

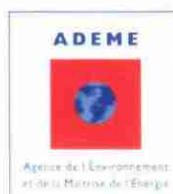
Document à accès réservé

# Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France - Année 2010

Rapport final

BRGM/RP-59845-FR

Mai 2011





Accès réservé

# Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France - Année 2010

Rapport final

BRGM/RP -59845-FR  
Mai 2011

Réalisé dans le cadre de la convention  
ADEME-BRGM n° 09 05 C 0016

**V. Hamm, C. Castillo, O. Goyeneche**  
Avec la collaboration de  
**M Le Brun et J.F. Malon**

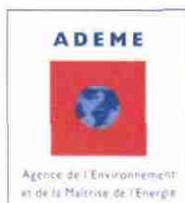


**Vérificateur :**  
Nom : JC Martin  
Date : 24 juin 2011  
Signature :

**Approbateur :**  
Nom : A. Desplan  
Date : 24 juin 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, aquifère profond du Dogger, Île-de-France, Bassin Parisien, base de données, modélisation hydro-thermique, modélisation géochimique

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

**Hamm V., Castillo C., Goyèneche O.** (2011) - Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France – année 2010- Rapport final – BRGM/RP-59845-FR, 111 p., 79 fig., 4 tabl., 2 ann.

## Synthèse

Le rapport intitulé « Gestion de la ressource géothermique du Dogger – Année 2010 » constitue le rapport final du projet PSP10GTH20 DOGGER de la convention ADEME-BRGM n° 0905C0016 notifiée le 28/12/2009. Ce rapport fait état des avancées majeures et arrive à la suite du rapport précédent (BRGM/RP-58834-FR) de la phase 3 du Dogger.

Il fait le point notamment sur :

- L'état d'acquisition des données quotidiennes d'exploitation des 33 doublets et 1 triplet en activité pour l'année 2010 via le fichier Excel standardisé mis en place au cours de la Phase 3 du Dogger, ainsi que sur le développement de l'application permettant l'intégration de ces données dans la base Oracle du BRGM et leur extraction au format Access. On peut relever à ce titre l'importante contribution des Sociétés de service CFG-Services et GPC-IP qui ont participé, aux côtés du BRGM, à la collecte et à la validation des données d'exploitation mais aussi des maîtres d'ouvrage, de leurs délégataires et des exploitants d'opérations géothermiques au Dogger dont l'implication dans la mise à disposition de ces données participe, à travers la base Dogger, à l'amélioration de la connaissance du comportement de l'aquifère.
- L'utilisation de ces nouvelles données d'exploitation ainsi que des données hydrogéologiques collectées par les bureaux d'étude sous-sol lors de la réalisation de nouveaux forages (Paris-Nord-Est, Orly-Aéroport de Paris) pour affiner les modélisations hydro-thermiques du réservoir du Dogger et notamment l'évolution de la température du fluide aux puits producteurs ;
- La poursuite de l'évolution géochimique des fluides au Dogger à partir des données collectées en 2010 afin de confirmer les conclusions du rapport de la phase 3 du Dogger qui montrait une reprise des processus de corrosion-dépôts dans les tubages et une acidification progressive du réservoir.

La collecte des données d'exploitation via le fichier Excel standardisé mis en place en avril 2010 s'est poursuivie mais a pris du retard du fait d'envois tardifs des données pour un certain nombre de sites exploités (au nombre de 34 fin 2010). L'application Oracle pour l'intégration des données d'exploitation dans la base a été finalisée fin 2010 et est présentée dans ce rapport. Un nouveau fichier normalisé est en cours de création ainsi qu'une extension de l'application pour l'intégration des données physico-chimiques dans la base.

Les résultats des nouvelles simulations thermo-hydrauliques montrent la sensibilité de la décroissance thermique au débit et la température de réinjection qui conditionnent l'énergie prélevée dans l'aquifère du Dogger. Ainsi, la prise en compte plus précise des données d'exploitation (estimation de chroniques saisonnières mensuelles au lieu de créneaux été/hivers moyennés sur la durée d'exploitation) aboutit à une décroissance moins rapide de la température du fluide prélevé mais confirment les tendances annoncées dans la Phase 3 du Dogger, à savoir :

- La décroissance thermique au puits producteur d'**Alfortville** est confirmée par la modélisation qui indique une diminution de la température du réservoir de l'ordre de 2°C actuellement et prédit une perte thermique de l'ordre 4°C à l'échéance 2020 dans l'hypothèse d'une exploitation du même ordre de grandeur en débit et température qu'en 2010. D'autre part, les mesures de la température en tête de puits producteur indiquent une baisse de l'ordre de 3°C actuellement.
- La décroissance thermique calculée au puits producteur de **l'Hay-Les-Roses** est plus amortie que celle calculée dans la Phase 3 du Dogger avec une diminution de la température proche de 1°C actuellement et de 1.5°C à l'échéance 2020. Une diminution de la température est également observée sur les mesures en tête de puits (inférieure à 1°C). Cette tendance sera à confirmer dans les années à venir.
- Le doublet de **Maisons-Alfort 1** indique actuellement une chute de la température du réservoir au puits producteur de l'ordre de 1°C et de 2°C d'ici 2020. La mesure de la température en tête de puits ne permet pas de statuer sur un refroidissement en ce puits (absence de données entre 2004 et 2010). La température du fluide géothermal extrait de ce puits est donc à surveiller dans les prochaines années.
- Les températures calculées aux producteurs de **Champigny-sur-Marne, Chevilly-Larue et Fresnes** indiquent une baisse comprise entre 1°C et 1.5°C qui se produira entre 2012 et 2020. La mesure en tête de puits ne permet d'observer une baisse éventuelle de la température. Ces puits sont donc à surveiller dans les années à venir. Il est à noter que le doublet de Champigny-sur-Marne sera réhabilité sous peu en triplet.
- Le puits de la **Courneuve Nord**, enfin, présente une baisse de sa température qui serait proche de 1°C en 2020. La simulation prévisionnelle ne tient pas compte du fait que le doublet devrait être réhabilité dès 2012 en triplet (nouveau puits producteur). La température mesurée en tête semble indiquer une baisse de la température entre 2 et 3 °C en 2010 par rapport aux mesures antérieures à 2004 (aucunes données disponibles entre 2004 et 2010). Cette baisse de la température de production est à confirmer ou infirmer.

Les mesures réalisées en tête de puits permettent dans certains cas de confirmer le refroidissement (Alfortville, l'Hay-Les-Roses) mais dans d'autres cas, du fait de grandes variations et de lacunes, elles ne permettent pas de statuer par rapport aux résultats des modélisations. La température varie conjointement au débit, elle devrait refléter la température du réservoir pour les forts débits. Il serait intéressant de pouvoir équiper l'ensemble des sites d'une GTC afin de disposer de mesures en continu de la température et du débit. Seuls 6 sites sont actuellement équipés d'un système automatisé (Alfortville, Bonneuil-sur-Marne, Chevilly-Larue, Coulommiers, L'Hay-Les-Roses, Le Mée-sur-Seine).

La cartographie détaillée des bulles froides par secteur modélisé a permis de visualiser la taille actuelle et dans 10 ans des bulles et leur proximité par rapport au puits producteur de chaque doublet. Pour certains doublets (Maisons-Alfort 2, Thiais, l'Hay-Les-Roses, Chevilly-Larue), les bulles sont déformées dans la direction de leur producteur mais aussi de producteurs voisins. Cette cartographie est importante lorsqu'il s'agit soit de réhabiliter un doublet, ce qui sera de plus en plus le cas avec le

vieillessement grandissant des puits (entre 23 et 29 ans d'âge), soit de réaliser un nouveau doublet, ce qui nécessite une connaissance la plus précise possible des bulles froides.



## Sommaire

<b>Erratum.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Finalisation de l'application pour l'intégration des paramètres d'exploitation dans la base Oracle.....</b>	<b>17</b>
2.1. ETAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNEES D'EXPLOITATION .....	17
2.2. ETAT DU PROCESSUS D'INTEGRATION ET D'EXTRACTION DES DONNEES DANS LA BASE ORACLE .....	19
2.3. CONCLUSIONS ET SUITE A VENIR.....	22
<b>3. Mise à jour des modélisations hydro-thermiques au Dogger avec les nouvelles données acquises en 2010.....</b>	<b>23</b>
3.1. MISE A JOUR DE LA REGIONALISATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES ET THERMIQUES .....	23
3.2. MISE A JOUR DES SIMULATIONS HYDRO-THERMIQUES .....	30
3.2.1. Données d'exploitation utilisées pour les modélisations et le calcul de l'énergie géothermale par doublet .....	30
3.2.2. Courbes de décroissance thermique par zone de doublets .....	34
3.2.3. Cartes des bulles froides actualisées à fin 2010 et 2020 .....	49
<b>4. Mise à jour 2010 du suivi physico-chimique de l'aquifère du Dogger.....</b>	<b>61</b>
4.1. SYNTHESE DES RESULTATS DES PHASES 1, 2 ET 3 DU PROJET « GESTION DU DOGGER DE L'ILE-DE-FRANCE » .....	65
4.2. APPORTS DU PROJET « GESTION DU DOGGER 2010 » .....	66
4.2.1. Corrections .....	66
4.2.2. Données supplémentaires.....	71
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>73</b>
<b>6. Bibliographie.....</b>	<b>77</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 :	Périmètre et doublets du domaine d'étude (noir : ouvrages en service, rouge : ouvrages arrêtés et vert : ouvrages forés mais non exploités).....	24
Figure 2 :	Carte de transmissivité du réservoir (zone grisée : sillon marneux non aquifère) .....	26
Figure 3 :	Carte des épaisseurs productrices (zone grisée : sillon marneux non aquifère)....	27
Figure 4 :	Cartes des épaisseurs cumulées des épontes ((zone grisée : sillon marneux non aquifère) .....	28
Figure 5 :	Cartes de la température du réservoir à la profondeur moyenne de production (zone grisée : sillon marneux non aquifère).....	29
Figure 6 :	Chroniques de débit et température d'injection au doublet d'Alfortville (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).....	31
Figure 7 :	Chroniques de débit et température d'injection au doublet l'Hay-Les-Roses (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).....	31
Figure 8 :	Chroniques de débit et température d'injection au doublet Orly 1 Gazier (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).....	32
Figure 9 :	Chroniques de débit et température d'injection au doublet Clichy-sous-Bois (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).....	32
Figure 10 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Alfortville .....	35
Figure 11 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Bonneuil sur Marne .....	35
Figure 12 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Créteil .....	36
Figure 13 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Maisons-Alfort 1 .....	36
Figure 14 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Maisons-Alfort 2 .....	37
Figure 15 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Sucy-en-Brie (ancien puits, injecteur à partir d'octobre 2008).....	37
Figure 16 :	Évolution de la température (°C) au nouveau puits producteur de Sucy-en-Brie... ..	38
Figure 17 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Gazier .....	39
Figure 18 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Nouvelet 1 (ancien doublet) .....	39
Figure 19 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Nouvelet 2 (nouveau doublet) .....	40
Figure 20 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Thiais.....	40
Figure 21 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Villeneuve-St-Georges.....	41
Figure 22 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Cachan 1 .....	42
Figure 23 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Cachan 2 .....	42
Figure 24 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Chevilly-Larue .....	43
Figure 25 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de Fresnes .....	43
Figure 26 :	Évolution de la température (°C) au puits producteur de l'Hay-Les-Roses .....	44

Figure 27 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Villeneuve-St-Georges .....	44
Figure 28 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Montgeron.....	45
Figure 29 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Épinay-sous-Sénart .....	45
Figure 30 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Champigny-sur-Marne.....	46
Figure 31 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Chelles .....	46
Figure 32 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de La Courneuve Nord .....	47
Figure 33 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de La Courneuve Sud.....	48
Figure 34 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Clichy-sous-Bois .....	48
Figure 35 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Blanc-Mesnil Nord .....	49
Figure 36 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Tremblay-en-France .....	49
Figure 37 : Impacts thermiques simulés dans l'aquifère du Dogger à fin 2010.....	51
Figure 38 : Impacts thermiques simulés dans l'aquifère du Dogger à fin 2020.....	52
Figure 39 : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2010).....	53
Figure 40 : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2020).....	53
Figure 41 : Impacts thermiques des doublets de la zone 2 (fin 2010).....	54
Figure 42 : Impacts thermiques des doublets de la zone 2 (fin 2020).....	54
Figure 43 : Impacts thermiques des doublets de la zone 3 (gauche : fin 2010, droite : fin 2020).....	55
Figure 44 : Impacts thermiques des doublets de la zone 4 (haut : fin 2010, bas : fin 2020).....	56
Figure 45 : Impacts thermiques des doublets de la zone 5 (fin 2010).....	57
Figure 46 : Impacts thermiques des doublets de la zone 5 (fin 2020).....	57
Figure 47 : Impacts thermiques des doublets de la zone 6 (fin 2010).....	58
Figure 48 : Impacts thermiques des doublets de la zone 6 (fin 2020).....	58
Figure 49 : Impacts thermiques des doublets de la zone 7 (fin 2010).....	59
Figure 50 : Impacts thermiques des doublets de la zone 7 (fin 2020).....	59
Figure 51 : Conséquences des corrections effectuées sur l'évolution du pH et du pe. ....	68
Figure 52 : Conséquences des corrections effectuées sur l'indice de saturation de minéraux d'intérêt, cas des sites d'Alfortville et de Clichysous-Bois.....	69
Figure 53 : Conséquences des corrections effectuées sur l'indice de saturation de minéraux d'intérêts, cas des sites de Meaux-Beauval 1 et de Champigny-sur-Marne.....	70
Figure 54 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Puits de production GAL2 (Alfortville, VDM). ....	71
Figure 55 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Puits de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	72

Figure 56 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).....	86
Figure 57 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM). .....	87
Figure 58 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM). .....	87
Figure 59 : Évolution du pH. Forages de production GCHLR2 (L'Hay-les-Roses, VDM), GSUC1 et 3 (Sucy-en-Brie, VDM) et GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).....	88
Figure 60 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (majeurs) dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).....	93
Figure 61 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (mineurs) dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).....	94
Figure 62 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM). .....	95
Figure 63 : Évolution du pH et du pe. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).....	96
Figure 64 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).....	97
Figure 65 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production (suite). Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).....	98
Figure 66 : 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. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM). .....	99
Figure 67 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).....	101
Figure 68 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).....	102
Figure 69 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM). .....	102
Figure 70 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM). .....	103
Figure 71 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (majeurs) dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD). .....	107
Figure 72 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (mineurs) dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD). .....	108
Figure 73 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).....	109
Figure 74 : Évolution du pH et du pe. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).....	110

Figure 75 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).....	111
Figure 76 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production (suite). Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).....	112
Figure 77 : 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. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD). ....	113
Tableau 1 : Sites en exploitation et nombre de mesures récupérées au cours de l'année 2010.....	18
Tableau 2 : Energie prélevée à fin 2010 (MWh) par doublet depuis leur mise en service (noir : doublets en fonction dont 1 triplet, rouge : doublets arrêtés).....	33
Tableau 3 : Caractéristiques générales des sites géothermiques examinés (d'après les analyses de fin de sondage, base Dogger) .....	62
Tableau 4 : Tableau de synthèse des différentes études géochimiques menées depuis 2002 sur la nappe du Dogger par le BRGM. Inventaires des sites géothermiques examinés dans chaque étude et présentation des raisons ayant motivé le choix de ces sites .....	63

## Liste des annexes

Annexe 1 : Définition des notions géochimiques usuelles.....	79
Annexe 2 : Fiche descriptive des évolutions observées sur les sites supplémentaires de l'étude .....	81



## Erratum

Dans les études géochimiques précédentes (phases 1, 2 et 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France), nous avons supposé à tort que le pH et le potentiel redox étaient mesurés systématiquement sur un fluide refroidi à 25-30 °C et que les valeurs du potentiel redox renseignées dans la base Dogger étaient automatiquement exprimées par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène (ENH). En réalité, le pH et le potentiel redox sont mesurés à la température d'exhaure du fluide géothermique, pour la plupart des sites étudiés. De plus, dans la base Dogger, le potentiel redox des sites gérés par CFG-Services est exprimé par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl (dont le potentiel redox est de 197 mV/ENH à 25°C). Ces erreurs d'appréciation ont été corrigées dans le cadre de cette étude, pour tous les sites géothermiques examinés (§ 4.2.1).



# 1. Introduction

Le projet « Gestion du réservoir du Dogger 2010 » PSP10GTH20 est un des projets de la Convention de Service Public ADEME-BRGM 2010 (Convention 0905C0016 notifiée le 28/12/2009). Ce projet fait suite, à partir du 1er juillet 2010, aux différentes phases qui l'ont précédé, et notamment à la phase 3 du Dogger dont le rapport final a été achevé en novembre 2010 (cf. Rapport BRGM/RP-58834-FR)

Le projet comprend trois objectifs majeurs:

- La concrétisation de l'acquisition continue des données d'exploitation quotidiennes de chaque opération en activité et des éléments modificatifs relatifs au mode d'exploitation de certaines opérations géothermales (passage d'une exploitation par pompage à un mode artésien, réhabilitation de doublets en nouveau doublet ou en triplet) ; la mise à jour de la Base Dogger et la validation des routines d'intégration et d'extraction des données.
- L'intégration des données 2010 d'exploitation et des données issues des nouveaux puits (transmissivité, épaisseur productrice, température..) pour affiner les résultats des modélisations hydro-thermiques (percées thermiques, bulles froides).
- L'intégration des données 2010 géochimiques pour l'ajustement du suivi physicochimique des fluides en tête de puits en vue de confirmer les phénomènes de reprise de corrosion-dépôts et d'acidification du réservoir observés au cours de la Phase 3 du projet de gestion du Dogger ;

Le présent rapport synthétise l'ensemble des résultats obtenus.



## **2. Finalisation de l'application pour l'intégration des paramètres d'exploitation dans la base Oracle**

### **2.1. ETAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNEES D'EXPLOITATION**

Cette phase du projet « Gestion du Dogger 2010 » est la poursuite et la finalisation du dispositif d'intégration des paramètres d'exploitation dans la base Dogger. Lors de la phase 3 précédente du projet, il avait été mis en place un fichier Excel standardisé pour les paramètres d'exploitation des opérations géothermiques au Dogger (cf. annexe 10 du rapport de la phase 3).

En 2010, une routine d'intégration, sur la base de ce fichier Excel, a été mise en place afin que les données d'exploitation puissent être intégrées à la base Dogger tous les trimestres.

Le tableau 1 ci-après présente le bilan d'intégration des données dans la base au cours de l'année 2010. Il montre un certain nombre de lacunes (absence de données pour certaines périodes) du fait de l'envoi encore non systématique des données d'exploitation aux bureaux d'étude sous-sol (BESS) en charge du suivi d'exploitation des sites, qui ont pour mission, après vérification et validation, de les adresser au BRGM administrateur de la base.

En effet, pour un certain nombre de sites, les données ont été récupérées par le BESS lui-même, lors de son passage pour la réalisation des mesures contractuelles imposées par l'arrêté d'exploitation. Il reste donc encore à acquérir un certain nombre d'automatismes pour aboutir à une transmission régulière des paramètres d'exploitation. Ainsi en 2010, on comptabilisait 10 sites sur les 34 en exploitation pour lesquels des données complètes (1 valeur ou plus par jour) ont été récupérées, 9 sites avec plus de 300 mesures collectées et 15 sites pour lesquels les données sont plus incomplètes (données non disponibles ou manquantes).

<b>Données d'exploitation 2010</b>	
<b>Site</b>	<b>Nombre de mesures</b>
ALFORTVILLE	351
BONNEUIL-SUR-MARNE	419
CACHAN 1	157
CACHAN 2	109
CHAMPIGNY	334
CHELLES	33
CHEVILLY-LARUE	2944
CLICHY-SOUS-BOIS	372
COULOMMIERS	2179
CRETEIL MONT MESLY	39
EPINAY-SOUS-SENART	107
FRESNES	48
L'HAY-LES-ROSES	2948
LA COURNEUVE NORD	220
LA COURNEUVE SUD	132
LE BLANC MESNIL	174
LE MEE-SUR-SEINE	1054
MAISON ALFORT 1	63
MAISON ALFORT 2	21
MEAUX BEAUVAL 1	337
MEAUX BEAUVAL 2	337
MEAUX COLLINET	335
MEAUX HOPITAL	337
MELUN L'ALMONT	488
MONTGERON	364
ORLY 1 GAZIER	217
ORLY 2 LE NOUVELET2	364
RIS ORANGIS	67
SUCY-EN-BRIE	364
THIAIS	431
TREMBLAY-EN-FRANCE	283
VIGNEUX-SUR-SEINE	365
VILLENEUVE ST-GEORGES	125
VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	2029

Tableau 1 : Sites en exploitation et nombre de mesures récupérées au cours de l'année 2010

## 2.2. ETAT DU PROCESSUS D'INTEGRATION ET D'EXTRACTION DES DONNEES DANS LA BASE ORACLE

L'application Access « VersORACLE » contient une interface qui permet de transférer dans la base de données Dogger le contenu du fichier Excel standardisé fourni par l'exploitant et valider par le bureau d'étude en charge du suivi de l'exploitation. La connexion à la base Oracle est administrée par le BRGM qui par conséquent est le seul à en avoir l'accès (via un service ODBC).

Lors de la connexion, la fenêtre d'accueil de l'application apparaît :



L'application permet cinq opérations :

- En cliquant sur le bouton :

**Déverser un fichier Excel type doublet dans Oracle**

On obtient la fenêtre suivante :



Dans cette fenêtre il faudra choisir le site, indiquer le contexte de la mesure, l'ouvrage de production et d'injection, puis indiquer le fichier Excel à charger. Dès que ces renseignements seront donnés il sera possible d'avoir un aperçu des données qui sont à charger pour la production, l'injection, la centrale et la corrosion.

Le bouton **Charger dans la base Dogger** réalisera l'action de chargement du contenu du fichier Excel dans la base de données Oracle. Dans cette fenêtre il est également possible de consulter le journal de l'historique des chargements.

- En cliquant sur le bouton :



On obtient la fenêtre suivante :



Comme précédemment il faudra indiquer le site, le contexte de la mesure, l'ouvrage de production, et les ouvrages servant pour l'injection. Dès que ces renseignements seront donnés il sera possible d'avoir un aperçu des données qui sont à charger pour la production, l'injection, la centrale et la corrosion.

**Charger dans la base Dogger**

Le bouton **Charger dans la base Dogger** réalisera l'action de chargement du contenu du fichier Excel dans la base de données Oracle.

- En cliquant sur le bouton :

**Déverser Oracle dans un fichier Access**

On obtient la fenêtre suivante :

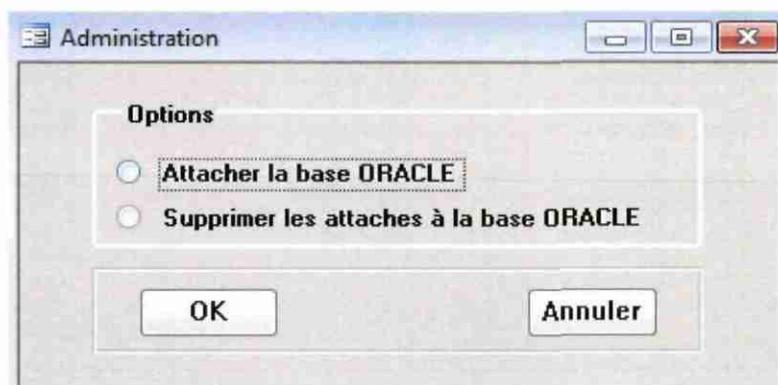


Cette opération permet d'extraire les données de la base Oracle dans un fichier Access. Dans cette fenêtre il faudra indiquer le nom de la base de données Access qui doit recevoir le contenu de la base de données Oracle. Le bouton **Transférer** réalisera l'action de recopie du contenu de la base Oracle vers la base Access Dogger type.

- En cliquant sur le bouton :

**Administration**

On obtient la fenêtre suivante :



Les actions réalisées dans cette fenêtre sont liées à un changement de nom du serveur de base de données. On peut par exemple supprimer les attaches à un serveur de bases de données pour les réinitialiser sur un autre serveur. D'une façon

générale, cette fonction « Administration » ne sera utilisée que par les administrateurs du BRGM.

- En cliquant sur le bouton :



On termine l'application

### 2.3. CONCLUSIONS ET SUITE A VENIR

Cette phase du projet a donc permis d'expérimenter et de valider une application pour l'intégration des paramètres d'exploitation dans la base Oracle Dogger.

La suite du projet en 2011 prévoit la mise en place d'une routine équivalente pour ***l'intégration des paramètres du suivi physico-chimique*** (mesures de terrain, analyses en laboratoire, traitements de fond de puits) lors des interventions réalisés par les BE sous-sol. Ainsi, pour les paramètres d'exploitation mesurés au pas journalier ou horaire pour les sites équipés d'une GTC et les paramètres physico-chimiques mesurés lors des visites mensuelles à trimestrielles, l'intégration dans la base se fera via l'application « Vers Oracle ».

En ce qui concerne les données plus ponctuelles (paramètres caractérisant le réservoir, les ouvrages et les équipements de la centrale géothermique) acquises lors de la réalisation d'une nouvelle opération et d'un nouveau puits ou à l'occasion de travaux de réhabilitation (rechemisages de puits, etc.), elles seront renseignées directement via le formulaire Access par les BE sous-sol. La base Access mise à jour sera alors transmise au BRGM (en même temps que les fichiers Excel sur les données d'exploitation et physico-chimiques) lorsque de nouvelles données auront été acquises. Le BRGM opérera alors le transfert dans la base Oracle.

