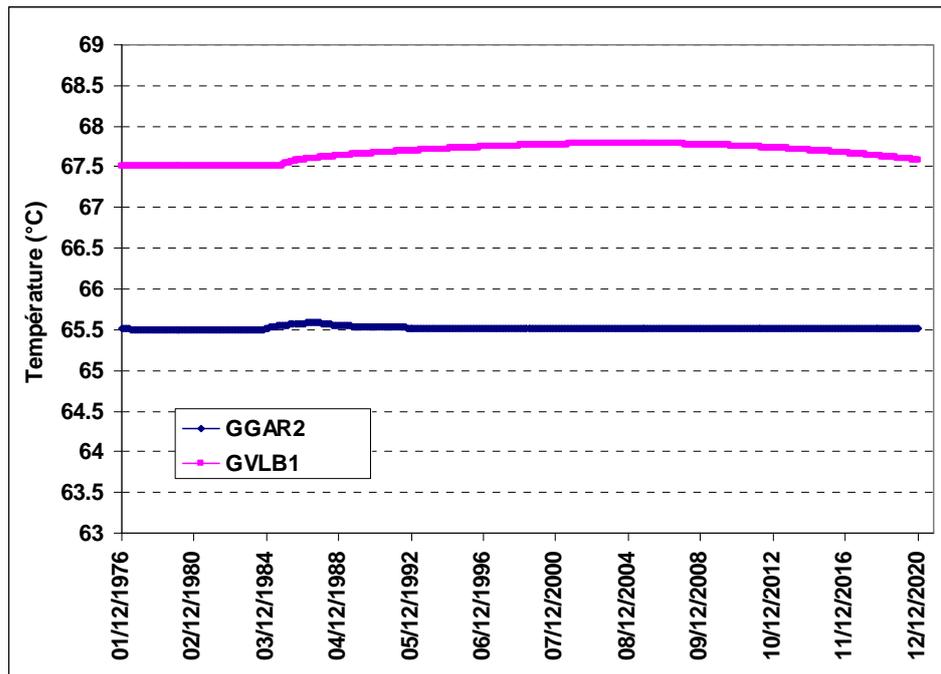


Figure 25 : Évolution de la température aux puits producteurs de Villiers-le-Bel-Gonesse et Garges-les-Gonesse (Nord de la Seine-Saint-Denis)

- **Doublets de Villeneuve-la-Garenne et de La Courneuve Nord et Sud (figure 26)**

Le doublet de **Villeneuve-la-Garenne** est arrêté depuis 1994 et la température au puits producteur est stable. Pour le puits producteur de **La Courneuve Sud** (GLCS1) mis en service en mai 1982, on observe une première légère inflexion du fait de la différence de température locale du réservoir entre les puits injecteur et producteur (dans ce cas précis la température initiale au puits injecteur est un peu plus fraîche qu'au puits producteur). La seconde inflexion autour d'octobre 2002, est due à une variation du débit d'exploitation de l'ordre de 2 fois plus faible. La date coïncidant avec une chute de température perceptible de 0,5 °C est fin 2001. À fin 2010, la baisse simulée serait de 0,7 °C et à fin 2020, de 0,9 °C si le régime d'exploitation n'est pas modifié. La simulation numérique n'indique donc pas de refroidissement notable (évolution de 0,02 °C/an) actuellement et dans les années à venir pour le doublet de La Courneuve Sud. Pour le puits producteur de **La Courneuve Nord** (GLCN2) dont la date de mise en service est en février 1983, la date coïncidant avec une chute de température perceptible de 0,5 °C est calculée mi-2007. Cette baisse de température serait de 0,7 °C à fin 2010 et de 1,2 °C en 2020 (diminution de 0,05 °C/an). La simulation montre donc que pour le doublet de La Courneuve-Nord, la température de production diminue actuellement très progressivement.

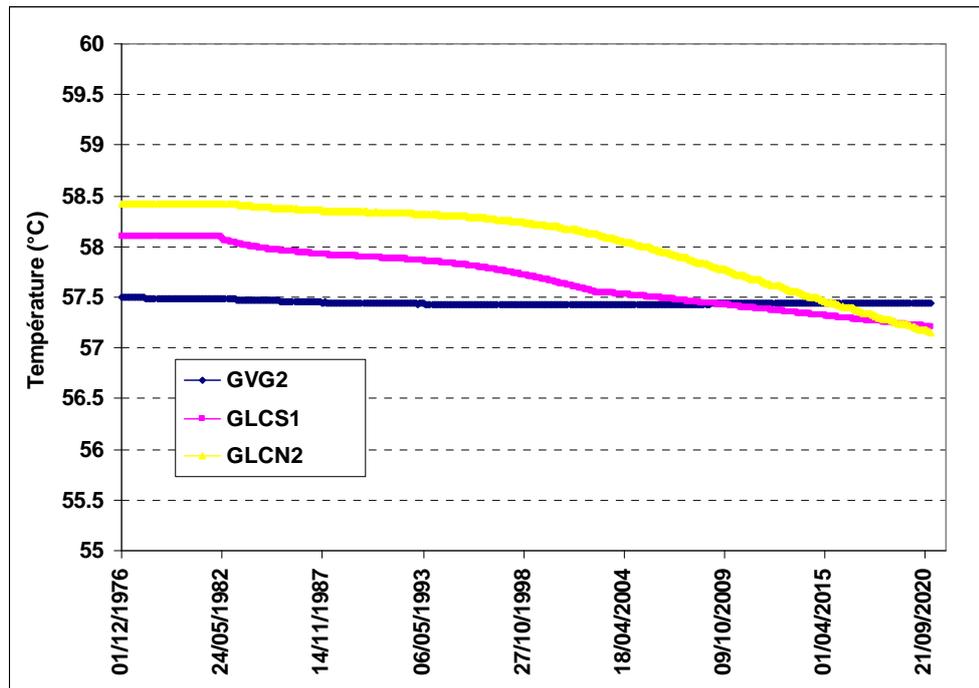


Figure 26 : Évolution de la température aux puits producteurs de Villeneuve-la-Garenne, La Courneuve Sud et Nord (Ouest de la Seine-Saint-Denis)

- **Doublets d'Aulnay-sous-Bois « Roses des Vents » et « Villeneuve-Gros Saule », Blanc-Mesnil, Tremblay-en-France, Sevrans, Bondy et Clichy-sous-Bois (figure 27)**

Les doublets **d'Aulnay-sous-Bois « Roses des Vents » et « Gros Saule »** sont arrêtés depuis 1994, et ceux de Sevrans et Bondy depuis 1989. La température au droit de ces doublets est stable. Les doublets demeurant en service sont Tremblay-en-France, Blanc-Mesnil et Clichy-sous-Bois. La température aux puits producteurs de **Blanc-Mesnil** (GBMN1) et **Tremblay-en-France** (GTRE1) est stable. Seul le puits producteur de **Clichy-sous-Bois** présente une très légère baisse de la température d'exhaure, une chute perceptible de 0,5 °C est simulée début 2012, cette baisse est de 0,7 °C en 2020. L'amorce du refroidissement au producteur de Clichy-sous-Bois est donc très progressive.

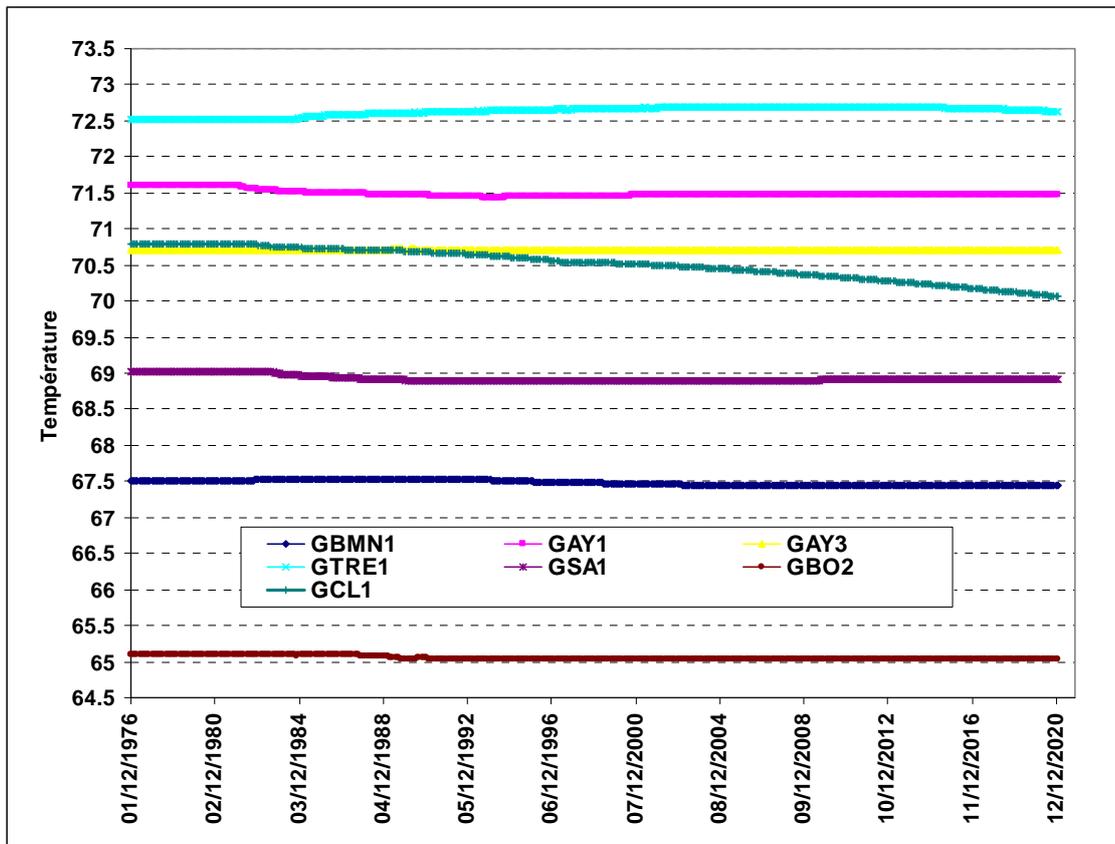


Figure 27 : Évolution de la température aux puits producteurs de Tremblay-en-France, Aulnay RDV, Aulnay VGS, Clichy-sous-Bois, Sevrans, Blanc-Mesnil et Bondy (Seine-St-Denis)

- **Doublet de Chelles (figure 28)**

Le doublet de **Chelles**, mis en service en décembre 1986, présente une augmentation progressive de la température du réservoir pendant la durée de la simulation du fait d'une différence de température initiale du réservoir plus marquée entre le puits producteur (66,2 °C) et le puits injecteur (70,8 °C). Comme la température n'a pas atteint une phase de stabilisation ou un début de décroissance, le front froid est loin du producteur (voir aussi carte de la « bulle froide » autour du puits injecteur de Chelles en Annexe 9).

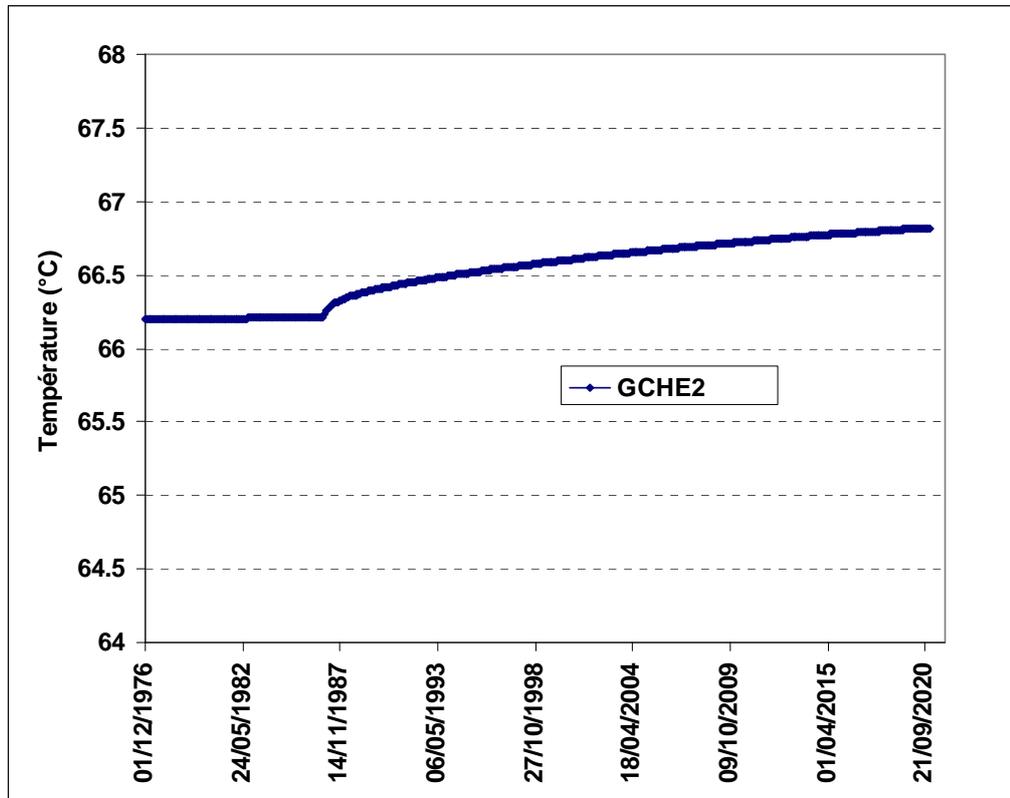


Figure 28 : Évolution de la température au puits producteur de Chelles (sud-est Seine-St-Denis)

- **Doublets de Bonneuil-sur-Marne, Créteil-Mont-Mesly, Sucy-en-Brie, Alfortville et Maisons-Alfort I et II (figures 29 et 30)**

Le doublet de **Bonneuil-sur-Marne**, mis en service en janvier 1987, ne présente pas de chute de température perceptible au cours de la simulation (0,15 °C estimée à fin 2010 et 0,4 °C estimée à fin 2020). Le doublet de **Créteil-Mont-Mesly** présente une légère baisse de température à sa mise en service (octobre 1985) du fait d'un écart de température initiale de 1°C entre le puits producteur (78,9 °C) et le puits injecteur (77,9 °C). La date coïncidant avec une baisse de température perceptible de 0,5 °C est 2009, cette baisse serait inférieure à 0,8 °C à fin 2020. La diminution potentielle de la température d'exhaure est donc très progressive et indique que le front froid est encore loin du puits producteur. Le doublet de **Sucy-en-Brie**, mis en service en octobre 1984, et transformé en triplet à partir d'octobre 2008 (ancien puits producteur GSUC1 transformé en injecteur, nouveau producteur GSUC3) ne présente pas de baisse mesurable de sa température pendant la durée de la simulation (soit 12 ans pour le fonctionnement en triplet).

Le puits producteur de **Maisons-Alfort II** (GMA3) voit sa température demeurer stable au cours de la simulation. Les puits producteurs de **Maisons-Alfort I** (GMA1) et d'**Alfortville** (GAL2) présentent, par contre, une décroissance de leur température de production liée à l'arrivée progressive des eaux froides injectées. La première baisse simulée lors de la mise en service du doublet de Maisons-Alfort I en juillet 1985 résulte

du gradient de température local entre le puits injecteur à 69 °C et son producteur à 72.4 °C. La température continue ensuite à chuter progressivement atteignant 1°C en 2001, 2 °C en 2014 et 2,6 °C à fin 2020. Pour le puits producteur d'Alfortville (GAL2) mis en service en octobre 1987, la température d'exhaure (75,2 °C) reste stable pendant les 10 premières années d'exploitation ( $\Delta T$  inférieur à 0,5 °C, température locale du réservoir identique aux puits injecteur et producteur) mais ensuite la courbe de température s'infléchit avec une diminution de la température de 1 °C à partir de 2002, 2 °C en 2009 et 3,8 °C d'ici à fin 2020. La simulation numérique indique donc qu'actuellement la température du réservoir aurait baissé de plus de 2 °C par rapport au démarrage de l'exploitation et que le doublet d'Alfortville se situe dans une phase de déclin énergétique avec une baisse de la température de production de l'ordre de 0,15 °C par an. On observe une tendance similaire pour le producteur de Maisons-Alfort I mais avec une baisse plus progressive (0,08 °C par an).

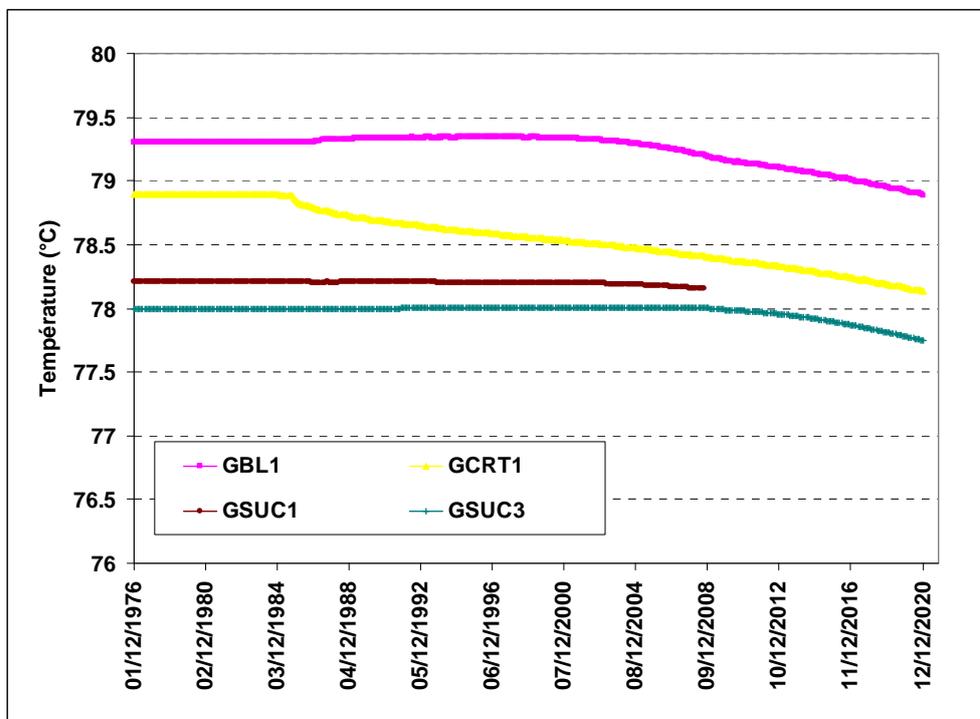


Figure 29 : Évolution de la température aux puits producteurs de Bonneui-sur-Marnel, Créteil-Mont-Mesly, Sucy-en-Brie (Val de Marne).

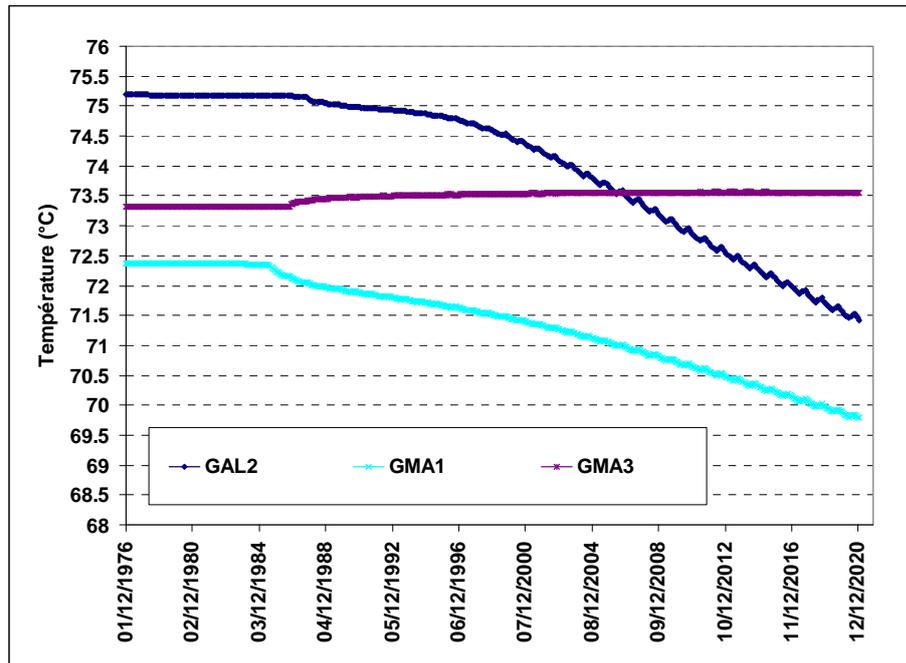


Figure 30 : Évolution de la température aux puits producteurs d'Alfortville et de Maisons-Alfort I et II (Val de Marne).

- **Doublets de Cachan I et II, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-Les-Roses, Thiais, Orly I et II (figure 31)**

Le puits producteur de **Cachan I** GCA3 (démarrage en octobre 1985), présente une chute perceptible de température de 0,5 °C fin 2009, et de 1,3° C d'ici à fin 2020. L'évolution de la température au puits producteur de Cachan I est donc très progressive (0,07 °C/an) et ne montre pas, dans l'immédiat, de refroidissement significatif. Le puits producteur de **Cachan II** GCA4 (démarrage en décembre 1985) présente une évolution assez similaire à celle de GCA3 avec une chute de température calculée de 0,6 °C à fin 2020.

Le puits producteur de **Chevilly-Larue** GCHL2 (température initiale de 77,2 °C, 75,4 °C à l'injecteur) mis en service en octobre 1985, présente une baisse de la température de production de 1 °C à fin 2006, 2 °C d'ici à 2018. Le doublet de Chevilly-Larue présente donc un début de décroissance de sa température de production de l'ordre de 0,08 °C/an.

Le puits producteur de **Fresnes** GFR2 (température initiale de 74,3 °C, 71,7 °C à l'injecteur) présente une évolution très progressive de sa température de production depuis sa mise en service en janvier 1987. La date coïncidant avec une chute de 1 °C est fin 2005, fin 2010 elle est de 1,3 °C et fin 2020 de 1,95 °C. La simulation numérique indique donc pour ce doublet un début de recyclage des eaux froides injectées avec une progression de 0,06 °C/an.

Le puits producteur de **l'Hay-Les-Roses** GHLR2 (température initiale de 74,1 °C, 73,2 °C à l'injecteur) présente une température relativement stable pendant les 18 premières années d'exploitation (démarrage en octobre 1985) avec ensuite une baisse estimée de 1 °C à fin 2007, 2 °C début 2014 et 3,2 °C à fin 2020. Pour le doublet de l'Hay-Les-Roses le déclin énergétique serait donc également amorcé avec une chute de température de l'ordre de 0,15 °C/an.

Le doublet de **Thiais** GTHI1 a une température relativement stable depuis sa mise en service en juillet 1986 (baisse perceptible de 0,5 °C estimée en 2018, 0,6 °C à fin 2020). Il ne présente donc pas, dans l'immédiat, de déclin énergétique perceptible.

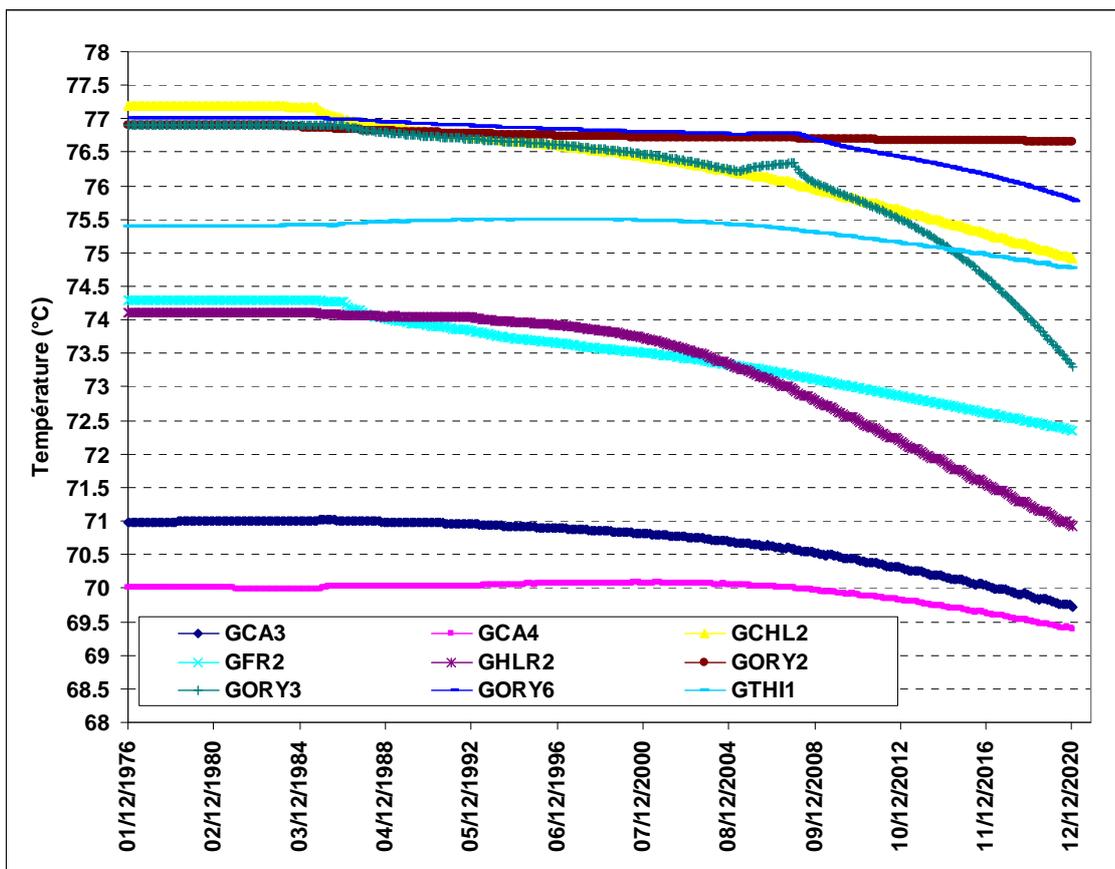


Figure 31 : Évolution de la température aux puits producteur de Cachan I et II, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-les-Roses, Orly I et II, Thiais (Val de Marne)

Le puits producteur **d'Orly I-Gazier** GORY2 (puits artésien) présente une température parfaitement stable ( $\Delta T < 0,2$  °C) depuis sa mise en production en janvier 1984. En fait, les eaux refroidies injectées au puits injecteur GORY1 sont recyclées en direction du producteur de Thiais à débit beaucoup plus grand. Le doublet d'**Orly II-Le Nouvelet 1** a été arrêté en juin 2005 et remplacé par un nouveau doublet (**Orly II-Le Nouvelet 2**) mis en service en janvier 2008. Juste avant l'arrêt du doublet, la baisse de température de production, estimée au puits GORY3, est de 0,7 °C. Ainsi à l'arrêt du doublet on a commencé progressivement à recycler l'eau froide injectée. Suite à l'arrêt du doublet,

on observe une stabilisation et un très léger réchauffement au droit de l'ancien puits suivi à nouveau d'une baisse avec le démarrage du nouveau doublet dont l'injecteur (GORY5) est proche de l'ancien injecteur (GORY4) et le nouveau producteur (GORY6) de l'ancien producteur (GORY3). Cette baisse serait de 3,6 °C à fin 2020. Avec la mise en service du nouveau doublet, la décroissance en température au nouveau puits producteur serait de 0,5 °C courant 2011, et 1,2 °C à fin 2020. On peut également noter que lors des essais de débit réalisés en septembre 2007 par Antea sur le nouvel injecteur GORY5, la température en fond de puits s'est progressivement stabilisée à 62,3 °C tandis que celle calculée par le modèle à cette date est de 63 °C.

- **Doublets de Montgeron et Vigneux-sur-Seine (figure 32)**

Le puits producteur de **Vigneux-sur-Seine** (GVS1) a une température d'exhaure qui reste stable au cours de la simulation, depuis sa mise en service en octobre 1985 à fin 2020. Le puits producteur de **Montgeron** (GMO2) a une température également relativement stable avec, néanmoins, une légère amorce de refroidissement avec une baisse limitée à 0,5 °C d'ici à fin 2020.