### **3. Mise à jour des modélisations hydro-thermiques au Dogger avec les nouvelles données acquises en 2010**

Le rapport de la Phase 3 (cf. BRGM/RP-58834-FR) a montré que 6 sites présentaient actuellement une baisse potentielle de la température de production. Cette tendance n'est actuellement confirmée que pour le site d'Alfortville et soupçonnée sur le site de l'Hay-Les-Roses.

Les simulations hydrauliques et thermiques pour la phase 3 du Dogger avaient été réalisées sur la base des données d'exploitations disponibles à fin 2009. Les paramètres d'exploitation (notamment le débit de production et la température de réinjection) ont été complétés à partir des données acquises en 2010 via le fichier Excel standardisé et des données d'exploitation entre 2005-2009 récupérées par les bureaux d'étude sous-sol et complétées dans la base depuis.

Le chapitre présente donc les nouveaux résultats obtenus avec la mise à jour des modélisations hydro-thermiques.

#### **3.1. MISE A JOUR DE LA REGIONALISATION DES PARAMETRES HYDRAULIQUES ET THERMIQUES**

Afin de construire un modèle à l'échelle régionale, un certain nombre de paramètres (transmissivité, épaisseur productrice, épaisseur des épontes, température) qui sont mesurés localement aux puits ont été krigés (interpolation par méthode géostatistique) sur une grille de mailles carrées de 25 m de côté (cf. Annexe 8 du rapport BRGM/RP-58834-FR).

Ces cartes (transmissivité, épaisseur productrice, épaisseur non productrice) ont été mises à jour pour tenir compte des informations maintenant disponibles dans les DOE (Dossiers d'Ouvrages Exécutés) des nouveaux sites de Paris Nord-Est (Porte d'Aubervilliers, doublet foré en 2009) et d'Orly ADP (doublet foré en 2010). L'estimation régionale des paramètres a été étendue sur un domaine plus grand (grille limitée par les coordonnées Lambert Nord  $X_{\min}= 590$  km,  $X_{\max}= 630$  km,  $Y_{\min}= 100$  km et  $Y_{\max}= 150$  km). Le domaine d'étude a été étendu vers la Seine-et-Marne, les Hauts-de-Seine et l'Essonne (cf. Fig. 1).

Concernant la température mesurée en fond de puits au cours de l'essai de production (température initiale du réservoir), la méthode d'interpolation utilisée a été modifiée pour tenir compte de la correction liée à la profondeur (krigeage avec dérive externe).

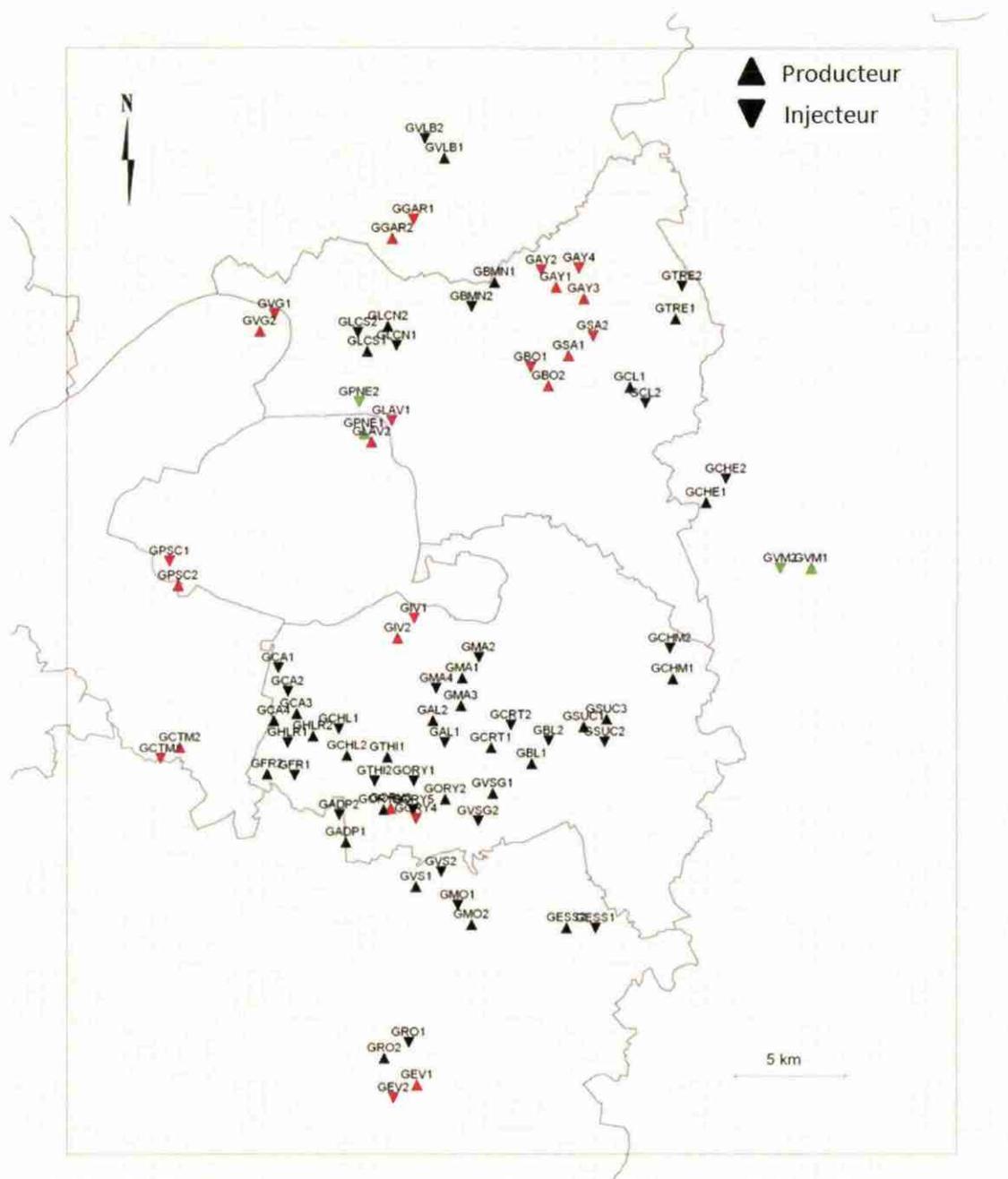


Figure 1 : Périmètre et doublets du domaine d'étude (noir : ouvrages en service, rouge : ouvrages arrêtés et vert : ouvrages forés mais non exploités).

En effet, la carte de température calculée dans le rapport de la Phase 3 est obtenue par krigeage direct de la donnée brute et ne tient pas compte de la relation de la température avec le paramètre profondeur et par conséquent, du gradient géothermique moyen mesuré dans la zone. Afin de prendre en compte cet effet qui est surtout pertinent dans les zones où l'information est manquante ou peu abondante, un nouveau traitement des températures est appliqué. Cette méthode déjà utilisée pour le

calcul des températures des réservoirs argilo-gréseux du Trias (cf. rapport BRGM/RP-56463-FR) est résumée ci-dessous :

- Calcul d'un gradient géothermique moyen ( $T_{prof}$ ) sur l'ensemble du bassin de Paris à partir de données de température des doublets géothermiques ainsi que des données de fond de puits des forages pétroliers. Le gradient obtenu est donné par la relation  $T_{prof} = 0.034 \times z + 11.82$ , qui correspond à un gradient géothermique de 3,4 °C/100 m avec une température de surface moyenne de 11,82 °C ;
- Krigeage géostatistique du résidu ( $T_{res} = T - T_{prof}$ ) sur la zone des doublets géothermiques du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis (T étant la température mesurée lors de l'essai de production à la profondeur moyenne de production) ;
- Calcul de la température à la profondeur barycentrique de production ( $T_{prof}$ ) à partir des isohypses du toit calcaire ;
- Correction de la température ( $T_{cor}$ ) par addition des deux cartes obtenues ( $T_{cor} = T_{res} + T_{prof}$ )

La nouvelle carte obtenue est plus précise dans les zones non couvertes par des puits car elle tient compte de l'augmentation de température avec la profondeur suivant le gradient estimé dans la zone.

Ces nouvelles grilles de paramètres sont ensuite utilisées pour les modélisations hydrauliques et thermiques (cf. Fig. 2 à 5).

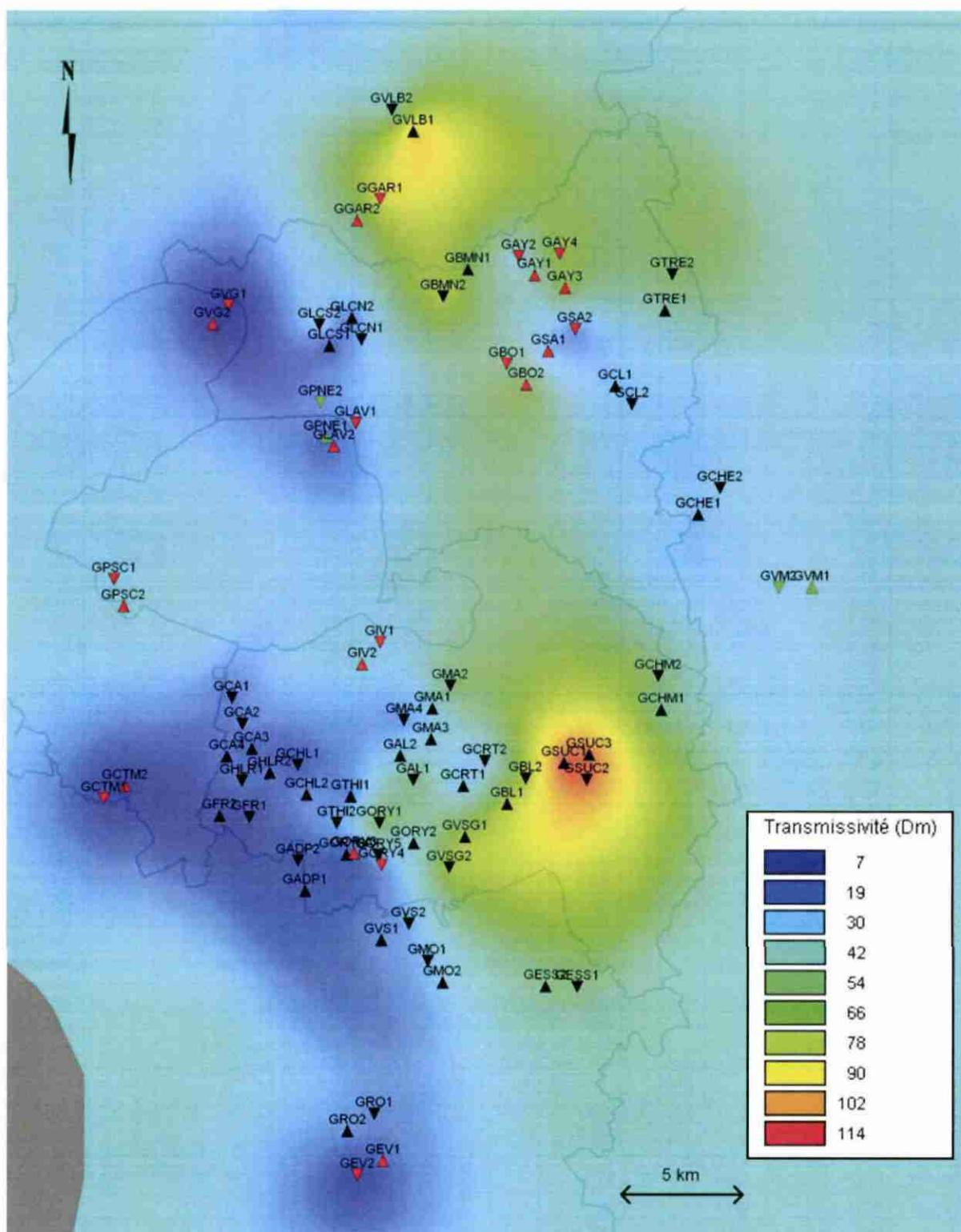


Figure 2 : Carte de transmissivité du réservoir (zone grisée : sillon marneux non aquifère).

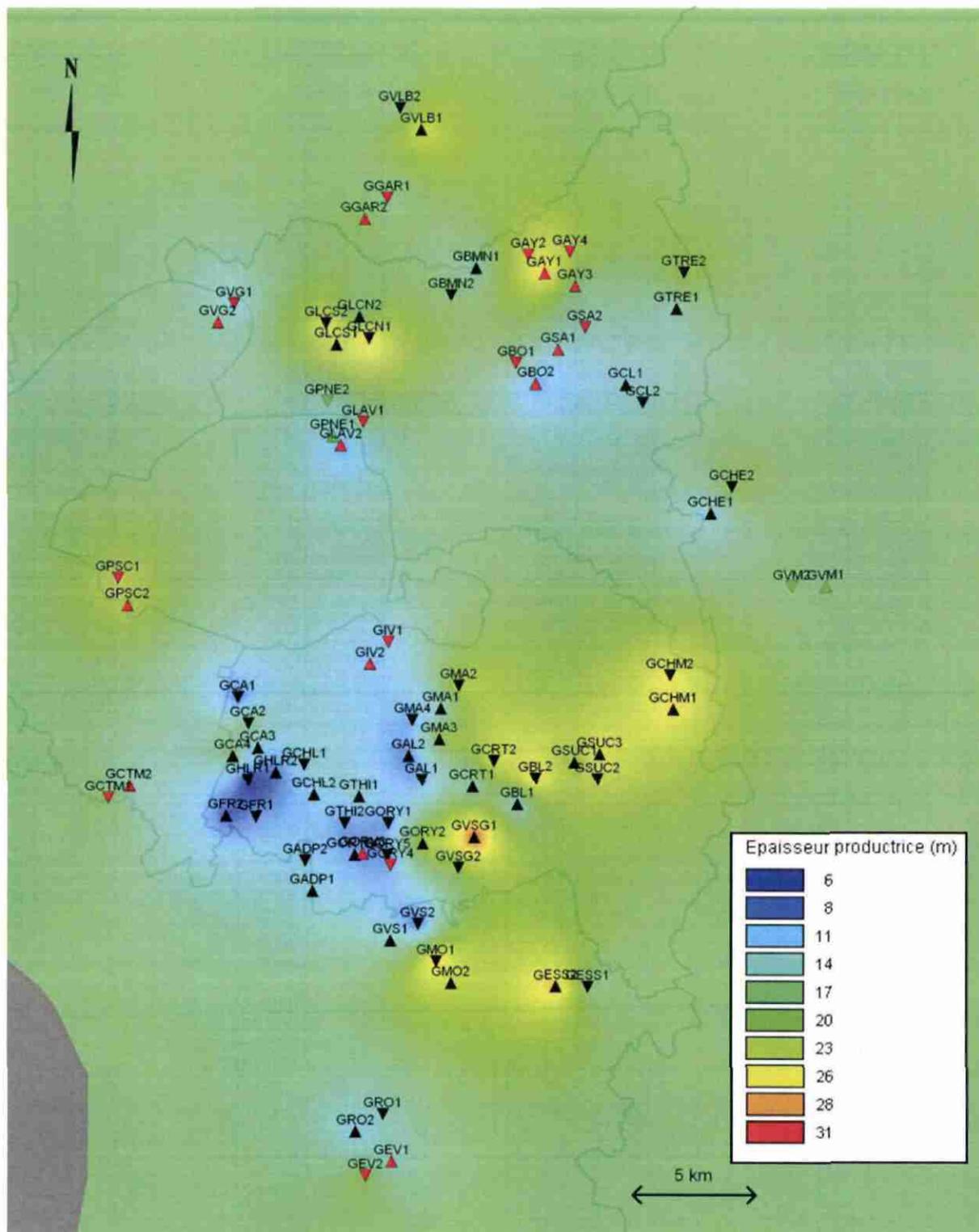


Figure 3 : Carte des épaisseurs productrices (zone grisée : sillon marneux non aquifère).

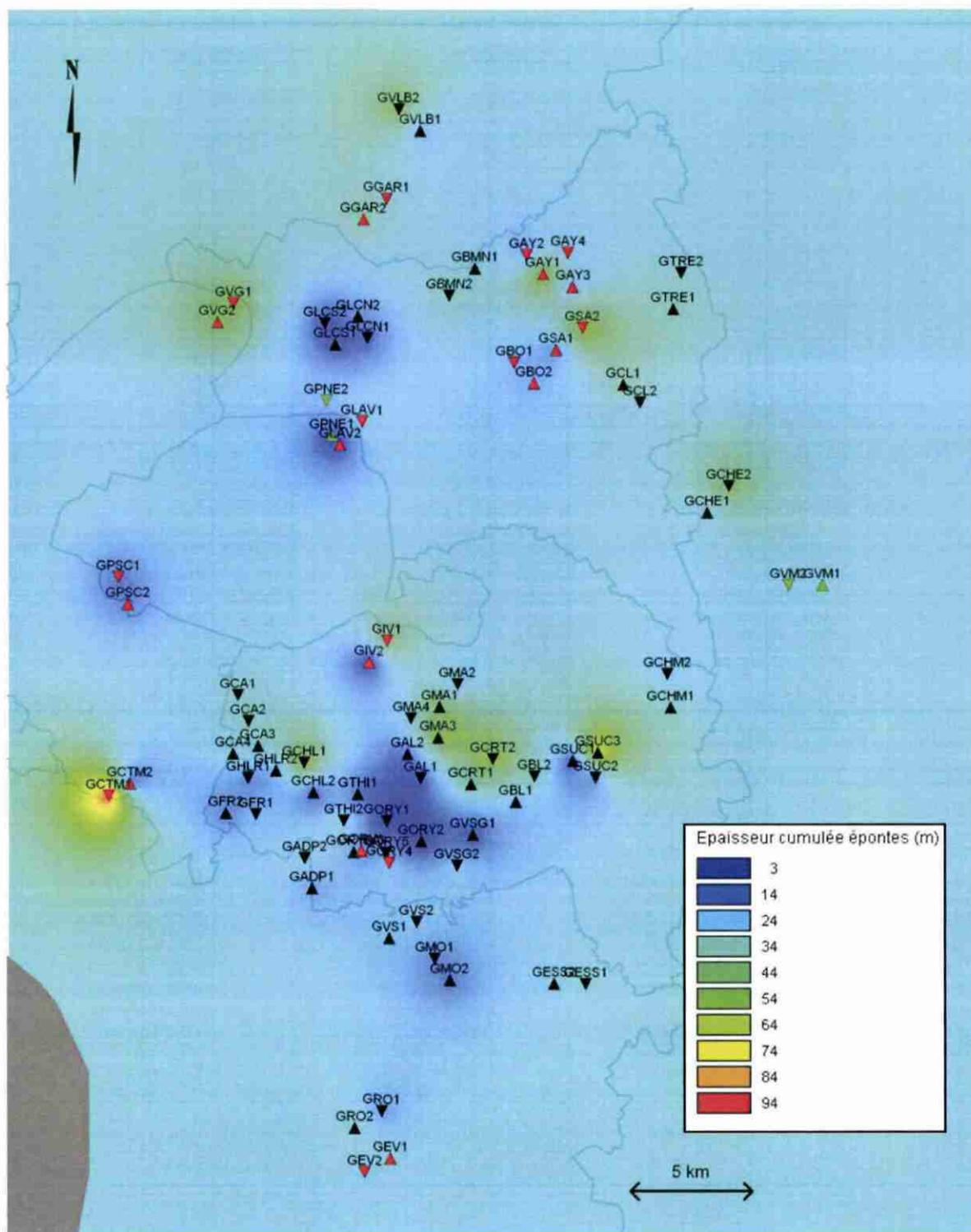


Figure 4 : Cartes des épaisseurs cumulées des épontes (zone grisée : sillon marneux non aquifère).

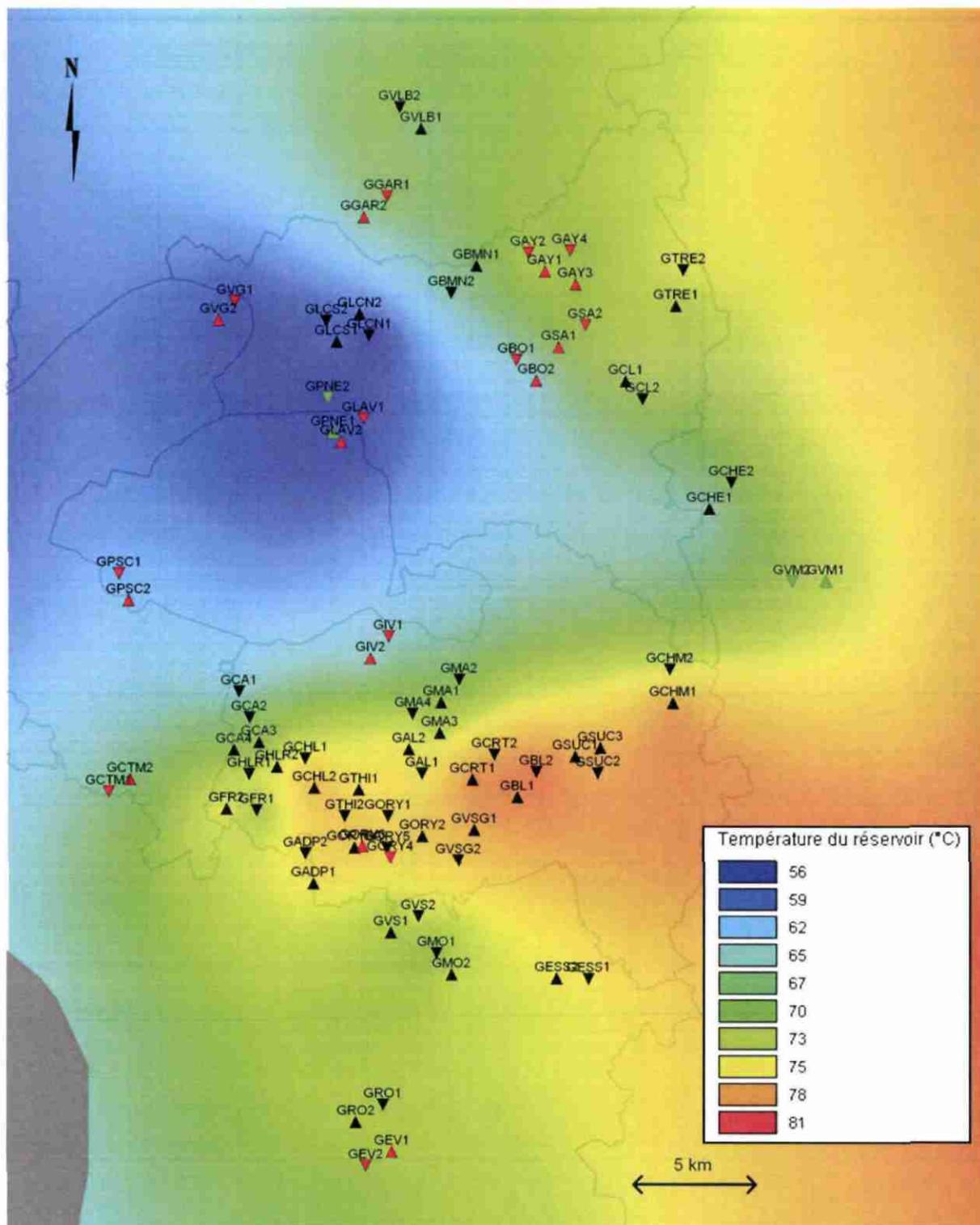


Figure 5 : Cartes de la température du réservoir à la profondeur moyenne de production (zone grisée : sillon marné non aquifère).

### 3.2. MISE A JOUR DES SIMULATIONS HYDRO-THERMIQUES

La méthodologie appliquée pour le calcul thermique reste la même que celle décrite dans le rapport de la Phase 3.

Le découpage en sous-modèles a néanmoins été modifié afin d'optimiser les temps de calcul liés à la multiplicité des modèles et pour tenir compte des nouveaux sites (Orly ADP, Paris Nord-Est et Val-Maubuée). Ainsi, 7 sous-modèles ont été réalisés et correspondent aux doublets suivant :

- Zone 1 (Val-de-Marne) : Alfortville, Bonneuil-sur-Marne, Créteil, Maisons-Alfort I et II, Sucy-en-Brie (triplet depuis octobre 2008) ;
- Zone 2 (Val-de-Marne) : Orly I Gazier, Orly II Le Nouvelleté 1 et 2, Thiais, Villeneuve-Saint-Georges ;
- Zone 3 (Val-de-Marne) : Cachan I et II, Chevilly-Larue, Fresnes, L'Hay-Les-Roses, Orly ADP (en exploitation depuis mars 2011) ;
- Zone 4 (Essonne, doublets limitrophes du Val-de-Marne) : Épinay-sous-Sénart, Montgeron, Vigneux-sur-Seine ;
- Zone 5 (Val-de-Marne, Seine-St-Denis, Seine-et-Marne) : Champigny, Chelles, Val-Maubeuge (exploitation prévue à partir de 2012) ;
- Zone 6 (Seine-Saint-Denis) : La Courneuve Nord et Sud, Villeneuve-la-Garenne (arrêté) et Paris Nord-est (exploitation prévue à partir de 2012) ;
- Zone 7 (Seine-Saint-Denis) : Clichy-sous-Bois, Blanc-Mesnil-Nord, Tremblay-en-France et les doublets arrêtés d'Aulnay-sous-Bois, Bondy et Sevran.

Ces zones n'intègrent pas les doublets de Villiers-le-Bel-Gonesse (Val d'Oise) plus au Nord et de Ris-Orangis (Essonne) plus au Sud qui seront traités ultérieurement. On rappelle, par ailleurs, que l'étude est centrée sur les secteurs du Val-de-Marne et de Seine-Saint-Denis et des doublets avoisinants. Ainsi les doublets de Meaux, Coulommiers, Melun et Le Me-sur-Seine ne sont pas intégrés dans l'étude à ce jour.

#### 3.2.1. Données d'exploitation utilisées pour les modélisations et le calcul de l'énergie géothermale par doublet

Afin de reproduire au mieux la vie de l'exploitation du doublet géothermique, les données d'exploitation ont été traitées différemment par rapport à la Phase 3 du Dogger, de manière à suivre au plus près les évolutions temporelles du débit produit et de la température injectée et donc de l'énergie puisée dans le sous-sol.

Ainsi dans la gestion du Dogger en 2010, les débits et températures d'injection sont mensualisés, ce qui permet de prendre en compte les variations saisonnières annuelles comparativement à la Phase 3 du Dogger, où un débit et une température moyens pour la saison froide et chaude pour l'ensemble de la durée de l'exploitation étaient calculés. Les figures 6 à 9 montrent 4 exemples de chroniques de débits et températures avec ce nouveau traitement.

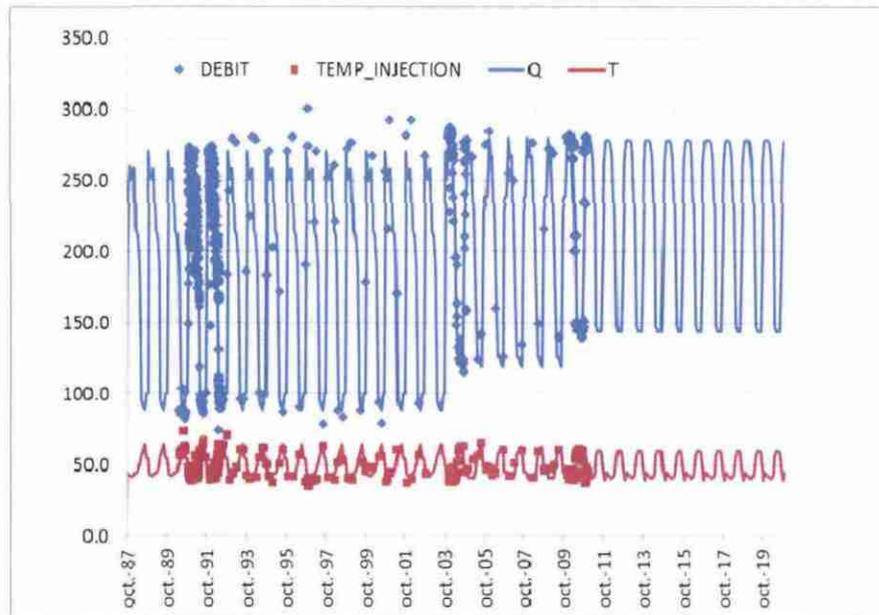


Figure 6 : Chroniques de débit et température d'injection au doublet d'Alfortville (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).

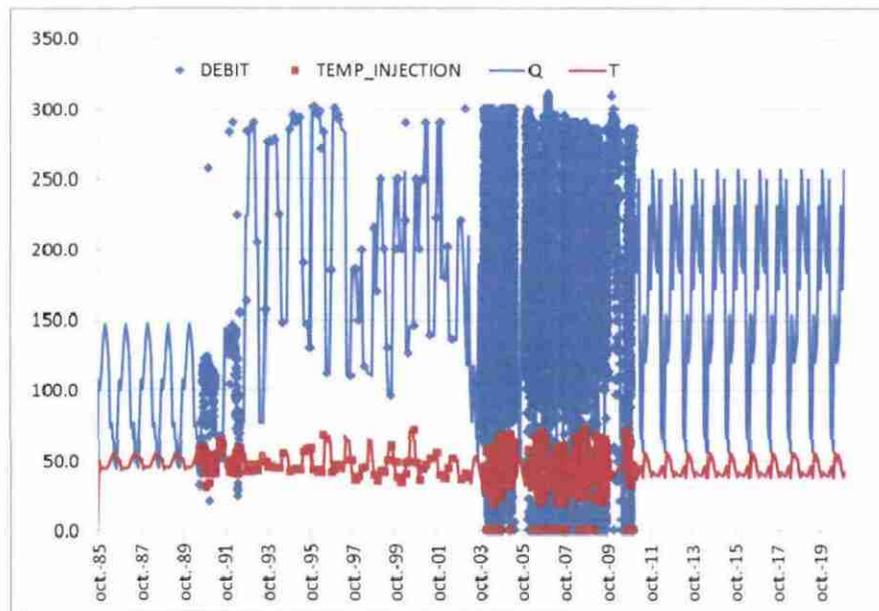


Figure 7 : Chroniques de débit et température d'injection au doublet l'Hay-Les-Roses (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).

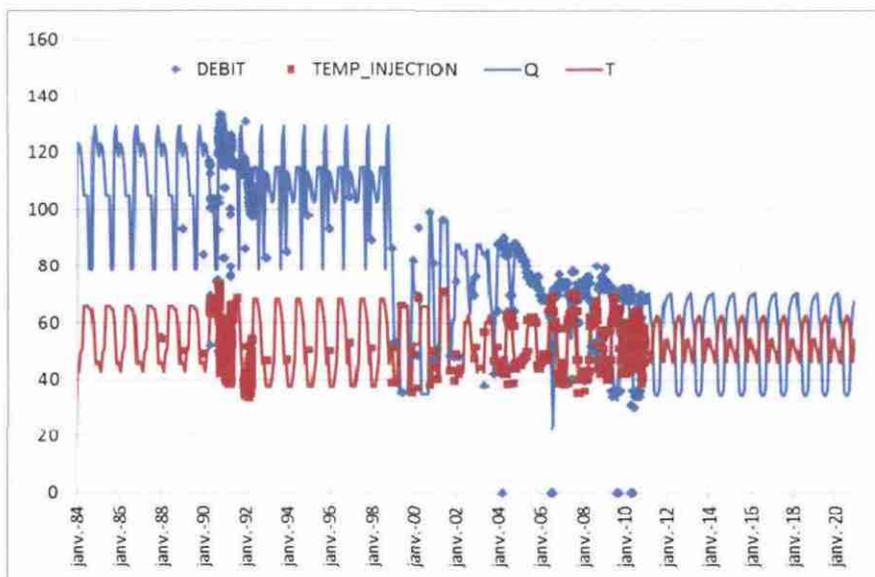


Figure 8 : Chroniques de débit et température d'injection au doublet Orly 1 Gazier (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées).

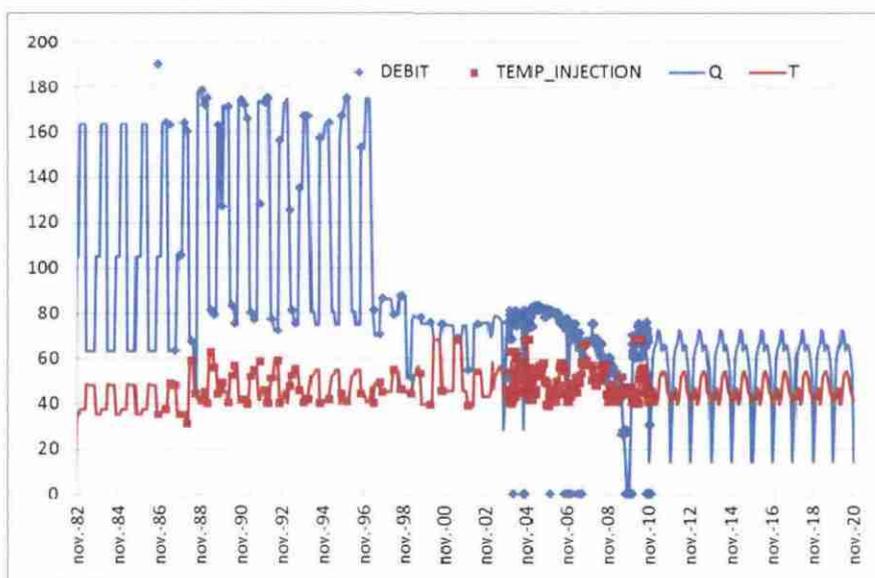


Figure 9 : Chroniques de débit et température d'injection au doublet Clichy-sous-Bois (points : mesures ponctuelles, lignes : débits et températures extrapolées)

Un tableau comparatif a été réalisé (cf. tableau 2) afin de quantifier les énergies thermiques produites pour chaque doublet depuis sa mise en service dans le cas du traitement simplifié en créneaux hivers/été (Dogger Phase 3) et dans le cas des données d'exploitation mensualisées (Dogger Gestion 2010). La dernière colonne du tableau indique le rapport des énergies.

Le rapport reste proche de l'unité (moyenne de 1, écartype de 0.1) mais indique globalement une énergie géothermale plus faible pour la plupart des doublets avec la prise en compte des données au pas mensuel.

Par la suite, il sera utile de pouvoir remonter à l'énergie annuelle exploitée par doublet, donnée récupérée par la DRIEE Ile de France dans le cadre du suivi réglementaire de chaque exploitation. Ce travail sera réalisé dans le cadre du projet « Gestion 2011 du Dogger ».

Doublets Val-de-Marne	Nombre d'années d'exploitation (à fin 2010)	Energie (E1) prélevée fin 2010 (MWh) calculée avec créneaux été/hivers (Dogger phase 3)	Energie (E2) prélevée fin 2010 (MWh) calculée à partir des débits et températures mensuels (Gestion Dogger 2010)	Rapport E2/E1
ALFORTVILLE	23.3	1270305	1238685	0.98
BONNEUIL-SUR-MARNE	24.0	1013255	959328	0.95
CACHAN 1	25.3	587065	637097	1.09
CACHAN 2	25.1	720121	636939	0.88
CHAMPIGNY	25.1	1827343	1800389	0.99
CHEVILLY-LARUE	25.3	1729499	1493825	0.86
CRETEIL MONT MESLY	25.3	1371705	1320246	0.96
FRESNES	24.0	946634	1053137	1.11
L'HAY-LES-ROSES	25.3	1256387	1187305	0.95
IVRY-SUR-SEINE	10.0	404482	352728	0.87
MAISON ALFORT 1	25.5	941074	883348	0.94
MAISON ALFORT 2	24.3	816689	671584	0.82
ORLY 1 GAZIER	27.0	598168	606562	1.01
ORLY 2 LE NOUVELET	18.5	888368	927031	1.04
ORLY 2 LE NOUVELET 2	3.0	177511	202138	1.14
SUCY-EN-BRIE (doublet)	24.0	542091	578748	1.07
SUCY-EN-BRIE (triplet)	2.3	75753	86357	1.14
THIAIS	24.5	1203691	1118089	0.93
VILLENEUVE ST-GEORGES	23.2	1303165	1079416	0.83
VIGNEUX-SUR-SEINE	25.2	606213	718054	1.18
MONTGERON	28.2	768495	665513	0.87
EPINAY-SOUS-SENART	26.2	1099682	1132641	1.03
<b>Doublets Seine-St-Denis</b>				
AULNAY-SOUS-BOIS-RDV	12.0	442744	560226	1.27
AULNAY-SOUS-BOIS-VGS	9.3	164415	156607	0.95
BONDY	4.3	228389	219115	0.96
CHELLES	24.1	557473	633798	1.14
CLICHY-SOUS-BOIS	28.3	786839	691428	0.88
GARGES-LES-GONESSE	3.0	132964	129478	0.97
LA COURNEUVE NORD	27.9	580442	572446	0.99
LA COURNEUVE SUD	28.7	392880	414851	1.06
LE BLANC MESNIL	27.2	455073	550105	1.21
SEVRAN	6.3	401242	395860	0.99
TREMBLAY-EN-FRANCE	26.3	1058491	994928	0.94
VILLENEUVE-LA-GARENNE	17.2	238117	228957	0.96
VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	25.3	514149	608158	1.18

Tableau 2 : Energie prélevée à fin 2010 (MWh) par doublet depuis leur mise en service (noir : doublets en fonction dont 1 triplet, rouge : doublets arrêtés).

### 3.2.2. Courbes de décroissance thermique par zone de doublets

Dans ce chapitre est représentée, en chacun des puits producteurs de la Seine-St-Denis et du Val-de-Marne, l'évolution de la température du fluide du réservoir dans le cas des chroniques mensuelles (Gestion 2010), comparée à celle dans le cas de créneaux moyennés étés/hivers de la Phase 3 de la gestion du Dogger. Le but étant de préciser les décroissances thermiques calculées lors de la Phase 3 avec une prise en compte plus fine des chroniques d'exploitation.

#### a) Doublets de la zone 1

Le doublet **d'Alfortville** (cf. fig. 10), dans le cas des chroniques mensuelles, présente une décroissance thermique de la température du réservoir similaire à celle calculée dans la Phase 3 du Dogger avec néanmoins un léger déphasage au début (baisse plus tardive) suivi d'une décroissance un peu plus forte. La chute de température est d'environ 2 °C fin 2010 et 4 °C fin 2020 soit de l'ordre de 0,2 °C/an.

La figure 10 présente par ailleurs la température mesurée en tête de puits producteur sur la période d'exploitation du doublet. Si on considère une température en tête initiale de l'ordre de 74 °C, la température actuelle en tête se situe autour de 71 °C ce qui donne une perte thermique de l'ordre de 3 °C. Le modèle semble être plus optimiste avec une décroissance moins accentuée fin 2010 (2 °C). Cependant la température en tête de puits varie avec le débit avec des points de mesure très variables sur de courtes périodes, ce qui rend difficile une estimation précise de la baisse réelle de température. Depuis septembre 2010 le site est équipé d'une GTC (Gestion Technique Centralisée) ce qui permettra de suivre plus précisément la décroissance de la température dans le temps.

Les doublets de **Créteil** et **Bonneuil-sur-Marne** (cf. fig. 11 et 12) ne présentent pas de baisse perceptible de la température du réservoir sur la durée d'exploitation et au-delà jusqu'en 2020.

Le doublet de **Maisons-Alfort I** (fig. 13) présente une décroissance thermique de l'ordre de 1 °C fin 2010 et de l'ordre de 2 °C fin 2020. La décroissance est plus amortie comparée à la baisse simulée lors de la Phase 3. Toutefois, en tête de puits, la température est relativement stable entre 72 et 73,5 °C. Le suivi de la température en tête pour les années à venir permettra de confirmer ou non cette baisse.

Le doublet de **Maisons-Alfort 2** ne présente pas de baisse de température sur toute la période (fig. 14).

Le doublet de **Sucy-en-Brie** (fig. 15 et 16) a été transformé en triplet depuis octobre 2008. L'ancien puits producteur a été transformé en injecteur et l'ancien injecteur conservé. Le débit d'injection par injecteur n'étant actuellement pas connu précisément (mesure du débit global avant séparation du fluide injecté), il a donc été supposé identique dans chaque puits pour la simulation en mode triplet. La figure 15 montre la modification de température à l'ancien producteur à partir de fin 2008 qui correspond au passage en mode injecteur.

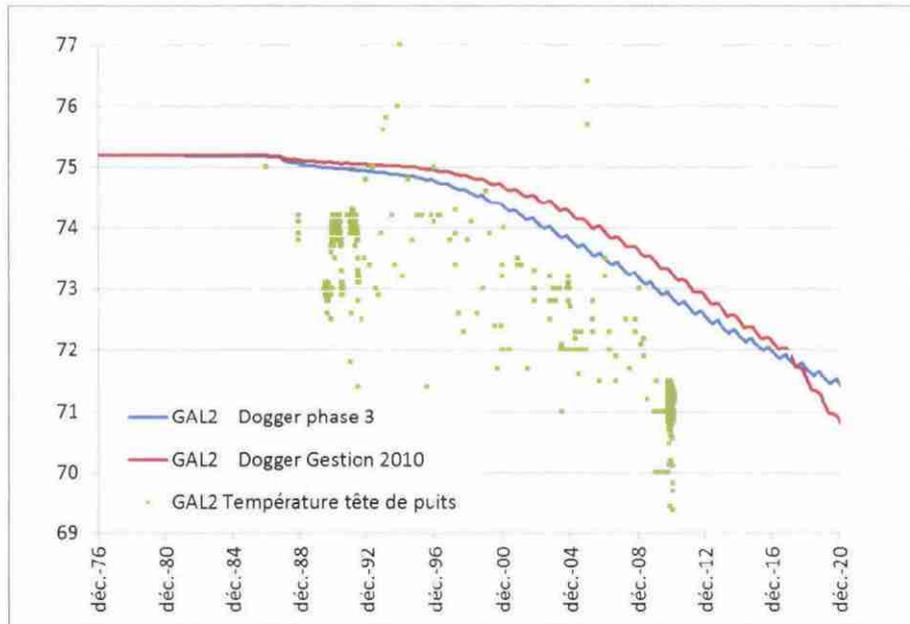


Figure 10 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Alfortville.

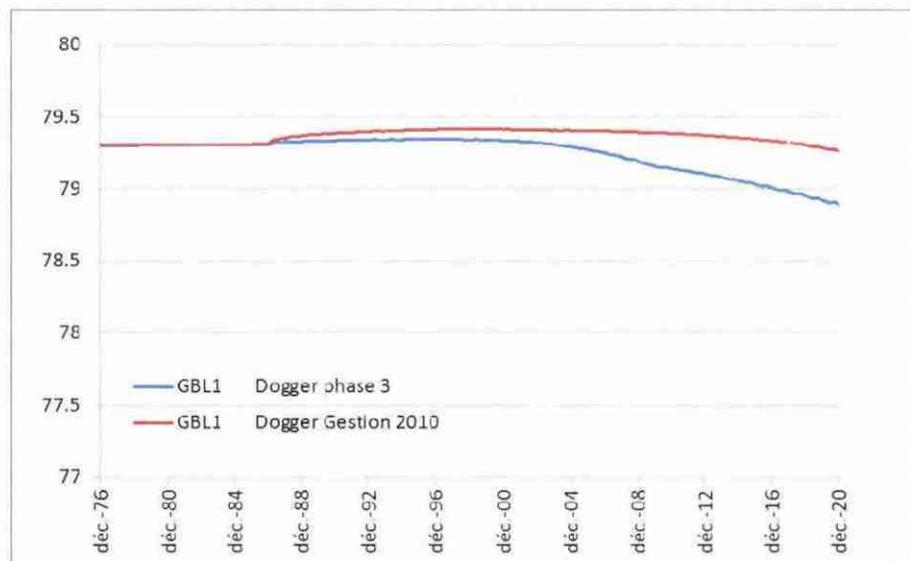


Figure 11 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Bonneuil-sur-Marne.

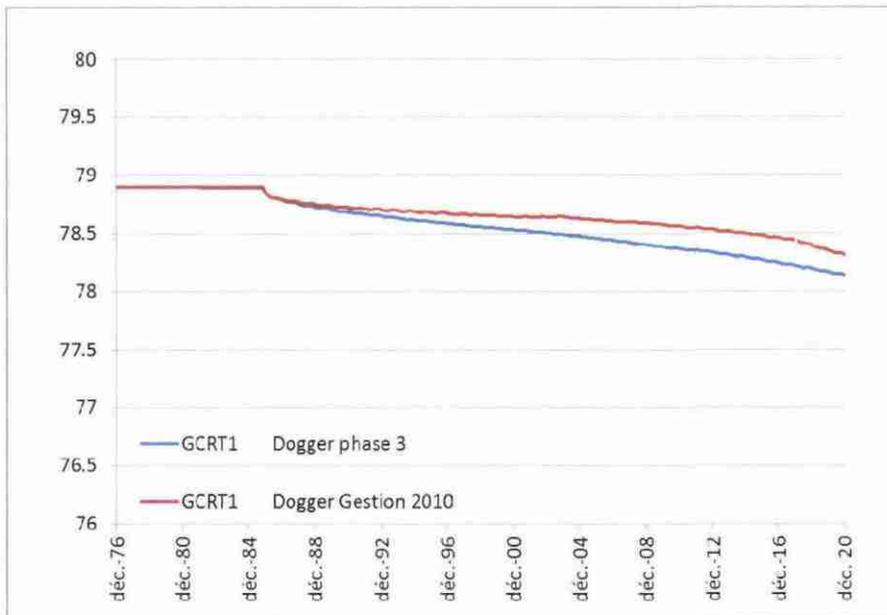


Figure 12 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Créteil.

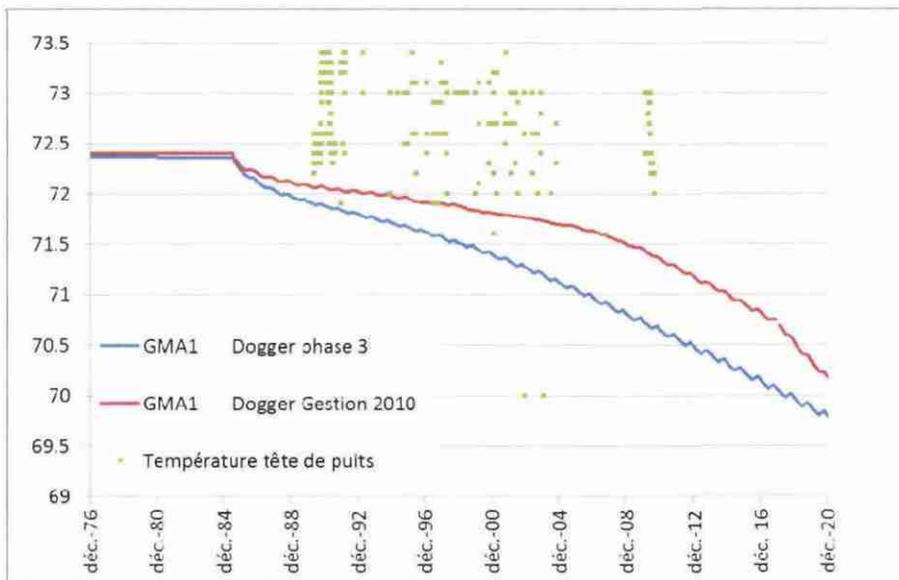


Figure 13 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Maisons-Alfort 1.

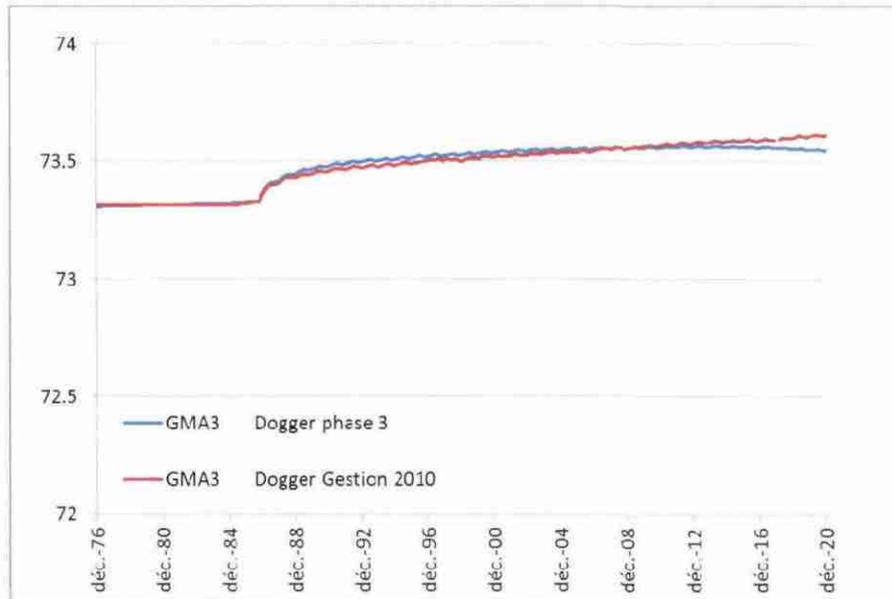


Figure 14 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Maisons-Alfort 2.