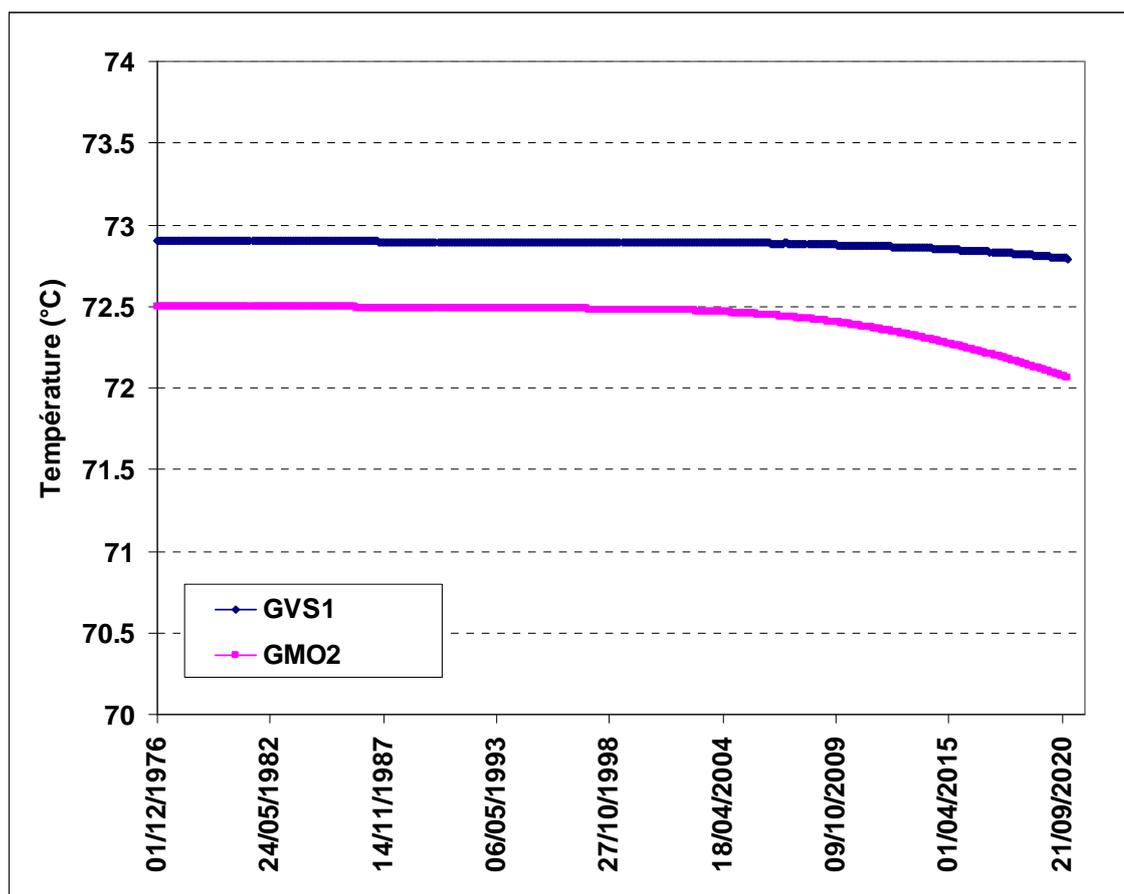


Figure 32 : Évolution de la température aux puits producteur de Vigneux-sur-Seine et Montgeron (Val de Marne)

- **Doublets de Champigny-sur-Marne, Villeneuve-St-Georges, Epinay-sous-Sénart (figure 33)**

Le puits producteur de **Champigny-sur-Marne** (GCHM1) a été mis en service en décembre 1985. Une légère diminution de température (inférieure à 0,5 °C) est enregistrée dès le début de son fonctionnement du fait d'une gradation de la température du réservoir de 4,3 °C entre le puits injecteur plus froid (73,9 °C) et le puits producteur plus chaud (78,2 °C). Une baisse de 1 °C est ensuite calculée à partir de 2011 et de 1,7 °C d'ici à 2020. La simulation numérique met en évidence une amorce du refroidissement actuellement (0,07 °C/an) et dans les années à venir au doublet de Champigny-sur-Marne. Le doublet de **Villeneuve-St-Georges** (GVSG1) présente une courbe d'évolution de la température de production similaire à celle de Champigny-sur-Marne (température au puits producteur de 77,9 °C) avec une baisse de 0,5 °C en 2011 et 1,2 °C à fin 2020. La baisse de température, très progressive, témoigne d'une amorce, non perceptible actuellement, du déclin thermique de ce doublet. Le doublet d'**Epinay-sous-Sénart** n'indique pas de refroidissement perceptible actuellement ( $\Delta T$  de 0,3 °C à fin 2020).

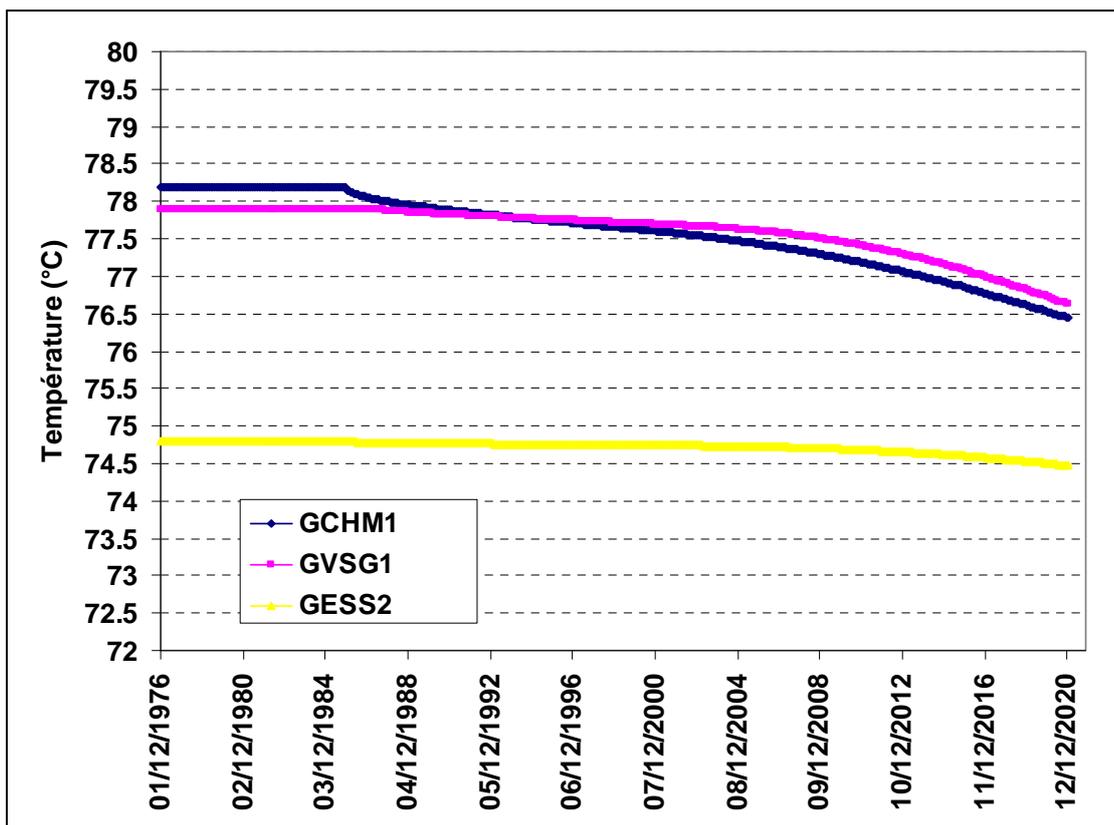


Figure 33 : Évolution de la température aux puits producteurs de Champigny-sur-Marne, Villeneuve-Saint-Georges et Epinay-sous-Sénart (Val de Marne).

- Doublet d'Ivry-sur-Seine (figure 34)

Le doublet d'**Ivry-sur-Seine**, mis en service en janvier 1984, est arrêté depuis janvier 1994. La température de production est stable pendant l'exploitation du doublet (l'augmentation de 0,1 °C résulte de la gradation de température entre le puits injecteur à 65 °C et le puits producteur à 64,8 °C).

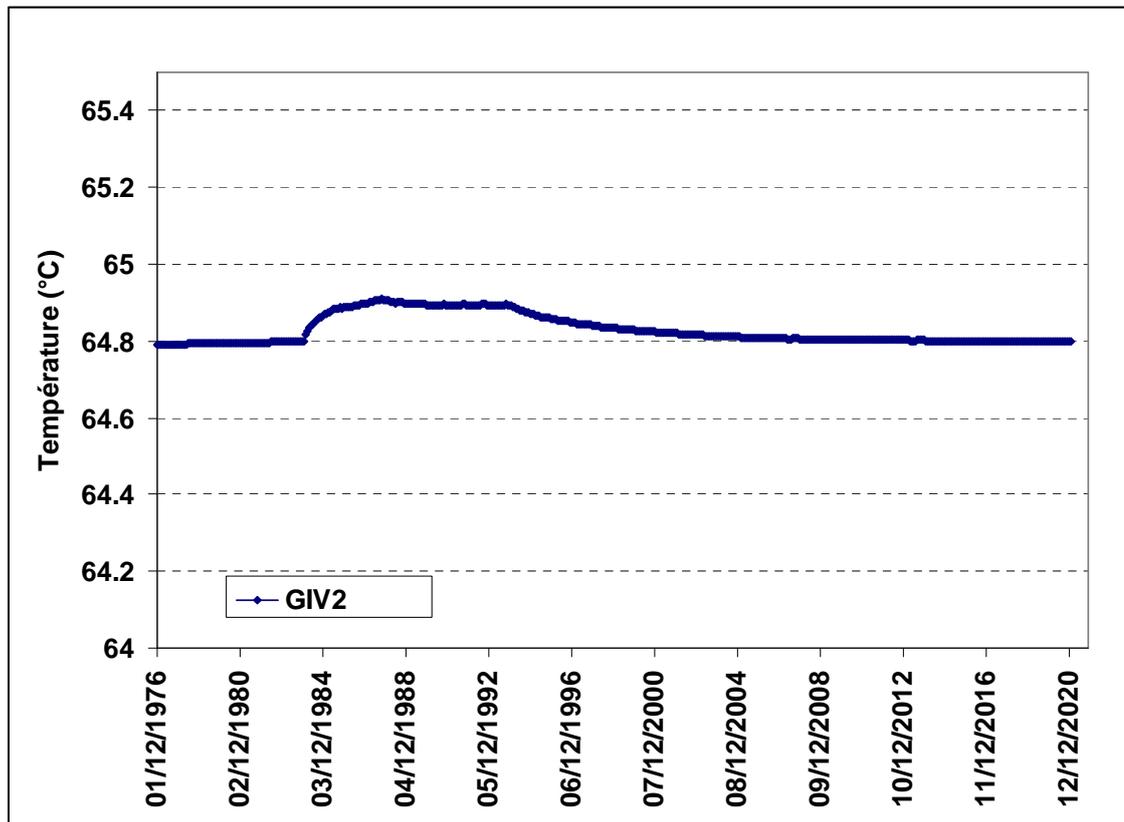


Figure 34 : Évolution de la température au puits producteur d'Ivry (Val de Marne)

### 3.2.4. Conclusions sur la modélisation

Les simulations numériques du calcul de l'impact thermique sur l'aquifère du Dogger permettent de dégager un certain nombre de conclusions sur l'état actuel du système, en termes de surface impactée et de déclin énergétique aux puits de production. **Il faut néanmoins garder à l'esprit qu'il s'agit de résultats de simulations avec les incertitudes inhérentes au modèle (paramètres du réservoir, données d'exploitation, limite des outils de modélisation) mais qui donnent une indication sur les ouvrages nécessitant une surveillance plus particulière aujourd'hui et dans les années à venir.**

### **Surface impactée par les eaux froides injectées**

Les cartes de l'impact thermique sont représentées dans l'annexe 9. Elles montrent, d'une part les « bulles froides » actives des doublets en exploitation et d'autre part, les « bulles froides » rémanentes des doublets arrêtés.

Ainsi, **dans le département de Seine-Saint-Denis**, on distingue 7 bulles rémanentes et 7 bulles actives. Excepté les bulles froides de La-Courneuve-Nord et Sud qui sont proches l'une de l'autre, les autres zones refroidies par l'injection à la profondeur du réservoir sont relativement éloignées les unes des autres laissant potentiellement de la place pour le renouvellement ou la réalisation de nouvelles opérations géothermiques en Seine-St-Denis. Le sud du département est une zone vierge en doublets (excepté Chelles à la limite du département).

**Dans le département du Val-de-Marne**, il existe deux bulles rémanentes qui sont celles d'Ivry-sur-Seine et de l'ancien doublet d'Orly II-Le Nouvelet 1 qui se fond avec la nouvelle bulle froide créée par le nouveau doublet d'Orly II-Le Nouvelet 2. Les doublets actifs étant nombreux et concentrés dans l'ouest du département, il reste peu de disponibilité pour le renouvellement d'opérations dans ce secteur. On peut néanmoins trouver une zone relativement vierge de doublets au sud-ouest d'Ivry-sur-Seine et d'Orly où vient d'être réalisé le nouveau doublet d'ADP Orly. L'Est du département est moins dense en doublets et représente potentiellement un secteur encore exploitable.

### **Amorce du déclin énergétique**

L'analyse de l'évolution de la température aux puits de production permet de classer les doublets dans trois grandes catégories :

- les doublets qui actuellement ne présentent pas de diminution perceptible de leur température de production ( $\Delta T < 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), pour lesquels on ne mesure pas d'amorce du déclin énergétique ;
- ceux dont la baisse de température de production est supérieure à  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  mais inférieure à  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  pour lesquels on a potentiellement une amorce de la décroissance de la température du fluide prélevé ;
- ceux dont la baisse de température actuelle est supérieure à  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  pour lesquels la phase du déclin énergétique pourrait être amorcée.

Ainsi les doublets ne présentant pas de baisse perceptible de leur température de production (groupe 1) sont : Villiers-Le-Bel-Gonesse, Garges-Les-Gonesse (arrêté), Villeneuve-La-Garenne (arrêté), Aulnay-sous-Bois RDV et VGS (arrêtés), Blanc-Mesnil, Tremblay-en-France, Sevran (arrêté), Bondy (arrêté), Chelles, Bonneuil-sur-Marne, Sucy-en-Brie, Maisons-Alfort II, Cachan II, Thiais, Orly I, Montgeron, Vigneux-sur-Seine, Epinay-sous-Sénart et Ivry-sur-Seine (arrêté).

Les doublets ayant une baisse perceptible de la température comprise entre  $0,5$  et  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  (groupe 2) sont La Courneuve-Nord et Sud, Clichy-sous-Bois, Créteil, Cachan I, Orly II et Villeneuve-Saint-Georges.

Enfin, les doublets ayant une baisse de température supérieure à 1 °C (groupe 3) sont Maisons-Alfort I, Alfortville, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-Les-Roses et Champigny-sur-Marne. **Ceux ayant une courbe de décroissance de leur température la plus marquée (en moyenne 0,15 °C/an) sont Alfortville et l'Hay-les-Roses.** Ces doublets nécessitent par conséquent une attention plus particulière car la température du réservoir au droit des puits producteurs serait en cours de diminution. **Il est à noter que seul le doublet d'Alfortville montrerait une chute progressive de sa température actuellement.**



## 4. Conclusion

Ce document constitue le rapport final de la durée de la Convention ADEME-BRGM n° 0705C0040 notifiée le 8 octobre 2007 et de son avenant n° 1 du 4 août 2009.

Il a permis de constater la grande difficulté à rassembler les données d'exploitation destinées à élaborer les modèles d'évolution des fronts froids des doublets géothermiques en exploitation. La mobilisation des sociétés d'exploitation des opérations de la région parisienne reste encore à démontrer pour parvenir collectivement à la bonne compréhension technico-économique de la production géothermique de cet aquifère, indispensable à la pérennité de son développement.

Sur le plan scientifique, il a permis de dresser un premier bilan sur les tendances observées des paramètres physico-chimiques et de l'évolution des équilibres thermodynamiques ainsi que de l'évolution de la température du réservoir du Dogger sur près de 30 ans d'exploitation de 26 sites géothermiques localisés dans le Val-de-Marne et la Seine-Saint-Denis, sur l'ensemble des 34 doublets en exploitation en Ile-de-France

**Du point de vue géochimique**, les principaux phénomènes identifiés sont :

- Une tendance à une acidification du fluide prélevé les 10 dernières années d'exploitation. La création de dépôts de sulfure de fer et leur vieillissement progressif dans le puits de production peut être en partie à l'origine de cette diminution. Toutefois, la plus grande contribution pressentie à la diminution du pH est celle du réservoir, qui produirait, après recirculation, un fluide de plus en plus acide.
- Des indices de saturation stables pour la majorité des minéraux exceptés pour la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et la mackinawite ( $\text{FeS}$ ) pour lesquels l'indice de saturation évolue de manière sensible. La saturation de la calcite ( $\text{IS} \sim 0$ ) tend à diminuer en raison de la chute générale du pH des fluides sur les 10 dernières années d'exploitation. L'indice de saturation de la mackinawite ( $\text{IS} \sim 0$  à 0,5) suit l'évolution des concentrations en fer dissous qui tend à augmenter depuis 2001 et ceci, malgré les traitements de fond de puits. Cette tendance serait notamment due à la baisse généralisée du débit d'exploitation (passage en artésien ou réduction des débits d'exploitation par pompage). 3 sites sont en exploitation artésienne sur les 26 de la zone étudiée et 10 sur l'ensemble des 34 sites de l'Ile-de-France
- L'état de saturation de la calcédoine ( $\text{SiO}_2$ ), seul minéral susceptible d'annoncer l'arrivée du front froid dans le domaine du proche puits de production, reste stable pour l'ensemble des puits étudiés.

La **modélisation hydrodynamique du réservoir du Dogger**, quant à elle, a permis d'identifier les doublets ayant des interactions hydrauliques et de cartographier l'emprise des bulles froides autour des puits injecteurs, suite à un calcul thermique détaillé par secteur de doublets identifiés dans le calcul hydraulique. Les évolutions de la température, calculées par le modèle aux puits de production sur l'ensemble des

doublés du Val-de-Marne et de Seine-St-Denis, montrent actuellement, pour 6 puits (Alfortville, Champigny-sur-Marne, Chevilly-Larue, Fresnes, L'Hay-les-Roses, Maisons-Alfort I), une baisse égale ou supérieure à 1 °C de la température de production. Cette chute de la température du fluide de production serait plus marquée pour les doublés d'Alfortville et de l'Hay-Les-Roses. **À l'heure de la finalisation du rapport, cette tendance serait uniquement confirmée au doublet d'Alfortville par le BE sous-sol qui réalise les mesures prescrites par l'arrêté d'exploitation de ce site.**

La poursuite du projet « Gestion du Dogger » sera notamment consacrée à affiner les modèles de prévision de la percée thermique tant du point de vue géochimique (indicateur du front froid) qu'hydrodynamique (intégration des nouvelles données d'exploitation, des nouveaux puits et paramètres du réservoir). Cette démarche de mise à jour des modèles ne pourra se faire que dans le cadre d'une transmission régulière des données par les exploitants pour les paramètres d'exploitation (pression, température, débit) et par les bureaux d'études sous-sol pour les paramètres du suivi des opérations (interprétation des essais de puits, analyses physico-chimiques...). Dans ce cadre de bonnes pratiques, la base DOGGER permettra de capitaliser l'ensemble des informations relatives aux opérations géothermiques exploitant l'aquifère et permettra d'assurer une meilleure gestion de la ressource.

## 5. Bibliographie

**Amalhay M., Ignatiadis I.** (1998) - Comparative study of the effectiveness of various organic surfactants in inhibiting carbon steel corrosion in a natural geothermal environment by using rapid electrochemical tests. *In: "Electrochemical Methods in Corrosion Research VI"*. Trans Tech Publications LTD (USA), *Materials Science Forum*, Vols. 289-292, p. 169-180.

**Amalhay M., Ignatiadis I.** (1996) - Application de la diffractométrie des Rayons X à l'étude électrochimique de la corrosion de l'acier au carbone en milieu géothermal réel et traité. *Journal de Physique III*, 1996, Vol. 6, p. 913-920.

**Antics M., Papachristou M., Ungemach P.** (2005) – Sustainable heat mining. A reservoir engineering approach. In Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 31 – February 2, 2005

**Barthelemy Y., Beon O., Buscarlet E.** (2007) – Réseau de chaleur d'Orly – Choisy(94) – Doublet géothermique d'Orly II – Site de Nouvlet – Modélisation thermique d'un nouveau doublet. ANTEA A43336/B, 41 p

**Criaud A., Fouillac C. and Marty B.** (1989) - Low Enthalpy geothermal fluids from the Paris basin. 2 : oxydation-reduction state and conséquences for the prédiction of corrosion and sulfide scaling. *Geothermics*, Vol. 18, n° 5, p. 711-727.

**Daumas S., Goyeneche O., Bianchi A.** (1985) - Activités métaboliques des bactéries des eaux géothermales du Dogger et du Trias du Bassin Parisien. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 301, Série III, n° 6, pp. 295-297.

**Daumas S., Lombart R., Bianchi A.** (1986) - A Bacteriological study of Geothermal Spring Waters Dating from the Dogger and Trias Period in the Paris Basin. *Geomicrobiology Journal*, vol. 4, n° 4, p. 423-433.

**Gauthier B., Ignatiadis I.** (1994) - Relation between Mg/Ca ratio and sulfide concentration in geothermal fluids at wellheads in the Paris basin. Use of their variation versus time and flowrate to distinct current from ancient bacterial activity in the wells-reservoir system. *In: Proceedings of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orleans, France, 8-9 February 1994, p. 249-256.

**Goyénèche O., Desplan A., Bretteville V., Fabris H., Menjoz A., Azaroual M., Sbai A., Ungemach P., Antics M., Scalisi G.** (2004) – Mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France : Conception et réalisation de la base de données, collecte de l'ensemble des données historiques. Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-52927-FR, 82 p., 23 ill., 2 ann., 1 CD-ROM.

**Goyénèche O., Desplan A., Bretteville V., Fabris H., Menjoz A., Azaroual M., Sbai A., Ungemach P., Antics M., Scalisi G.** (2005) – Mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France. Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-53782-FR, 110 p., 35 fig., 5 ann.

**Henley R.W., Truesdell A.M. et Barton P.B.** (1984) - Fluids mineral equilibria in hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, J.Robertson ed., vol. 1, 189 p.

**Fardeau M.L., Khelifi N., Goulhen F., Cayol J.L., Ignatiadis I., Bruschi M. and Ollivier B.** (2009) - *Archaeoglobus fulgidus* and *Thermotoga elfii*, Thermophilic Isolates from Deep Geothermal Water of the Paris Basin. *Geomicrobiology Journal*, n° 26, p. 119-130.

**Fouillac C., Fouillac A.M., Criaud A., Lundt F., Rojas R.** (1986) - Isotopic studies of oxygen hydrogen and sulfur in the Dogger aquifer from Paris Basin. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Inter. Symposium on Water-Rock Interaction, Reykjavik, p. 201-205.

**Fouillac C., Criaud A., Honegger J.L., Czernichowski-Lauriol I.** (1989) - Sulfide deposition and well clogging in the Dogger aquifer of Paris Basin (France). European Geothermal Update, Florence, (Italie), Avril 1989, EEC Contract n° EN3G - 0033-F.

**Fouillac C., Fouillac A.M., Criaud A.** (1990) - Sulphur and oxygen isotopes of dissolved sulphur species in formation waters from the Dogger geothermal aquifer, Paris Basin, France. *Applied Geochemistry*, vol. 5, N° 4, p. 415-427.

**Ignatiadis I., Cheradame J.-M., Brach M., Castagne S., Guezennec J.** (1990a) - Reduction by biocide treatment of hydrogen sulfide teneur in a geothermal brine. In "Microbially influenced corrosion and biodeterioration". Ed. N.J. Dowling, M.W. Mittelman, J.C. Danco. Proceedings of the International Congress on "Microbially Influenced Corrosion", Knoxville, USA, 7-12 october 1990, section 8, p. 33-36.

**Ignatiadis I., Brach M., Le Dinh Bao B., Lafforgue M.** (1990b) - Suivi journalier physico-chimique d'hiver et d'été de fluides géothermaux du Dogger du Bassin Parisien. Rap. BRGM R 31928 IRG SGN 90, 77 p.

**Ignatiadis I., Lafforgue M.** (1990c) - Suivi physico-chimique de l'eau géothermale produite lors d'une opération de nettoyage d'un puits par la nouvelle méthode hydraulique de "Jetting". Note Technique n° 90/209 IRG SGN, 50 p.

**Ignatiadis I., Amalhay M., Lafforgue M. et Brach M.** (1991a) - Dosage des sulfures et mercaptans dissous dans les fluides géothermaux du Dogger du bassin parisien. Rap. BRGM R 33488 IRG SGN, 91 p.

**Ignatiadis I., Teton S., Lafforgue M.** (1991b) - Evaluation de l'action d'un inhibiteur de corrosion organique sur les dépôts des sulfures de fer en milieu géothermal reconstitué et réel. Rapport BRGM n° R33945 IRG SGN 91, 90 p.

**Ignatiadis I., Cheradame J.M., Lafforgue M., Castagne S. (1991c)** - Évolution des teneurs en sulfures dissous dans les fluides géothermaux. Rapport BRGM R 33518 IRG SGN 91, 160 p.

**Ignatiadis I., Teton S. (1992)** - Assessment of the chemical action of different agents on the iron sulfides constituting the scale formed by corrosion of carbon steels in geothermal environments. *In: Geothermal Ressources Council Transactions*, vol. 16, pp. 357-363.

**Ignatiadis I. (1994)** - Origins of the increased sulphide concentrations noted in geothermal fluids at production wellheads in the south and east of the Paris basin. *In: Proceedings of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 241-248.

**Ignatiadis I., Abou Akar A. and Amalhay M. (1994a)** - Methods for monitoring corrosion and the efficiency of treatment by corrosion inhibitor on the geothermal projects of the Paris basin. *In: Proceeding of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 257 - 266.

**Ignatiadis I., Peyrot N. (1995)** - Estimation of the solubility product of the iron sulphide controlling  $Fe^{2+}$  and  $S^{2-}$  solubilities in geothermal waters. Poster presentation in the 8th European Union of Geosciences, 9-13 April 1995, Strasbourg, France, 9-30 April 1995. *In: Proceedings of EUG8, Terra abstracts, Abstract supplement n° 1, to Terra nova*, vol. 7, 1995, pp.322.

**Ignatiadis I., Amalhay M. (1996a)** - Study of the behaviour of a carbon steel in a natural or modified and treated geothermal environment. *In: Proceedings of the International Symposium, Eurocorr' 96, Nice, France, September 24-26, 1996. Session II: Corrosion inhibitors. P. 15, pp. 1-4.*

**Ignatiadis I., Amalhay M. (1996b)** - The effect of iron sulfide deposits on corrosion of carbon steel in a natural and treated geothermal water using electrochemical techniques and X-ray diffractometry. *In: Proceedings of the International Symposium, Eurocorr' 96, Nice, France, September 24-26, 1996. Session II: Corrosion inhibitors. P. 21, p. 1-4.*

**Ignatiadis I., Abou Akar A., Cotiche C. (1996a)** - Analysis and consequences of bacterial proliferation in casings and reservoirs of geothermal doublets of the Paris Basin. *In: Proceedings of the International Symposium, Eurocorr' 96, Nice, France, September 24-26, 1996. Session II: Microbial Corrosion. P. 1, p. 1-4.*

**Ignatiadis I., Amalhay M., Abou Akar A., Cotiche C. (1996b)** - Analyse et conséquences de la prolifération bactérienne sur les tubages et dans le réservoir (proche ou lointain) des doublets géothermiques du Bassin de Paris. Rapport final (convention Ademe-BRGM 4.05.0040). Rap. BRGM R 39028, 53 p., 32 fig., 15 tabl.

**Ignatiadis I., Cheradame J.M., Daumas S.** (1996c) - Comparative tests to determine the effectiveness of various bactericides on sulfate reducing bacteria in geothermal fluids. In: Proceedings of the International Symposium, Eurocorr' 96, Nice, France, September 24-26, 1996. Session II: Microbial Corrosion. OR 8, p. 1-4.

**Ignatiadis I., Abou Akar A.** (1997) - Etude comparative de deux fluides géothermaux issus du même réservoir : l'un produit par un tubage en acier au carbone en service depuis 26 ans (1969), l'autre par un tubage en composite récent (1995). - Rapport final (convention BRGM-SAF Environnement-Ademe n° SAF 95.119-CT). Rap. BRGM R 39755, 62 p., 7 fig., 6 tabl., 1 ann.

**Ignatiadis, I., Cheradame J.M.** (1997a) - Contrôle de l'évolution de l'activité bactérienne et des pertes de charge dans les tubages d'un doublet géothermique du Bassin de Paris (Sucy en Brie, Val de Marne). Rapport Final (conventions SOGESUB-Ademe n° 95-115-CT et SOGESUB-Arene n° 95-FB-503). Rap. BRGM R 39445, 314 p., 20 fig., 16 tabl., 7ann. (2 volumes).

**Ignatiadis, I., Cheradame J.M.** (1997b) - Recherche et propositions des traitements curatifs et préventifs pour l'optimisation d'une opération géothermique : maîtrise de l'évolution des pertes de charges dans les tubages prenant en compte le rôle des tensio-actifs utilisés. Rapport final (conventions SMGC-SAF Environnement n° SAF 95 116-CT et SMGC-Arene n°95 FB 502). Rap. 39522 , 248 p., 15 fig., 15 tabl., 3 ann..

**Ignatiadis I., Amalhay M., Abou Akar A. et Cotiche C.** (1998) - Analyse et conséquences de la prolifération bactérienne sur les tubages et dans le réservoir (proche ou lointain) des doublets géothermiques du bassin de Paris. Biodétérioration des matériaux. C. Lemaître, N. Pebère et D. Festy. Eds. EDP Sciences, Les Ulis, France. Chap. 16, p. 231-257

**Lopez S., Hamm V., Le Brun M., Schaper L., Boissier F., Cotiche C., Giuglaris E.** (2010) - 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France. Geothermics, accepté.

**Matray J M., Menjoz A.** (1996) - Recherche de traceurs chimiques pour l'identification de la percée thermique des doublets géothermiques. Dogger du Bassin parisien (France). Rapport final (Convention Ademe-BRGM N. 4.05.0040) BRGM/RR-39096-FR, 123 p., 18 fig.

**Menjoz A., Fillion E., Lesueur H., Matray J.M., Noyer M.L.** (1996) – Comportement des doublets géothermiques exploitant le réservoir du Dogger et analyse du contexte de la percée thermique, Bassin parisien (France). Rapport final (Convention Ademe-BRGM 4.05.0040). BRGM R 39095, 160 p.

**Peyrot N., Ignatiadis I., Amalhay M. Abou Akar A.** (1995) - Experimental concentration versus time curves for the iron(ii) sulphide precipitation reaction in partly reconstituted geothermal waters and their interpretation. Poster presentation in the 8th European Union of Geosciences, 9-13 April 1995, Strasbourg, France, 9-30 April 1995. In: Proceedings of EUG8, Terra abstracts, Abstract supplement N° 1, to Terra nova, Vol. 7, 1995 p. 72.

**Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.-M., Criaud A., Fouillac C., Brach M., Menjoz A., Martin J.-C., Lambert M** (1989) – Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin Parisien, France. Rapport final. BRGM R 30169, 240 p.