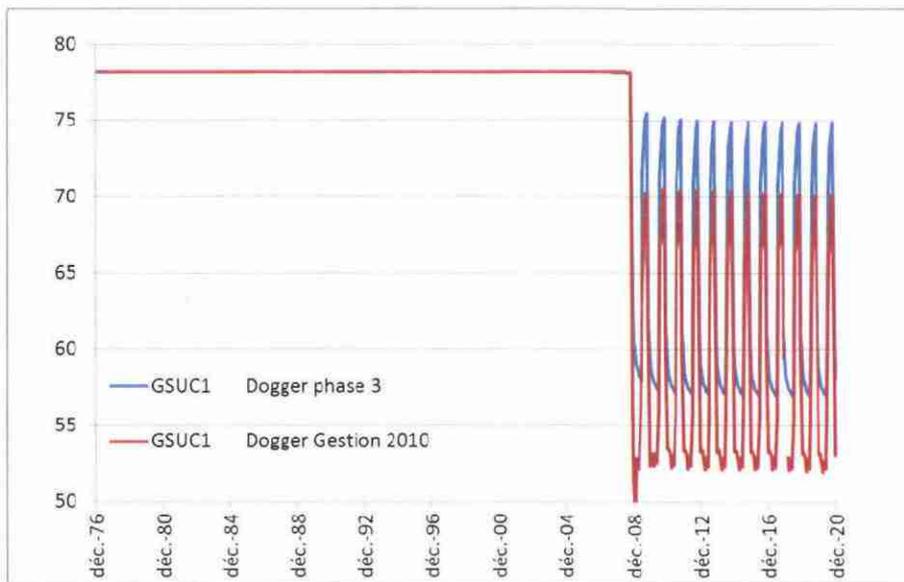


Figure 15 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Sucy-en-Brie (ancien puits, injecteur à partir d'octobre 2008)

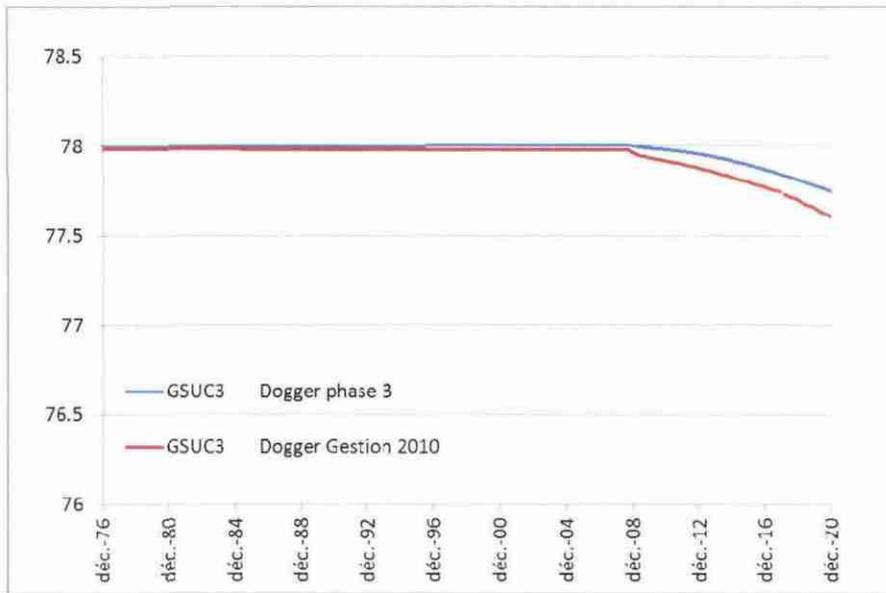


Figure 16 : Évolution de la température (°C) au nouveau puits producteur de Sucy-en-Brie.

## b) Doublets de la zone 2

Les courbes de la température de production du fluide pour chacun des puits producteurs de la zone 2 sont représentées en figures 17 à 21. Les températures calculées avec les chroniques mensuelles sont légèrement supérieures à celles correspondant aux créniaux moyens étés/hivers. **Si on considère une baisse de température de 1 °C comme seuil annonciateur d'un début de refroidissement au puits, aucun des doublets de cette zone ne montrent de refroidissement perceptible jusqu'à 2020.**

Pour le cas de **l'ancien doublet d'Orly-Nouvelet 1**, arrêté depuis juillet 2005, et dont la température en 2020 est de 74 °C pour une température initiale proche de 77 °C, cette poursuite de la chute de température est due à la présence du **nouveau doublet d'Orly-Nouvelet 2** qui a été mis en exploitation en janvier 2008 et dont l'injecteur GORY5 se situe dans la bulle froide créée autour de l'ancien injecteur GORY4. Par ailleurs, le nouveau puits producteur GORY6A dont l'impact dans le réservoir se situe à 320 m au sud-ouest de l'ancien producteur GORY3, présenterait un début de décroissance thermique proche de 1 °C en 2020.

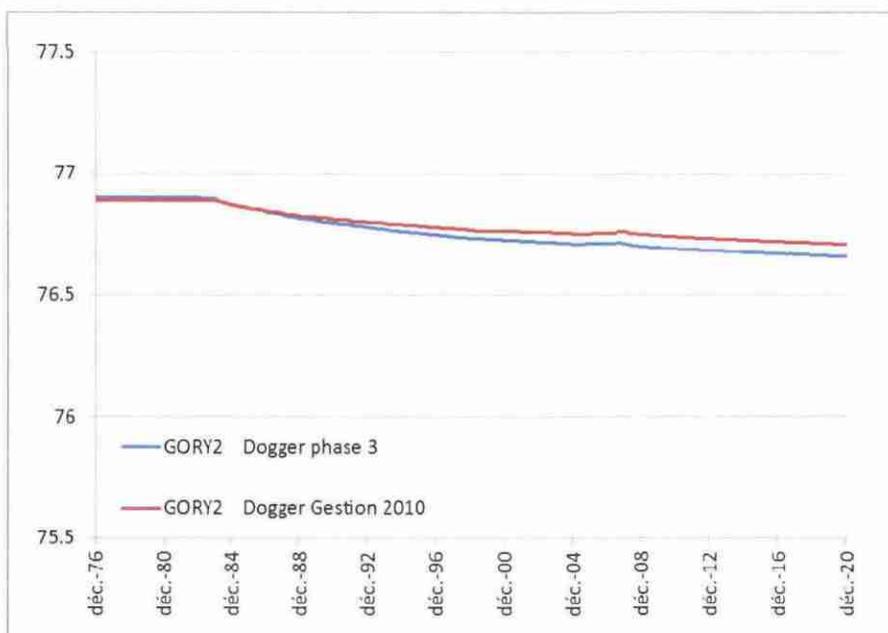


Figure 17 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Gazier.

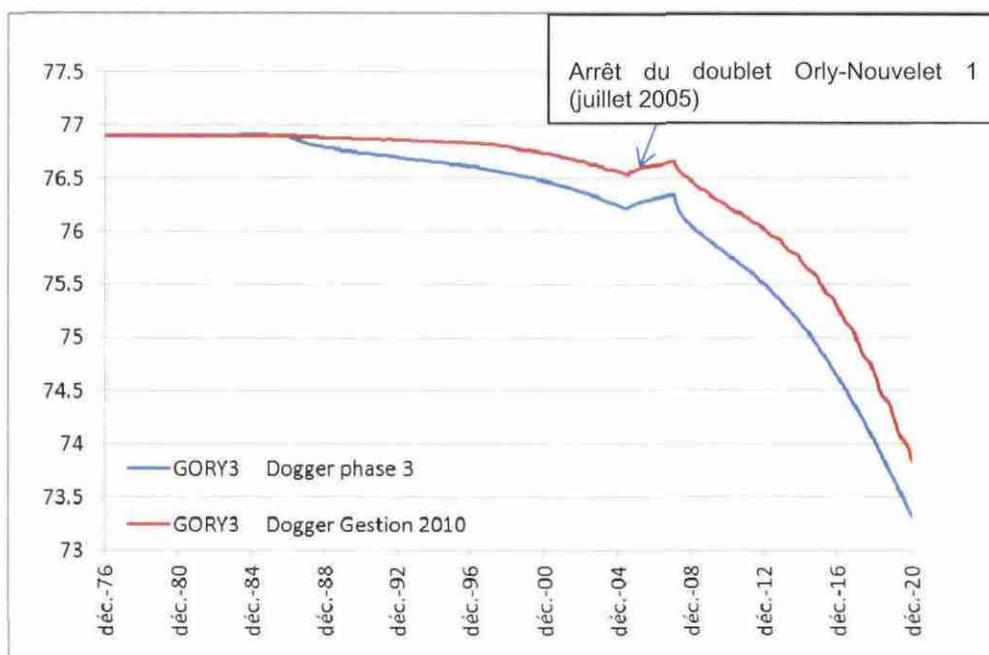


Figure 18 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Nouvelet 1 (ancien doublet).

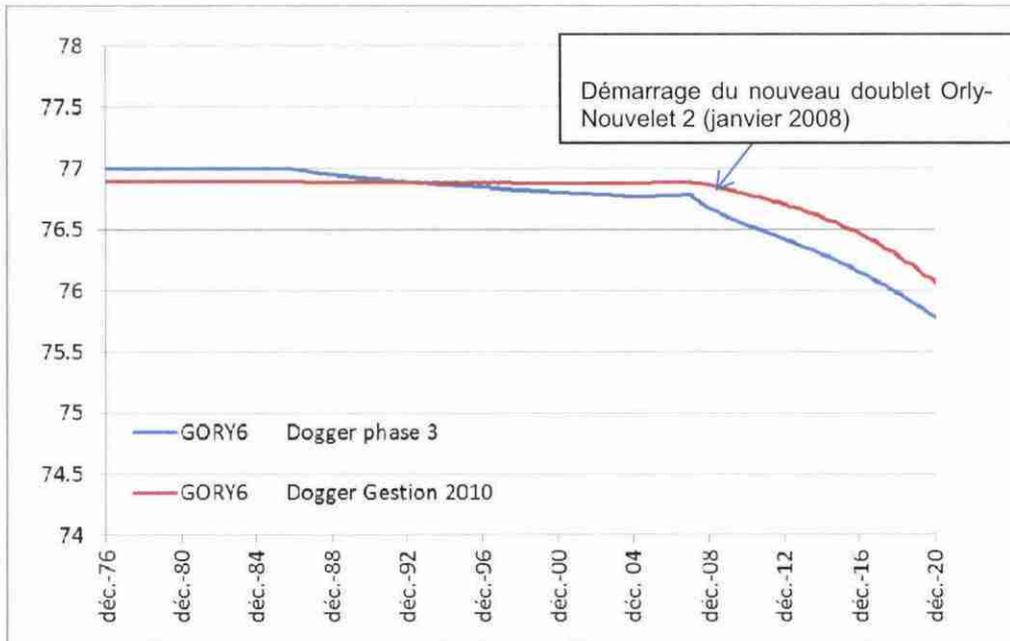


Figure 19 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Orly-Nouvelet 2 (nouveau doublet).

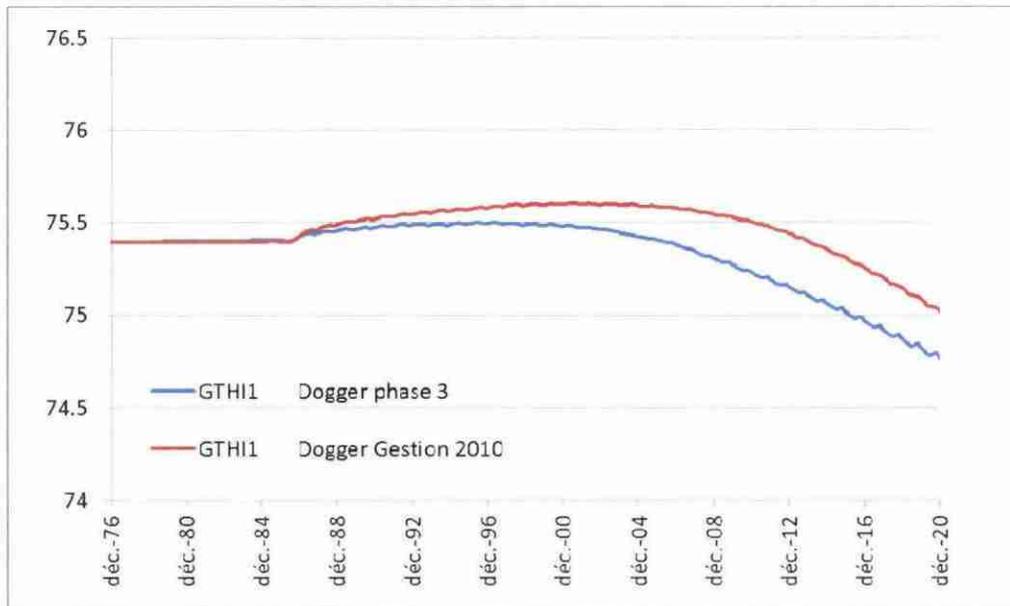


Figure 20 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Thiais.

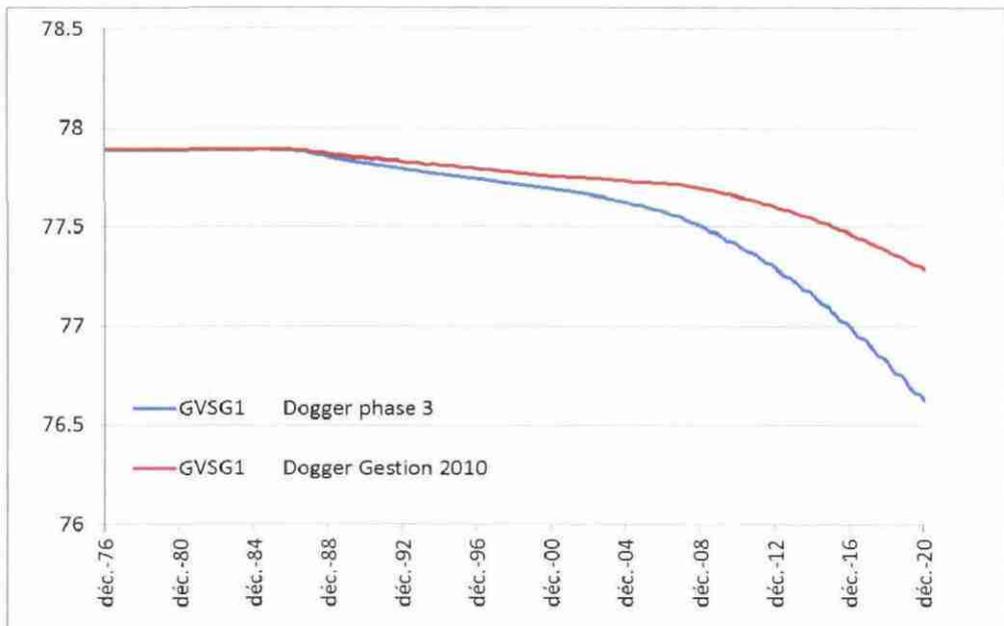


Figure 21 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Villeneuve-Saint-Georges.

### c) Doublets de la zone 3

Les doublets de **Cachan 1 et 2** (cf. fig. 22 et 23), ne présentent pas de baisse significative de leur température jusqu'en 2020.

Le doublet de **Chevilly-Larue** (fig. 24) présente une baisse de la température du réservoir de 1 °C fin 2014 pour la nouvelle simulation alors qu'elle était fin 2005 dans la simulation précédente (Dogger Phase 3). La température en 2020 est de 75,8 °C (perte de 1,4 °C) au lieu de 75 °C (perte de 2,2 °C). Ainsi, la température calculée du fluide présente une décroissance beaucoup plus lente. La température en tête de puits producteur est stable avec une singularité en 2010 où la température mesurée est plus forte que les années précédentes. La baisse simulée par le modèle en ce doublet sera à confirmer à plus long terme.

Le doublet de **Fresnes** (fig. 25) présente une baisse de température de 1 °C en 2017 pour la nouvelle simulation alors que cette dernière était fin 2005 dans la simulation précédente. La température simulée en 2020 est de 73,2 °C (perte de 1,1 °C) au lieu de 72,4 °C (perte de 1,9 °C). La baisse de température du fluide suit également une évolution plus lente. La température mesurée en tête de puits est très erratique et ne permet pas de conclure sur son évolution actuelle.

Le doublet de **l'Hay-Les-Roses** (fig. 26) présente une baisse de température de 1 °C en 2013 pour la nouvelle simulation alors que cette dernière était en 2006 dans la simulation précédente. La température en 2020 est de 72,5 °C (perte de 1,6 °C) au lieu de 70,9 °C (perte de 3,2 °C). Ce doublet montre une décroissance thermique beaucoup plus amortie avec les nouvelles chroniques d'exploitation. La température mesurée en tête de puits semblerait confirmer une tendance à la baisse avec une

température du fluide un peu plus faible que les années précédentes (suivi par une GTC). Cette baisse est à confirmer sur le plus long terme.

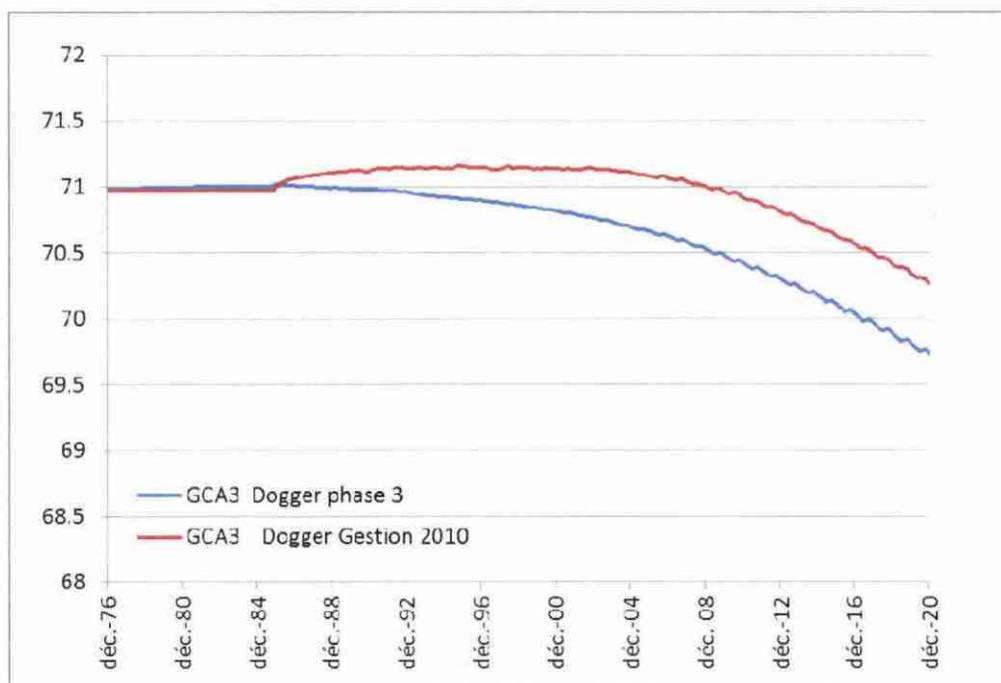


Figure 22 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Cachan 1.

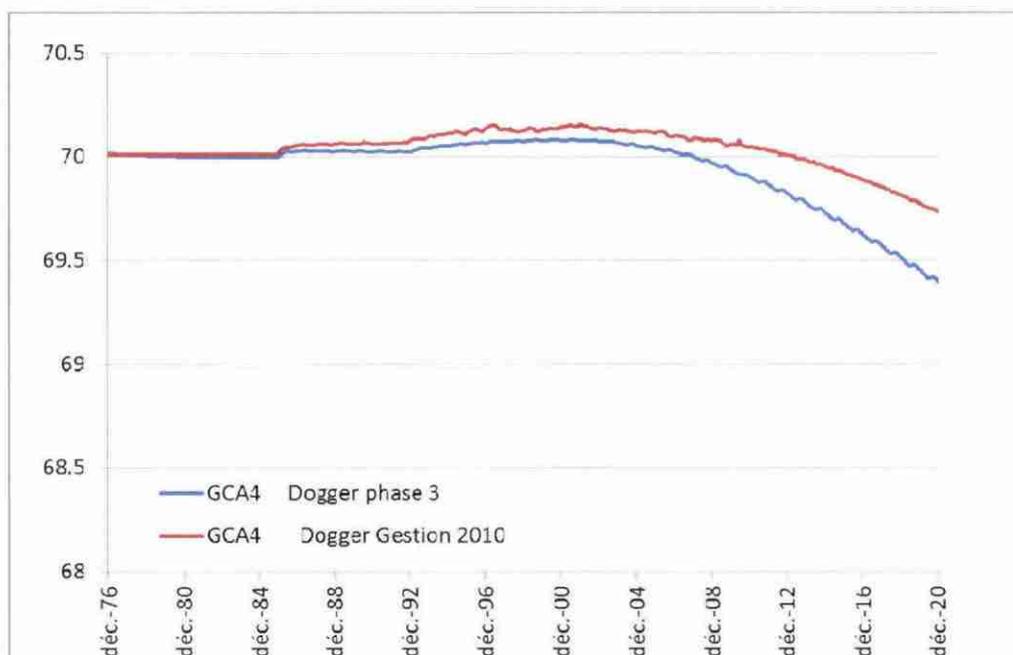


Figure 23 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Cachan 2.

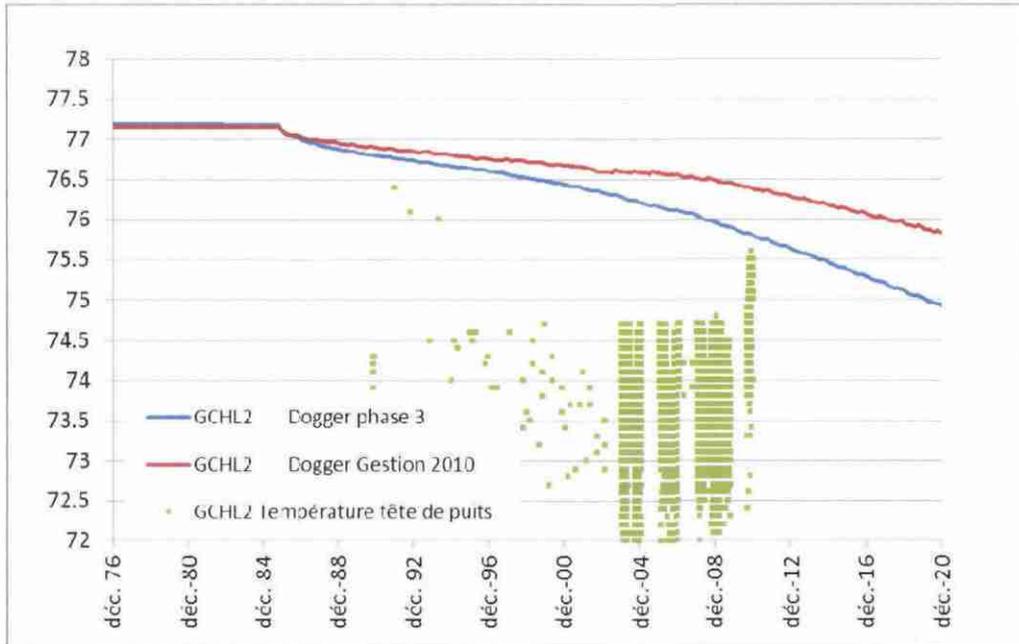


Figure 24 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Chevilly-Larue.

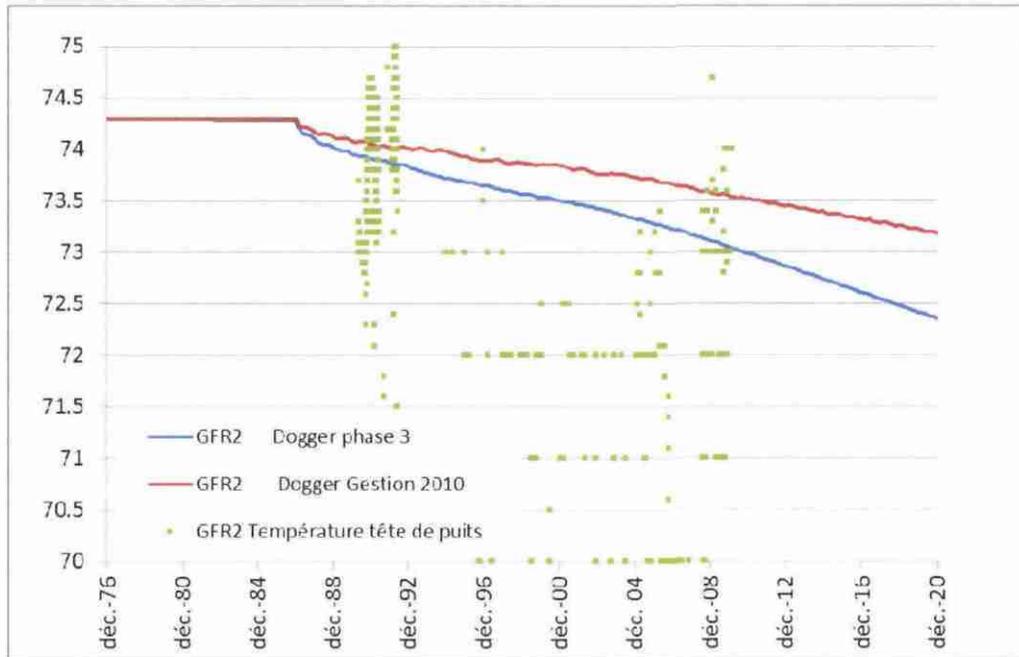


Figure 25 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Fresnes.

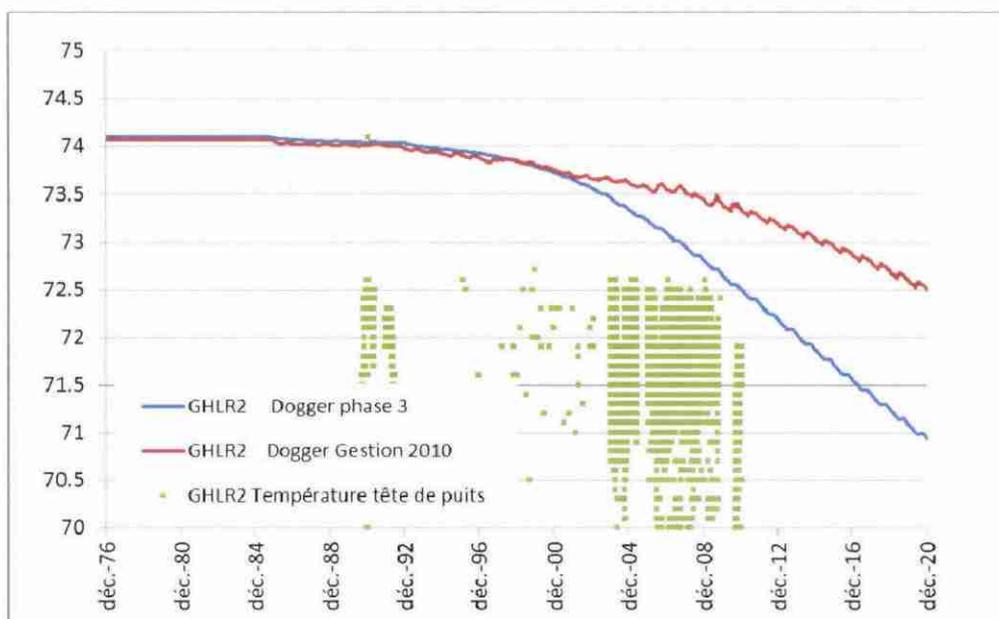


Figure 26 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de l'Hay-Les-Roses.

#### d) Doublets de la zone 4

La température du réservoir au droit des puits producteurs de **Villeneuve-Saint-Georges**, **Montgeron** et **Épinay-sous-Sénart** reste stable jusqu'en 2020.

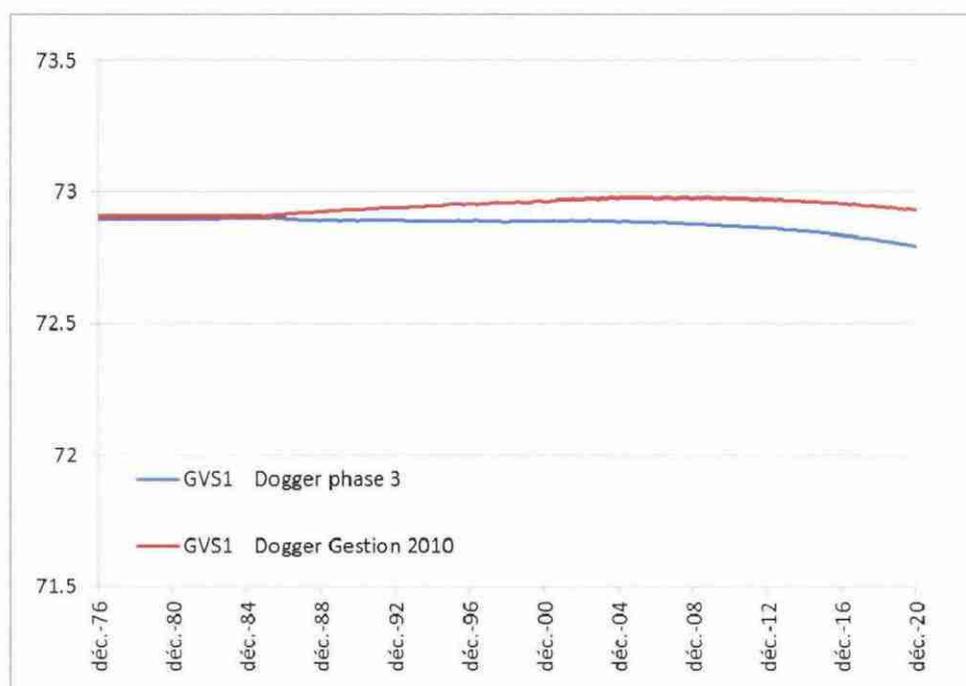


Figure 27 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Villeneuve-Saint-Georges.

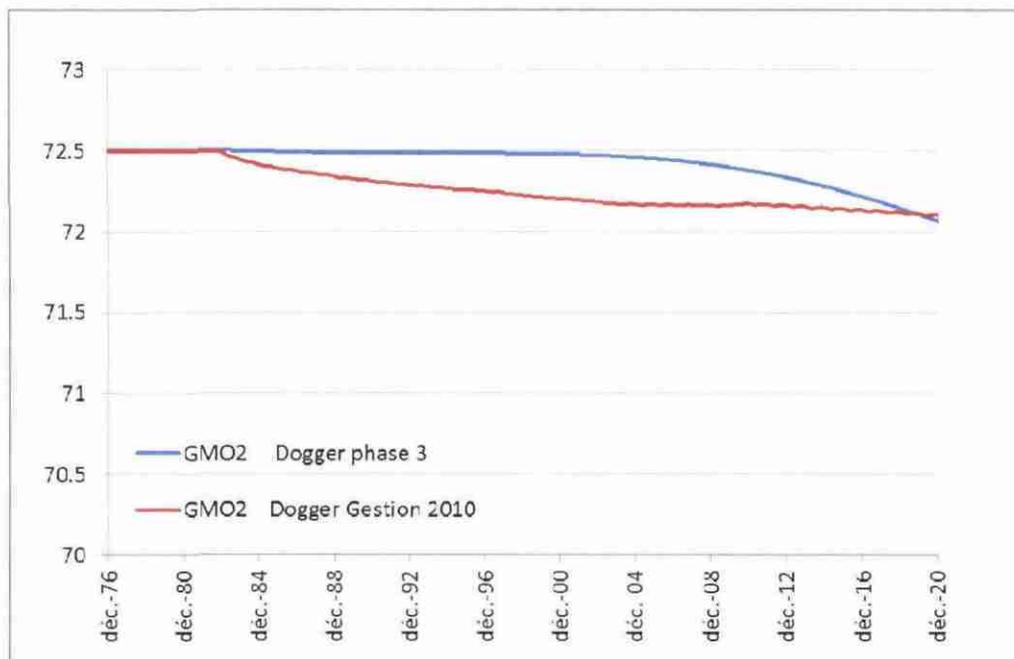


Figure 28 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Montgeron.

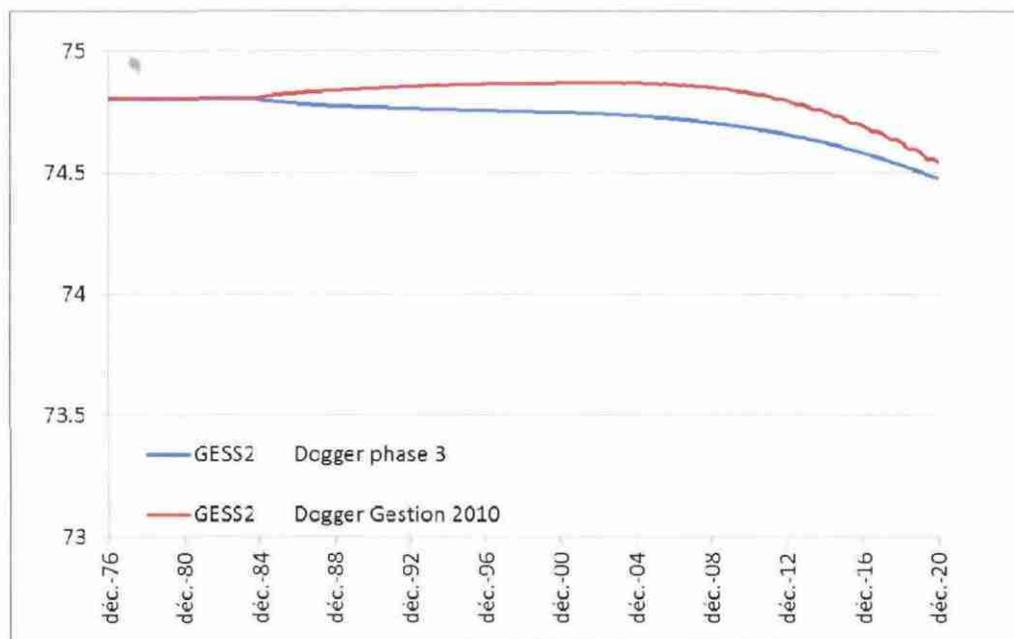


Figure 29 : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Épinay-sous-Sénart.

### e) Doublets de la zone 5

Cette zone se situe à cheval sur les départements du Val-de-Marne, de la Seine-Saint Denis et de la Seine-et-Marne et comprend les doublets de Champigny-sur-Marne, Chelles et le futur doublet de Val-Maubuée (en cours de réalisation).

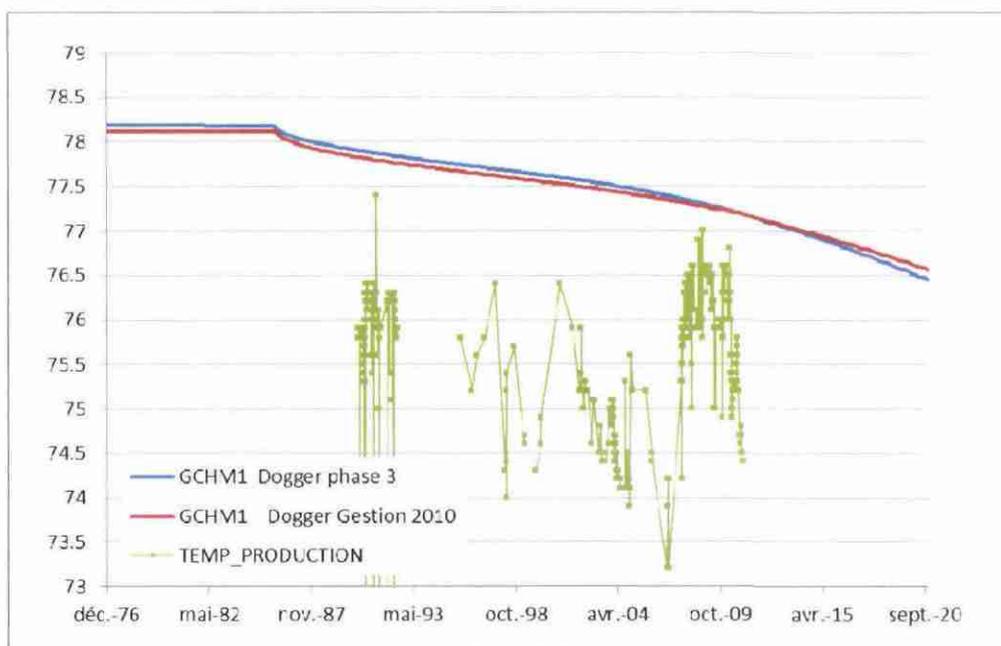


Figure 30 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Champigny-sur-Marne.

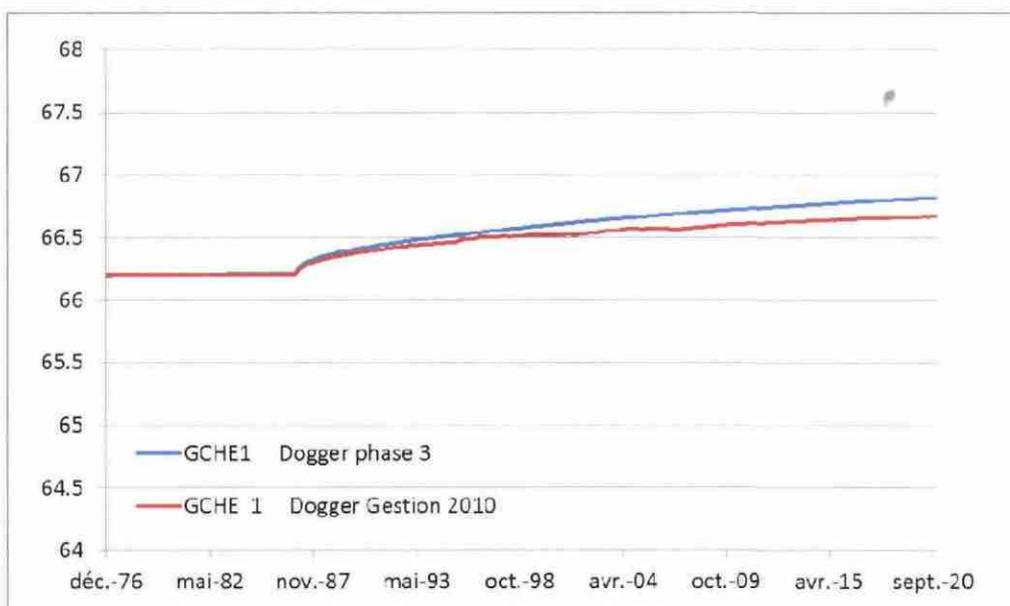


Figure 31 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Chelles.

La température calculée au droit du puits producteur de **Champigny-sur-Marne** présente une baisse de l'ordre de 1 °C courant 2012 et de 1.5 °C fin 2020. La température mesurée en tête de puits pendant la durée d'exploitation du doublet est très erratique avec des variations de 3 °C ou plus suivant les périodes. Il est donc très difficile d'interpréter une baisse de température de l'ordre de 1 °C à partir de la mesure en tête de puits.

La température au puits producteur de **Chelles** est similaire à celle calculée dans la Phase 3 du Dogger avec une légère remontée lors du démarrage de l'exploitation, du fait du mélange d'une eau plus chaude autour du puits injecteur par rapport au puits producteur.

#### f) Doublets de la zone 6

Les doublets actifs de la zone 6 sont ceux de **La Courneuve Nord** et **Sud**.

La décroissance thermique au puits producteur de **La Courneuve Nord** est plus tardive avec les nouvelles chroniques. Elle est de 1 °C courant 2020 (au lieu de 2016 pour la Phase 3 du Dogger). Ce doublet devrait être réhabilité en triplet d'ici 2012. La température en tête de puits est très erratique avec des lacunes entre 2004 et 2010. Elle serait néanmoins inférieure de 2 à 3 °C (dérive du capteur ou refroidissement réel du fluide ?)

La décroissance thermique au puits producteur de **La Courneuve Sud** présente une rupture de pente à partir de 2002 et en 2009, liée à une diminution importante du débit d'exploitation. Ainsi en extrapolant ce débit à 2020, la baisse de température reste inférieure à 1 °C.

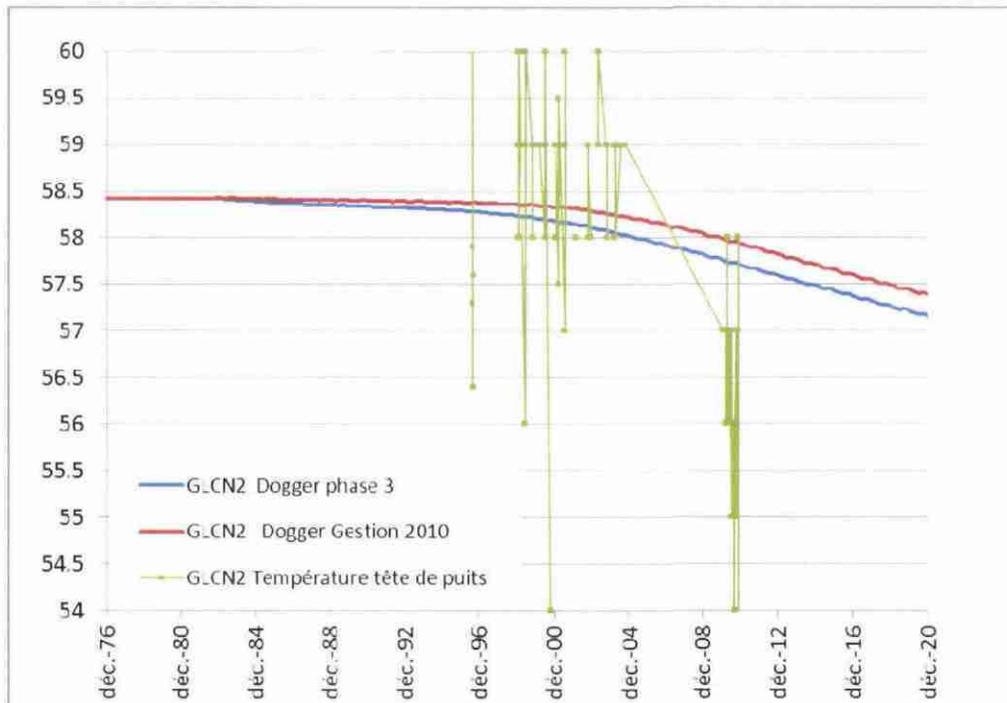


Figure 32 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de La Courneuve Nord.

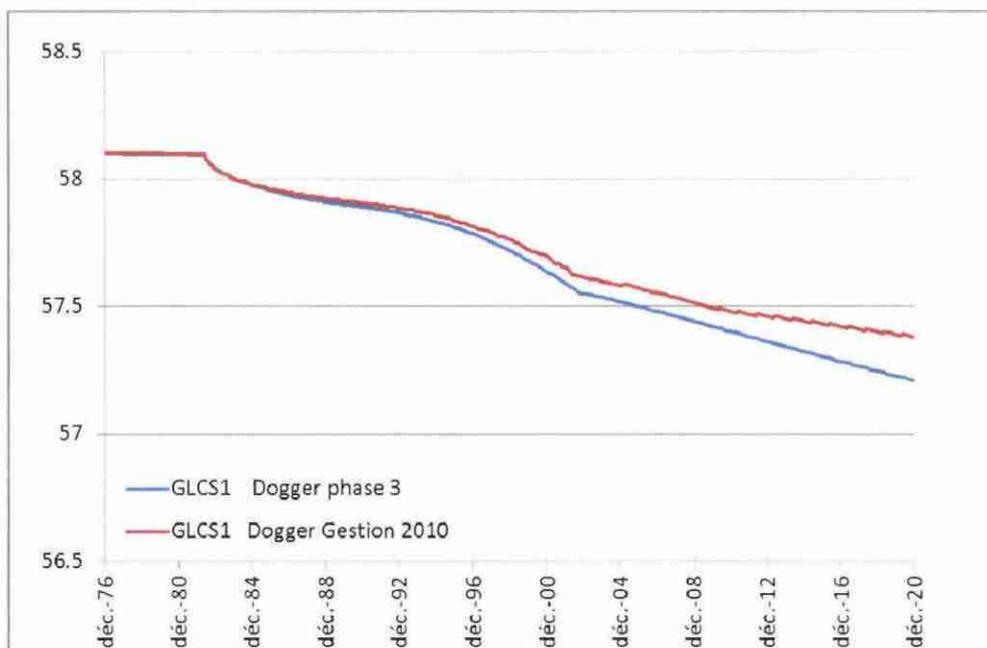


Figure 33 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de La Courneuve Sud.

### g) Doublets de la zone 7

Les doublets actifs de la zone 7 sont ceux de **Clichy-sous-Bois**, **Blanc-Mesnil-Nord** et **Tremblay-en-France**. Aucun ne montre de baisse perceptible de la température du réservoir au droit des puits producteurs.

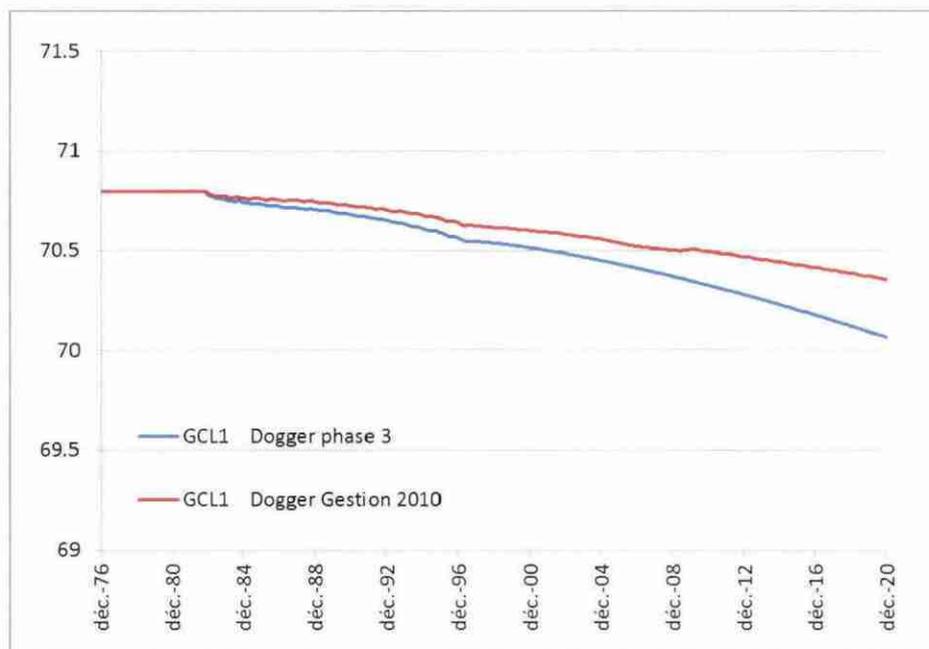


Figure 34 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Clichy-sous-Bois.

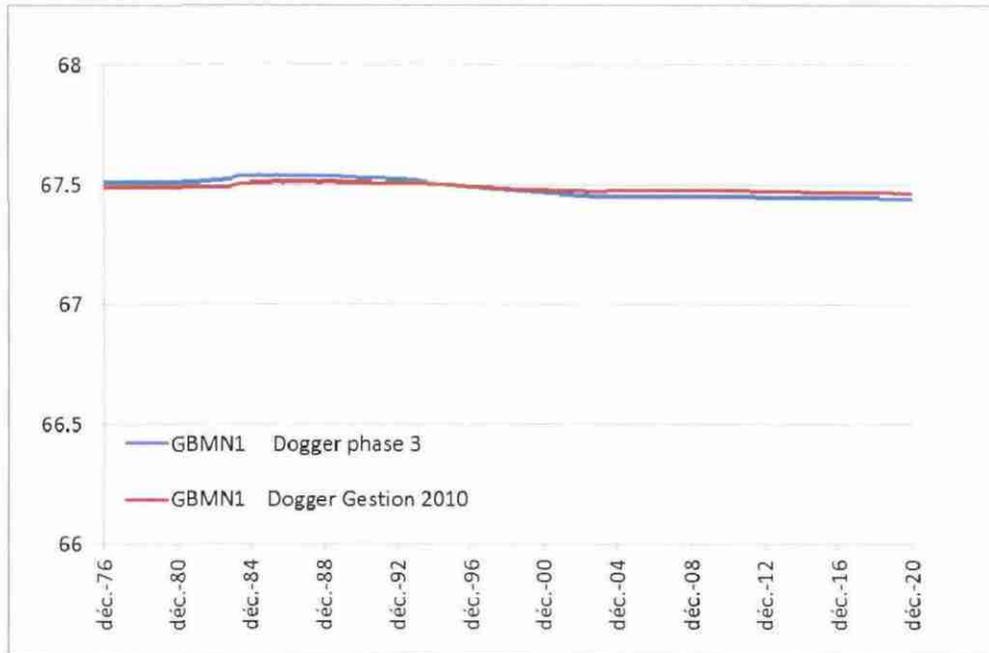


Figure 35 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Blanc-Mesnil Nord.

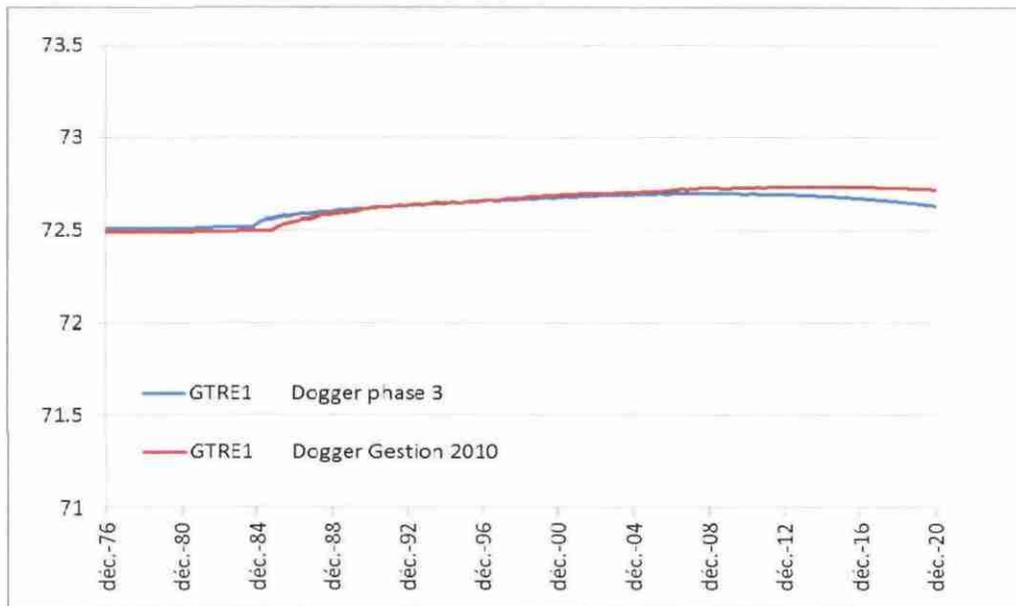


Figure 36 : Évolution de la température (°C) au puits producteur de Tremblay-en-France.

### 3.2.3. Cartes des bulles froides actualisées à fin 2010 et 2020

Les figures 37 à 50 présentent les cartes des impacts thermiques à fin 2010 et 2020, à la profondeur du réservoir pour l'ensemble des doublets du périmètre d'étude du Val-de-Marne et de la Seine-St-Denis ainsi qu'un agrandissement pour chacune des 7 zones étudiées.

Pour les doublets de la **zone 1** (figures 39 et 40), on peut voir notamment l'étendue de la bulle froide autour de l'injecteur d'Alfortville (GAL1) qui a atteint le puits producteur (GAL2), ainsi que celle de Maisons-Alfort 1 (GMA2) qui se rapproche également de son producteur (GMA1). La bulle de Maisons-Alfort 2 (GMA4) est déformée dans les directions des trois producteurs avoisinants (Maisons-Alfort 1 et 2 et Alfortville). Les bulles des doublets de Bonneuil-sur-Marne (GBL2) et Créteil (GCRT2), ainsi que les deux bulles froides du triplet de Sucy-en-Brie (GSUC1 et GSUC2) sont plus petites et encore éloignées de leurs producteurs respectifs.