**Rožanova E.P., Khudyakova A.I.** (1974) - A new nonspore-forming thermophilic sulfate-reducing organism, *Desulfovibrio thermophilus*. Nov. Sp. Microbiology (Eng.Transl.) N° 43, p. 908-912.

**Sauty J.P., Gringarten A.C., Fabris H., Thiery D., Menjoz A., Landel P.A.** (1982) – Sensible Energy Storage in Aquifers 2. Field Experiments and Comparison With Theoretical Results. Water Resources Research, Vol. 18, No. 2, p. 253-265.

**Ungemach P., Antics M., Lalos P.** (2009) – Sustainable Geothermal Reservoir Management Practice. GRC Transactions, Vol. 33, 2009.



## **Annexe 1**

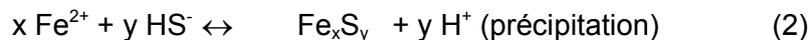
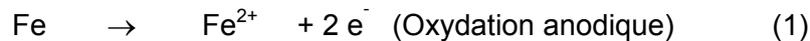
### **Rappels nécessaires pour comprendre les évolutions des concentrations en fer et en sulfures dissous observées en tête de puits**



### Origine du fer dissous et du sulfure dissous dans les fluides

Pour comprendre les évolutions possibles des teneurs en fer et en sulfure dissous en tête de puits de production à débit d'exploitation variable et sur des périodes importantes, il est nécessaire de considérer précisément toutes les causes potentielles pouvant induire de telles évolutions (Ignatiadis *et al.*, 1990a, 1990b, 1991a, 1996, 1998 ; Ignatiadis, 1994) :

Le sulfure et le fer dissous sont en rapport direct avec les phénomènes de corrosion-dépôts dans les tubages des puits selon :



La demi-réaction (1) explique la production de  $\text{Fe}^{2+}$  par la corrosion des tubages, alors que la seconde réaction montre la consommation à la fois du  $\text{Fe}^{2+}$  et du sulfure par la précipitation des sulfures de fer.

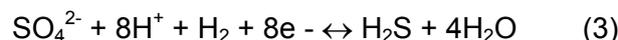
On pourrait imaginer que cette dernière réaction (2), sous certaines conditions (diminution de pH), s'inverse, c'est-à-dire, que l'on dissout les sulfures de fer présents sur les tubages (passage du sulfure et du  $\text{Fe}^{2+}$  en solution).

À ces possibilités de production/consommation des espèces  $\text{Fe}^{2+}$  et sulfure, il est raisonnable d'ajouter la production de sulfure par la réduction bactérienne des sulfates, schématisée simplement par  $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^-$ . En effet, les bactéries sulfato-réductrices (BSR) sont connues pour avoir la possibilité de produire du sulfure en réduisant les sulfates dans les eaux anaérobies (Rozakova et Khudyakova, 1994 ; Daumas *et al.*, 1985, 1986 ; Fardeau *et al.*, 2009).

Ainsi, au niveau de la boucle géothermale, il est nécessaire de définir deux systèmes :  $S_1$  le réservoir et  $S_2$  le puits de production.

$S_1$  constitue le réservoir éventuellement composé de différents niveaux producteurs appelés  $n_1, n_2, \dots, n_n$ . Ces niveaux contribuent au débit global mesuré en surface,  $Q_T$ , avec leurs débits respectifs  $q_1, q_2, \dots, q_n$  tels que :  $Q_T = \sum q_i$ .

$S_2$  constitue le puits proprement dit, c'est-à-dire les tubages et les dépôts qui y sont accrochés. On pourrait étendre le système  $S_2$  au proche réservoir, c'est-à-dire à la partie du réservoir toute proche du puits de production et susceptible d'être perturbée par une opération lourde sur le puits de production (curage). Des BSR (et d'autres types de bactéries) sont présentes dans le fluide circulant, mais également sur ou sous les dépôts. Ces bactéries peuvent produire du sulfure par réduction des sulfates, avec consommation de  $\text{H}^+$ , selon :



Lorsque l'hydrogène n'est pas disponible, toute source hydrocarbonée peut être utilisée. Notons que l'hydrogène est le produit de la corrosion des tubages et peut être disponible dans la boucle géothermale.

.Le sulfure ainsi produit est évacué par le fluide à une vitesse constante à un temps  $t$  et à un débit donné. Si le débit varie, la vitesse de diffusion du sulfure dans le fluide peut varier. Mais le sulfure peut précipiter sous forme  $Fe_xS_y$  lorsqu'il rencontre le fer qui provient du réservoir ou de la corrosion des tubages. Ces sulfures de fer peuvent s'accrocher aux parois des tubages ou être entraînés par le fluide circulant.

Dans tous les cas, les mesures et analyses sont effectuées en surface, en tête du puits de production, où la composition du fluide est la conséquence de la contribution des deux systèmes  $S_1$  et  $S_2$ . Ainsi, le sulfure mesuré en tête de puits de production peut avoir plusieurs origines :

- une partie existe dans le fluide avant qu'il ne pénètre dans le puits de production : c'est la teneur « réservoir » ;
- une partie peut être produite par l'activité des BSR à la surface des parois ;
- inversement, une certaine quantité peut être piégée sous forme de dépôts se formant sur les tubages.

### Méthodes d'étude de l'évolution du fer et du sulfure dissous

Pour comprendre les évolutions possibles à débit d'exploitation variable, il est nécessaire d'effectuer un paramétrage des concentrations (en considérant les systèmes  $S_1$  et  $S_2$ ) et d'introduire la notion du flux d'ion (Ignatiadis *et al.*, 1991c ; 1998). Les flux totaux en sulfure et en fer en tête de puits de production à chaque instant s'écrivent respectivement :

$$Q_T [S^{2-}]_T = \sum q_i . [S^{2-}]_i + \Phi_{\text{sulf bact.}} - \Phi_{\text{sulf depots}} \quad (4)$$

$$Q_T [Fe^{2+}]_T = \sum q_i . [Fe^{2+}]_i + \Phi_{\text{fer corr.}} - \Phi_{\text{fer dépôts}} \quad (5)$$

$Q_T$  est le débit total mesuré en tête de puits (en  $m^3/h$ ).  $[S^{2-}]_T$  et  $[Fe^{2+}]_T$  sont respectivement les teneurs en sulfure et en fer dissous dosées en tête du puits de production.  $[S^{2-}]_i$  et  $[Fe^{2+}]_i$  sont respectivement les teneurs en sulfure et en fer dissous produits par chaque niveau  $i$  du réservoir profond.  $\sum q_i . [S^{2-}]_i$  et  $\sum q_i . [Fe^{2+}]_i$  sont respectivement les flux de sulfure et de fer produits par le réservoir profond composé de différents niveaux producteurs produisant avec des débits respectifs  $q_i$  (avec  $1 < i < n$ ). Si la concentration est exprimée en  $mg/l$  et le débit en  $m^3/h$ , le flux est en  $g/h$ .  $\Phi_{\text{sulf. bact}}$  est le flux du sulfure produit au temps  $t$  par les bactéries dans le casing et le proche réservoir.  $\Phi_{\text{fer corr}}$  est le flux de fer produit au temps  $t$  par la corrosion dans le casing.  $\Phi_{\text{sulf. dépôts}}$  et  $\Phi_{\text{fer dépôts}}$  sont respectivement les flux de sulfure et de fer déposés sous forme de  $Fe_xS_y$  sur les parois du casing (en  $g/h$ ).

Si on considère que les niveaux producteurs du réservoir profond produisent un fluide de même concentration en sulfure et en fer dissous<sup>10</sup>, alors  $Q_T = \sum q_i$ , les relations précédentes deviennent :

$$[S^{2-}]_T = [S^{2-}]_{\text{réservoir}} + \Phi_{\text{sulf bact}}/Q_T - \Phi_{\text{sulf dépôts}}/Q_T \quad (6)$$

$$[Fe^{2+}]_T = [Fe^{2+}]_{\text{réservoir}} + \Phi_{\text{fer corr}}/Q_T - \Phi_{\text{fer dépôts}}/Q_T \quad (7)$$

Dans ce cas, la teneur en sulfure dépendrait de l'inverse du débit pour sa partie produite par les bactéries et pour sa partie déposée sous forme de sulfures de fer. En parallèle, la concentration en fer dissous dépendrait de l'inverse du débit pour sa partie produite par la corrosion et pour sa partie déposée sous forme de sulfures de fer.

Avec ces définitions et considérations théoriques préliminaires, il a été possible de définir deux méthodes pour provoquer et étudier les évolutions éventuelles de la composition du fluide prélevé en tête des puits de production :

- le suivi physico-chimique de la composition du fluide<sup>11</sup> à débits d'exploitation variables ;
- le suivi physico-chimique de la composition du fluide avant et après un traitement bactéricide du puits de production.

Pour mener à bien ces suivis physico-chimiques, différentes étapes sont nécessaires. Elles comportent, notamment, des opérations sur site (prélèvements, mesures et analyses), des opérations au laboratoire (analyses) et l'exploitation des résultats à l'aide d'un support informatique approprié. L'ensemble de ces opérations sont décrites dans différents rapports BRGM (Ignatiadis et Lafforgue, 1990a ; Ignatiadis *et al.*, 1990a, 1991b).

Plusieurs études concernant le suivi de la chimie des fluides géothermaux en fonction du débit d'exploitation ont été réalisées. Nous pouvons en citer quelques-unes :

- la première en 1990 sur les sites de Meaux-Beauval 1, Meaux-Beauval 2, Créteil et Fresnes (Ignatiadis *et al.*, 1991c)
- en 1994-1995 sur les sites de Bonneuil-sur-Marne, Chevilly-Larue, Meaux-Beauval 2 et Orly 1. (Ignatiadis *et al.*, 1996a)
- En 1996-1997 sur les sites de Sucy-en-Brie (Ignatiadis et Cheradame, 1997a), Coulommiers (Ignatiadis et Cheradame, 1997b) et Melun l'Almont (Ignatiadis et Abou Akar, 1997)

<sup>10</sup> La température entre le niveau producteur supérieur et le niveau producteur inférieur varie peu (de 1 à 3 °C). L'eau produite par chaque niveau producteur peut avoir sa propre composition chimique et microbiologique. Les études antérieures n'ont pas permis de connaître les amplitudes des éventuelles variations entre les différents niveaux producteurs. Les teneurs en sulfure et en fer dissous dans le fluide du réservoir profond, c'est-à-dire avant tout contact avec l'acier du tubage, ne sont pas connues (faute de pouvoir être dosées) pour un site déterminé et à un instant donné.

<sup>11</sup> **Méthodologie analytique** : Analyses chimiques : L'échantillonnage et les méthodes analytiques ont été décrites en détail par Marty *et al.* (1988) pour les gaz et par Criaud *et al.* (1988) pour les substances dissoutes.

### Quantification du flux de fer d'un puits de production

La quantification du flux de fer (ions  $\text{Fe}^{2+}$ ) sortant d'un puits de production constitue, dès lors que l'on peut rapporter le flux de fer à une surface d'acier accessible à la corrosion, un moyen d'estimation de la corrosivité moyenne du fluide. Cependant, les résultats doivent être considérés avec prudence puisqu'une partie du fer sortant du puits peut provenir du gisement. Il est alors difficile de faire la distinction entre le fer naturel issu de la formation et le fer issu de la corrosion des tubages. Ce phénomène conduit dans certains cas à une surestimation du taux de corrosion. On sait, par ailleurs, qu'une partie non contrôlable du fer est immobilisée dans le puits sous forme de dépôts insolubles et donc non prise en compte dans le flux sortant. Ce facteur peut conduire à une sous-estimation du taux effectif de corrosion. Le bilan du fer dans un puits producteur peut être résumé ainsi :

$$[\text{Fe}^{2+}] \text{ mesuré en tête} = [\text{Fe}^{2+}] \text{ gisement} + [\text{Fe}^{2+}] \text{ corrosion} - [\text{Fe}^{2+}] \text{ dépôts}$$

où [ ] exprime une concentration, cette équation est transposable en flux.

### Prédiction de la nature des produits de corrosion

Les propriétés électrochimiques des solutions sont depuis longtemps utilisées dans le domaine de la corrosion, sous forme de diagrammes de Pourbaix ou pe-pH, afin de prévoir quelles phases minérales peuvent être formées au contact des matériaux. Ces diagrammes d'équilibre, regroupés partiellement sous forme de catalogues (Pourbaix *et al.*, 1986), sont très utiles si l'on sait estimer le pH et le potentiel d'oxydoréduction du milieu dans les conditions de la corrosion (température, pression, composition chimique), pour autant que les mécanismes de la corrosion soient assimilables à des réactions d'équilibres.

Dans le cas des fluides du Dogger, le système Fe-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O est à considérer à priori, car les tubages sont constitués d'acier doux (K55) contenant peu d'autres éléments que le fer. Les sulfures dissous sont l'agent principal de la corrosion, mais la composition globale, de par la teneur élevée en Cl<sup>-</sup>, contribue significativement à faciliter les réactions électrochimiques. Enfin, les paramètres tels que pH et Eh (potentiel d'oxydoréduction) résultent d'équilibres complexes entre espèces gazeuses et dissoutes, incluant le système carbonate, mais également les couples oxydo-réducteurs présents.

### Estimation des Eh et pH en profondeur (proche du réservoir)

pH et Eh ne peuvent pas être mesurés dans les conditions qui prévalent dans un puits géothermique, à la fois pour des raisons pratiques et théoriques (accès en fond de puits, modification du pH par dégazage en cas de prélèvement en surface, signification théorique discutable des mesures de potentiel).

- pH

Nous disposons de mesures effectuées en tête de puits (Criaud *et al.*, 1989) fournissant le pH du fluide dégazé à pression atmosphérique et température connue. Connaissant, d'autre part, l'alcalinité totale, la composition de la phase gazeuse

séparée, le rapport gaz/eau et la concentration des autres constituants qui participent aux équilibres acido-basiques ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SiO}_2$ ), on peut recalculer au moyen d'un programme quel était le pH avant dégazage (Henley *et al.*, 1984).

Selon les puits en région parisienne, la variation de pH entre les conditions de fond et la surface n'excède pas + 0,3 unités. Ceci est dû au pourcentage relativement moyen de  $\text{CO}_2$  dans le gaz séparé (entre 10 et 30 % en volume). Les pH à la base du casing sont compris entre 6,1 et 6,6. Les valeurs supérieures correspondent aux puits de la zone ouest et des groupes Fontainebleau et Melun (Criaud *et al.*, 1989). Les fluides de Meaux - Coulommiers (les plus minéralisés, les plus chauds et les plus pauvres en sulfures) présentent les pH les plus bas. La combinaison des effets du GLR (gaz liquide ratio) et de la teneur en  $\text{CO}_2$ , s'il y a dégazage pendant la remontée, provoque une augmentation de pH plus importante pour les puits de la zone du Val de Marne que pour ceux de la Seine St Denis ou de la zone ouest.

- Eh

Le potentiel Eh que prend une électrode inerte (platine par exemple) par rapport à une électrode de référence, lorsque celles-ci sont plongées dans une solution, est souvent qualifié, à tort, de potentiel d'oxydoréduction du milieu. Cette mesure, couramment utilisée est toujours délicate à interpréter et n'a de signification théorique que dans un nombre très limité de cas. Au mieux, cette valeur constitue un potentiel apparent. Pour les fluides issus du Dogger, bien que le détail des mécanismes électrochimiques au niveau du platine ne soient pas connu (phénomènes d'adsorption-désorption d' $\text{H}_2\text{S}$  ou présence de poly-sulfures, influence des sulfures organiques), on sait que le potentiel obtenu est directement lié aux sulfures dissous dans l'eau géothermale (Criaud *et al.*, 1989). Le potentiel Ept est d'autant plus bas que la concentration en sulfures est élevée (Ignatiadis *et al.*, 1998) Cependant, le résultat de la mesure n'est pas un potentiel d'équilibre et ne peut être utilisé pour prédire la nature des produits formés sur le casing du puits. Une estimation du potentiel redox du fluide a été obtenue de façon indirecte : les éléments tels que carbone, soufre et azote sont présents dans les solutions avec plusieurs degrés d'oxydation sous forme de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , composés dont les concentrations sont déterminées en surface et recalculées dans les conditions de fond. Les potentiels correspondant à l'équilibre théorique des espèces en présence pour les demi-réactions suivantes ont été calculés :

Réaction d'oxydoréduction		potentiel mV/NHE	
$\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	$\Leftrightarrow$	$\text{CO}_2 + 8 \text{H}^+ + 8 \text{e}^-$	- 320 à - 260
$2 \text{NH}_4^+$	$\Leftrightarrow$	$\text{N}_2 + 8\text{H}^+ + 6 \text{e}^-$	- 310 à - 260
$4 \text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$	$\Leftrightarrow$	$\text{SO}_4^{2-} + 9\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	- 250 à - 200
$1/2 \text{H}_2$	$\Leftrightarrow$	$\text{H}^+ + \text{e}^-$	- 400 à - 300
$2 \text{CH}_4$	$\Leftrightarrow$	$\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{e}^- + 2 \text{H}^+$	- 740 à - 650
$\text{HCO}_3^+ 5 \text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\Leftrightarrow$	$\text{CH}_2\text{O}^{12} + 2 \text{H}_2\text{O}$	- 350

<sup>12</sup>  $\text{CH}_2\text{O}$  représente globalement la matière organique dissoute.

La minéralogie des niveaux aquifères producteurs est à ce jour insuffisamment connue pour autoriser des calculs précis tenant compte d'éventuels tampons minéraux d'oxydoréduction. Les valeurs obtenues pour les couples mettant en jeu l'hydrogène et les sulfures n'ont pas été retenues du fait de leur participation aux phénomènes de corrosion-dépôts qui faussent leur estimation. L'équilibre entre hydrocarbures n'est probablement pas atteint. Les équilibres entre méthane/gaz carbonique et azote/ammoniaque fournissent des valeurs acceptables pour les buts de l'étude, bien corrélées entre elles et indicatrices de conditions d'autant plus réductrices que la température des fluides est basse. Des tendances locales (parallèles aux légères variations de pH) sont observées.

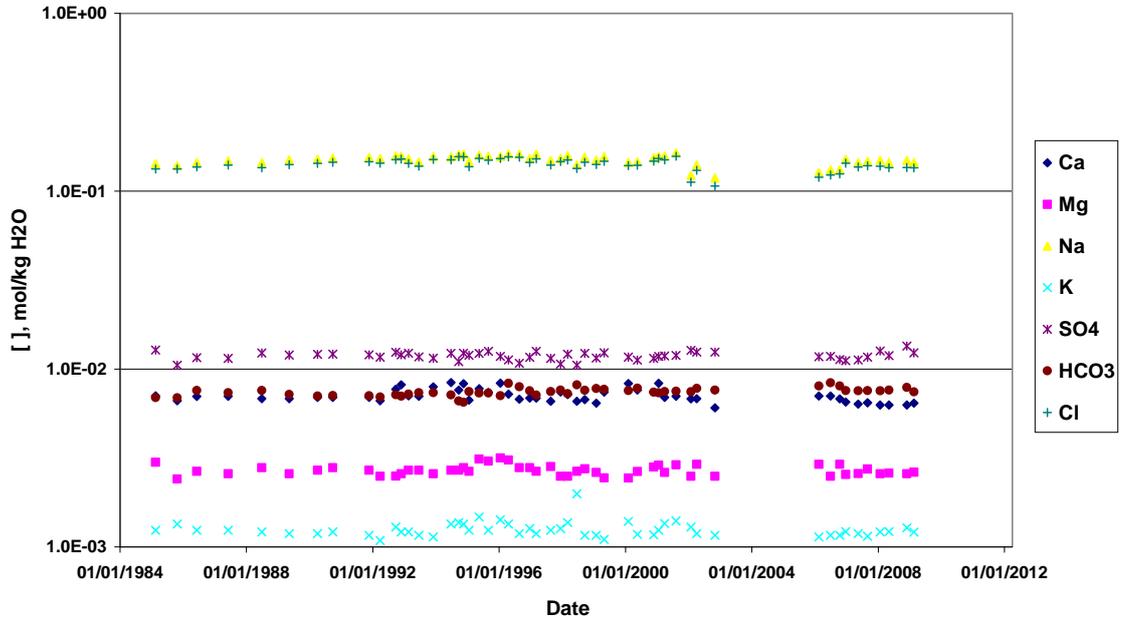
## **Annexe 2**

# **Évolution des concentrations en éléments dissous**

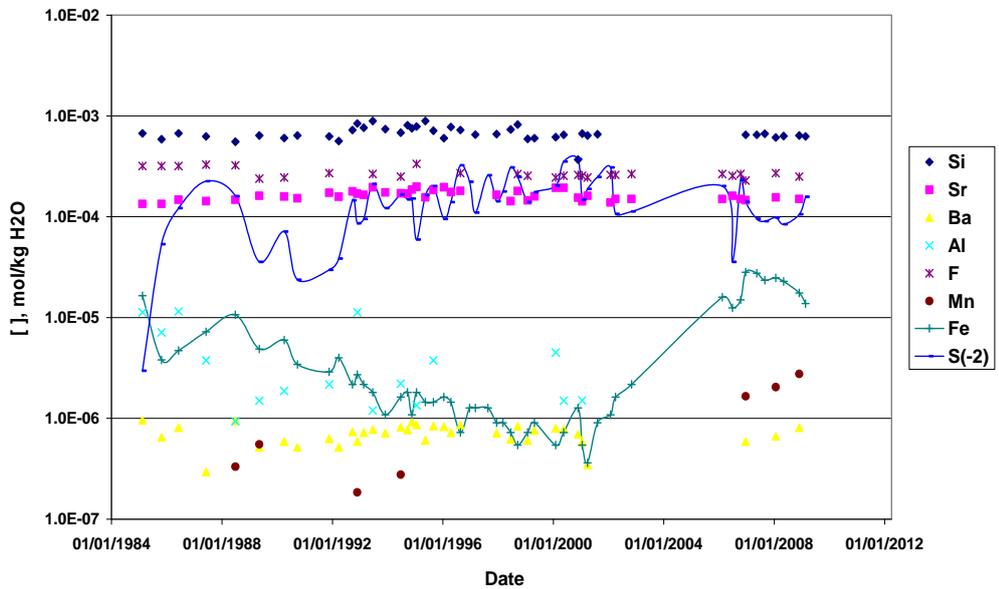


Site de Ris-Orangis (Sud)

a) Eléments majeurs dissous

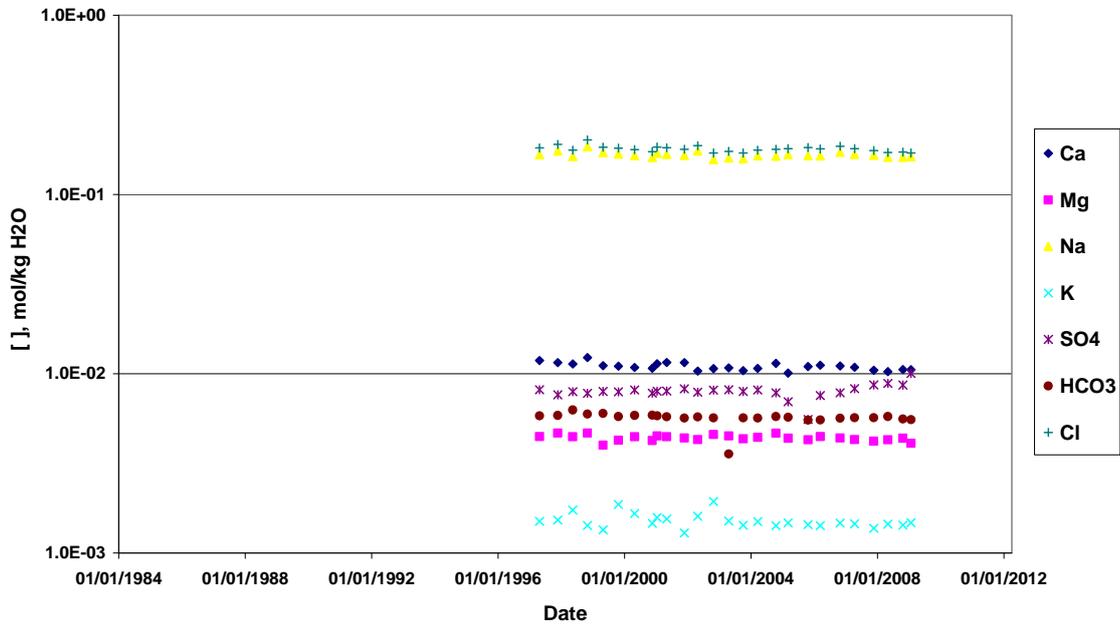


b) Eléments mineurs dissous

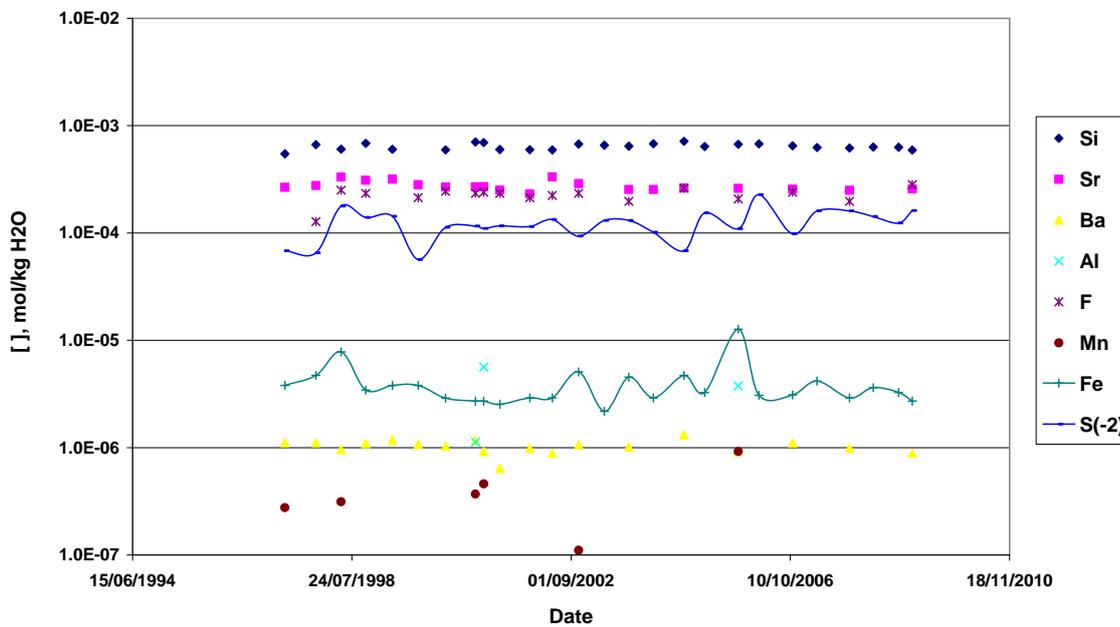


Site de Montgeron (Sud)

a) Eléments majeurs dissous

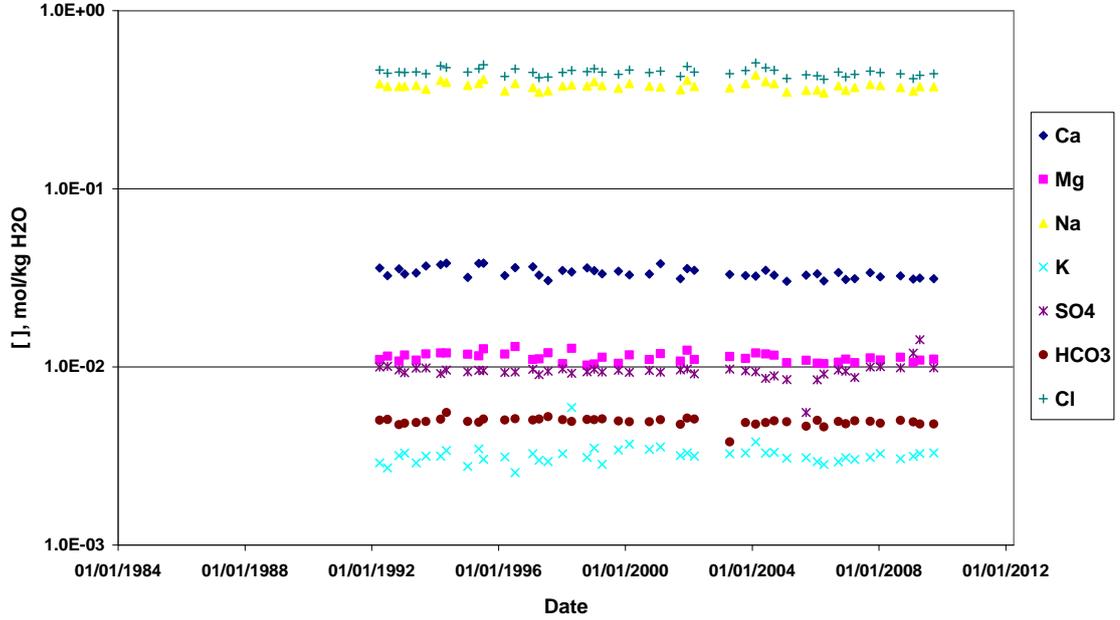


b) Eléments mineurs dissous

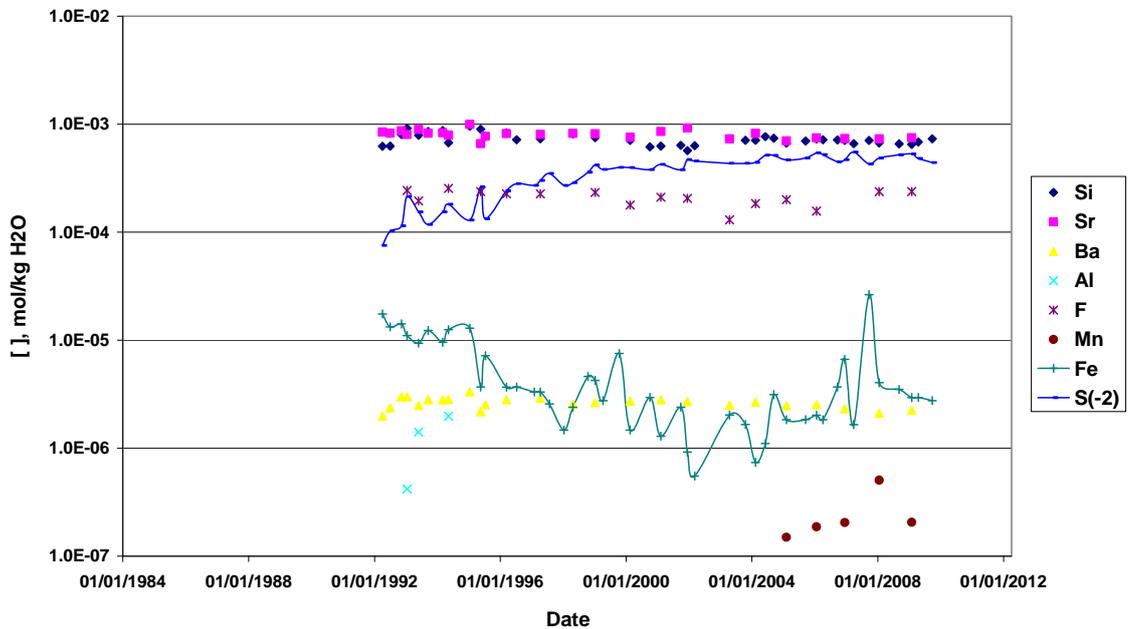


Site de Champigny (Val-de-Marne)