Pour les doublets de la **zone 2** (figures 41 et 42), la bulle froide de Thiais (GTHI2) se déplace dans la direction de son producteur mais également vers le producteur du nouveau doublet Orly-Nouvelet 2 (GORY6A en service depuis janvier 2008). La bulle froide créée par le nouvel injecteur d'Orly-Nouvelet 2 (GORY5) fusionne avec l'ancienne bulle froide (GORY4). La bulle d'Orly-Gazier (GORY1) se déplace vers le producteur de Thiais dont le débit d'exploitation est en moyenne 2 fois plus grand. La bulle froide d'Orly-Gazier a été modélisée jusqu'en 2020, néanmoins il est prévu que le doublet soit arrêté fin 2011. En fonction de l'évolution de la situation, la modélisation de cette zone géographique sera reprise.

Pour les doublets de la **zone 3** (figure 43), la bulle froide de l'Hay-Les-Roses (GHLR1) se déplace vers son producteur mais aussi vers le producteur de Cachan 2 (GCA4). De même, la bulle de Chevilly-Larue (GCHL1) se déplace vers son producteur mais aussi vers celui de l'Hay-Les-Roses. Ainsi, le début de refroidissement calculé au puits producteur de l'Hay-Les-Roses est dû pour partie au recyclage des eaux froides de son puits injecteur mais également au recyclage des eaux froides de l'injecteur de Chevilly-Larue. La bulle de Fresnes (GFR1) se rapproche de son producteur fin 2020. Par ailleurs, sur la simulation à fin 2020, la bulle autour de l'injecteur d'Orly-ADP (GADP2) a été calculée à partir des données de débit et température de début 2011 et extrapolées jusqu'à 2020.

Pour les doublets de la **zone 4** (figure 44), les bulles des doublets de Vigneux-sur-Seine (GVS2), Montgeron (GMO1) et Épinay-sous-Sénart (GESS1) sont encore relativement éloignées de leurs producteurs respectifs.

Pour les doublets de la **zone 5** (figures 45 et 46), la bulle de Champigny-sur-Marne (GCHM2) se rapproche de son puits producteur. La bulle de Chelles (GCHE2) est quant à elle moins étendue et encore éloignée du producteur. La simulation de 2020 montre également la bulle du doublet Val-Maubuée calculée dans l'hypothèse d'une mise en service à partir de 2012 et avec les débits et températures moyens envisagés

Pour les doublets de la **zone 6** (figures 47 et 48) qui se situent dans la partie la plus froide du réservoir (température originelle entre 55 et 60°C), les bulles des doublets actifs sont celles de La Courneuve Nord (GLCN1) et Sud (GLCS2) à fin 2010 auxquelles s'ajoute celle de Paris-Nord-Est (GPNE2) à partir de 2012. La bulle froide autour de l'injecteur de Villeneuve-la-Garenne est une bulle rémanente en régression progressive depuis l'arrêt du doublet en 1994. C'est le plus ancien doublet au Dogger après Melun l'Almont.

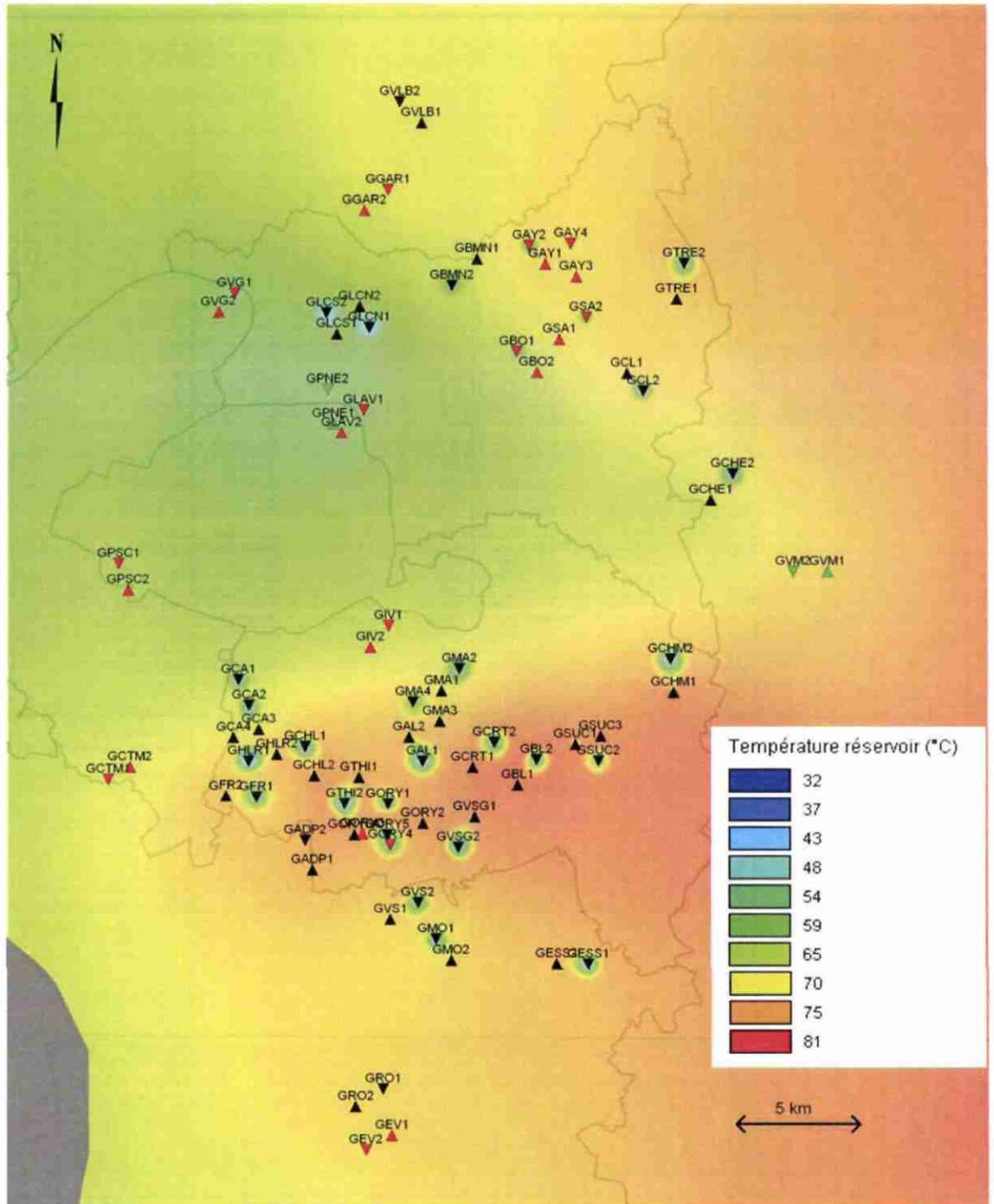


Figure 37 : Impacts thermiques simulés dans l'aquifère du Dogger à fin 2010.

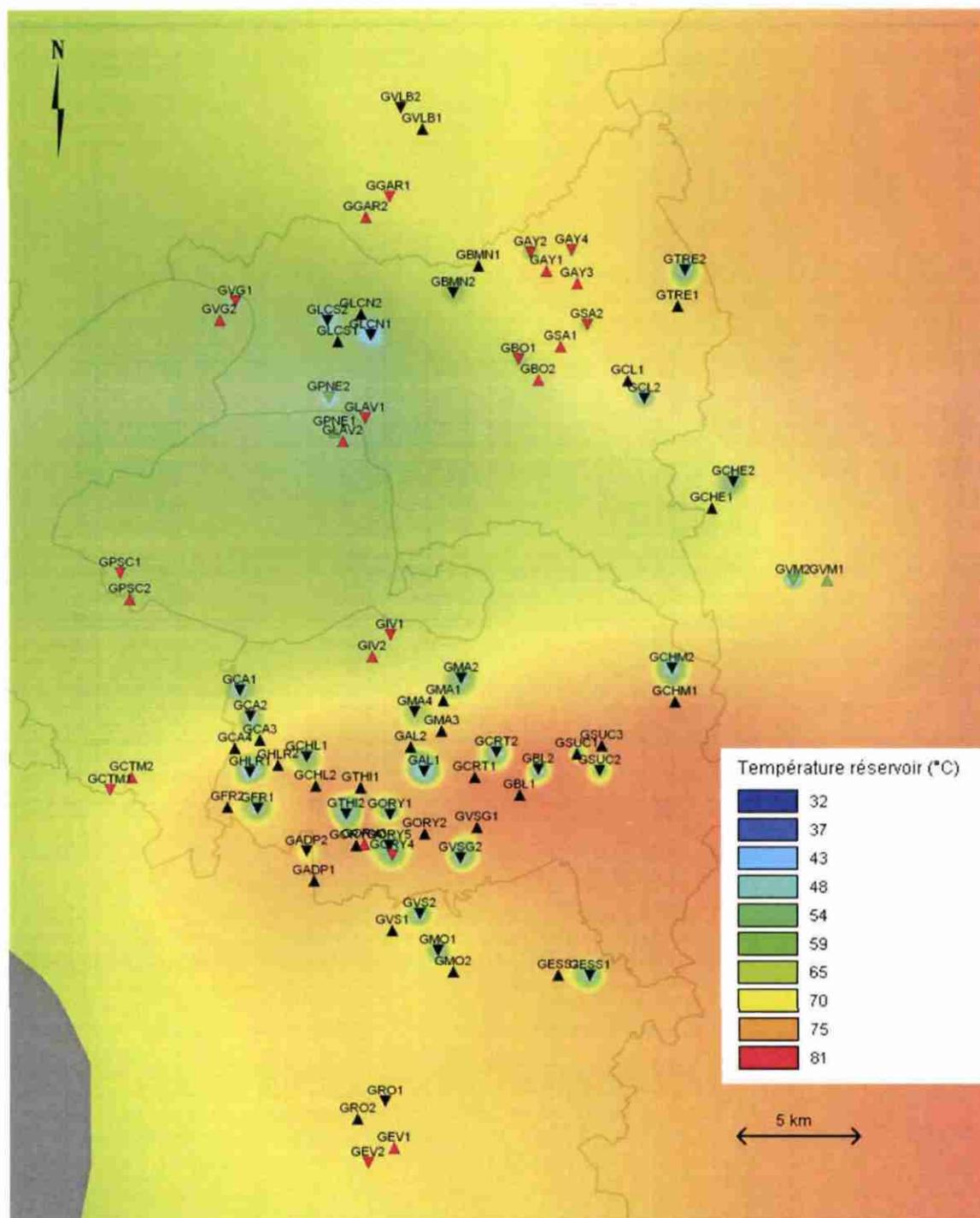


Figure 38 : Impacts thermiques simulés dans l'aquifère du Dogger à fin 2020.

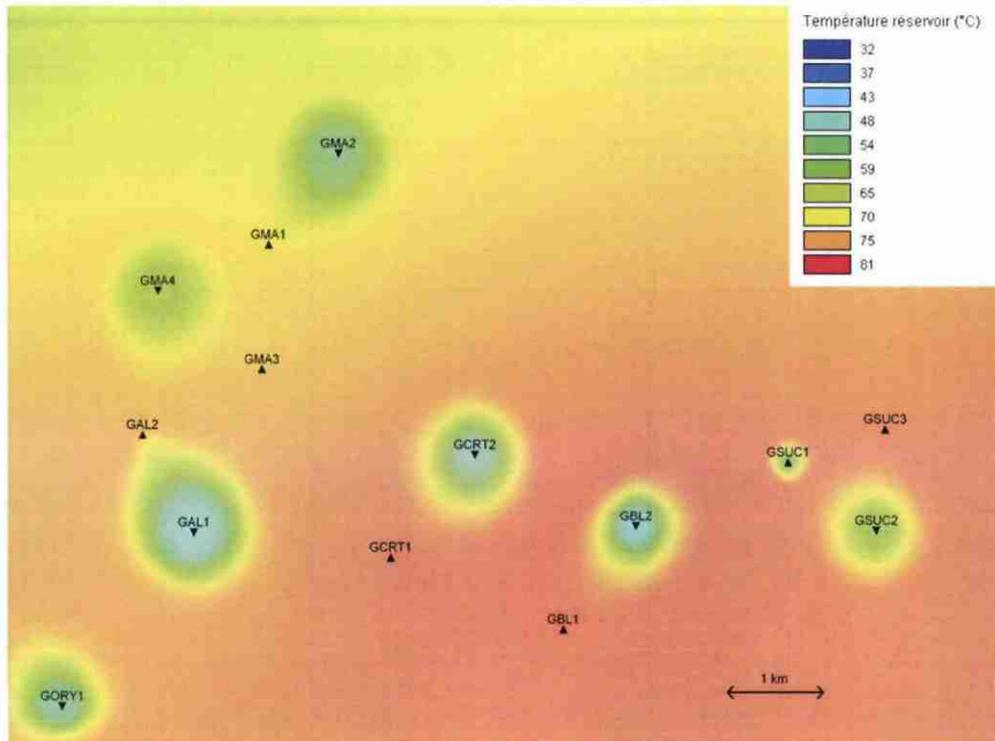


Figure 39 : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2010).

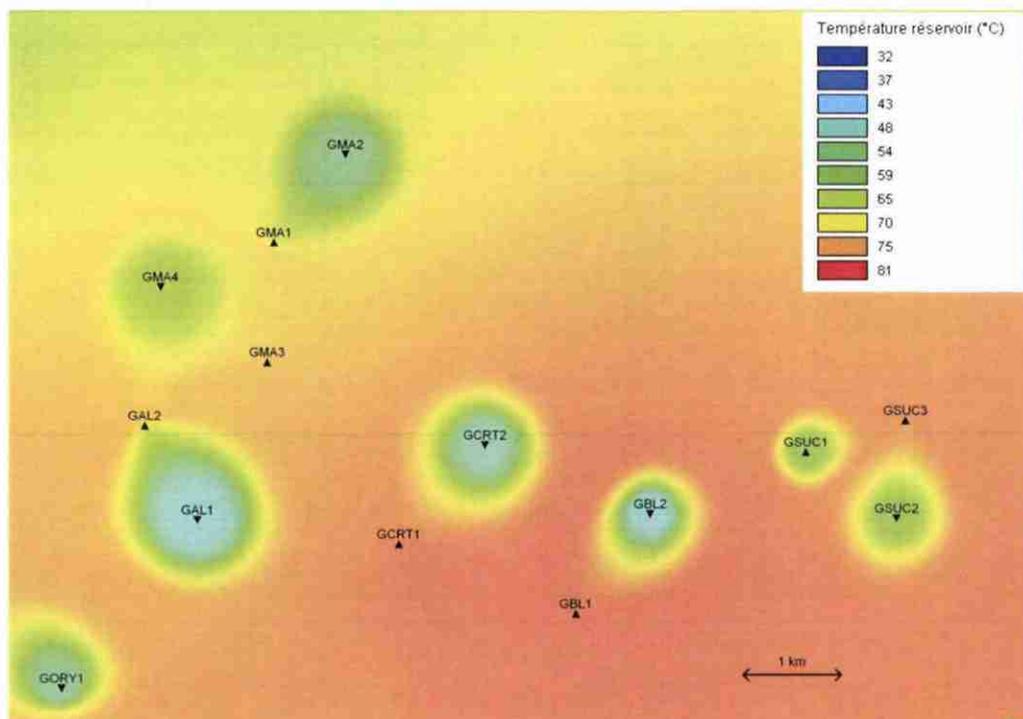


Figure 40 : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2020).

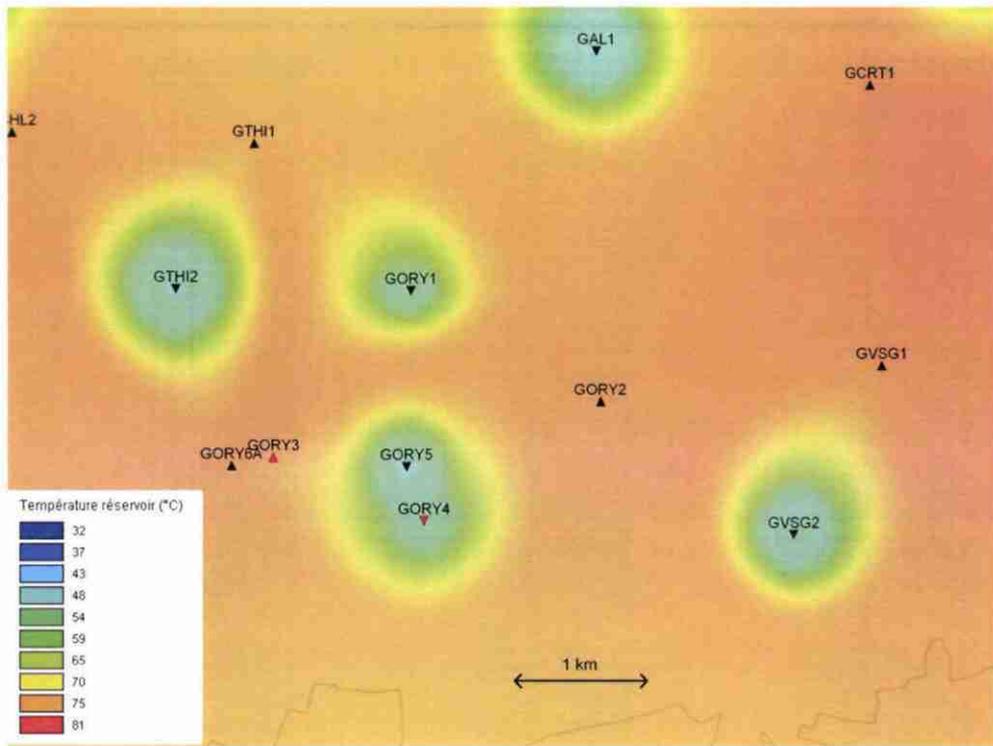


Figure 41 : Impacts thermiques des doublets de la zone 2 (fin 2010).

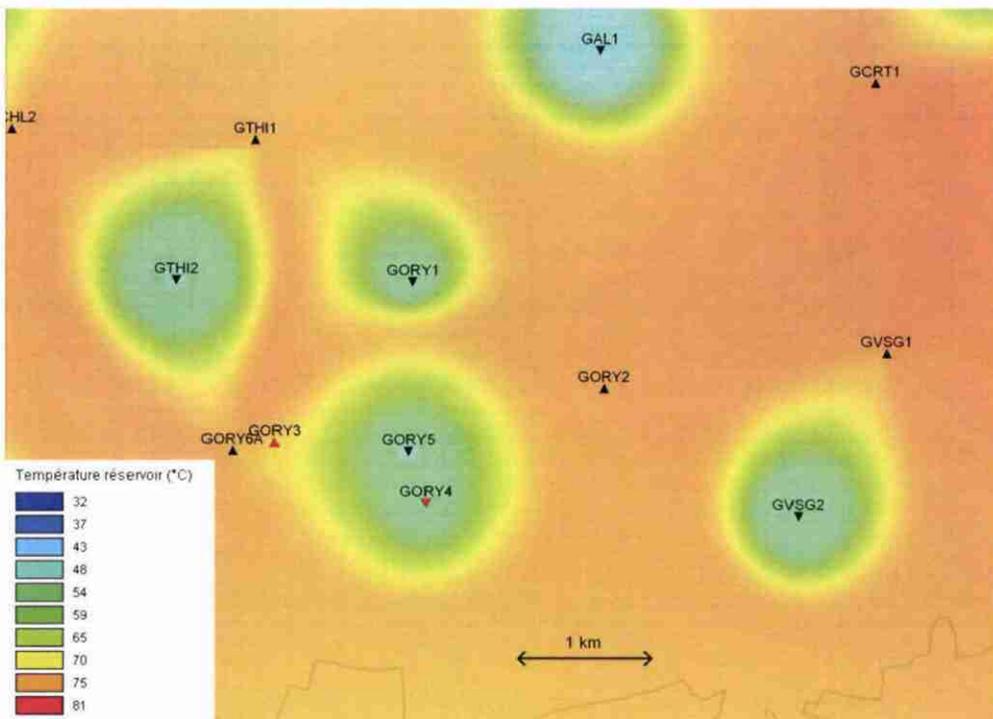


Figure 42 : Impacts thermiques des doublets de la zone 2 (fin 2020).

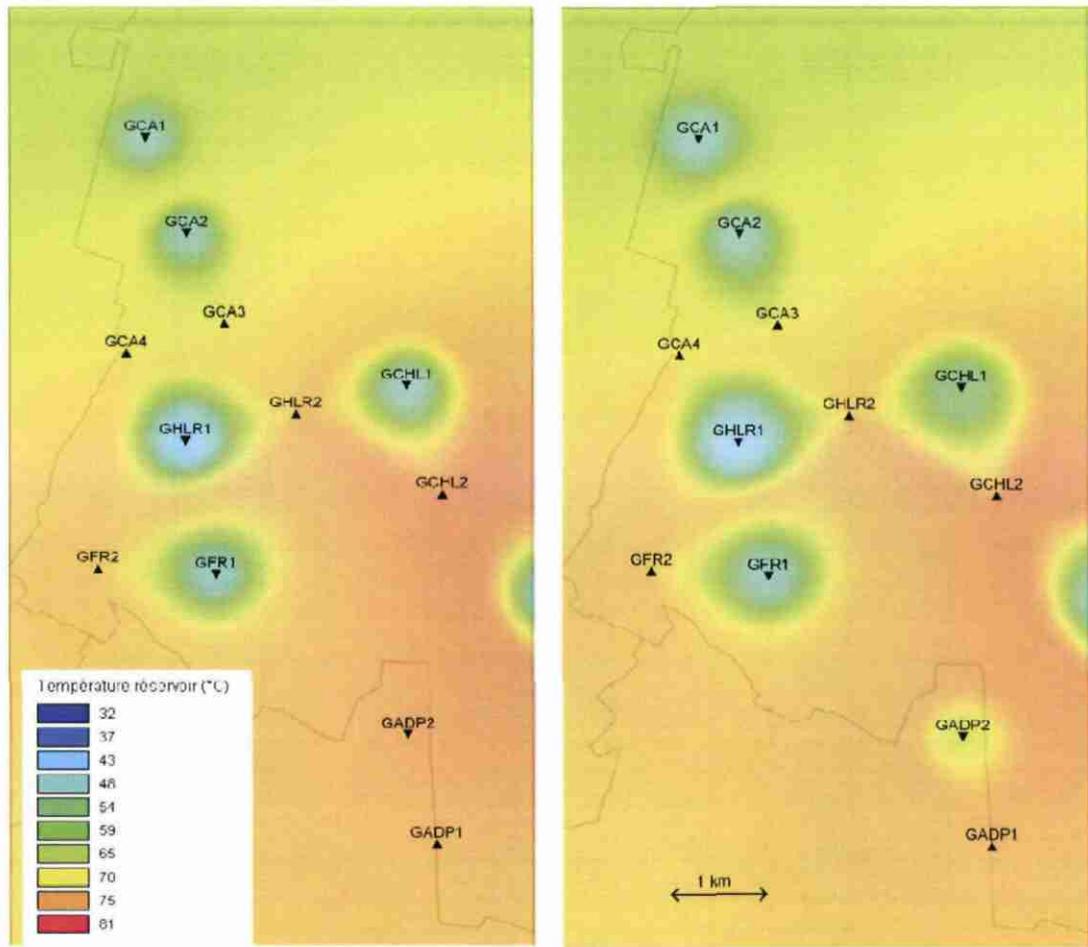


Figure 43 : Impacts thermiques des doublets de la zone 3 (gauche : fin 2010, droite : fin 2020).

Pour les doublets de la **zone 7** (figures 49 et 50), seuls les doublets de Blanc-Mesnil-Nord (GBMN2), Clichy-sous-Bois (GCL2) et Tremblay-en-France (GTRE2) sont encore en activité et voient leurs bulles s'étendre progressivement. Ce qui n'est plus le cas des bulles des doublets arrêtés (Aulnay-sous-Bois, Sevrans et Bondy) qui sont en régression progressive (réchauffement conductif par le flux naturel). La bulle de Clichy-sous-Bois se rapproche de son producteur dans la simulation à 2020. Les autres bulles (Tremblay-en-France et Blanc-Mesnil-Nord) sont encore éloignées de leurs producteurs respectifs.