a) Eléments majeurs dissous

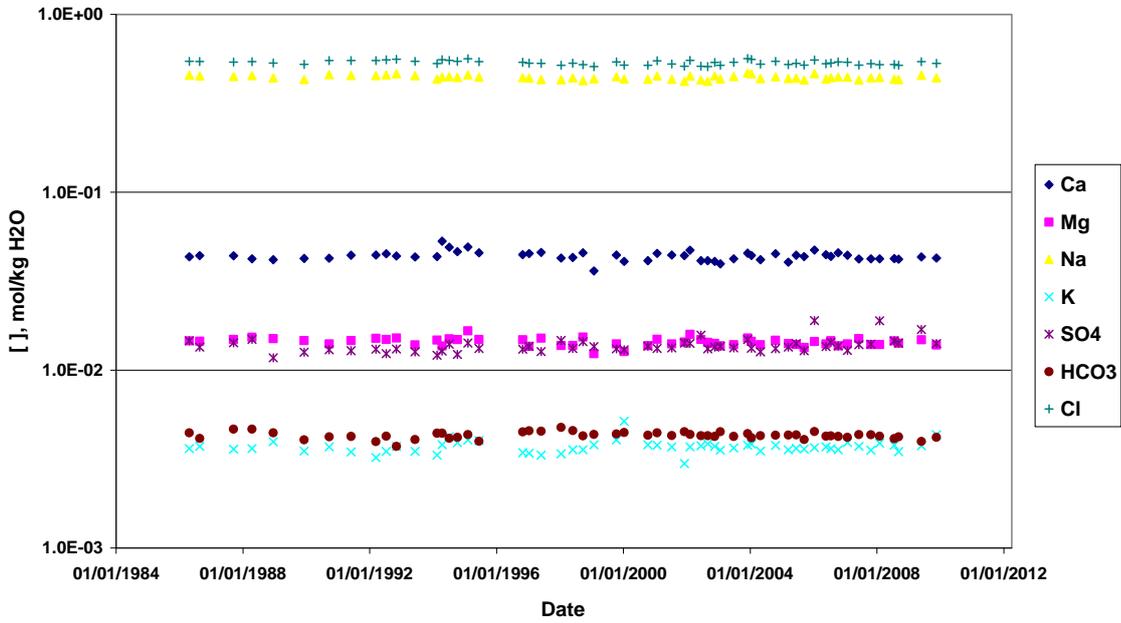


b) Eléments mineurs dissous

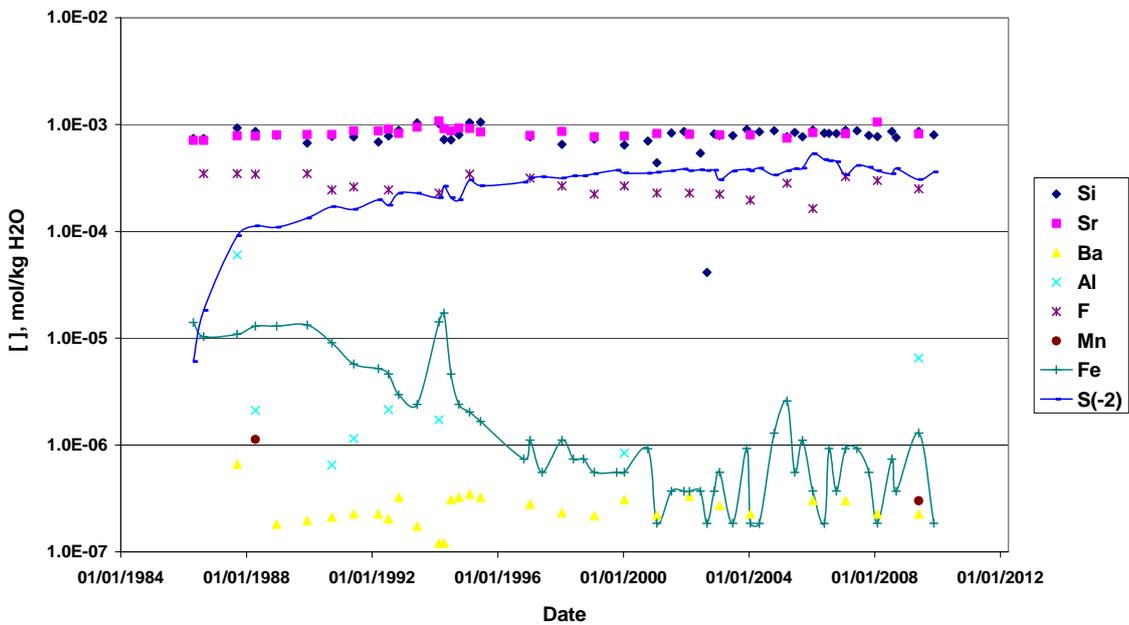


Site de Coulommiers (Est)

a) Eléments majeurs dissous

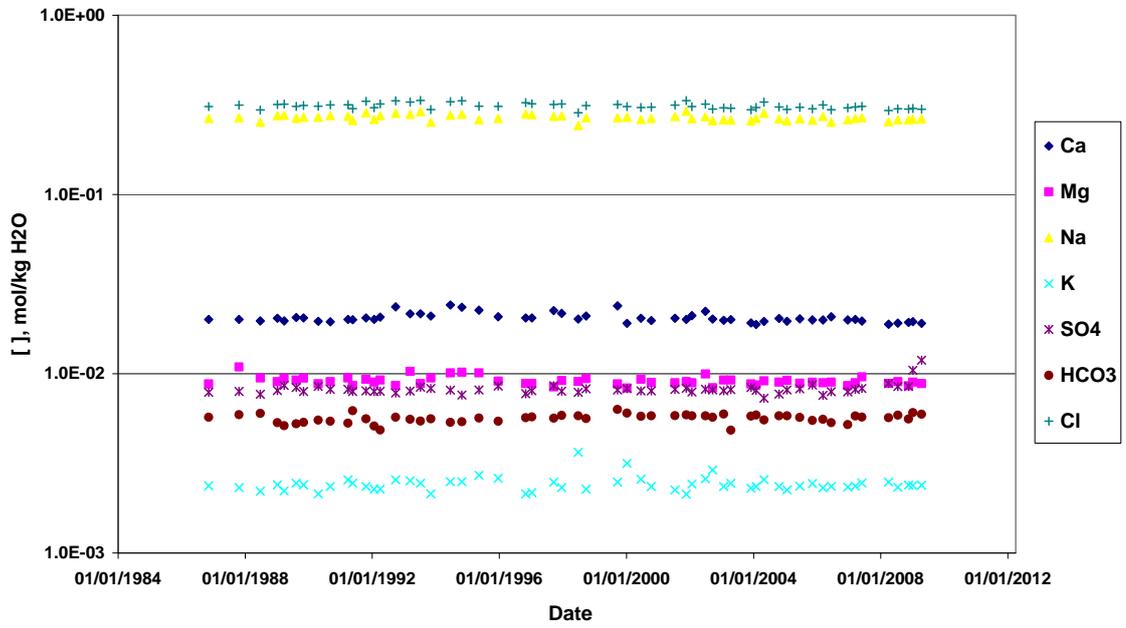


b) Eléments mineurs dissous

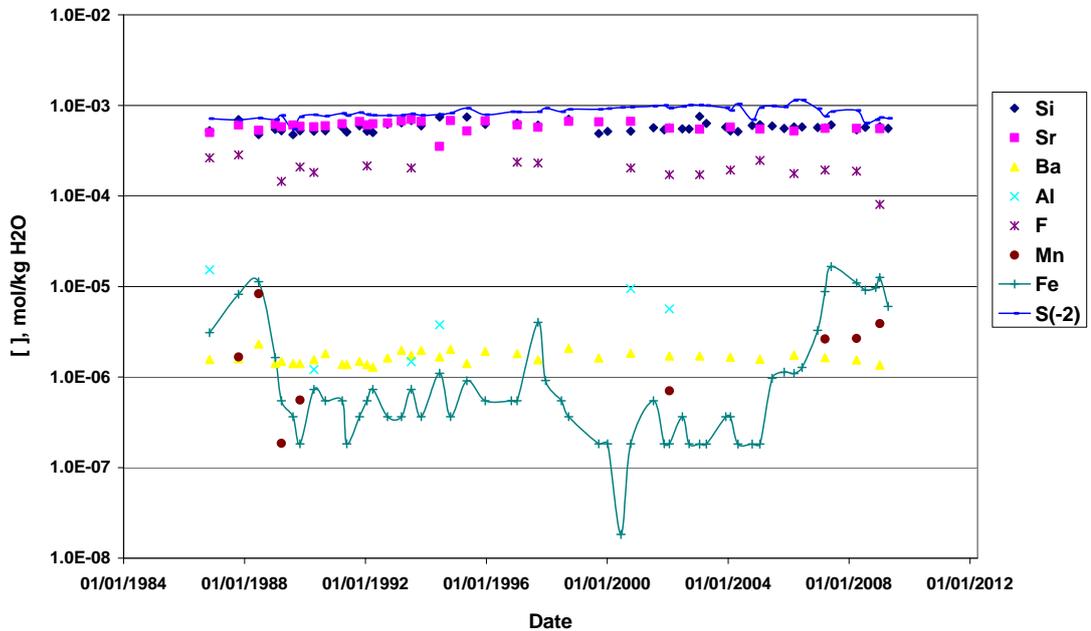


Site de Clichy-sous-Bois (Seine-Saint-Denis)

a) Eléments majeurs dissous



b) Eléments mineurs dissous



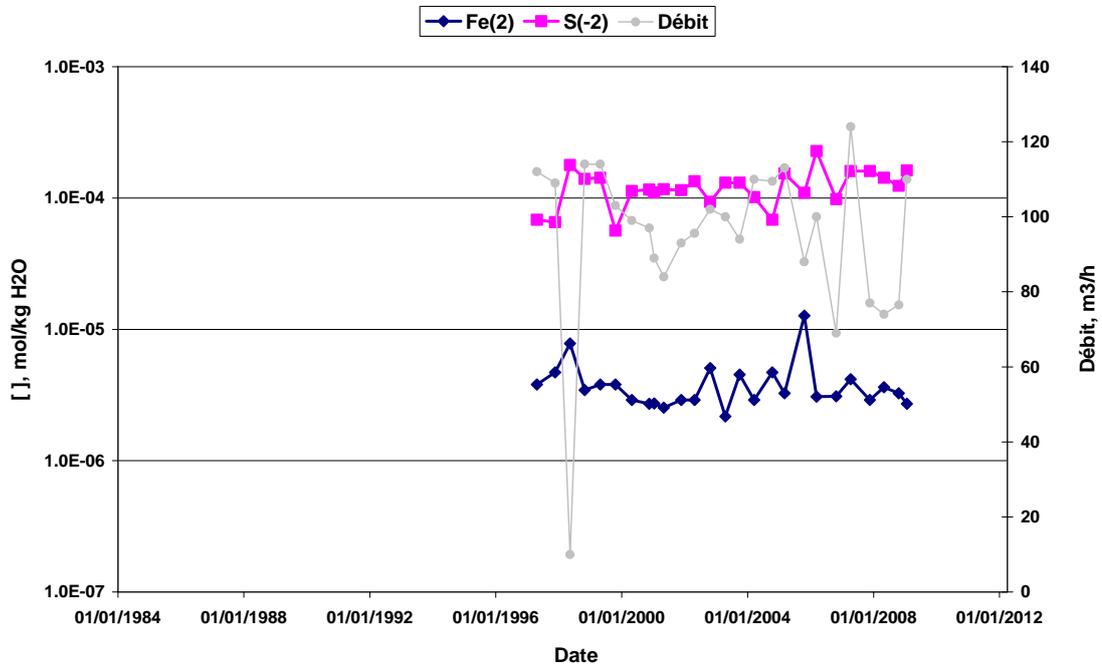


## **Annexe 3**

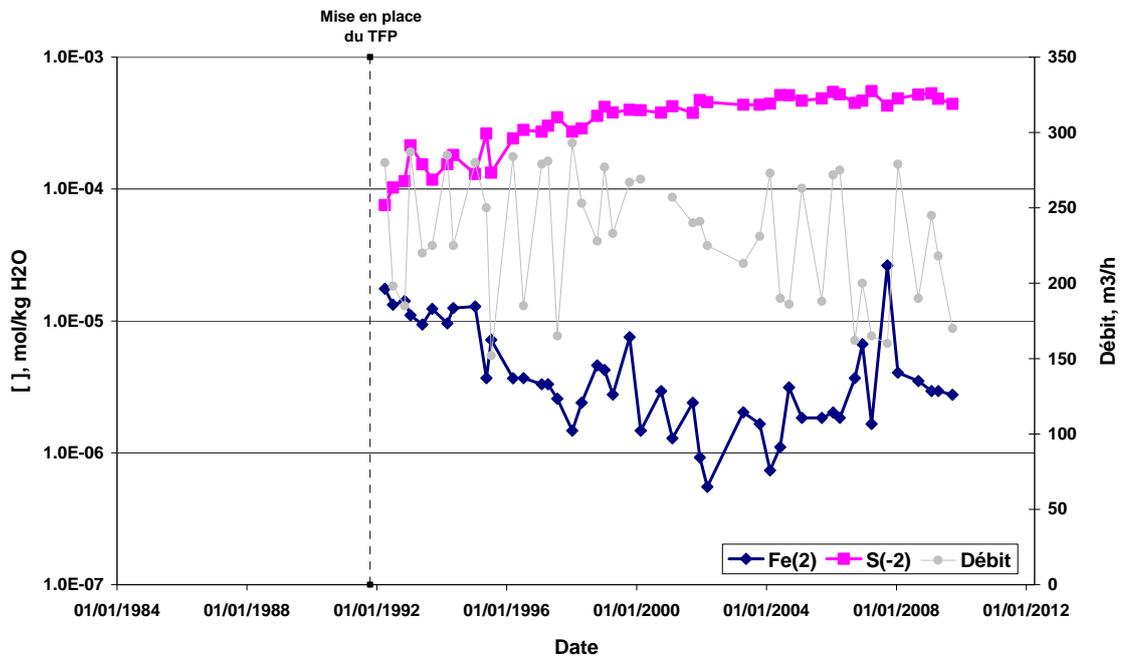
# **Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous**



Site de Montgeron (Sud)



Site de Champigny (Val-de-Marne)



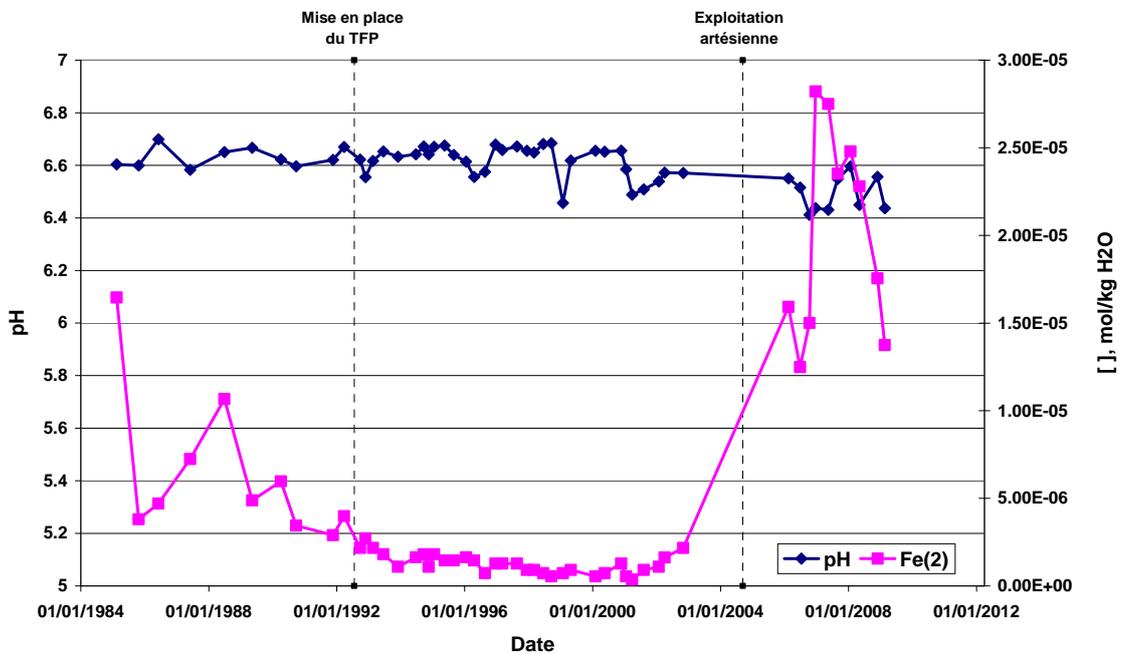
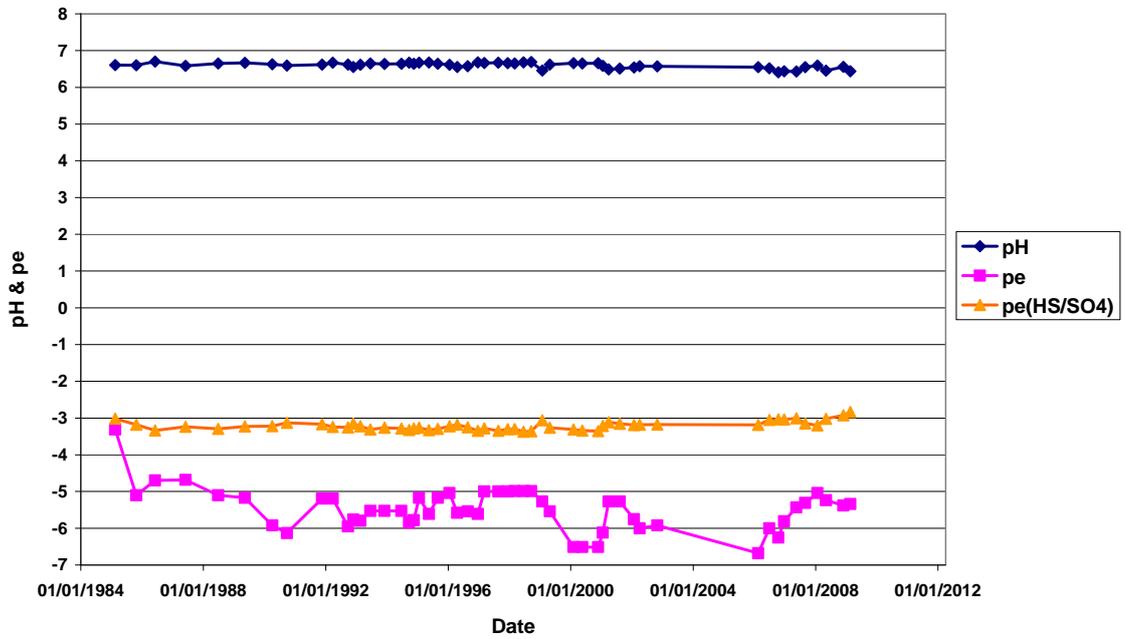


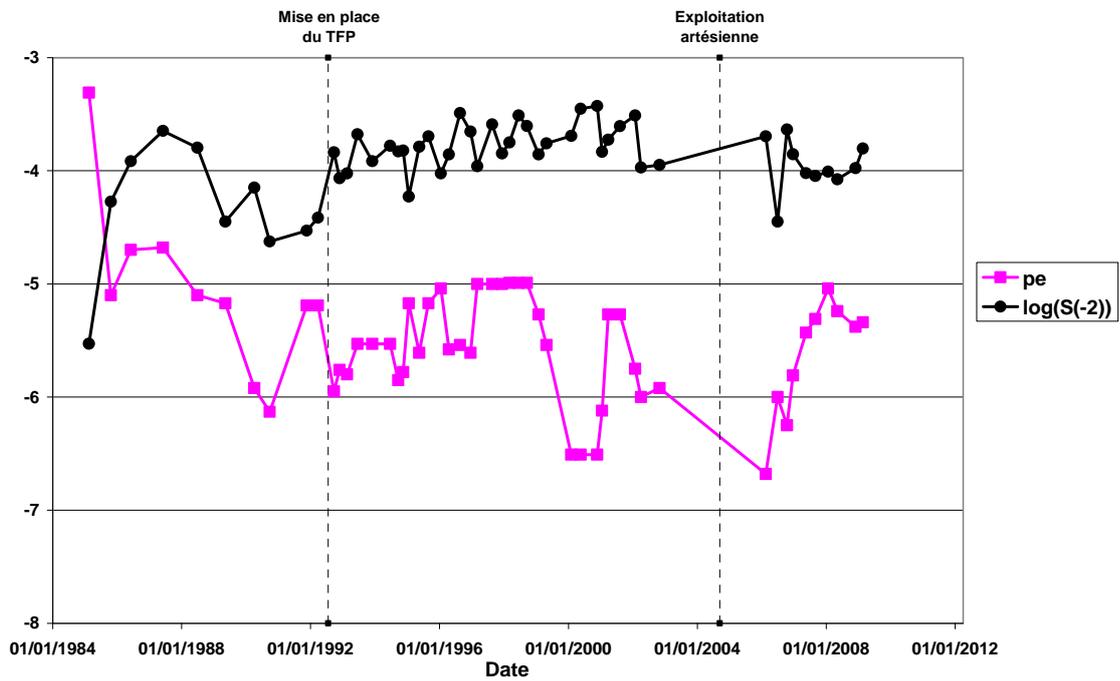
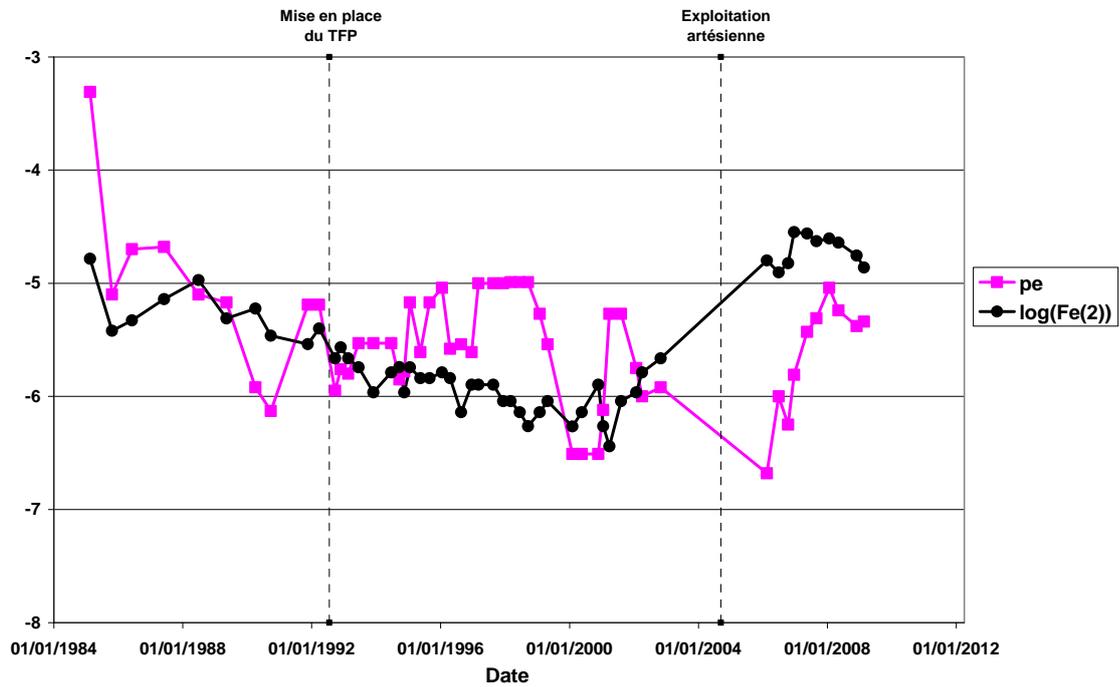
## **Annexe 4**

### **Évolution du pH et du pe**

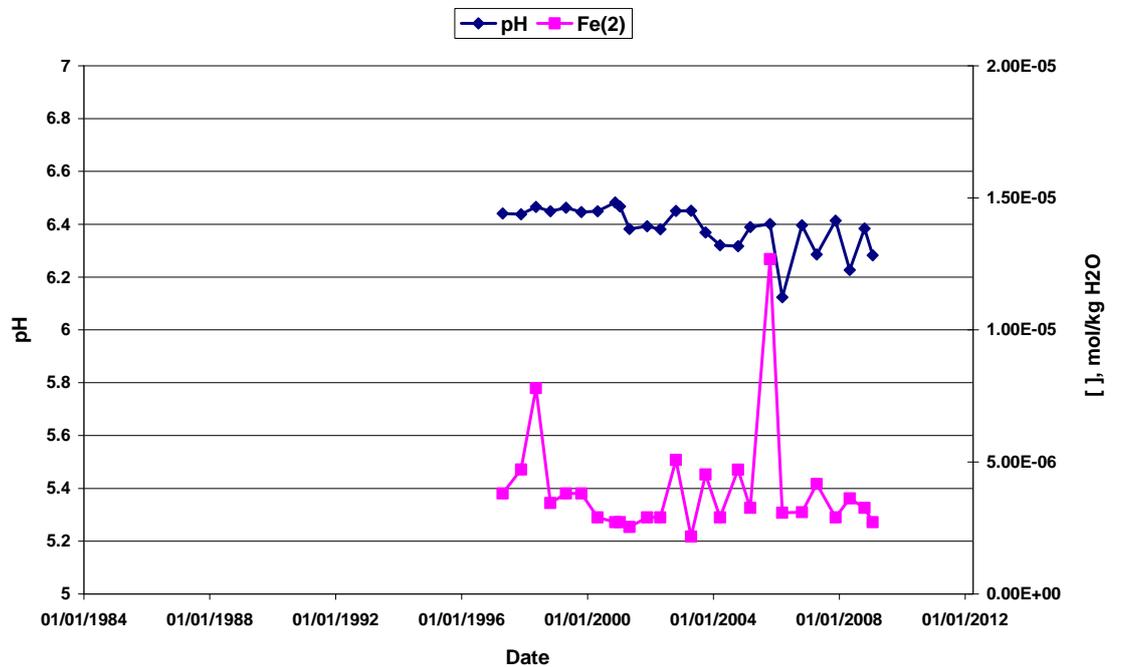
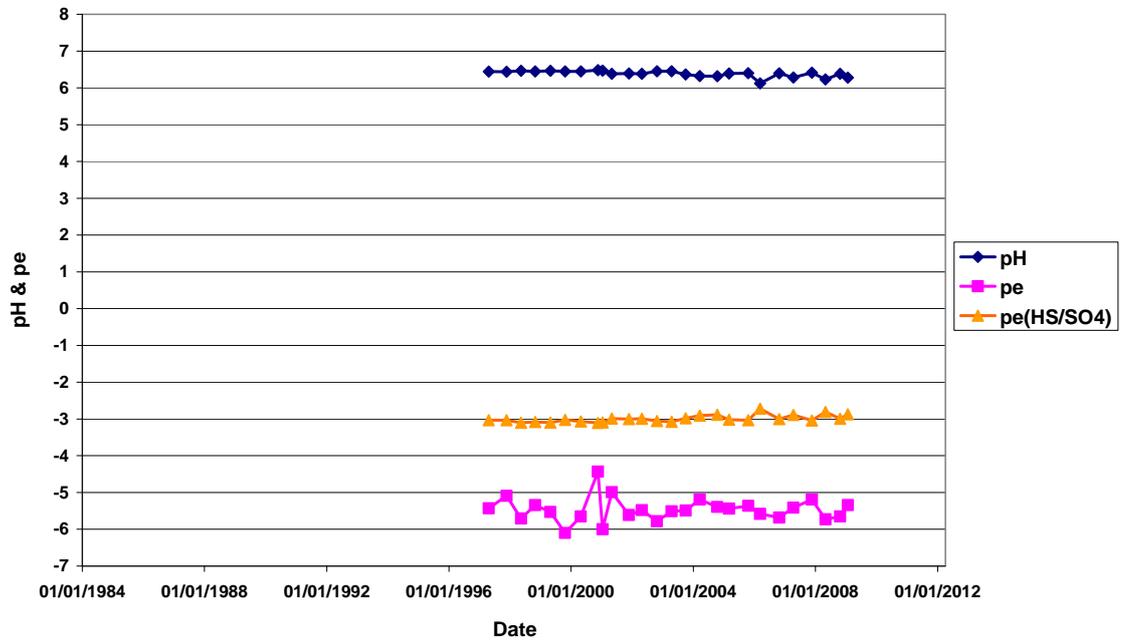


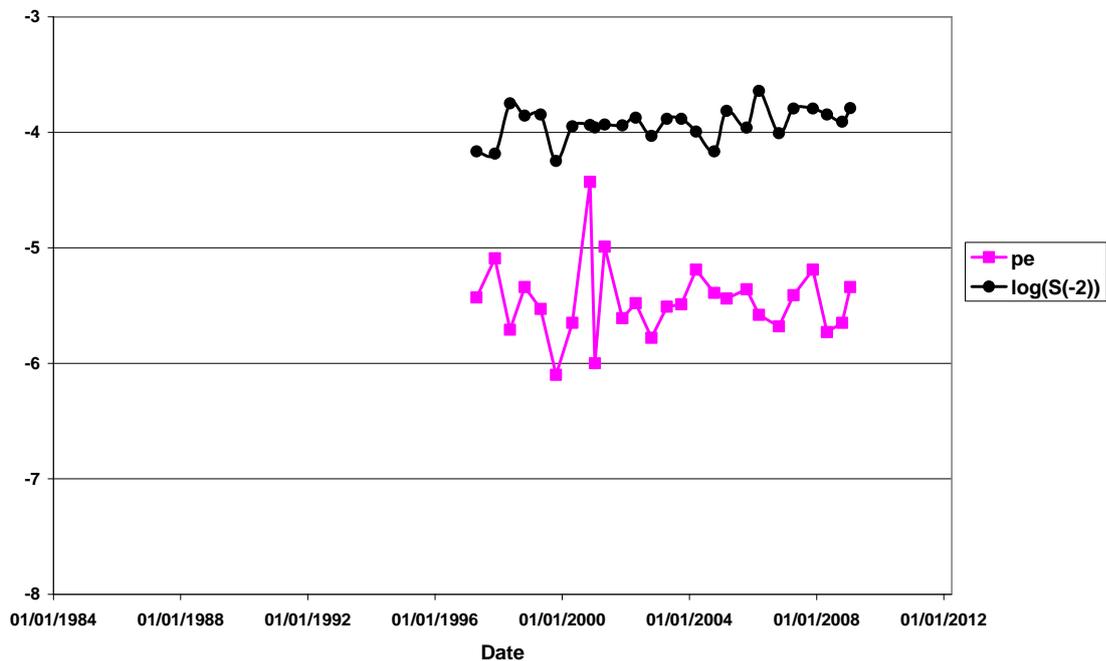
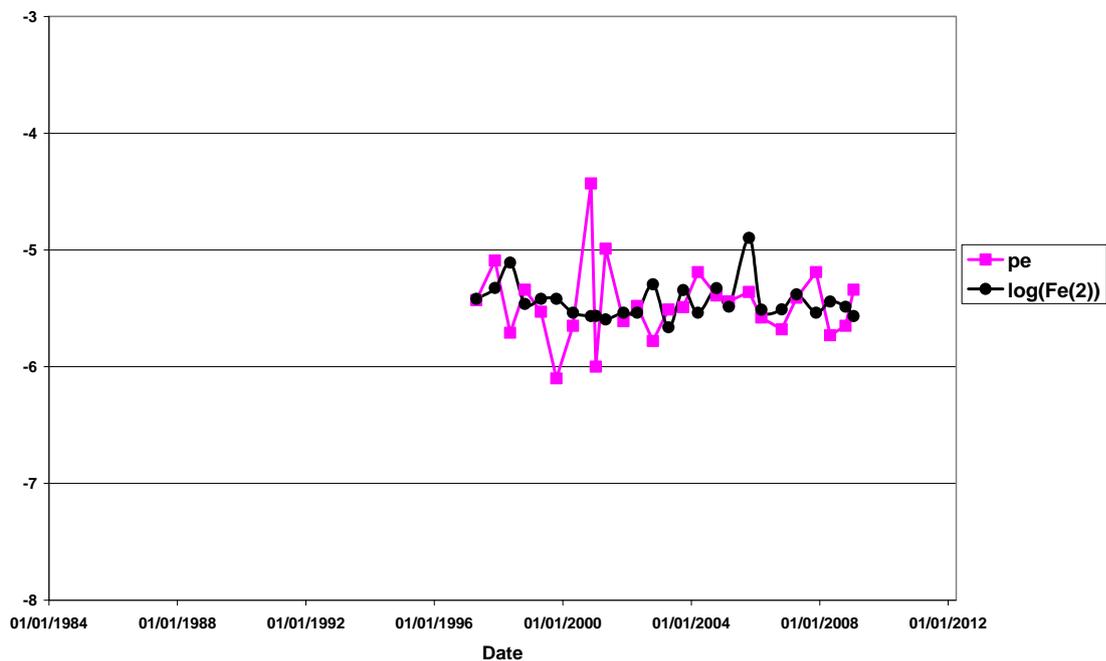
Site de Ris-Orangis (Sud)



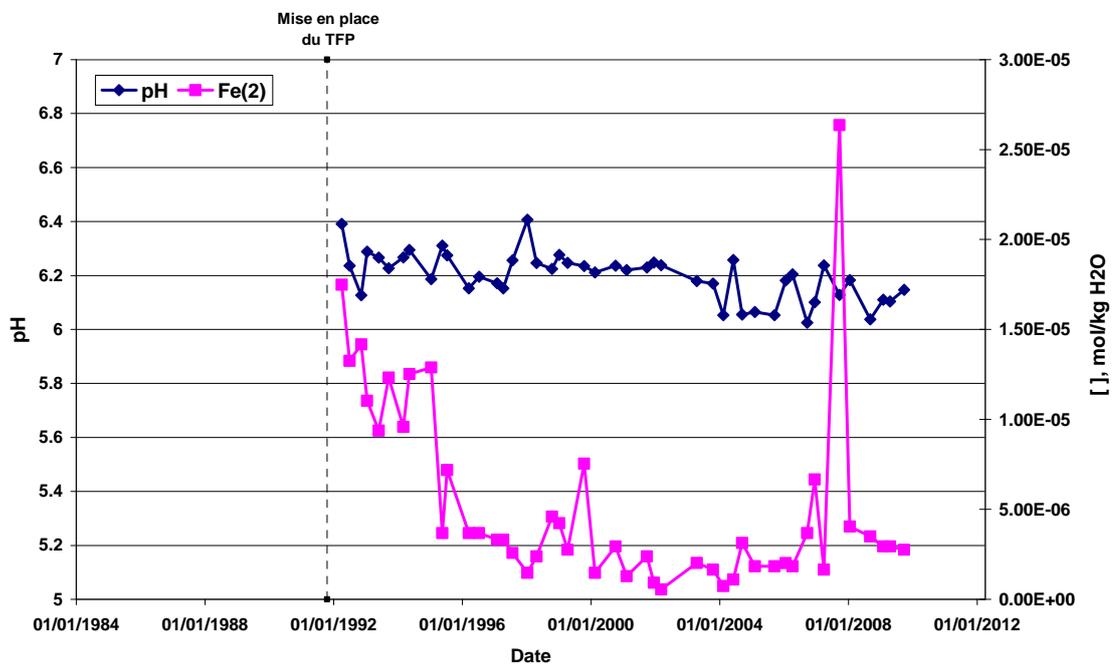
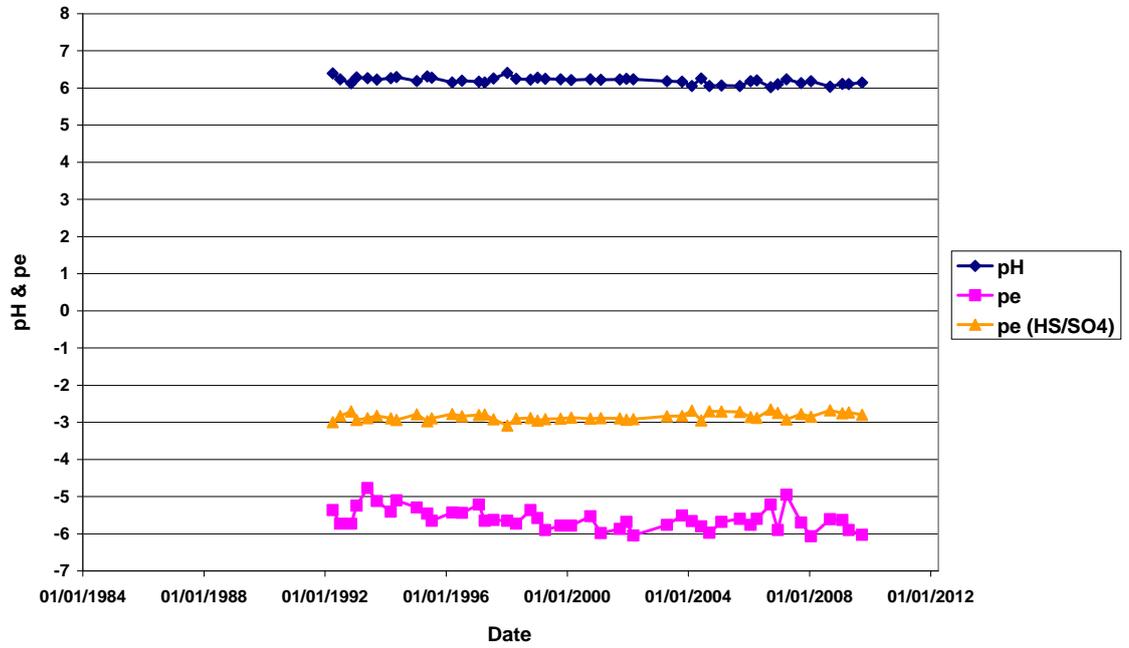


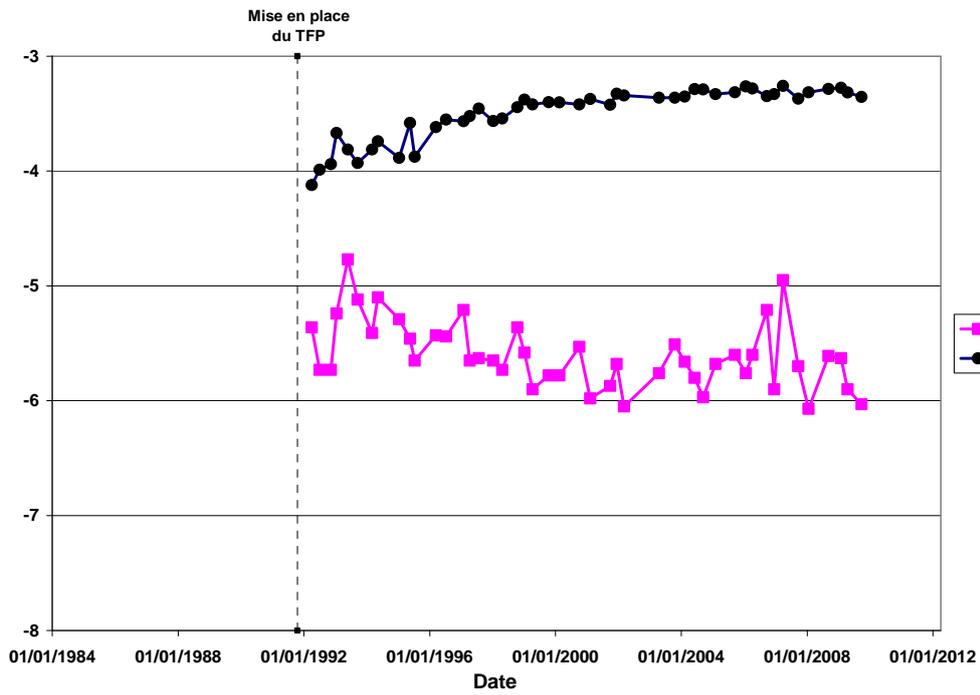
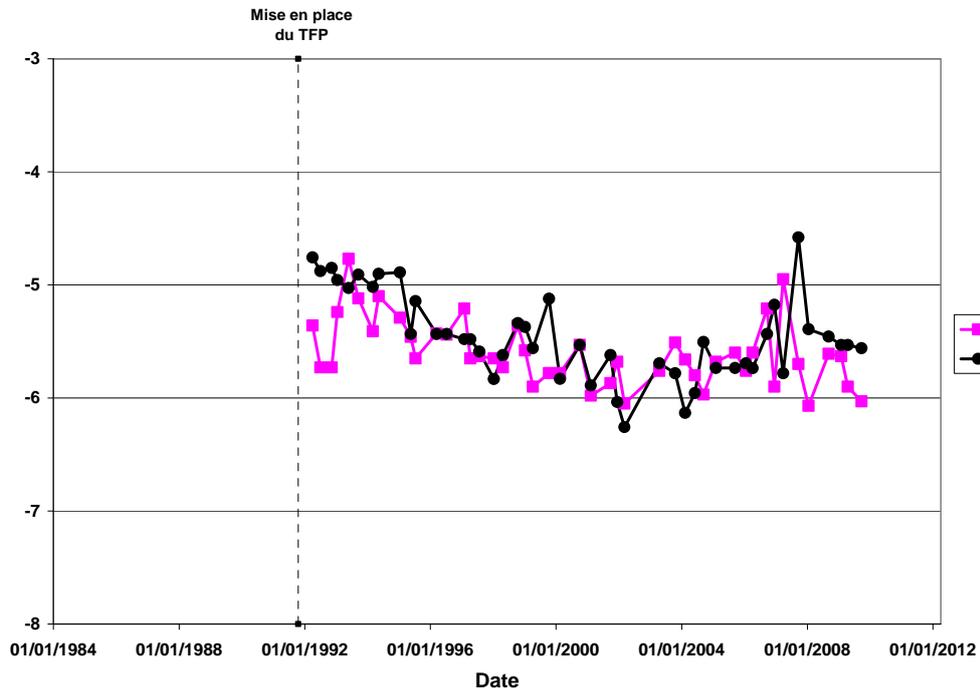
Site de Montgeron (Sud)



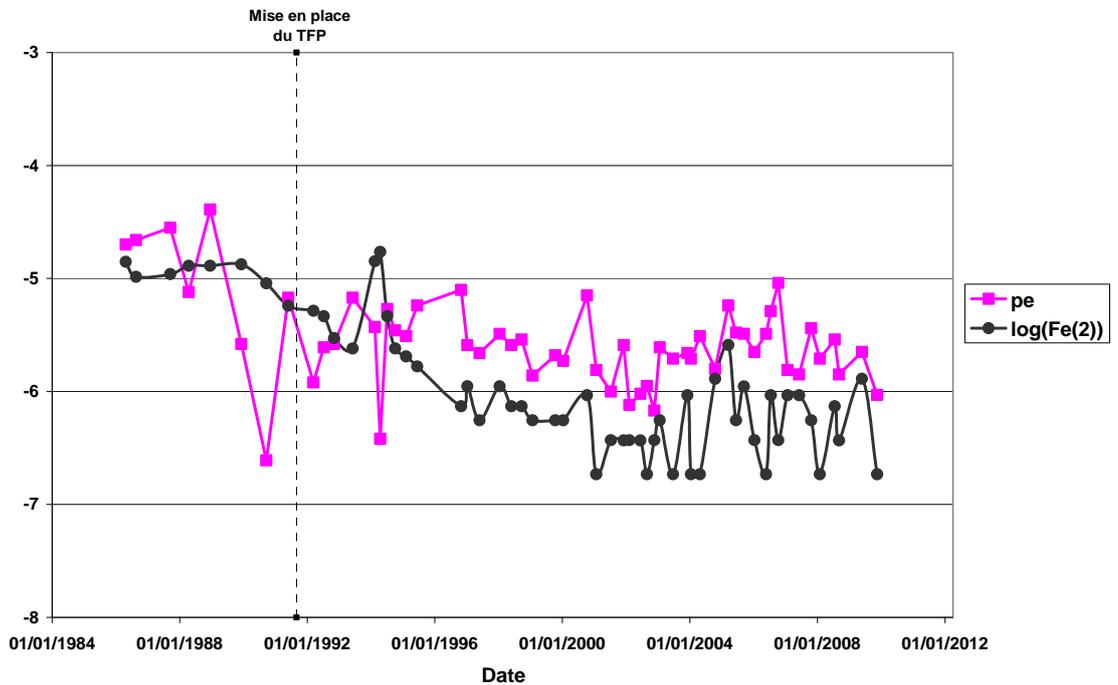
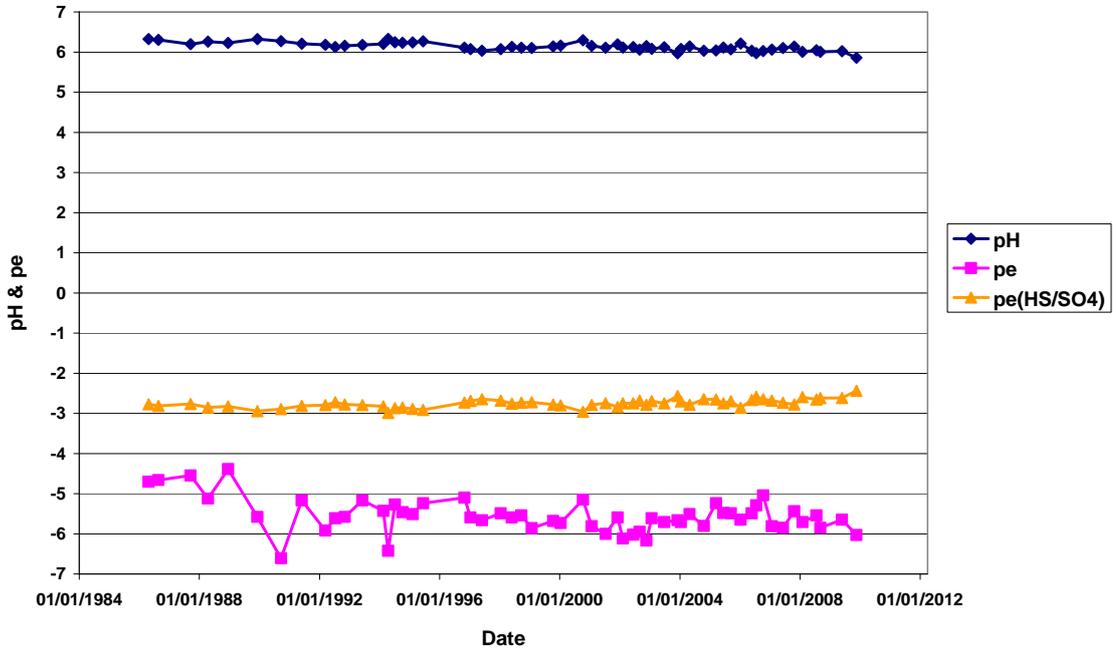


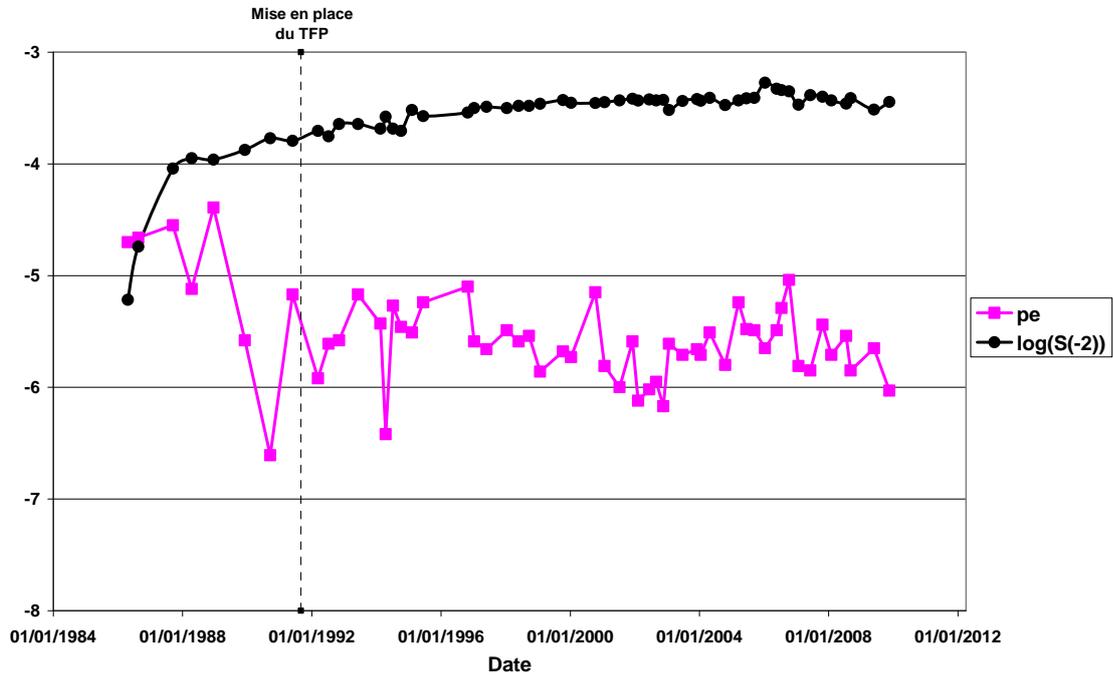
Site de Champigny (VDM)



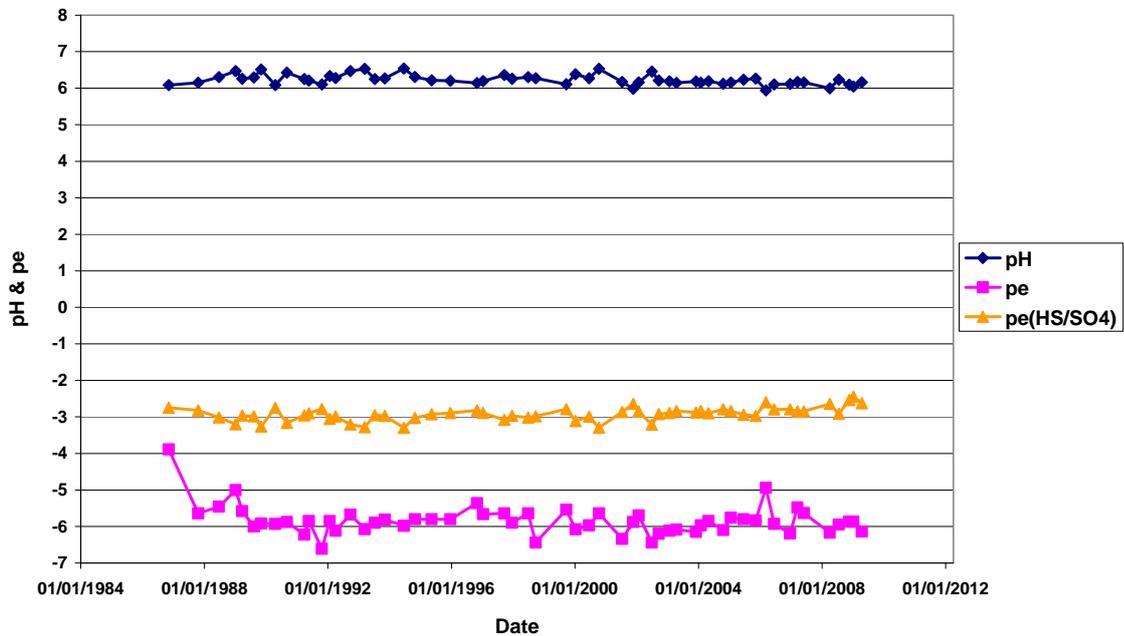


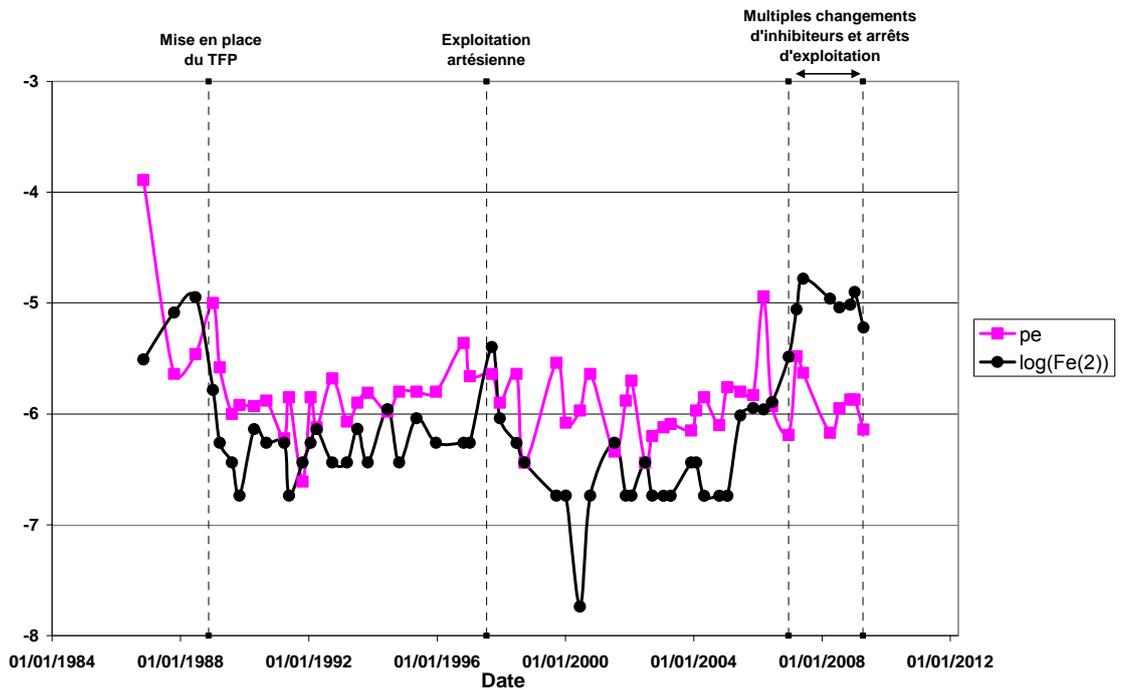
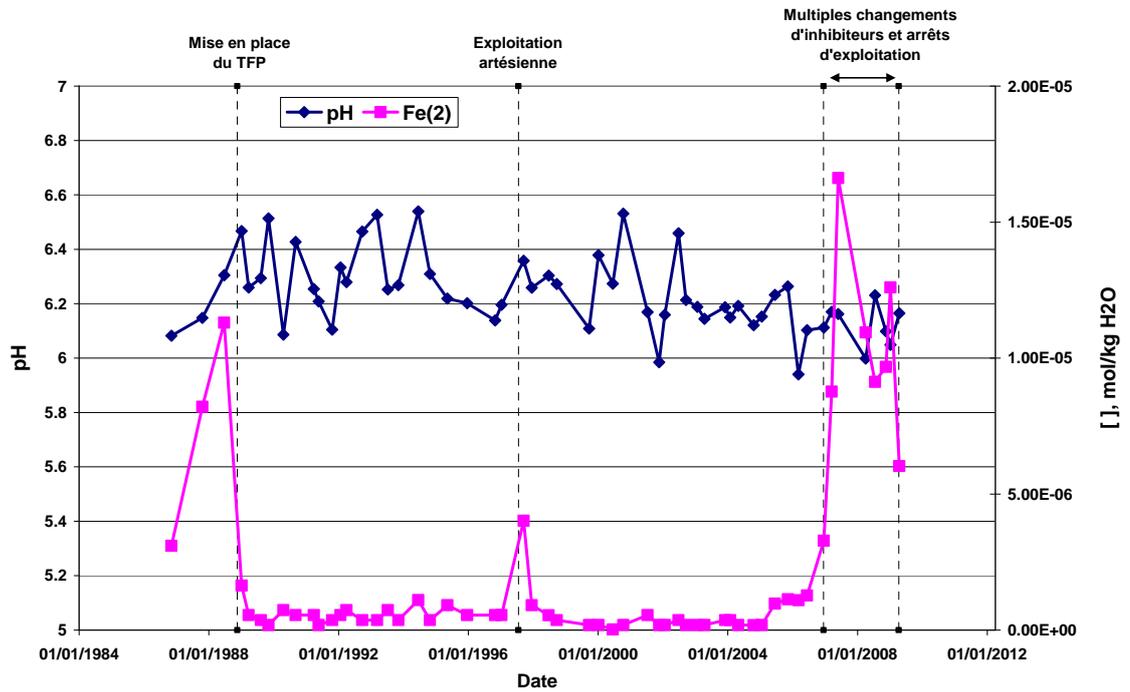
Site de Coulommiers (Est)

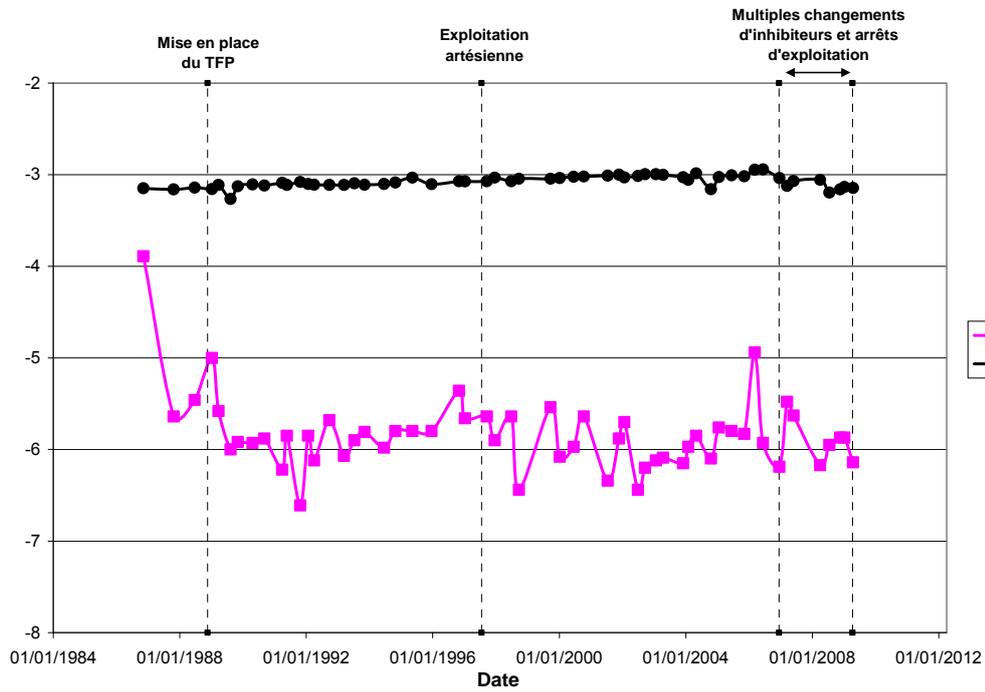




Site de Clichy-sous-Bois (Seine-Saint-Denis)