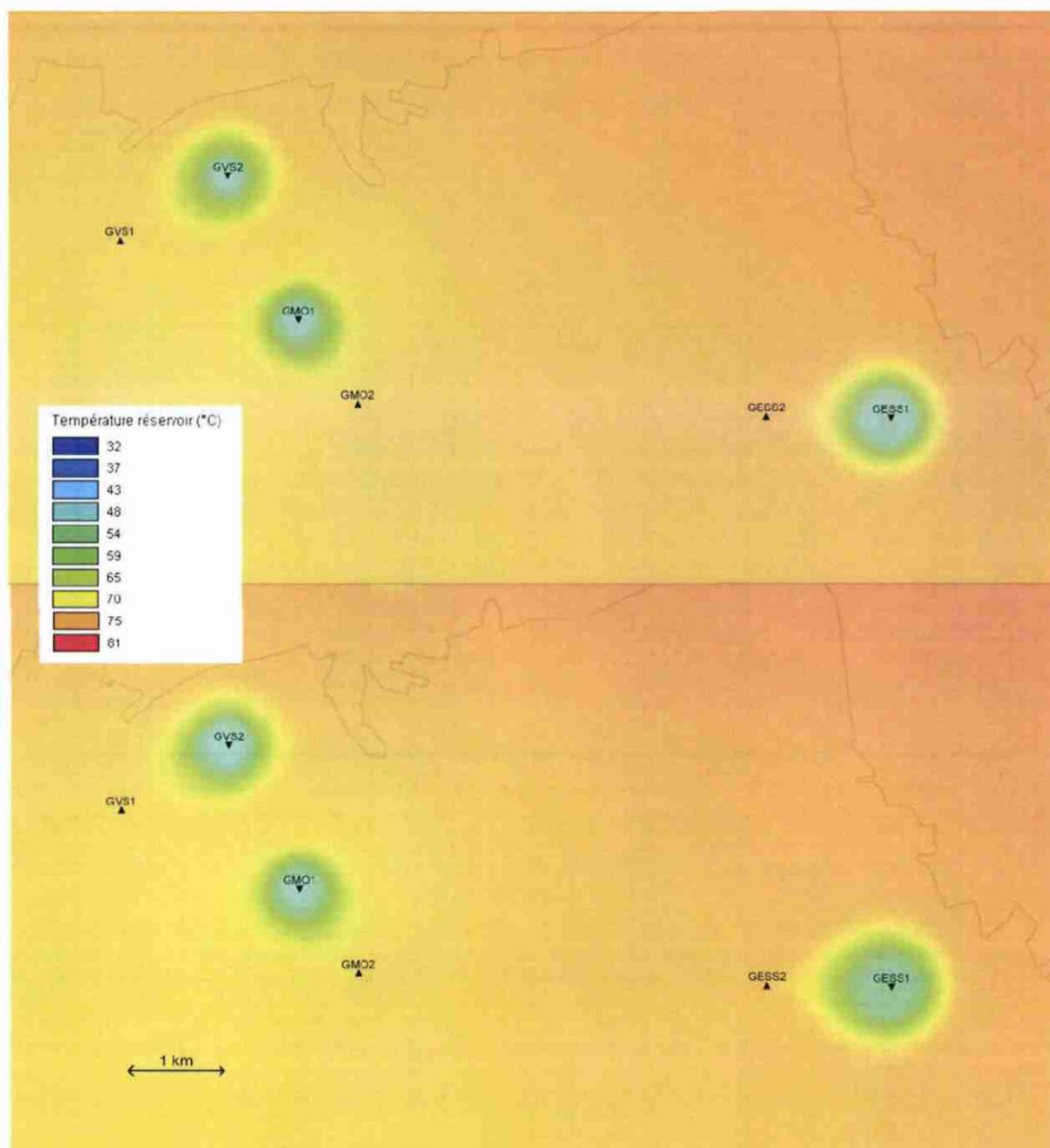


Figure 44 : Impacts thermiques des doublets de la zone 4 (haut : fin 2010, bas : fin 2020).

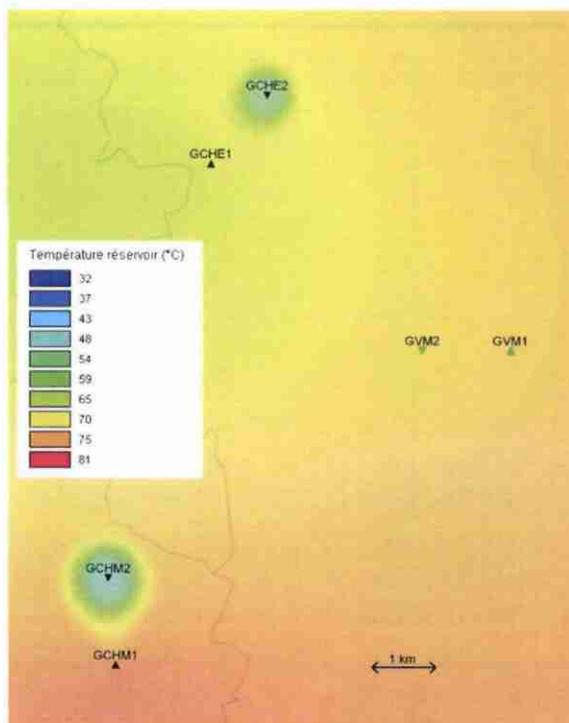


Figure 45 : Impacts thermiques des doublets de la zone 5 (fin 2010).

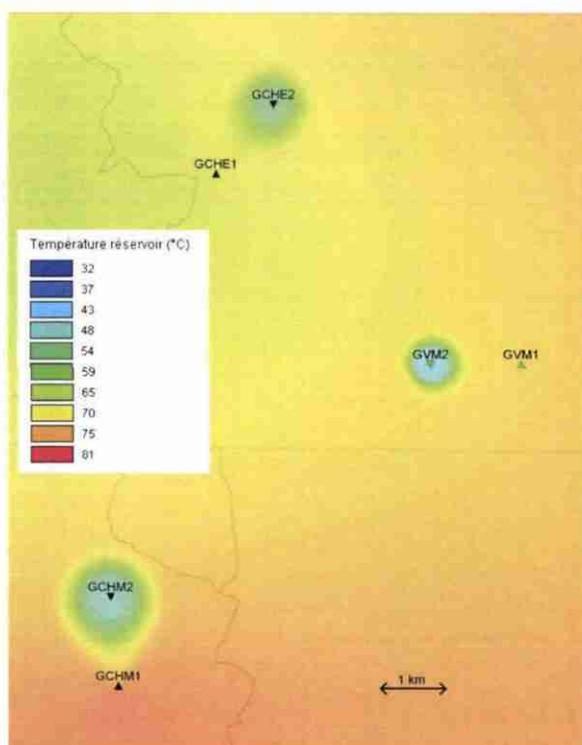


Figure 46 : Impacts thermiques des doublets de la zone 5 (fin 2020).

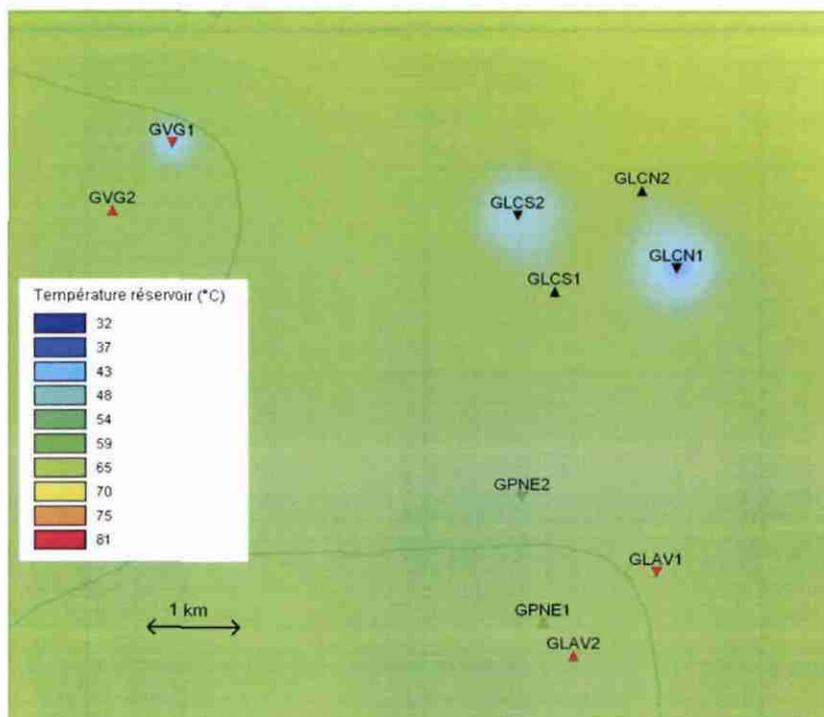


Figure 47 : Impacts thermiques des doublets de la zone 6 (fin 2010).

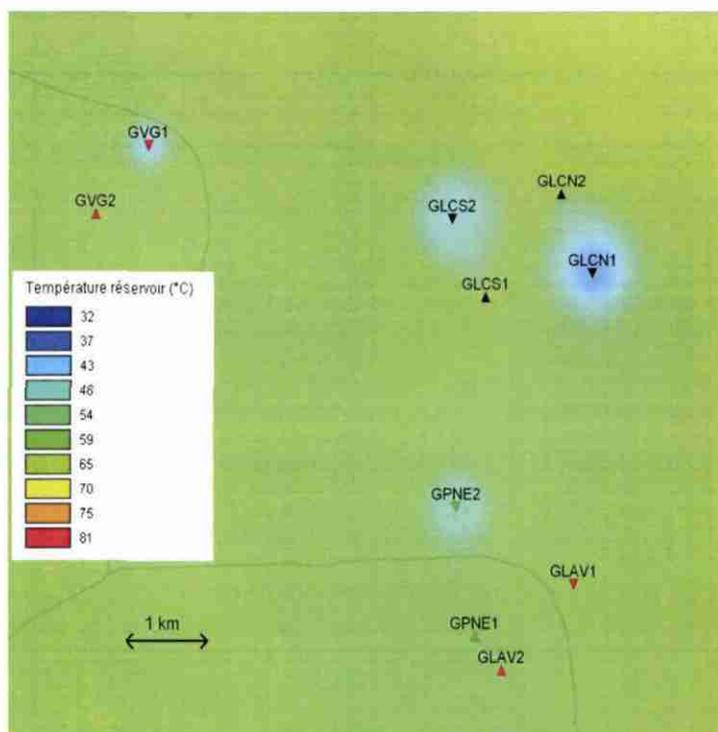


Figure 48 : Impacts thermiques des doublets de la zone 6 (fin 2020).

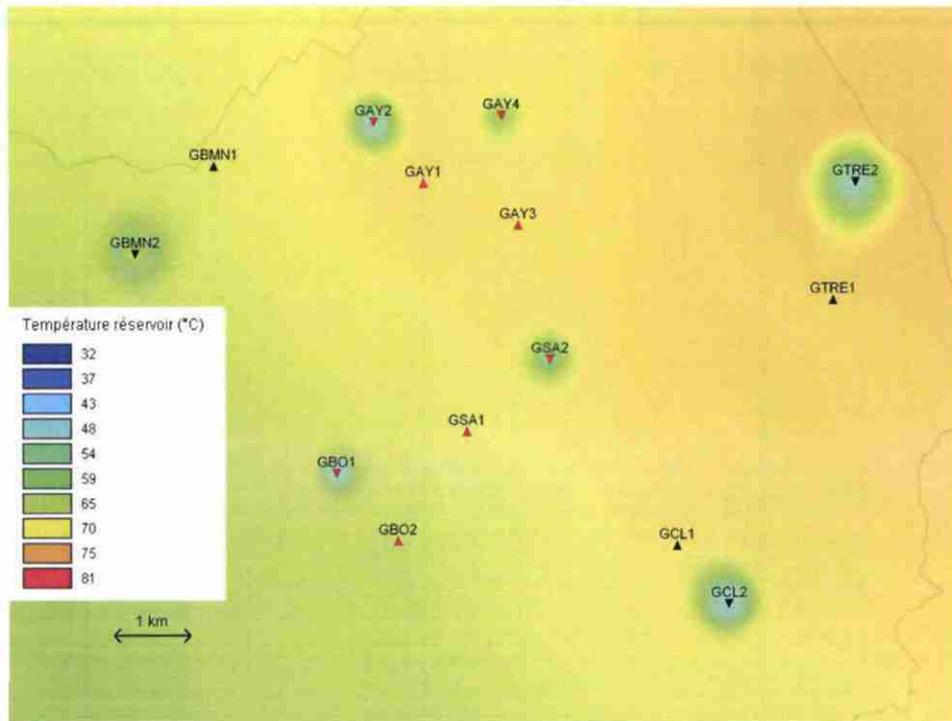


Figure 49 : Impacts thermiques des doublets de la zone 7 (fin 2010).

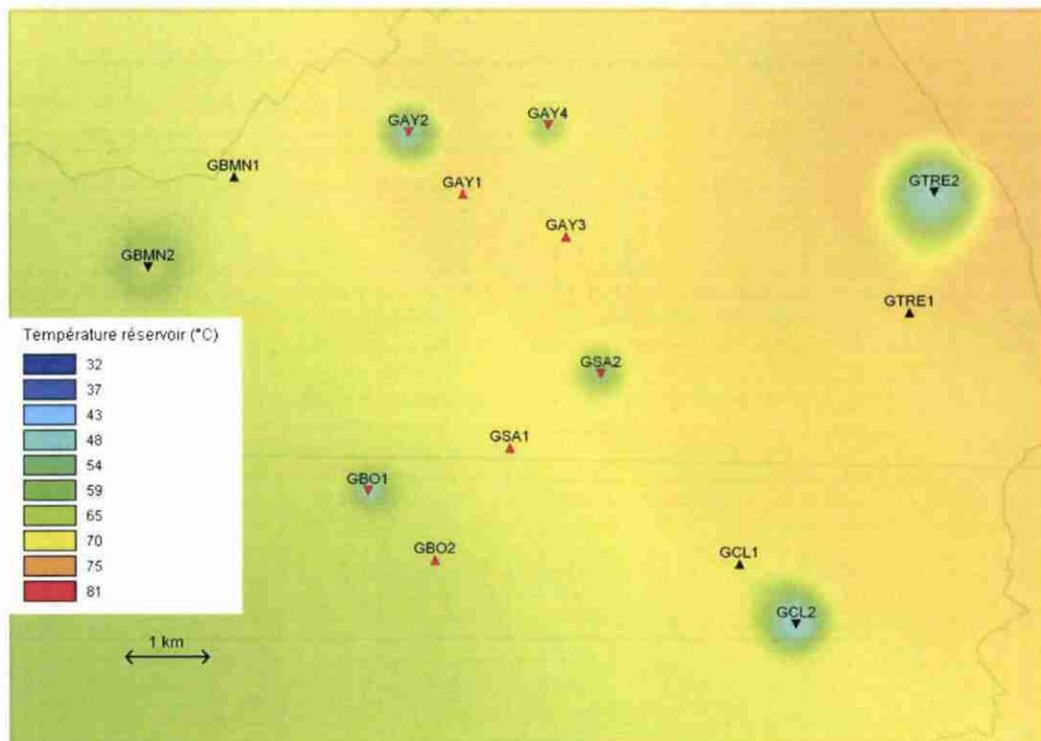


Figure 50 : Impacts thermiques des doublets de la zone 7 (fin 2020).



## 4. Mise à jour 2010 du suivi physico-chimique de l'aquifère du Dogger

L'étude géochimique effectuée dans le cadre de ce projet s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés dans les phases 1, 2 et 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France » (Goyénèche *et al.*, 2004, 2005 ; Hamm *et al.*, 2010 ; Tableau 4). Ces précédentes études ont mis en évidence des évolutions physico-chimiques des fluides du Dogger depuis la mise en production des puits géothermiques, donnant des informations intéressantes sur le fonctionnement du réservoir, et plus généralement, de la boucle géothermale. Il s'agit, donc dans cette étude, de poursuivre ces travaux afin d'améliorer notre connaissance sur les processus physico-chimiques associés à l'exploitation géothermale de la nappe du Dogger parisien.

Pour ce faire, la démarche employée dans les phases 2 et 3 pour interpréter les données physico-chimiques a été reprise et prolongée sur l'année 2010. En outre, elle a été étendue aux sites géothermiques de Melun-l'Almont (77), de L'Hay-les-Roses (94), d'Orly-Nouvelet 2 (94) et de Sucy-en-Brie (94). L'étude géochimique présentée dans ce rapport comprend donc un diagnostic physico-chimique (température, pH, pe et concentrations en éléments dissous) et un diagnostic thermodynamique de treize fluides géothermiques provenant des quatre secteurs géographiques du Bassin parisien<sup>1</sup> sur la période (1985-2010).

Les onze sites géothermiques considérés sont les suivants :

- Ris-Orangis (91), Montgeron (91) et Melun-l'Almont (77) pour le secteur Sud ;
- Alfortville (94), Champigny-sur-Marne (94), L'Hay-les-Roses (94), Orly-Nouvelet 2 (94) et Sucy-en-Brie (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).

Hors le site de Melun-l'Almont, tous ces sites bénéficient d'un suivi d'exploitation des organes du sous-sol par la société CFG Services.

Le Tableau 3 donne quelques informations générales sur ces sites.

Le tableau 4 présente une synthèse des études géochimiques menées depuis 2002, par le BRGM, sur la nappe du Dogger parisien. Plus précisément, il récapitule les sites examinés dans chaque étude ainsi que les raisons ayant motivé le choix de ces sites. Il permet ainsi de clarifier l'intérêt de chaque étude réalisée.

---

<sup>1</sup> Les secteurs géographiques (Sud, VDM, Est et SSD) ont été définis en fonction des caractéristiques du réservoir (productivité) et des propriétés des fluides produits (ex. teneurs initiales en sulfures) lors de la phase 1 du projet « Gestion du Dogger de l'Île de France » (Goyénèche *et al.*, 2004).



Secteur	Site géothermique	Ouvrage (producteur)	Interférences avec un autre site	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
	Melun-l'Almont	PM 4	Oui	68 - 70	9,3
VDM	Alfortville	GAL 2	Oui	71 - 74	3,1
	Champigny	GCHM 1	Non	75 - 77	2,5
	L'Hay-les-Roses	GHLR 2	Oui	70 - 72	4,9
	Orly-Nouvelet 2	GOR 5	Oui	74 - 75	7,3
	Sucy-en-Brie	GSUC 1 et GSUC3	Non	75 - 78	1,5
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 3 : Caractéristiques générales des sites géothermiques examinés (d'après les analyses de fin de sondage, base Dogger).

Les évolutions physico-chimiques observées sur la période 1985 (date conventionnelle du début de l'exploitation géothermique du Dogger) – 2009, ainsi que leurs origines éventuelles, sont largement détaillées dans les rapports des phases 1, 2 et 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France ». Ainsi, ce rapport s'attache plus particulièrement à présenter les tendances qui diffèrent de celles mises en avant par les études antérieures. En ce sens, le chapitre suivant (§ 4.1) synthétise les enseignements des phases 1, 2 et 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France ».

	Sites géothermiques examinés		Choix des sites, but :
<b>Phase 1</b> (Goyénèche <i>et al.</i> , 2004)	25 sites dont : Coulommiers (Est) Créteil, Chevilly-Larue et Cachan (VDM) Clichy-sous-Bois (SSD)	¾ des sites géothermiques du Bassin parisien	Mettre en place la démarche à employer dans les phases ultérieures notamment pour interpréter les résultats
<b>Phase 2</b> (Goyénèche <i>et al.</i> , 2005)	Coulommiers (Est) Créteil (VDM) Ris-Orangis (Sud) Clichy-sous-Bois (SSD)	1 site par secteur géographique	Prendre en compte la variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques des fluides du Dogger
<b>Phase 3</b> (Hamm <i>et al.</i> , 2010)	Coulommiers et Meaux-Beauval 1 (Est) Alfortville et Champigny-sur-Marne (VDM) Ris-Orangis et Montgeron (Sud) Clichy-sous-Bois (SSD)	~ 2 sites par secteur géographique (dont 1 soumis à des interférences, quand existe)	Idem + Prendre en compte les interférences entre doublets
<b>Dogger 2010</b> (Goyénèche <i>et al.</i> , 2011)	Coulommiers et Meaux-Beauval 1 (Est) Alfortville, Champigny-sur-Marne, L'Hay-les-Roses, Sucs-en-Brie et Orly-Nouvelet2 (VDM) Ris-Orangis, Montgeron et Melun-l'Almont (Sud) Clichy-sous-Bois (SSD)	Idem + 3 sites du secteur VDM et 1 du secteur Sud (dont le tubage du producteur est en composite)	Idem + Comparer les enseignements de la géochimie avec les résultats de la modélisation hydrothermique <sup>2</sup> Mettre en avant l'influence des matériaux de tubage (composite vs acier au carbone) <sup>3</sup>

Tableau 4 : Tableau de synthèse des différentes études géochimiques menées depuis 2002 sur la nappe du Dogger par le BRGM. Inventaires des sites géothermiques examinés dans chaque étude et présentation des raisons ayant motivé le choix de ces sites.

<sup>2</sup> La modélisation hydrothermique porte principalement sur les installations géothermiques du secteur Val-de-Marne.

<sup>3</sup> La quasi-totalité des installations géothermiques du Bassin de Paris exploite la nappe du Dogger via des tubages en acier au carbone ne résistant pas au fluide géothermal (problèmes de corrosion/dépôt). Le site de Melun-l'Almont est le seul site géothermique du Bassin parisien pour lequel le tubage du puits de production (PM4) est en matériau composite (Ignatiadis et Abou Akar, 1997).

#### 4.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS DES PHASES 1, 2 ET 3 DU PROJET « GESTION DU DOGGER DE L'ÎLE-DE-FRANCE »

Les études géochimiques réalisés à travers les différentes phases du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France » fournissent les enseignements suivants.

Sur la période d'exploitation (1985-2009) :

- **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). La précipitation de sulfures de fer le long des tubages des puits de production et leur vieillissement progressif peut expliquer cette diminution du pH des fluides produits (production de protons  $\text{H}^+$ ). Toutefois, il est également possible que le pH du réservoir ait diminué depuis le démarrage des opérations géothermiques. En effet, depuis leur mise en production, les forages géothermiques génèrent des sulfures ( $\text{HS}^-$ ) en grande partie réinjectés dans le réservoir pouvant y précipiter le fer dissous et les autres cations divalents et produire des protons  $\text{H}^+$ .
- **Le pe** est différent du pe recalculé à partir du couple ( $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ). Le déséquilibre redox est systématique (cf. erratum). 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 **mackinawite** ( $\text{FeS}$ ) et la **calcite** ( $\text{CaCO}_3$ ) sont les seuls minéraux dont les indices de saturation évoluent de manière sensible :
  - La *calcite* est saturée pour tous les forages ( $\text{IS} \sim 0$ ). Elle reste néanmoins susceptible de précipiter en cas de dégazage du fluide géothermal. Ce risque paraît toutefois réduit les dernières années d'exploitation (2001-2009) 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 forages. Le risque de précipitation de la mackinawite a globalement augmenté les dernières années d'exploitation, notamment à cause de la baisse des débits d'exploitation.
- La **calcédoine** ( $\text{SiO}_2$ ) est saturée pour tous les forages ( $\text{IS} \sim 0$ ).
- L'**anhydrite** ( $\text{CaSO}_4$ ) est sous-saturée pour tous les forages ( $-0,6 < \text{IS} < -0,2$ ) sauf pour les forages 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 forages.
- La **sidérite** ( $\text{FeCO}_3$ ) est sous-saturée ( $\text{IS} < -0,5$ ) pour tous les forages.

Les tendances observées 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.

Parmi les espèces chimiques sensibles à la température du fluide ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et Si), car contrôlées par des minéraux à comportement prograde ou rétrograde<sup>4</sup>, seul le **silicium** paraît susceptible d'annoncer l'approche du front froid<sup>5</sup>. 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 (Goyénèche *et al.*, 2005).

Le fait que le calcium ne puisse pas être annonciateur du front froid serait confirmé s'il s'avérait 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 (puisque si  $\text{H}^+$  augmente, l'équilibre  $\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$  se déplace vers la gauche).

Au regard de l'absence de variation : a) de la concentration en silicium et b) de l'IS de la calcédoine sur la période d'exploitation, **le front froid n'a, a priori, pas encore 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 variation en silicium et de l'IS de la calcédoine, la percée thermique, associée à une interférence entre doublets voisins, serait confirmée tout récemment par une chute de température mesurée (environ 0.2°C/an) et par les modélisations hydrodynamiques.

## 4.2. APPORTS DU PROJET « GESTION DU DOGGER 2010 »

### 4.2.1. Corrections

Dans les études géochimiques précédentes (phases 1, 2 et 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France»), nous avons supposé à tort que le pH et le potentiel redox étaient mesurés systématiquement sur un fluide refroidi à 25-30°C et que les valeurs du potentiel redox renseignées dans la base Dogger étaient automatiquement

---

<sup>4</sup> Un minéral à comportement prograde (rétrograde) est d'autant plus stable que la température augmente (diminue). En d'autres termes, un minéral prograde (rétrograde) tend à précipiter lorsque la température augmente (diminue). Pour illustrer, la calcite est un minéral prograde.

<sup>5</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.

exprimées par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène (ENH). En réalité, le pH et le potentiel redox sont mesurés à la température d'exhaure du fluide géothermal, pour la plupart des sites étudiés.

De plus, le **potentiel redox** (pe) des sites gérés par CFG Services est exprimé par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl dans la base Dogger. Ces erreurs d'appréciation ont été corrigées dans le cadre de cette étude, pour tous les sites géothermiques examinés. On remarquera ainsi que le pe recalculé à partir du couple (HS<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) approxime convenablement le pe mesuré en particulier pour les sites du Val-de-Marne, contrairement à ce que l'on pouvait observer dans les études géochimiques précédentes (fig. 51). Il semble donc que le couple HS<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> contrôle l'état redox des fluides du Dogger. Précisons néanmoins que pour certains sites (dont celui de Meaux-Beauval 1), le pe (HS<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) recalculé reste éloigné de la valeur

mesurée ( $pe = pe(HS/SO_4) + 0.7$  en moyenne), les premières années d'exploitation (fig. 51). Par ailleurs, ces rectifications s'accompagnent d'une légère augmentation (0.1 unité) des indices de saturation des fluides considérés vis-à-vis de la sidérite et de la mackinawite, sans conséquences sur les conclusions précédentes (§ 4.1).