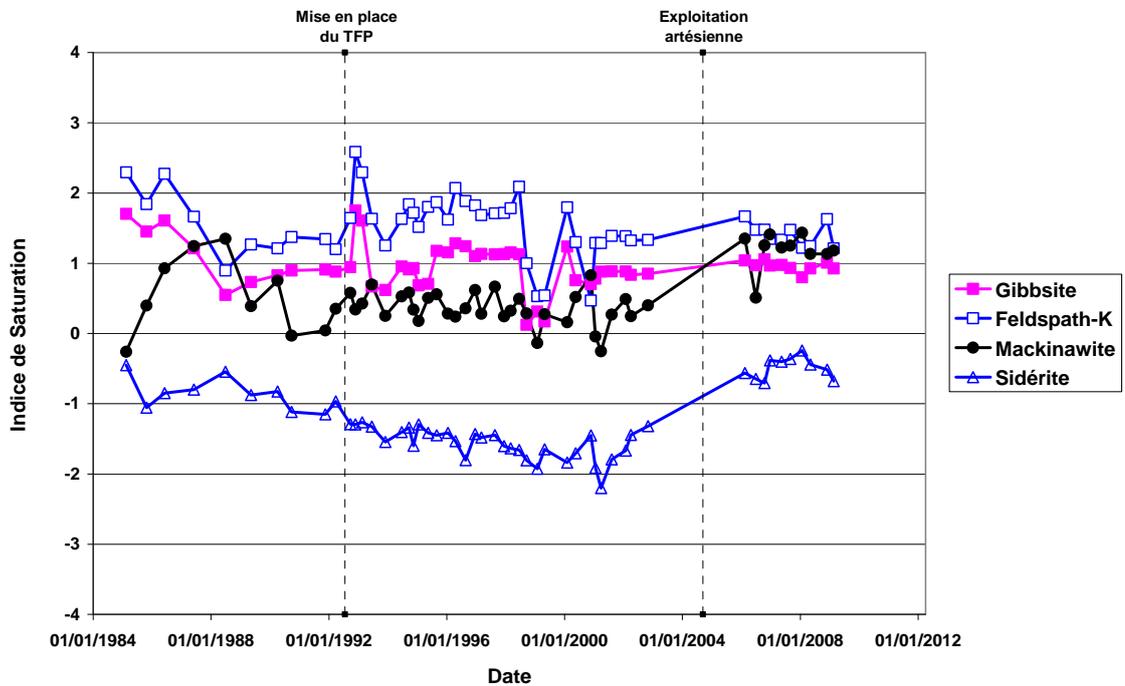
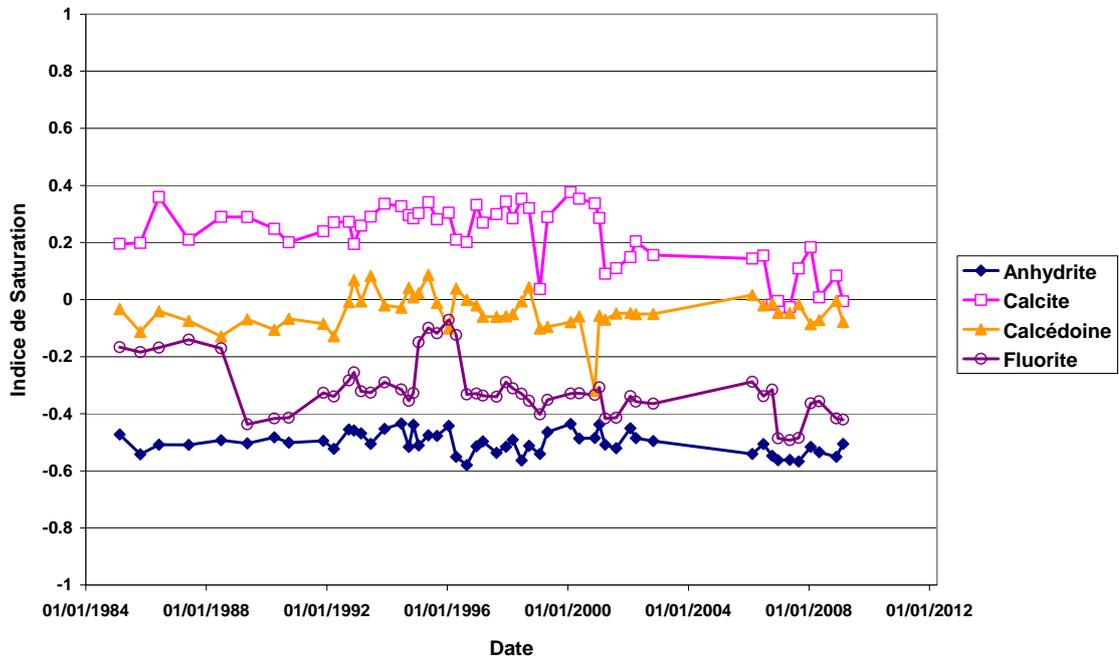


## **Annexe 5**

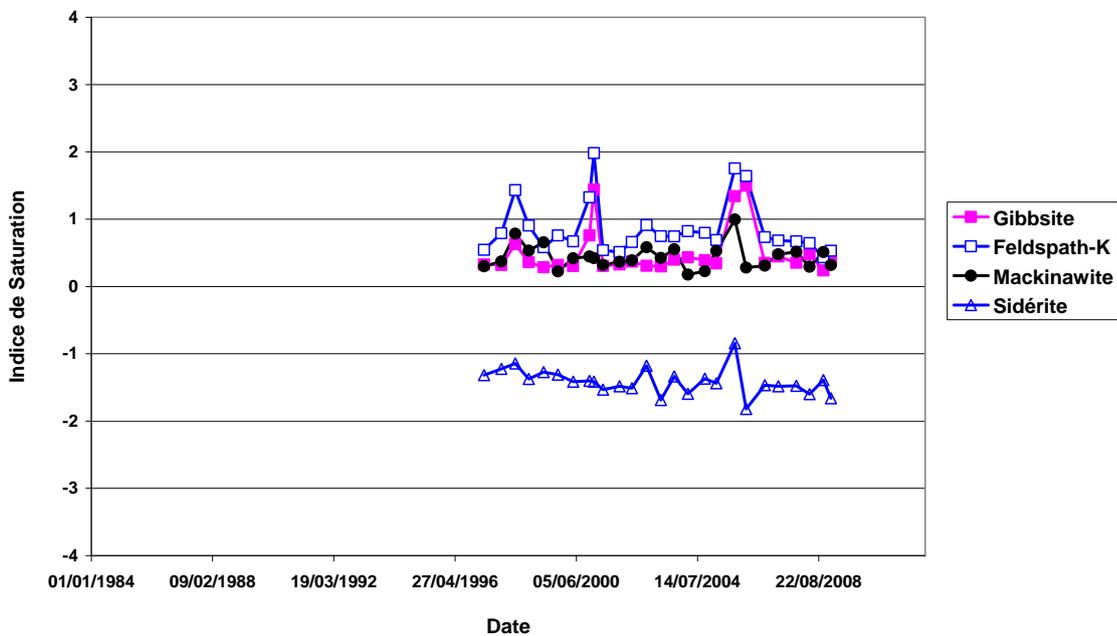
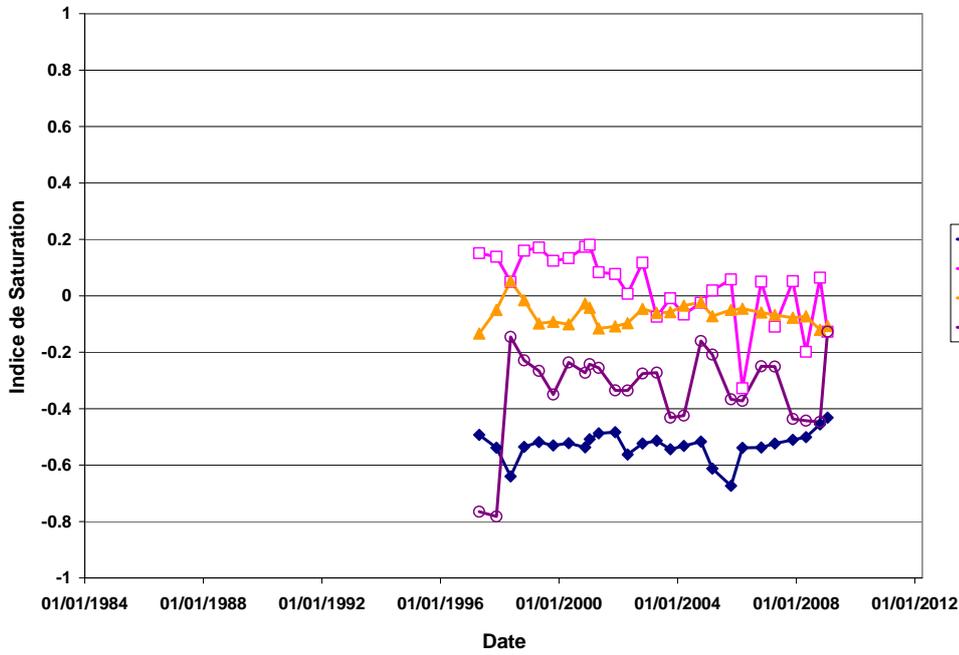
### **Évolution des indices de saturation des minéraux d'intérêts ciblés**



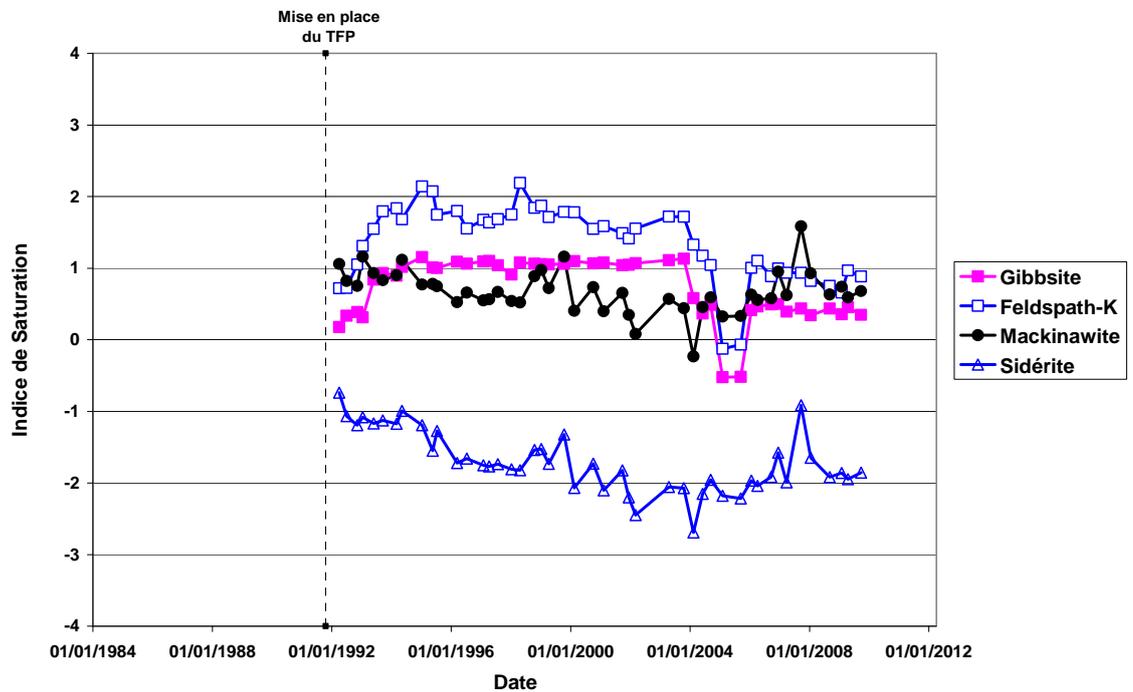
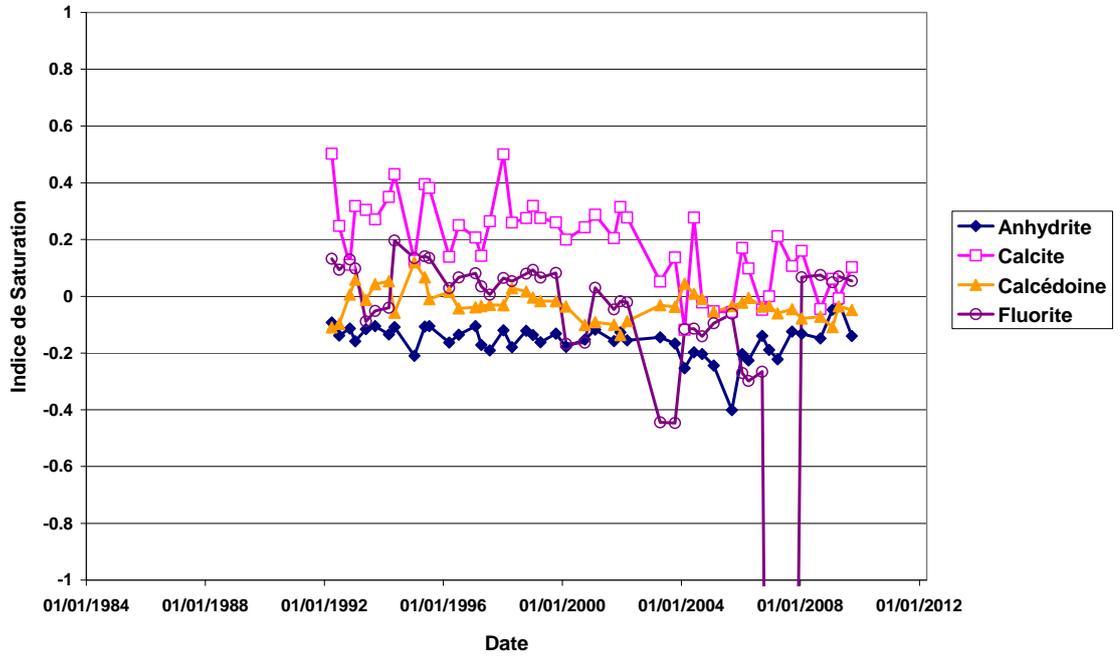
Site de Ris-Orangis (Sud)



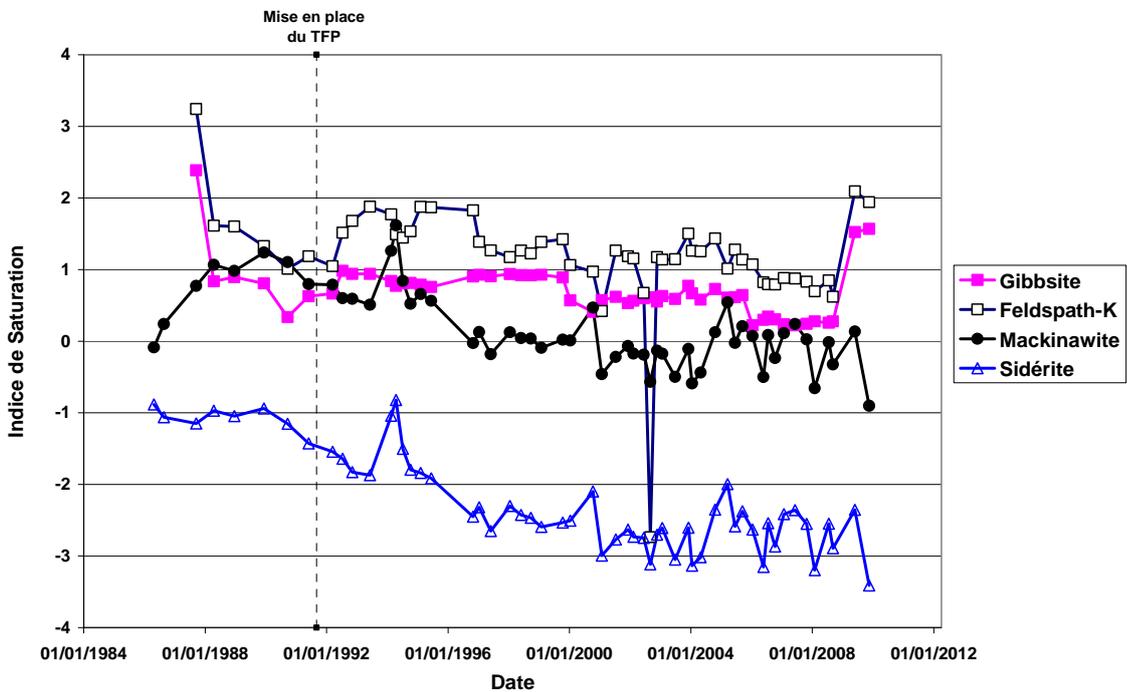
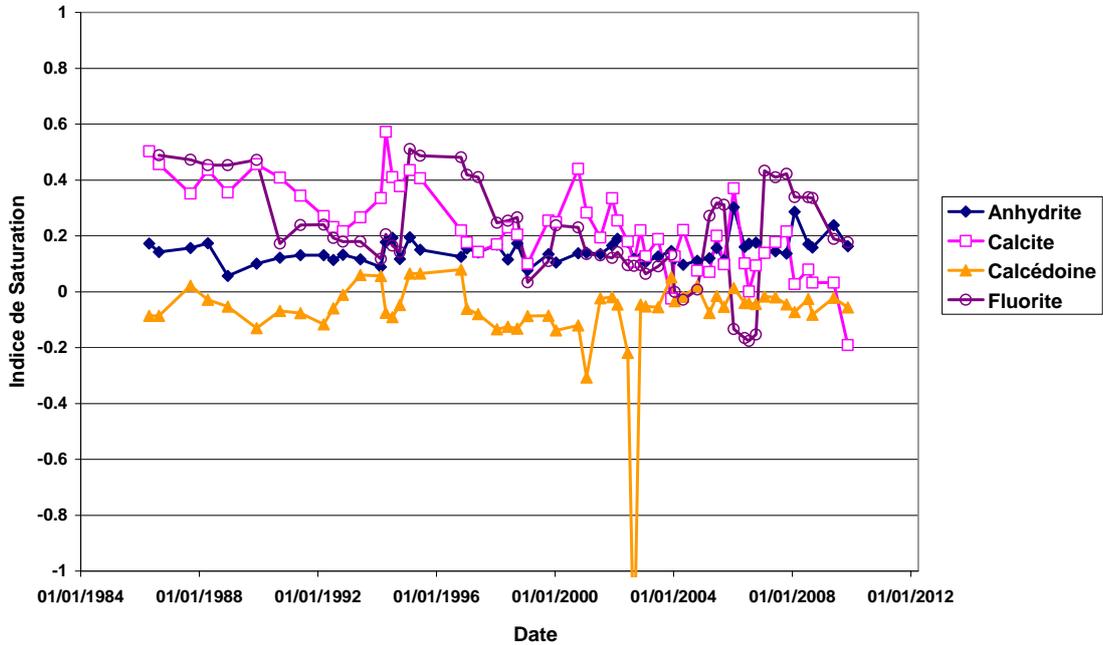
Site de Montgeron (Sud)



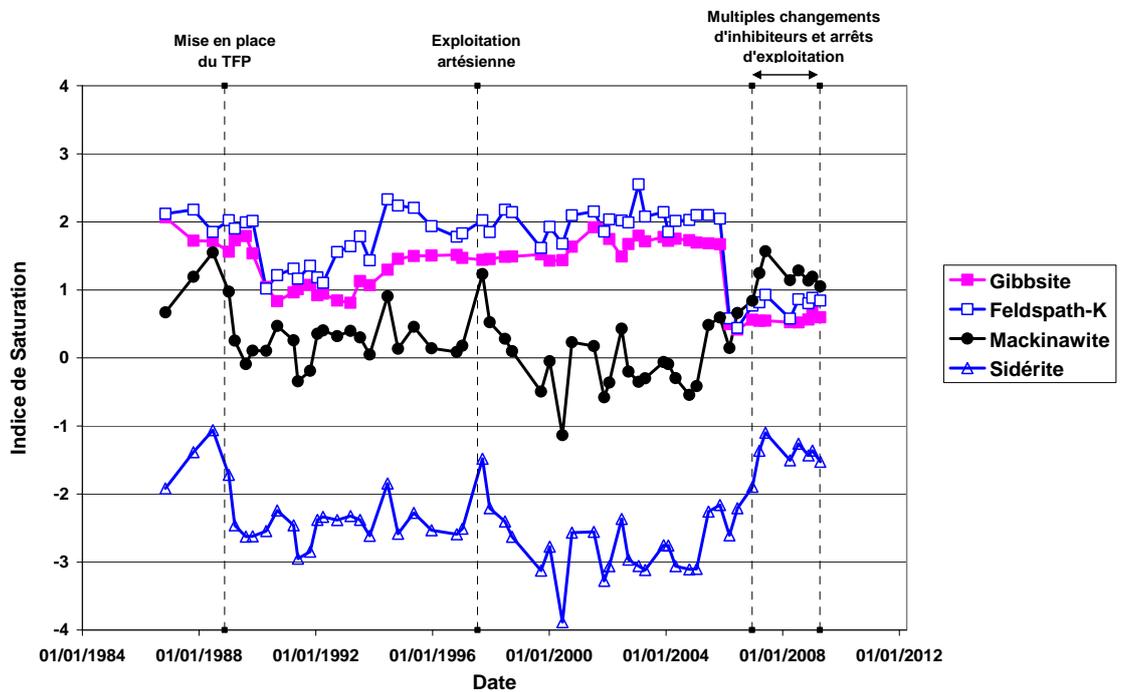
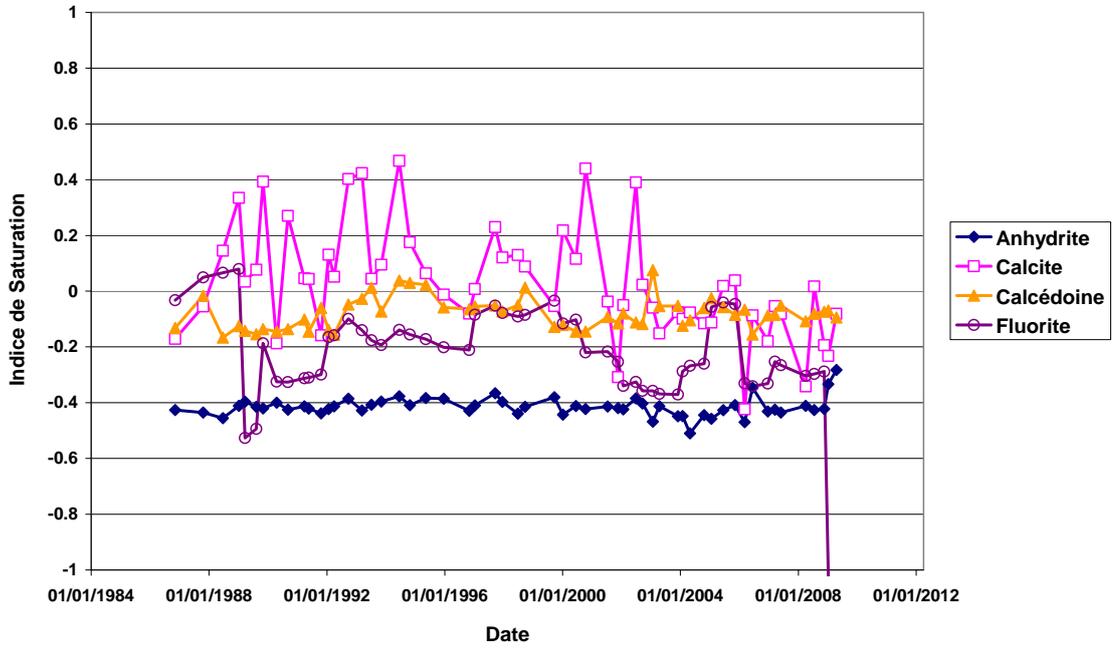
Site de Champigny (VDM)



Site de Coulommiers (Est)



Site de Clichy-sous-Bois (Seine-Saint-Denis)



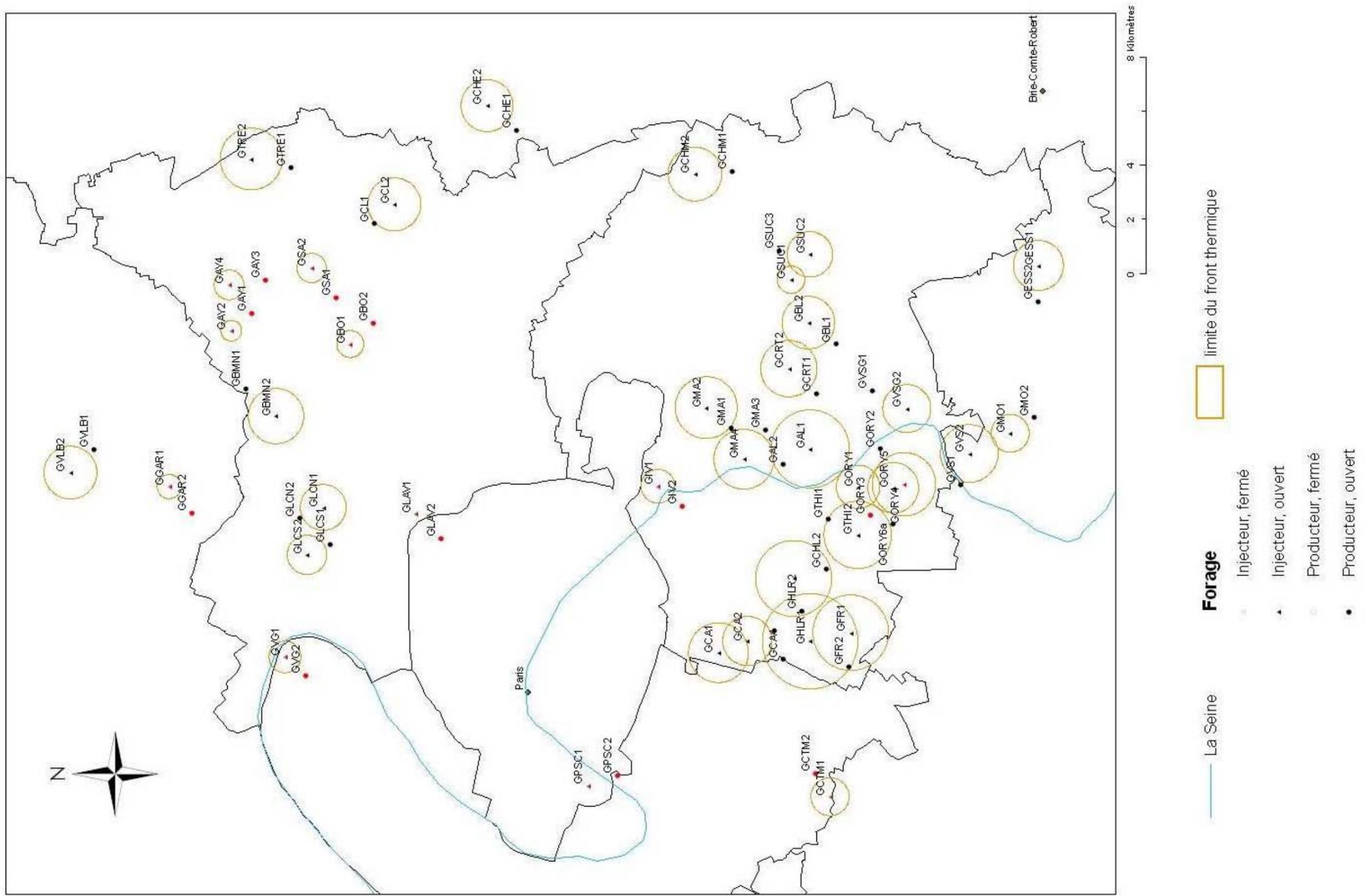


## **Annexe 6**

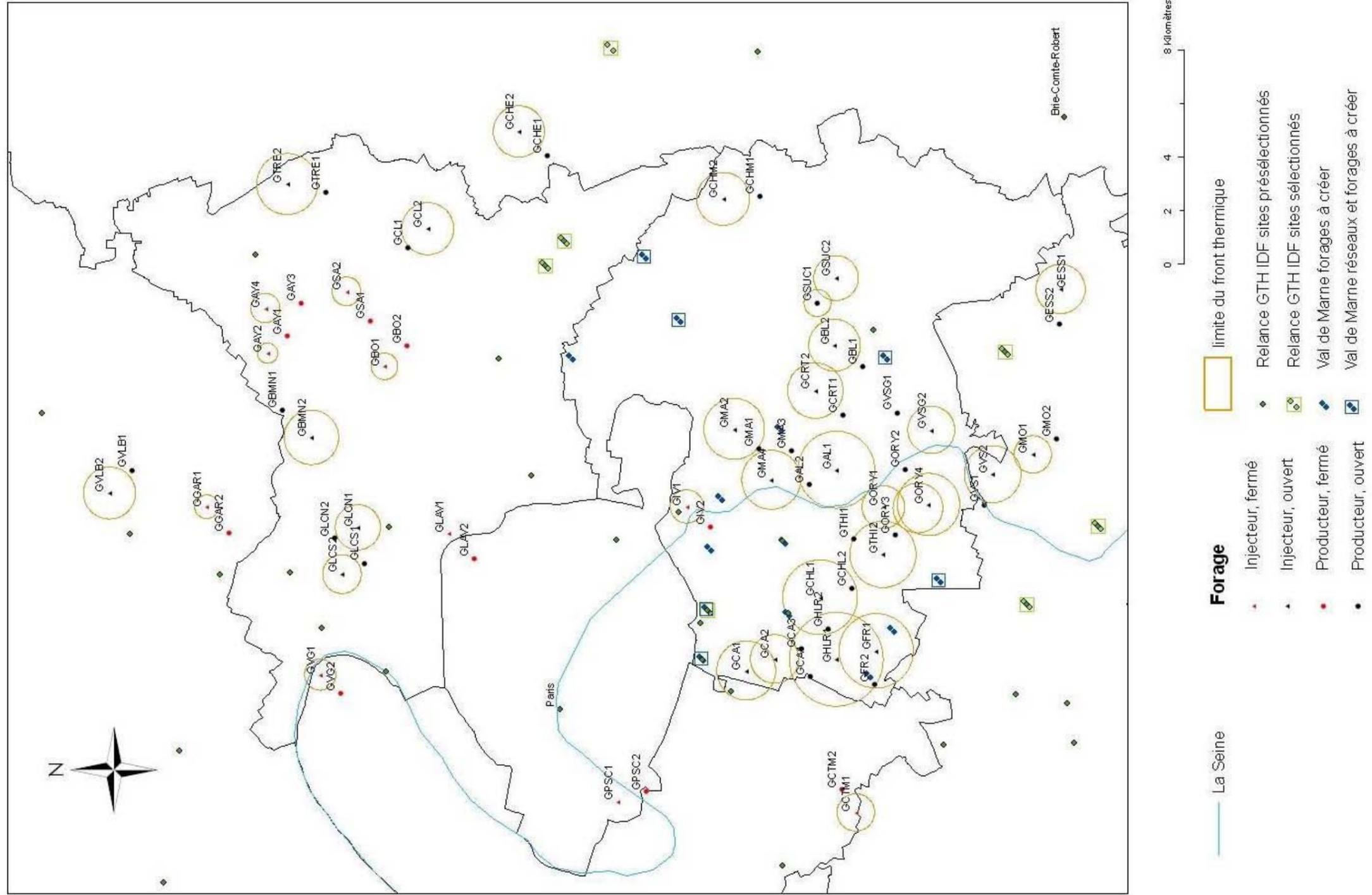
### **Cartes des limites d'extension des « bulles froides » à fin 2010 dans les conditions de calcul développées au § 3.2.2**



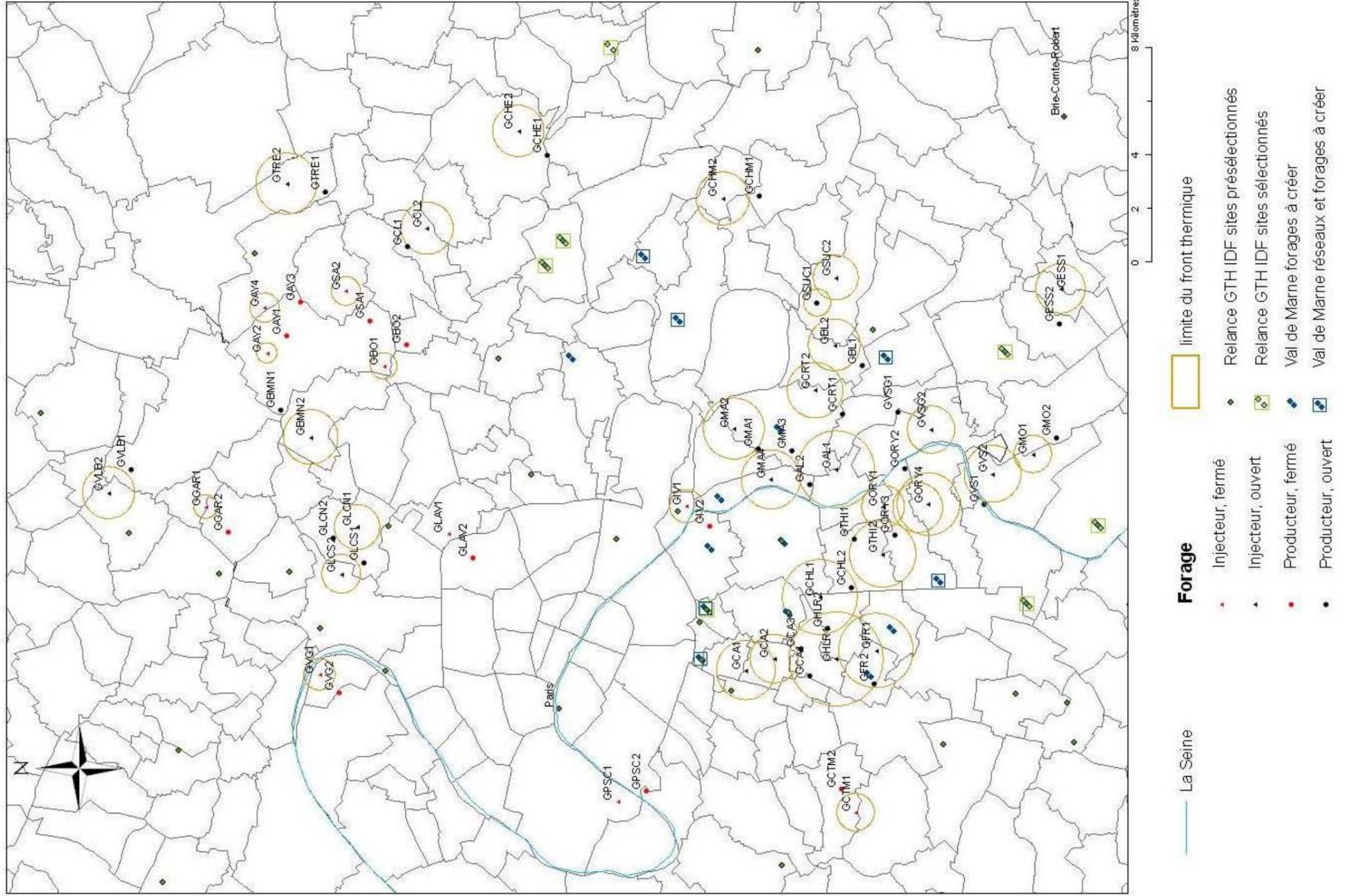
# Bulles thermiques jusqu'en 2010



# Bulles thermiques et réseaux jusqu'en 2010



# Bulles thermiques et réseaux identifiés par commune jusqu'en 2010



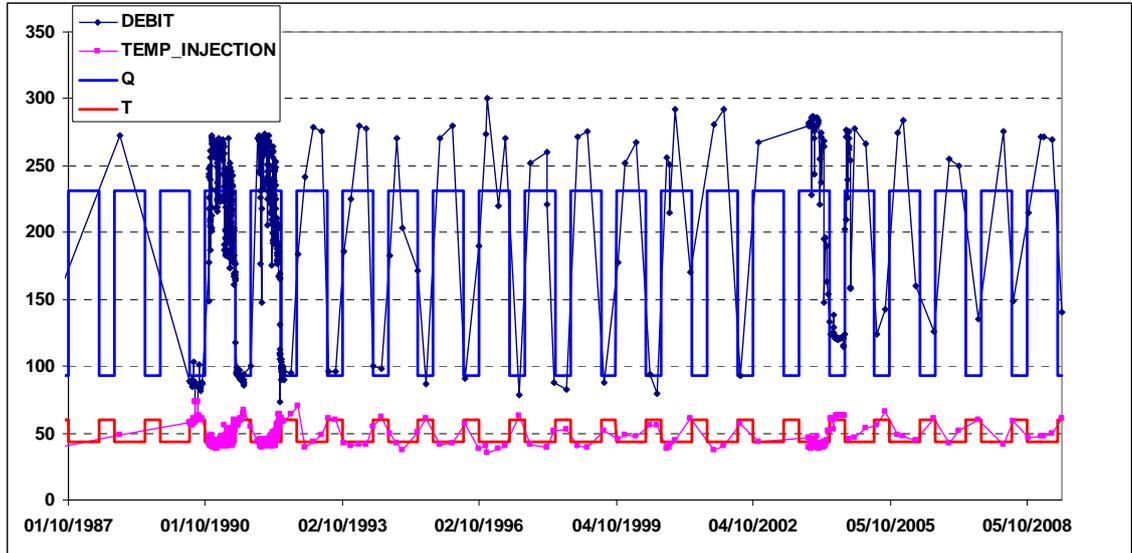


## **Annexe 7**

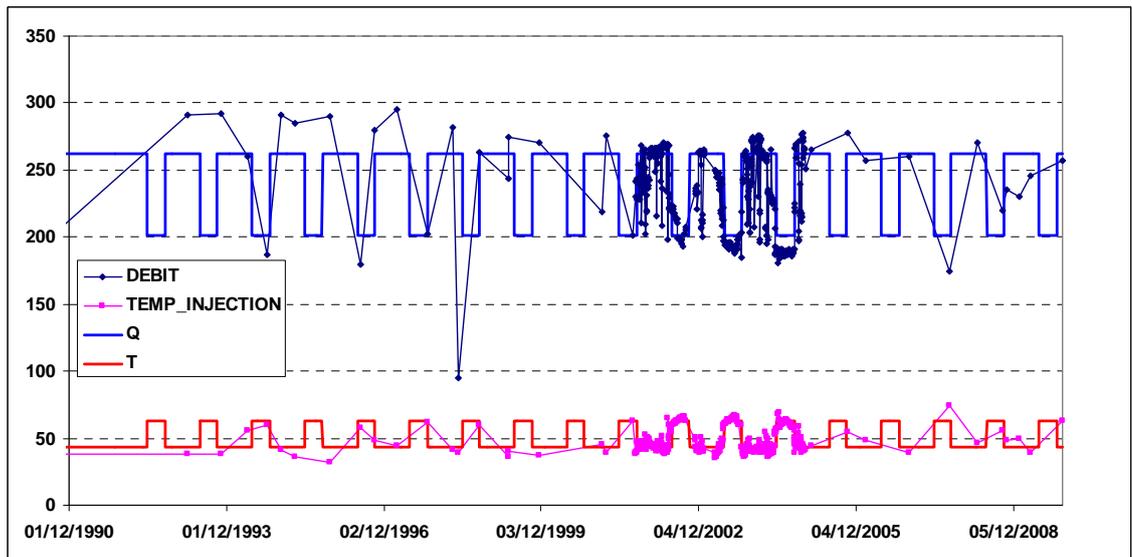
### **Exemples de chroniques de débits et températures résultant de l'exploitation des doublets**



Doublet d'Alforville

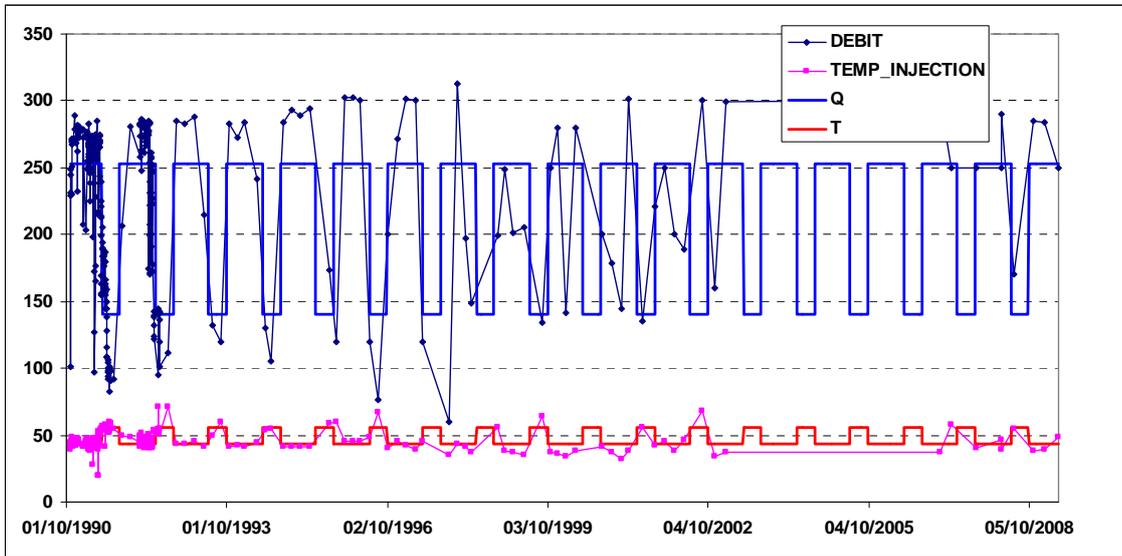


Doublet de Champigny-sur-Marne

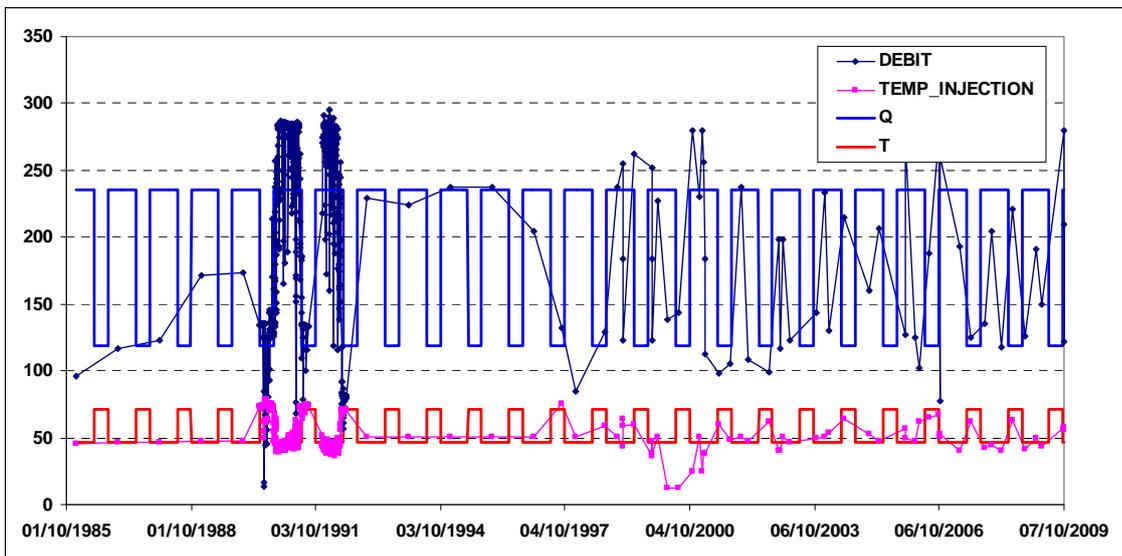


Note : Les points représentent les mesures ponctuelles de débit d'exploitation (m<sup>3</sup>/h) ou de température d'injection (°C). Les créneaux de débit (bleu) et de température (rouge) sont ceux appliqués dans le modèle

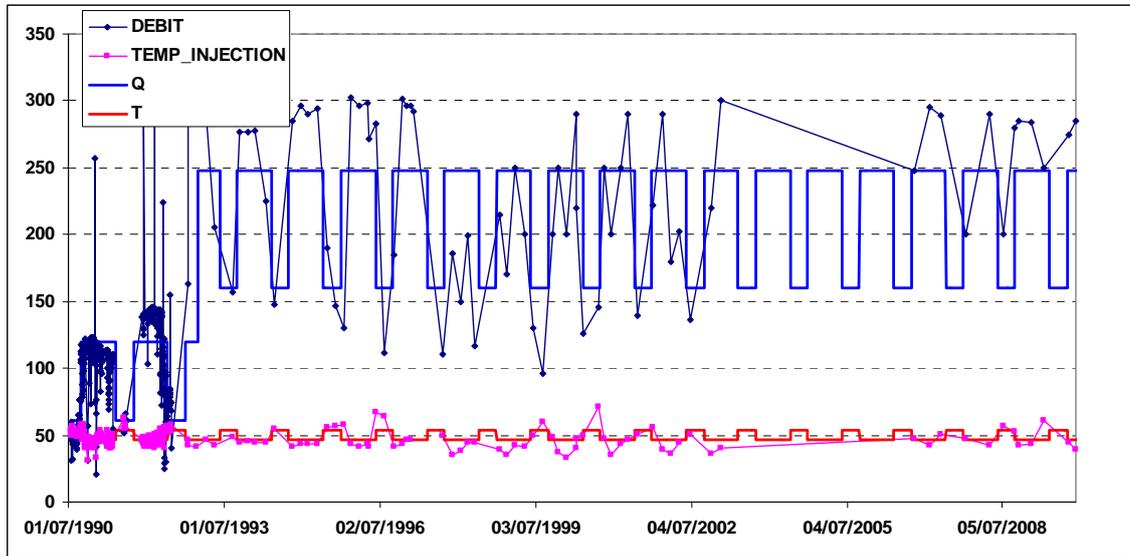
### Doublet de Chevilly-Larue



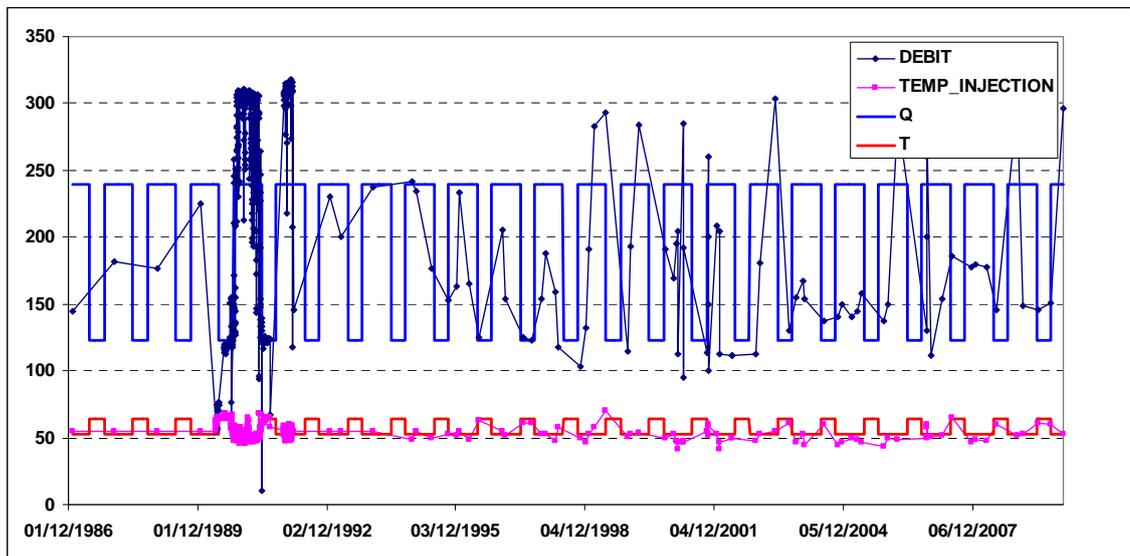
### Doublet de Créteil Mont-Mesly



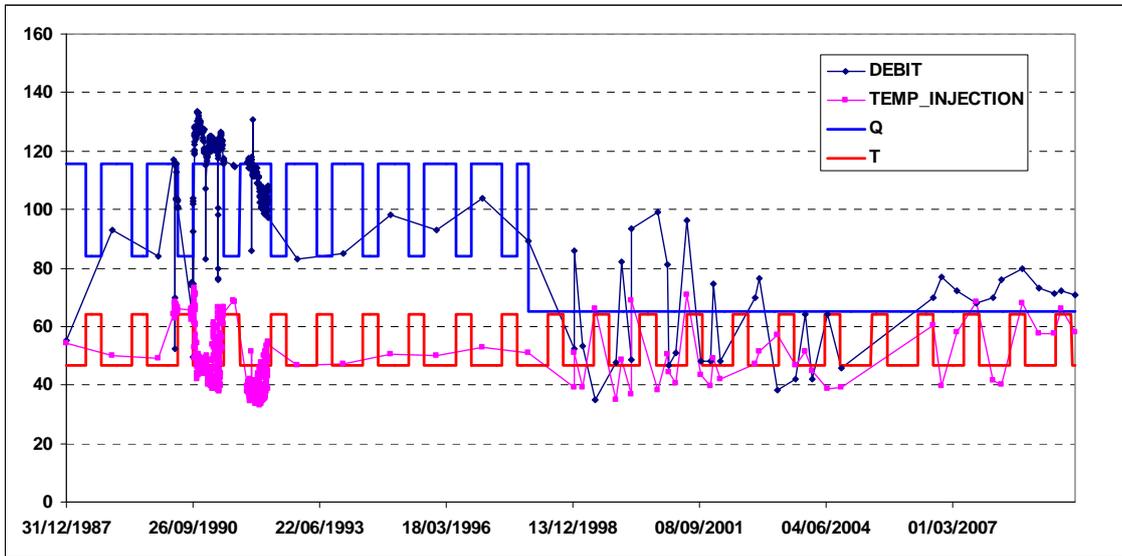
### Doublet de l'Hay-les-Roses



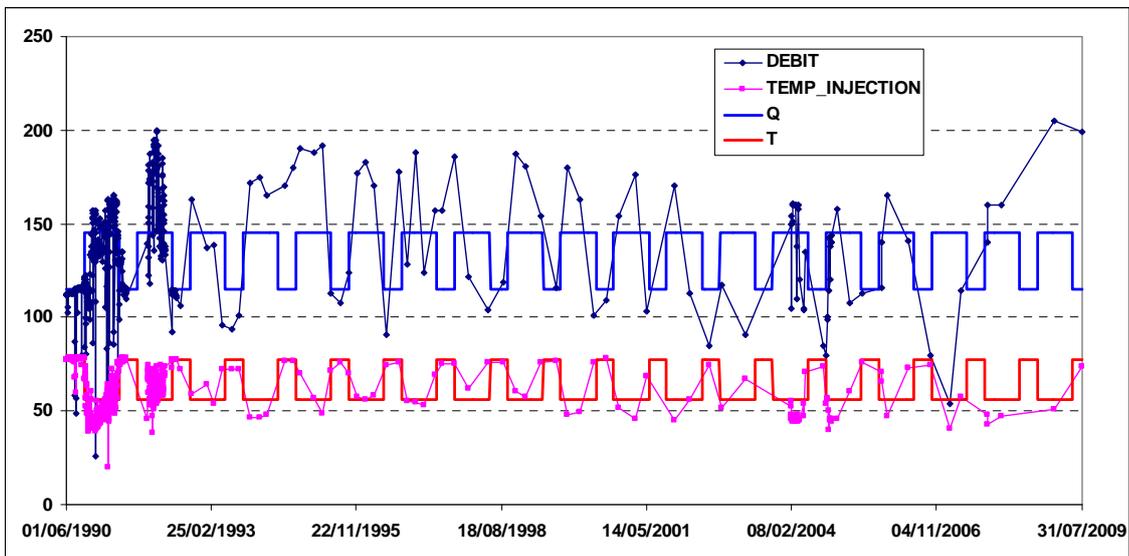
### Doublet de Maisons-Alfort I



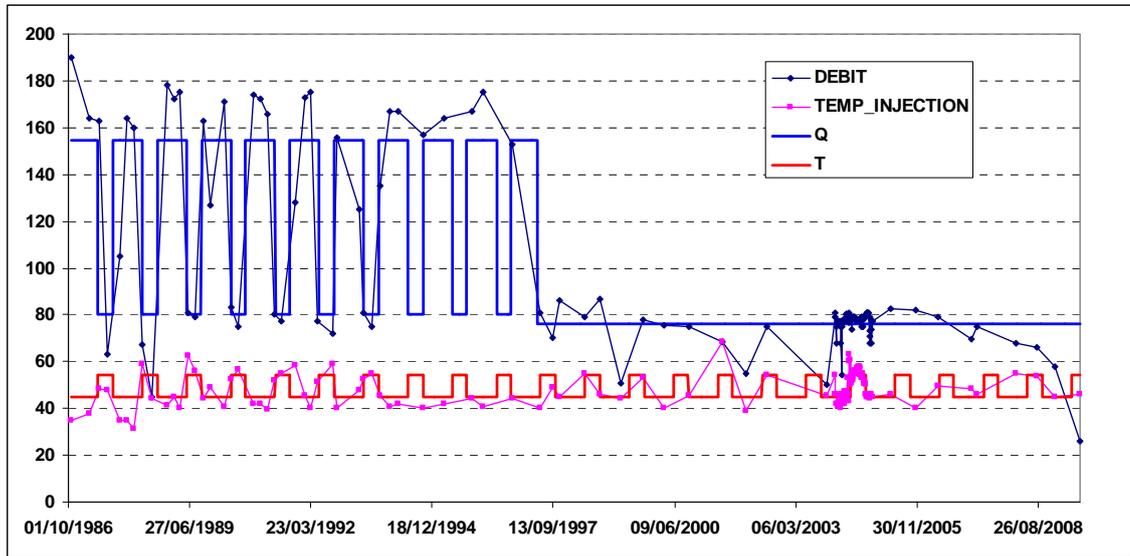
### Doublet d'Orly I



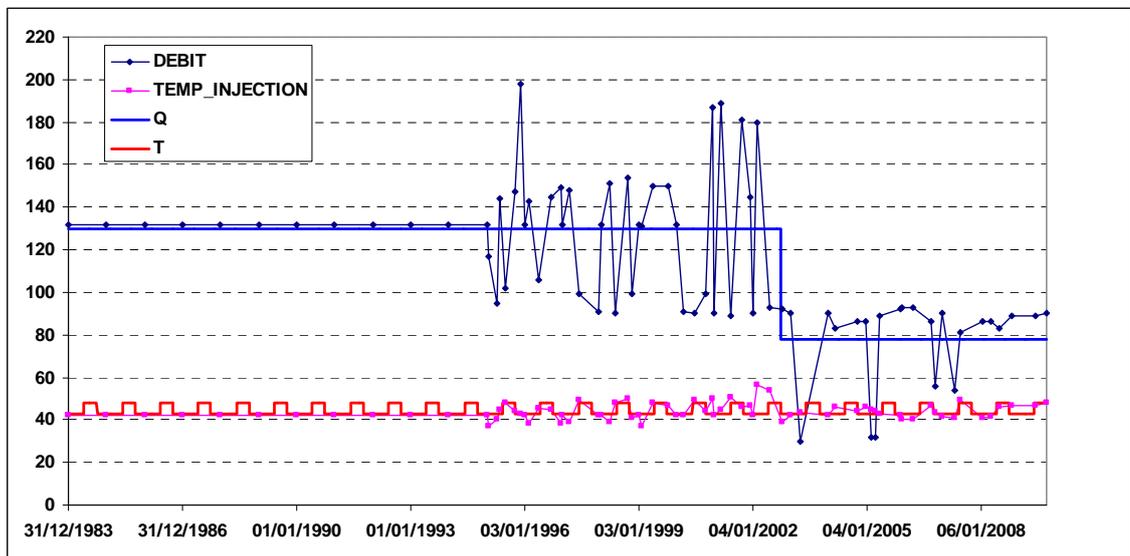
### Doublet de Sucy-en-Brie



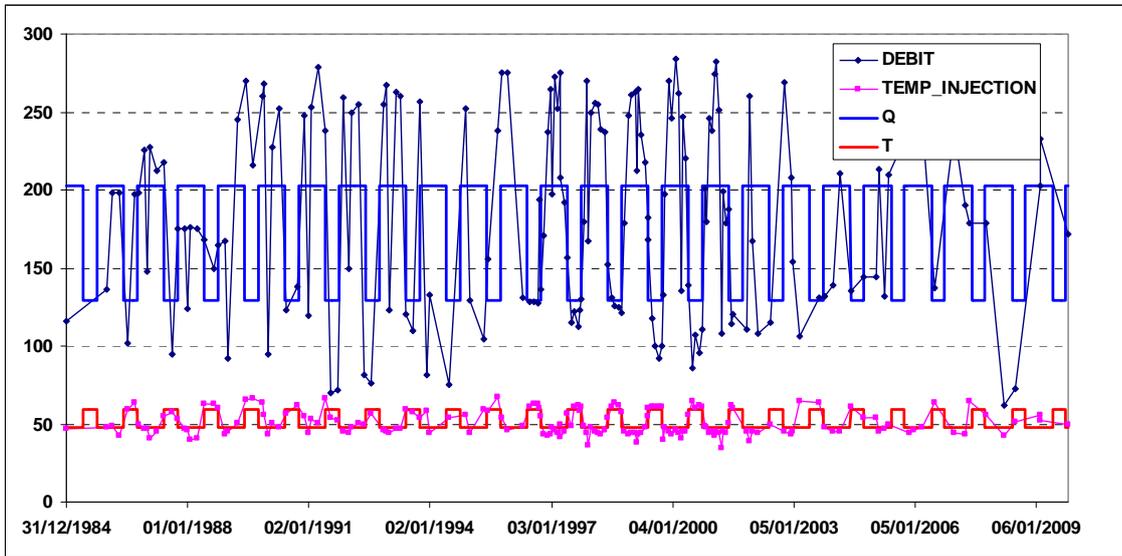
### Doublet de Clichy-sous-Bois



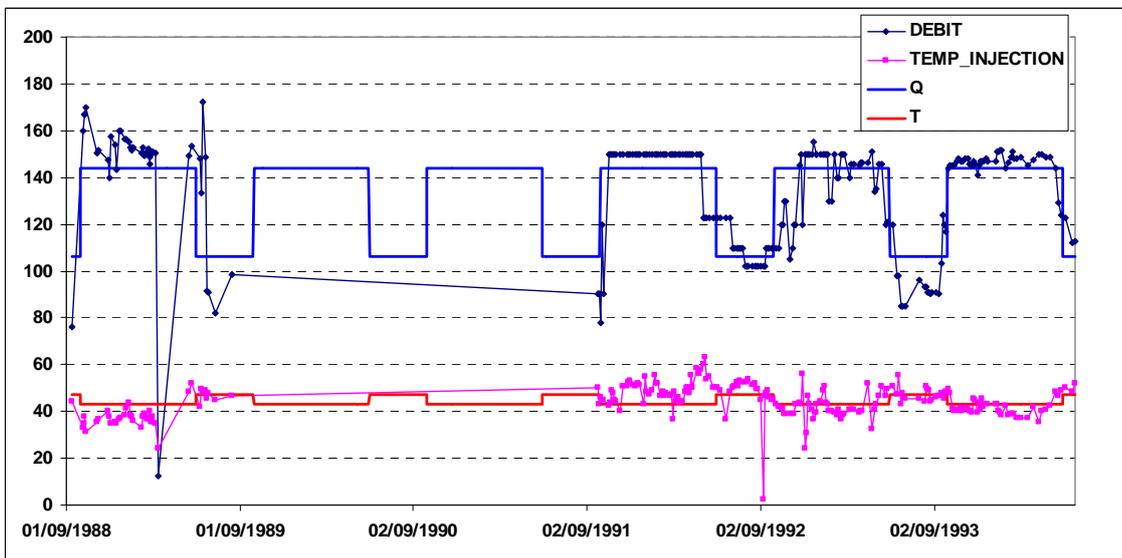
### Doublet de La-Courneuve-Sud



### Doublet de Tremblay-en-France



### Doublet d'Aulnay-sous-Bois RDV



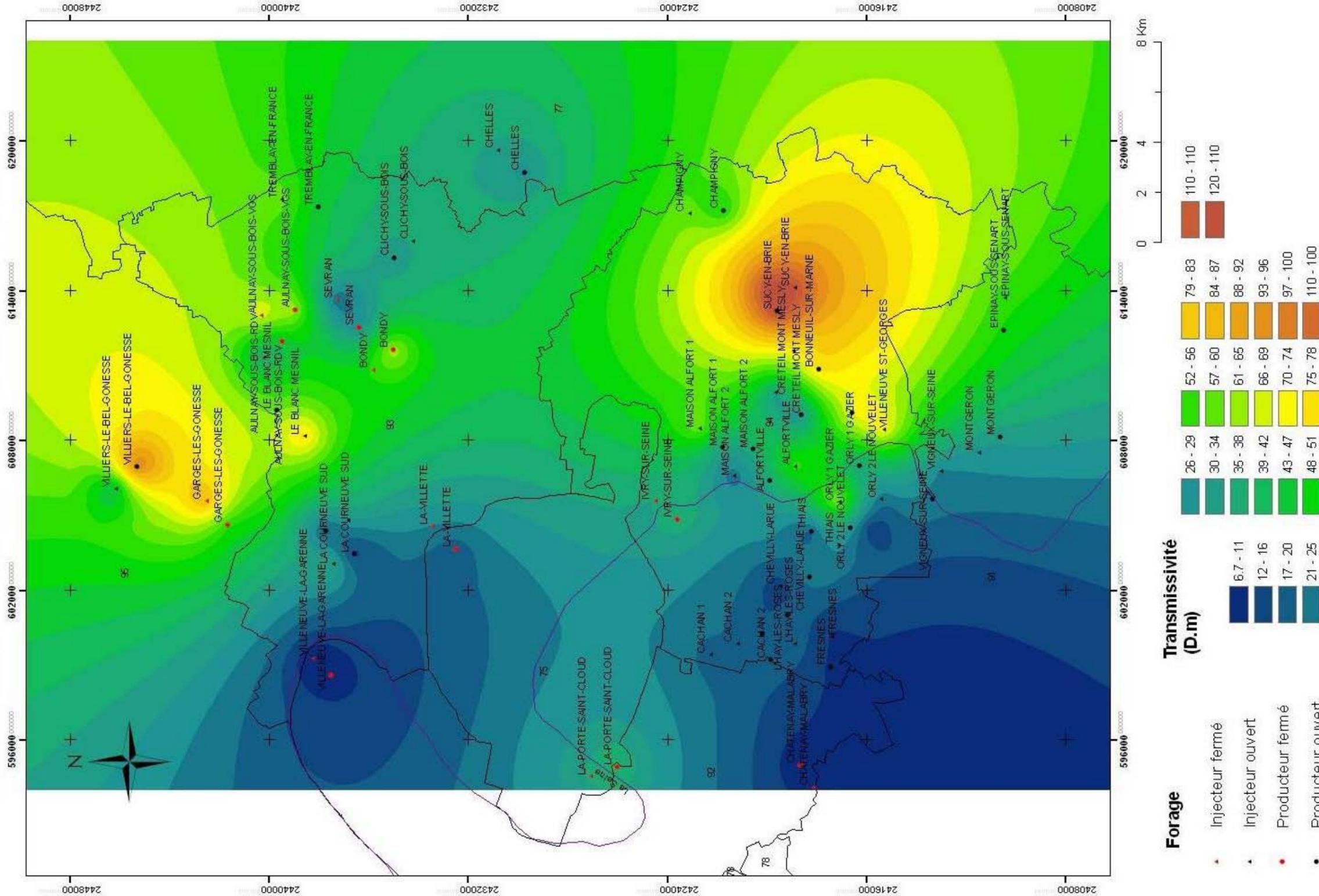
## **Annexe 8**

### **Régionalisation des paramètres du réservoir**

- Transmissivité
- Epaisseur (niveaux producteurs et épontes)
- Température

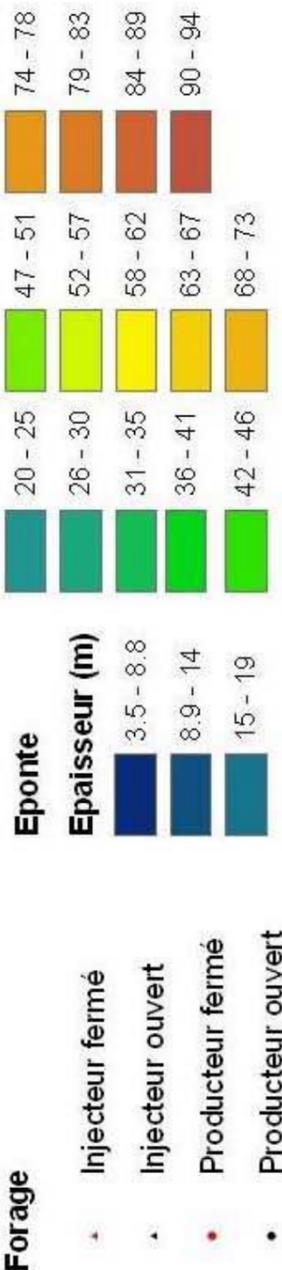
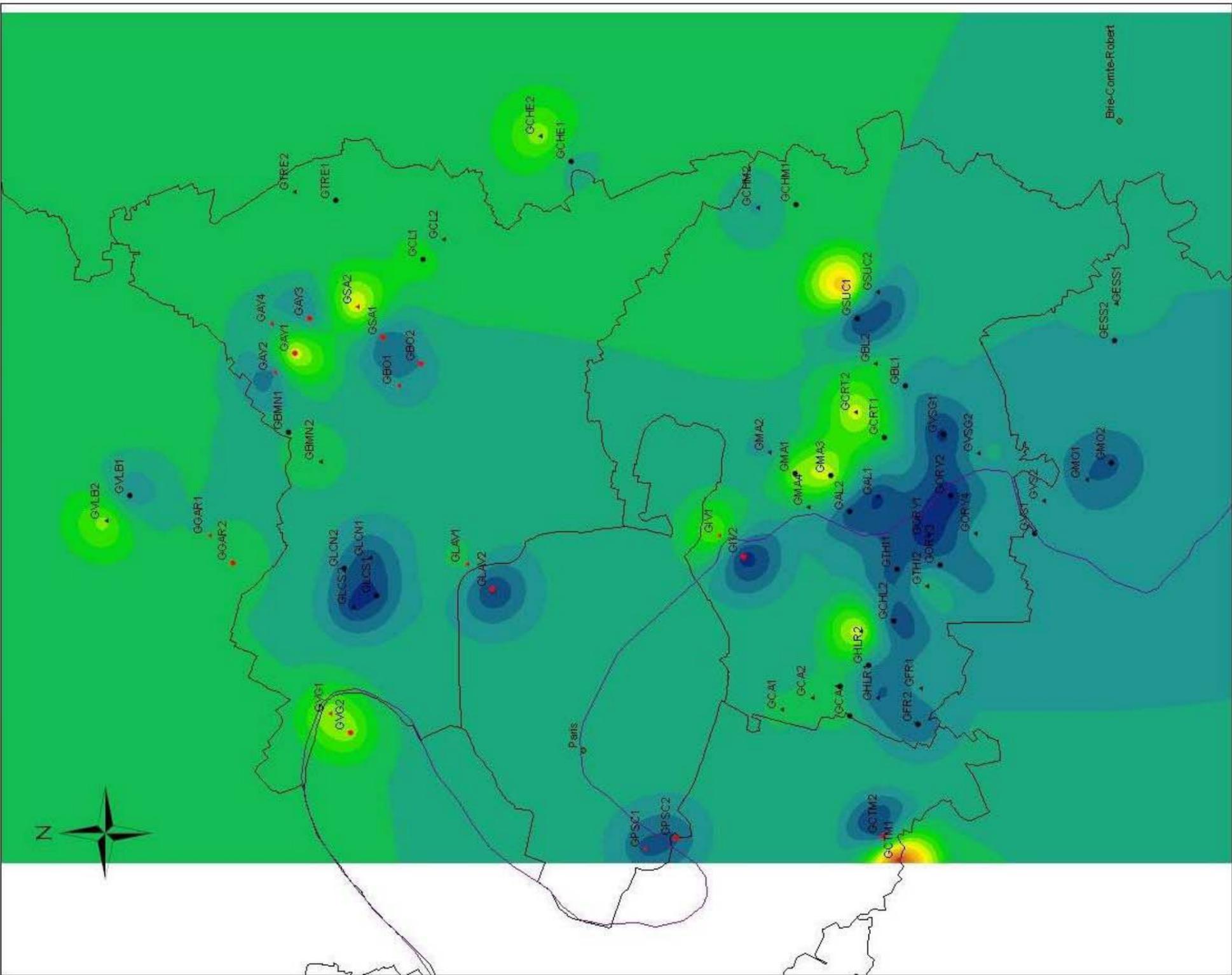


# Transmissivités actualisées 2010

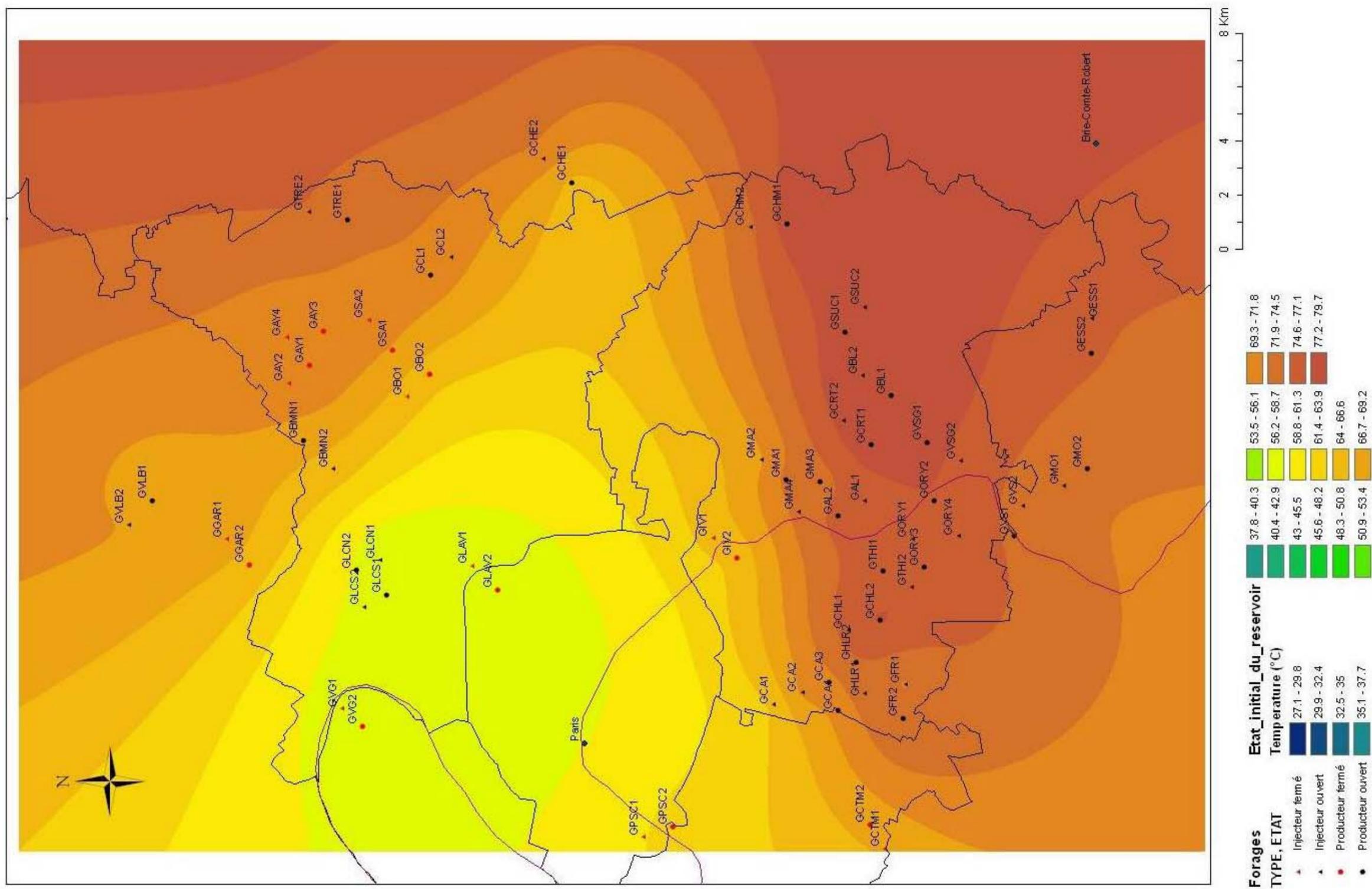




# Epaisseurs des épontes actualisées 2010



# Champ des températures initiales

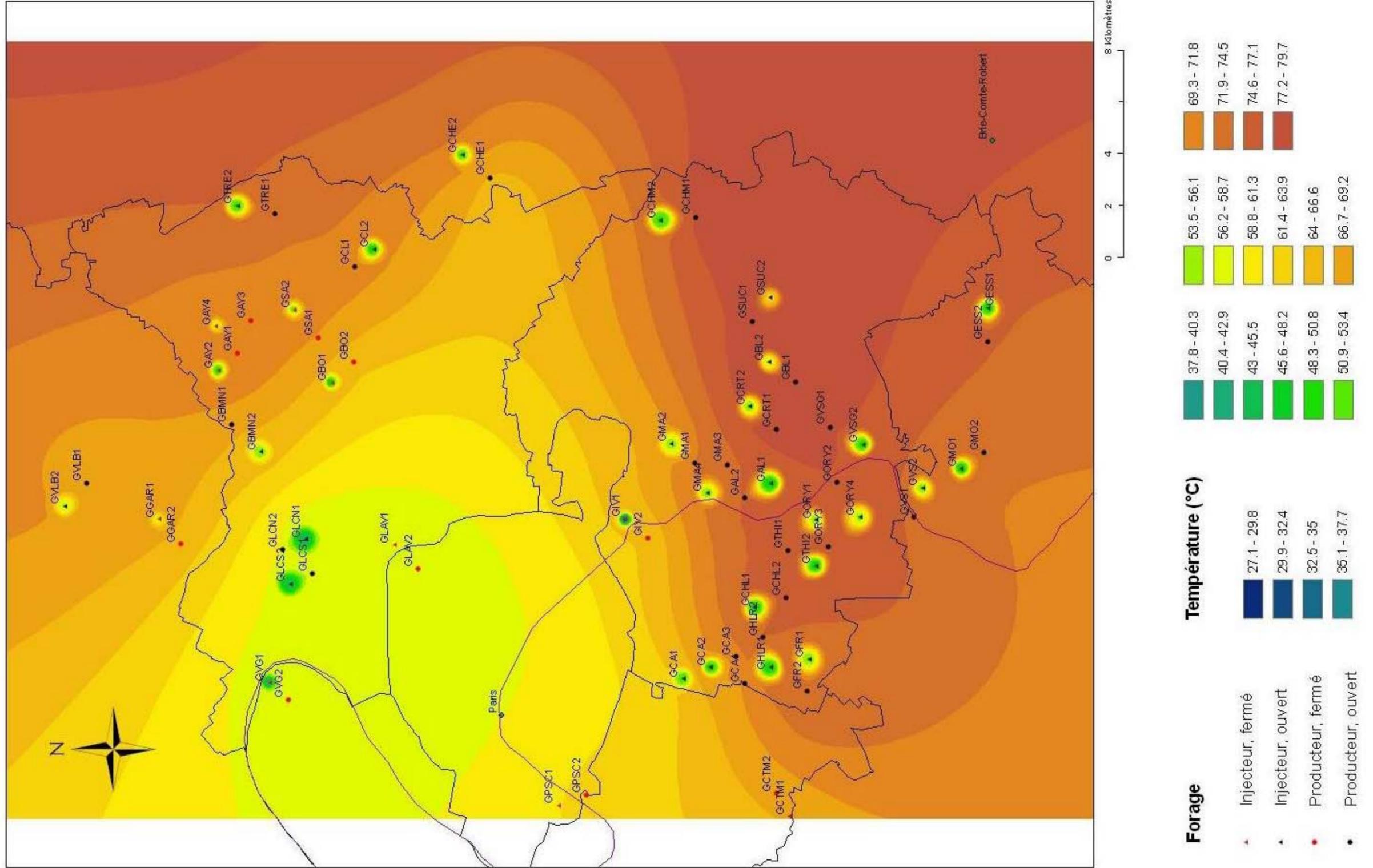


## **Annexe 9**

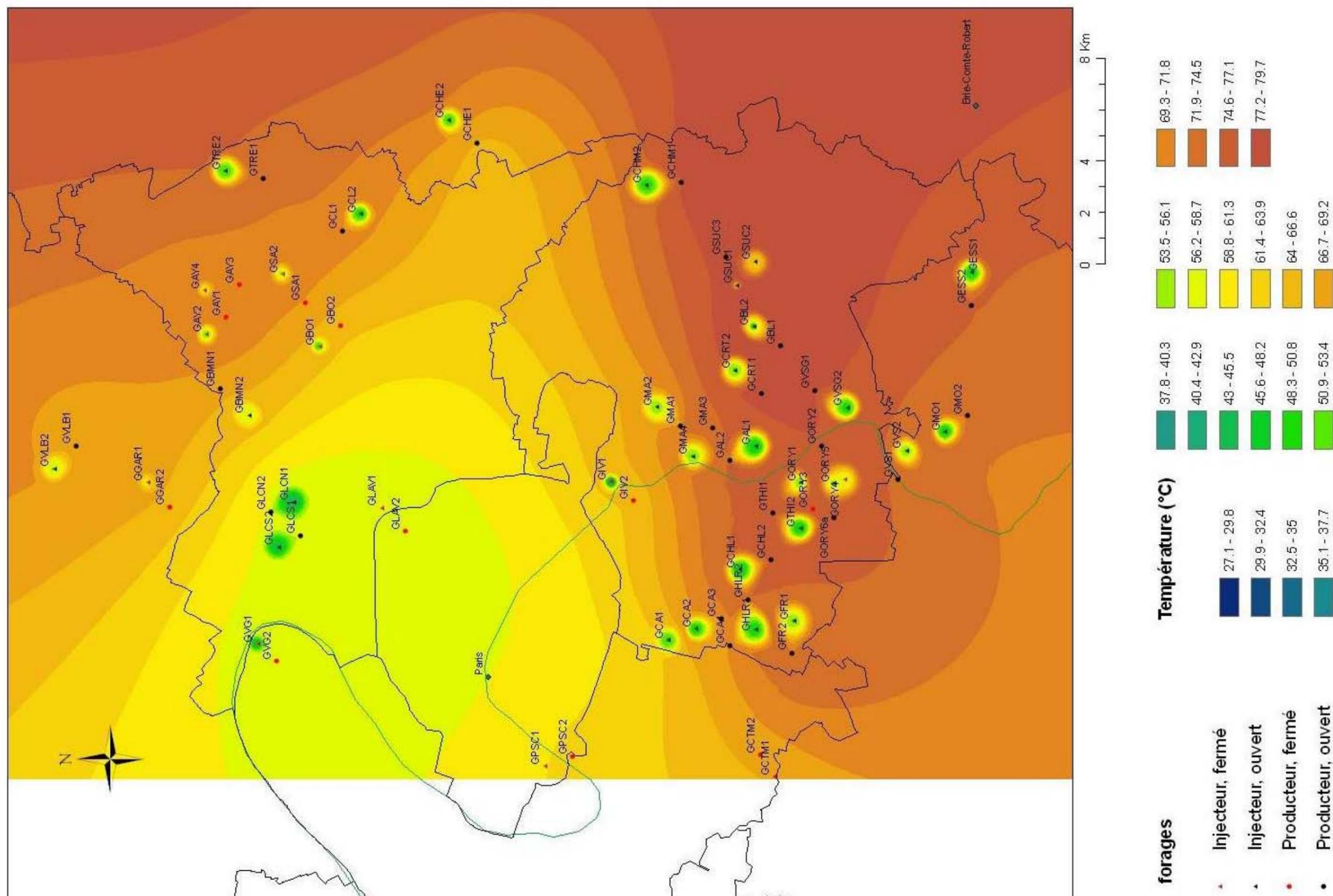
### **Cartes de températures et des limites d'extension des « bulles froides » à fin 2000, 2010 et 2020 dans les conditions de calcul développées au § 3.2.3**



# Champs des températures à fin 2000



# Champ thermique fin 2010







## **Annexe 10**

**Présentation du courrier de relance envoyé par le BRGM aux maîtres d'ouvrage des 33 opérations en cours d'exploitation en Ile-de-France et du fichier Excel à renseigner en données d'exploitation**





Direction Régionale de l'Industrie,  
de la Recherche  
et de l'Environnement



Paris, le 22 avril 2010

Lettre adressée à l'ensemble des Maîtres d'Ouvrages des opérations de géothermie en fonctionnement au Dogger en Ile-de-France à partir du tableau ci-joint.

BRGM / Département Géothermie  
66/10 OG/ MP  
Affaire suivie par O. GOYENECHÉ  
Tél : 02 38 64 47 42

Objet : Collecte des données d'exploitation des opérations géothermiques d'Alfortville

Madame, Monsieur,

Les opérations géothermiques de la région parisienne, associées à des réseaux de chaleur, mobilisent comme ressource du sous-sol, l'aquifère du Dogger.

L'ADEME, le Conseil régional d'Ile-de-France et le BRGM ont mis en place un partenariat, en concertation étroite avec la DRIRE Ile-de-France, afin de gérer le champ géothermique du Dogger dans cette région.

Cette démarche très complexe qui a plusieurs objectifs, comme celui d'améliorer la prévision de la durée de vie des opérations en cours d'exploitation, permettra aux maîtres d'ouvrages et aux instances qui sont associées à l'exploitation géothermique de l'aquifère du Dogger, de disposer des données concrètes et continues sur le réservoir et son exploitation.

Les enjeux de cette modélisation sont :

- D'améliorer la connaissance du comportement de l'aquifère du Dogger ;
- De permettre aux maîtres d'ouvrages et à leurs exploitants d'anticiper la dégradation pressentie de la capacité thermique du réservoir au droit de chaque doublet (percée thermique) et, en tout état de cause, d'être prêts à prendre les mesures adaptées ;
- De donner aux représentants de la puissance publique les outils nécessaires pour élaborer les arrêtés de permis de recherche ou d'exploitation de nouveaux ouvrages exploitant le Dogger, ou de procéder à l'implantation de forages de remplacement, en cas de réhabilitation d'un doublet existant.

La démarche s'appuie sur la mise en place d'un **processus de collecte des données** de fonctionnement de la boucle géothermale indispensable à la modélisation du comportement local et régional de ce réservoir remarquable.

Pour ce faire, le BRGM a mis en place une Base de données techniques à partir de laquelle travaillent les ingénieurs et les experts chargés d'élaborer les modèles prédictifs.

Cette base est alimentée par les données recueillies par des sociétés de services dédiées au sous-sol, notamment GPC I&P et CFG-Services, avec lesquelles la plupart d'entre vous et vos sociétés d'exploitation sont engagés contractuellement. Elle contient les données disponibles, pour chaque doublet, de sa réalisation jusqu'à fin 2009.

Les données brutes sont à accès strictement réservé aux maîtres d'ouvrages et exploitants site par site, aux bureaux d'étude sous-sol, pour les sites dont ils gèrent la boucle géothermale par contrat, et à l'administration, si elle le souhaite.

Il est maintenant indispensable de disposer de données plus régulières qui ne peuvent provenir que des maîtres d'ouvrage et de leurs personnels d'exploitation œuvrant quotidiennement sur les sites géothermiques.

En conclusion d'une réunion organisée par les quatre partenaires et qui regroupait les organismes concernés (représentants des maîtres d'ouvrages et d'exploitations géothermiques) le 10 mars 2010 dans les locaux de l'ADEME Ile-de-France, un accord s'est

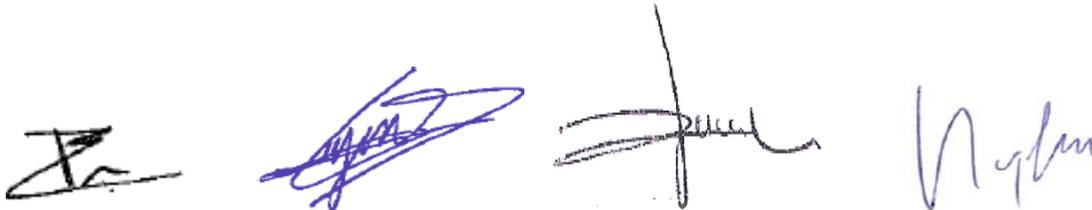
fait jour sur l'envoi au BRGM des données concernant la boucle géothermale des sites de géothermie (liste et coordonnées ci-jointes).

L'objet du présent courrier est d'officialiser la demande de mise à disposition du BRGM des données du site dont vous avez la responsabilité.

Un groupe de travail, composé des modélisateurs des bureaux d'études CFG Services, GPC I&P, ANTEA et ARMINES (Association de l'Ecole des Mines), a été créé sous la responsabilité du BRGM. Ce groupe travaille à l'harmonisation des modèles représentatifs de l'aquifère du Dogger à partir de quoi il élaborera un guide de bonnes pratiques accessible à tous. Sauf avis contraire, ce groupe sera destinataire de l'ensemble des données des boucles géothermales des sites de la région parisienne exploitant le Dogger.

Le détail de la méthodologie d'acquisition et d'envoi des données d'exploitation est indiqué dans le document joint.

Comptant sur votre collaboration, nous vous prions de croire, Madame, Monsieur, en l'expression de nos sentiments distingués.



MORREZE-LENEE  
de l'Environnement  
on d'Ile de France

Gwenaël GUYONVARCH  
Directeur Régional  
Ile-de-France de l'ADEME

Bernard DOROSZCZUK  
Directeur régional de l'industrie  
de la recherche et de  
l'environnement d'Ile de France

Alain DESPLAN  
Adjoint au Directeur du  
Département Géothermie  
du BRGM

Copie : Exploitants du ou des site(s)

**Projet Gestion du Dogger**

Paramètres d'exploitation des opérations au Dogger à extraire des enregistrements de la centrale d'acquisition ou de la GTC ou, à défaut, à enregistrer quotidiennement

Opération géothermique de :

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
jour et heure (jj/mm/aaaa hh:mm)	Flag état fonctionnement de la boucle GTH/On-Off : 1=OK ; 2=indisponible ou non représentatif ; *1=faux ou incohérent	Pression Aspiration Production /Pap/bar	Pression Refoulement Production/Pp/bar	Pression Aspiration Injection /Pai/bar	Pression Aspiration Injection /Pai2/bar	Pression Refoulement Injection/Pi/bar	Pression Refoulement Injection/Pi2/bar	Température extérieure/Text/°C	Température de Production/Tp/°C	Température supplémentaire 1 - Départ réseau T1/°C	Température supplémentaire 2 - Retour réseau T2/°C	Température d'Injection/Ti/°C	Puissance Electrique Production/Wp/kW	Puissance Electrique Injection/Wi/kW	Puissance Electrique Injection/Wi2/kW	Débit Géothermal de Production Qp/m <sup>3</sup> /h	Débit Géothermal d'Injection Qi1/m <sup>3</sup> /h	Débit Géothermal d'Injection Qi2/m <sup>3</sup> /h	Sonde de Corrosion/Cor/ mm/an
commentaires				si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet	si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet							si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet		premier puits injecteur d'un triplet	second puits injecteur d'un triplet	



## **Annexe 11**

### **Rapport – Contribution à la modélisation hydraulique et thermique du réservoir du Dogger**

***volume séparé***



# Modélisations de l'impact thermique et hydraulique sur l'exploitation de l'aquifère du Dogger pour différents scénarios de réhabilitation d'un doublet géothermique type

Rapport d'avancement

BRGM/RP-57779-FR

Novembre 2009





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique  
Département géothermie**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34