Les effets des corrections sur le **pH** des fluides sont plus négligeables. Les augmentations de pH associées sont en effet inférieures à 0.1 unité. Ces écarts de pH s'accompagnent d'une augmentation moyenne de 0.1 de la saturation en calcite des fluides examinés. De plus, pour les sites d'Alfortville et de Clichy-sous-Bois, ils se traduisent par un lissage des courbes d'évolution de la saturation en calcite des fluides en fonction du temps (fig. 52). En conséquence, les premières années de production (jusqu'en 2001 en moyenne), la calcite est légèrement sursaturée dans la plupart des fluides étudiés (risque de précipitation permanent dans les forages). C'est le cas notamment pour les sites de Meaux-Beauval 1 et de Champigny-sur-Marne (fig. 53). Néanmoins, depuis le début des années 2000, la calcite est saturée dans tous les fluides étudiés en raison de la chute générale du pH des fluides. Par contre, le comportement de la calcite reste relativement instable. Ainsi, depuis le démarrage des exploitations, la calcite présente un risque de précipitation dans tous les forages de production examinés. Toutefois, depuis le début des années 2000 et la chute générale du pH, ce risque est probablement limité aux seules périodes de dégazage du fluide géothermal (fig. 52 et 53).

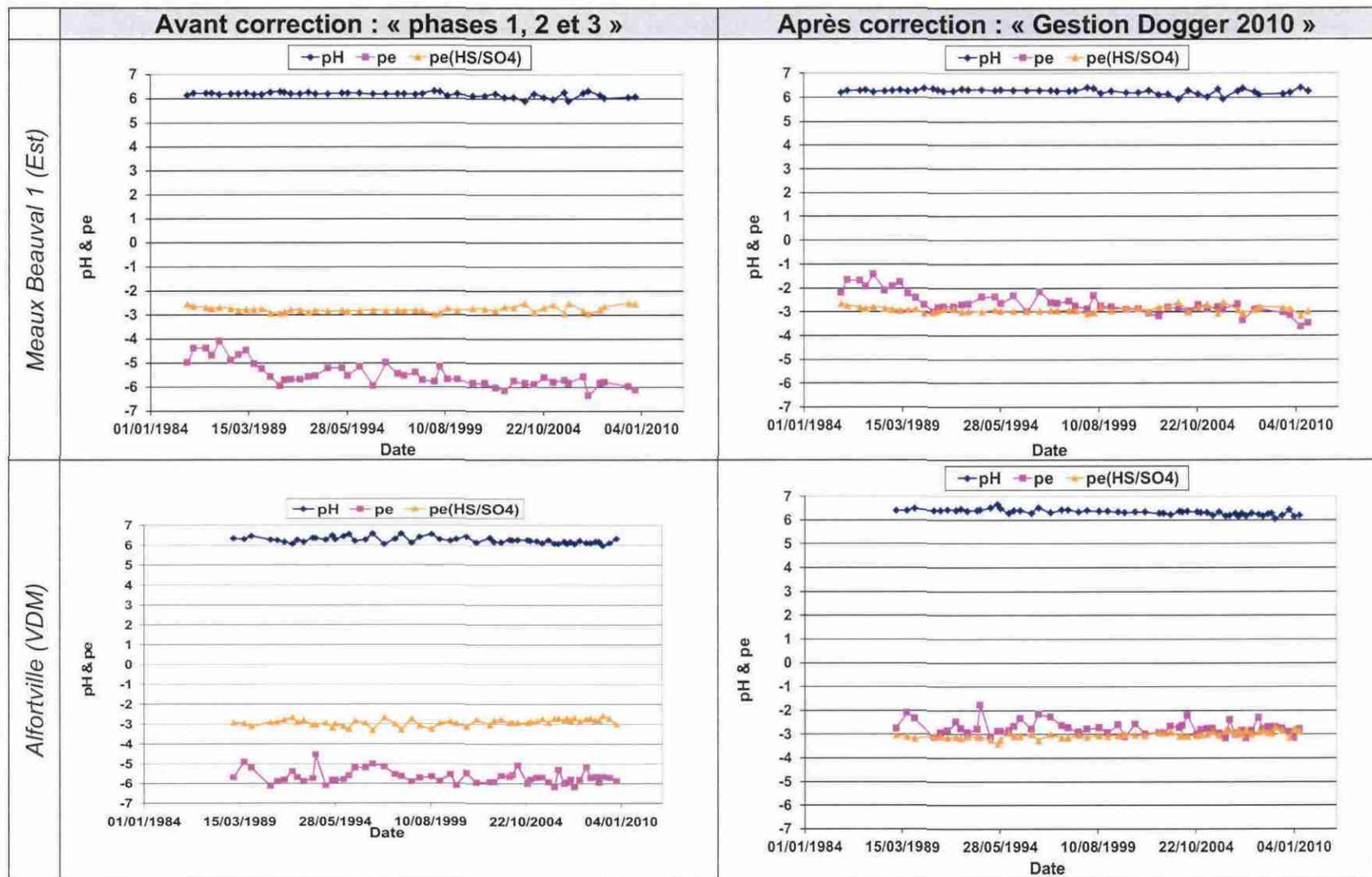


Figure 51 : Conséquences des corrections effectuées sur l'évolution du pH et du pe.

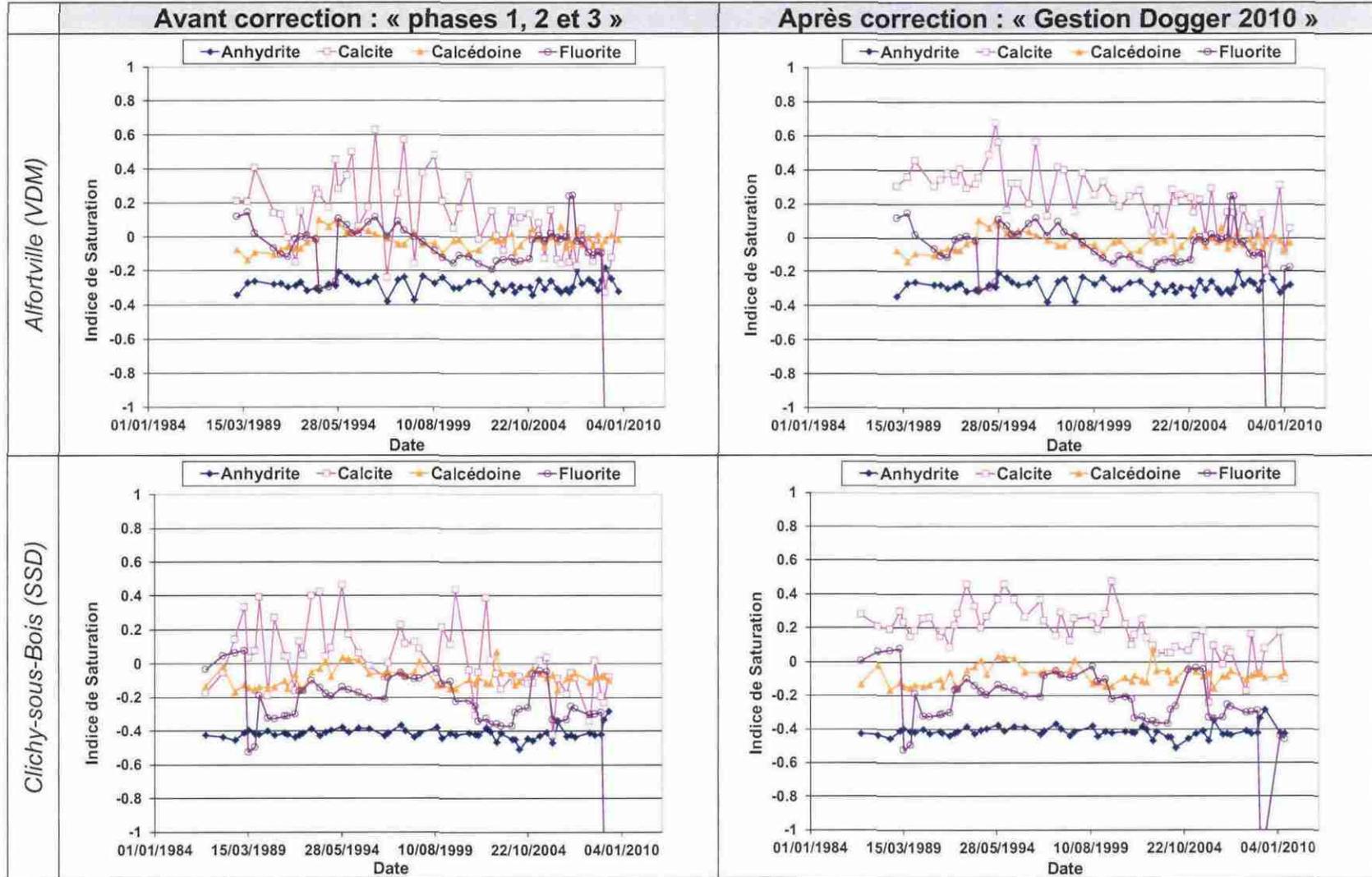


Figure 52 : Conséquences des corrections effectuées sur l'indice de saturation de minéraux d'intérêt, cas des sites d'Alfortville et de Clichysous-Bois.

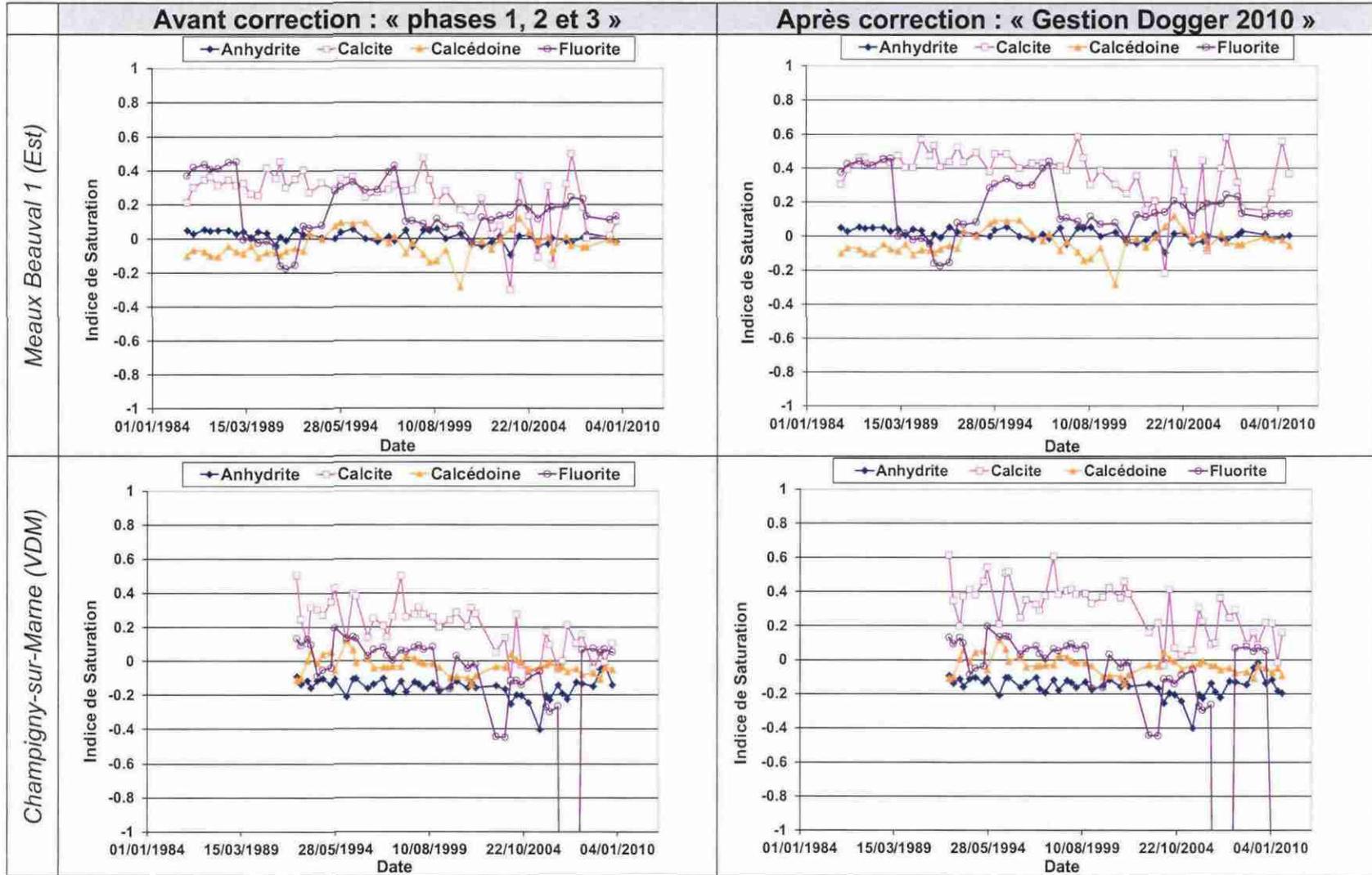


Figure 53 : Conséquences des corrections effectuées sur l'indice de saturation de minéraux d'intérêts, cas des sites de Meaux-Beauval 1 et de Champigny-sur-Marne.

#### 4.2.2. Données supplémentaires

L'étude géochimique présentée dans ce rapport porte sur une année (soit en moyenne 3 points de données) et quatre sites supplémentaires par rapport à l'étude l'ayant précédée (Phase 3 du projet « Gestion du Dogger de l'Île-de-France »).

Les tendances mises en évidence lors de la Phase 3 se confirment sur l'année 2010. La seule différence notable depuis 2010 est que la teneur en fer dissous du fluide du puits GAL2 d'Alfortville a stoppé sa croissance. Elle semble même avoir amorcé une décroissance. En avril 2010, elle a atteint sa valeur la plus basse depuis la mise en production du site :  $3.66.10^{-5}$  mol/kg d'eau (Figure 54). En conséquence, la mackinawite est sous-saturée dans le fluide d'Alfortville, depuis 2010 (Figure 55). Elle ne risque donc plus d'y précipiter. Les traitements de fond de puits semblent à l'origine de cette décroissance ; la concentration injectée en avril 2010 est en effet importante (11,30 mg/L - bactériostatique)<sup>6</sup>. Pour information, la consigne de traitement actuellement en place sur le doublet d'Alfortville est de 2,5 mg/L.

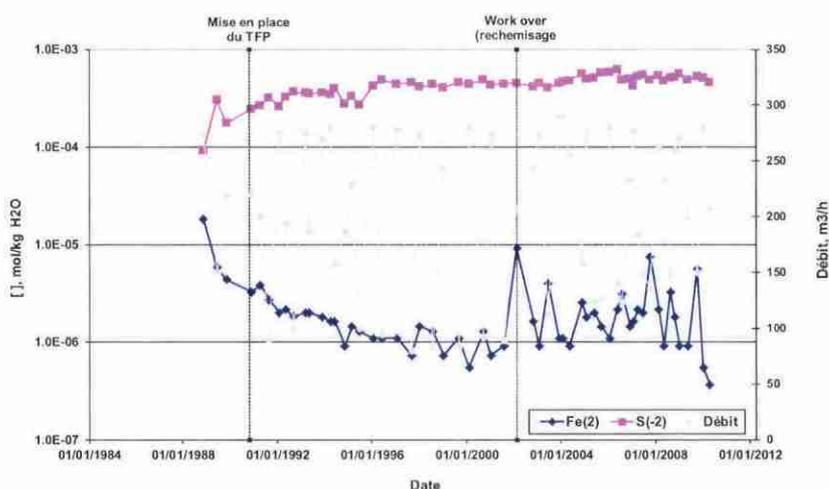


Figure 54 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Puits de production GAL2 (Alfortville, VDM).

<sup>6</sup> Rappelons que les inhibiteurs de corrosion/dépôt peuvent être bactériostatiques aux dosages pratiqués couramment (5 – 10 mg/L) et bactéricides à très forte concentration (> 20 mg/L) (Ignatiadis *et al.*, 1996).

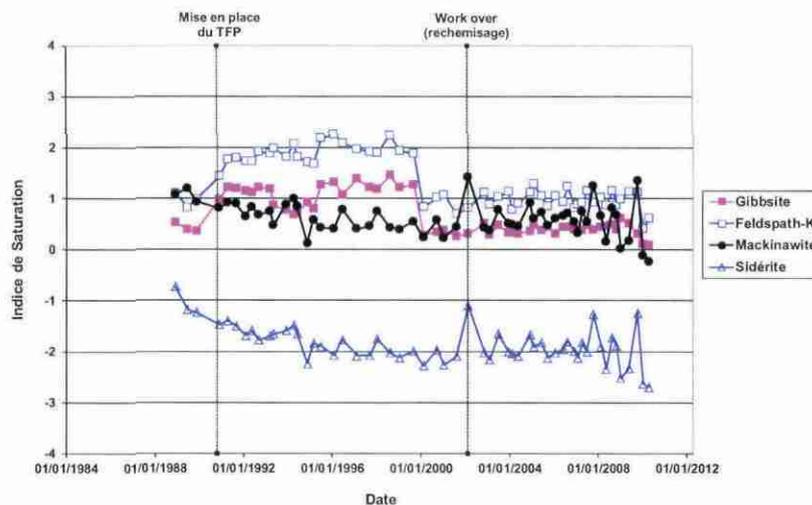


Figure 55 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Puits de production GAL2 (Alfortville, VDM).

Les tendances mises en avant lors de la Phase 3 s'observent également sur les quatre sites supplémentaires de l'étude : L'Hay-les-Roses, Sucy-en-Brie, Orly-Nouvelet 2 et Melun-l'Almont. Ainsi, par souci de clarté, les évolutions des paramètres physico-chimiques des fluides correspondants ne sont pas détaillées dans le corps de ce rapport. Néanmoins, une fiche descriptive illustrée de ces évolutions est disponible en annexe 2 pour chacun de ces sites.

## 5. Conclusions

**En termes de modélisation hydro-thermique**, La gestion de l'aquifère du Dogger en Île-de-France pour l'année 2010 a permis de mettre à jour les modélisations réalisées lors de la Phase 3 du projet et de préciser les décroissances thermiques aux puits producteurs pour chacun des doublets en exploitation de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne.

Les résultats des nouvelles simulations, grâce à une prise en compte plus fine des débits et températures réinjectés, permettent de préciser les conclusions décrites dans le rapport de la Phase 3 du Dogger. On notera que, d'une façon générale, la prise en compte plus systématique des données d'exploitation, transmises par les personnels exploitant les sites, démontre une concordance des dates de percée thermique et des courbes de décroissance thermique avec celles obtenues à l'issue des travaux de la Phase 3 du projet de gestion de l'aquifère du Dogger. Cependant, dans un nombre de cas non négligeable on obtient une amélioration sensible de celles-ci. Ce constat conduit à considérer que l'acquisition des données d'exploitation, au pas horaire ou quotidien, est d'une importance capitale.

Parmi les éléments singuliers remarquables, on peut citer :

- La décroissance thermique au puits producteur d'**Alfortville** est confirmée d'une part, par la modélisation qui indique une diminution de la température du réservoir de l'ordre de 2°C actuellement et prédit une perte thermique de l'ordre 4 °C à l'échéance 2020 dans l'hypothèse d'une exploitation du même ordre de grandeur en débit et température qu'en 2010, et d'autre part, par les mesures de la température en tête de puits producteur qui indiquent une baisse de l'ordre de 3 °C actuellement.
- La décroissance thermique calculée au puits producteur de **l'Hay-Les-Roses** est plus amortie que celle calculée dans la Phase 3 du Dogger avec une diminution de la température proche de 1 °C actuellement et de 1,5 °C à l'échéance 2020. Une diminution de la température est également observée sur les mesures en tête de puits (inférieure à 1 °C). Cette tendance sera à confirmer dans les années à venir.
- Le doublet de **Maisons-Alfort 1** indique actuellement une chute de la température du réservoir au puits producteur de l'ordre de 1 °C et de 2 °C d'ici 2020. La mesure de la température en tête de puits ne permet pas de statuer sur un refroidissement en ce puits (absence de données entre 2004 et 2010). La température de ce puits est donc à surveiller dans les prochaines années.
- Les températures calculées aux producteurs de **Champigny, Chevilly-Larue et Fresnes** indiquent une baisse comprise entre 1 °C et 1,5 °C qui se produira entre 2012 et 2020. La mesure en tête de puits ne permet pas de statuer sur une baisse éventuelle de la température. Ces puits sont donc à surveiller dans les années à venir. Il est à noter que le doublet de Champigny sera réhabilité sous peu en triplet.
- Le puits de la **Courneuve Nord** présente une baisse de sa température qui serait proche de 1°C en 2020. La simulation prévisionnelle ne tient pas compte du fait que le doublet devrait être réhabilité dès 2012 en triplet (nouveau puits producteur). La

température mesurée en tête semble indiquer une baisse de la température entre 2 et 3 °C en 2010 par rapport aux mesures antérieures à 2004 (aucunes données disponibles entre 2004 et 2010). Cette baisse de la température de production est à confirmer ou infirmer.

Les mesures réalisées en tête de puits permettent dans certains cas de confirmer le refroidissement (Alfortville, l'Hay-Les-Roses) mais dans d'autres cas du fait de grandes variations et de lacunes elles ne permettent pas de statuer par rapport aux résultats des modélisations. La température varie conjointement au débit, elle devrait refléter la température du réservoir pour les forts débits. Il serait intéressant de pouvoir équiper l'ensemble des sites d'une GTC afin d'avoir des mesures en continu de la température et du débit. Seuls 6 sites sont actuellement équipés d'un système automatisé (Alfortville, Bonneuil-sur-Marne, Chevilly-Larue, Coulommiers, L'Hay-Les-Roses, Le Mée-sur-Seine).

Il sera également précisé dans le projet 2011 « Étude de sensibilité au puits », dans le cadre de la Convention ADEME-BGRM, les relations entre la température du réservoir et celle mesurée en tête de puits, en fonction du débit et de l'état du puits. Cela permettra d'avoir une estimation de la température en fond de puits (toit du réservoir) à partir de celle mesurée en tête.

Enfin les tâches inscrites dans le projet « Gestion 2011 du Dogger » permettront de quantifier la sensibilité de la décroissance thermique vis-à-vis des données de l'exploitation (débit, température de réinjection) et des propriétés thermiques du réservoir et des épontes peu connues (conductivité thermique, dispersivité thermique, rôle des interstrates non productrices).

La cartographie détaillée des bulles froides par secteur modélisé a permis de visualiser la taille actuelle et dans 10 ans des bulles et leur proximité par rapport au puits producteur de chaque doublet. Pour certains doublets (Maison Alfort 2, Thiais, l'Hay-Les-Roses, Chevilly-Larue), les bulles sont déformées dans la direction de leur producteur mais aussi de producteurs voisins. Cette cartographie est importante lorsqu'il s'agit, soit de réhabiliter un doublet, ce qui se produira de plus en plus fréquemment avec le vieillissement grandissant des puits (entre 23 et 29 ans d'âge), soit de réaliser un nouveau doublet, ce qui nécessite une connaissance la plus précise possible des bulles froides.

***En ce qui concerne le suivi physico-chimique*** de l'aquifère du Dogger au cours de l'année 2010, les tendances observées lors de la phase 3 se confirment, ainsi que sur les quatre sites supplémentaires de l'étude : L'Hay-les-Roses, Sucy-en-Brie, Orly-Nouvelet 2 et Melun-l'Almont. Par conséquent, les conclusions de la phase 3 (§ 4.1.) s'appliquent dans l'ensemble à cette étude, les erreurs d'appréciations mises à part (cf. pe, § 4.2.1).

Soit, sur la période d'exploitation (1985-2010) :

- **Les sulfures et le fer dissous** sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration.

- **Le pH** est globalement stable ( $6 < \text{pH} < 7$ ). Il diminue en moyenne de 0,15 unité les dernières années d'exploitation (après 2001). Cette tendance générale n'est pas observée sur les fluides produits par les puits GOR 5 (Orly-Nouvelet 2) et GSUC3 (Sucy-en-Brie). Néanmoins, rappelons que ces deux puits ont été mis en production récemment (2008). On dispose donc de peu de données les concernant.
- **Le potentiel redox (pe)** recalculé à partir du couple ( $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ) approxime convenablement le pe mesuré. Il semble ainsi que le couple  $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$  contrôle l'état redox des fluides du Dogger, contrairement à ce que l'on a pu dire précédemment (phases 2 et 3, § 4.1 et § 4.2.1).
- 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 ( $\text{IS} \sim 0$ ) à légèrement sursaturée ( $0,3 < \text{IS} < 0,5$ ) pour tous les forages. De plus, elle est généralement très instable. Elle est ainsi susceptible de précipiter dans les puits de production, notamment lors de dégazage du fluide géothermal. Ce risque paraît toutefois réduit les dernières années d'exploitation (2001-2010) en raison de la chute générale du pH des fluides.
  - La mackinawite est généralement sursaturée ( $\text{IS} > 0,3$ ) pour tous les forages. Le risque de précipitation de la mackinawite a globalement augmenté les dernières années d'exploitation, notamment à cause de la baisse des débits d'exploitation.
- La **calcédoine** ( $\text{SiO}_2$ ) est saturée pour tous les forages ( $\text{IS} \sim 0$ ).
- L'**anhydrite** ( $\text{CaSO}_4$ ) est sous-saturée pour tous les forages ( $-0,6 < \text{IS} < -0,2$ ) sauf pour les forages 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 forages.
- La **sidérite** ( $\text{FeCO}_3$ ) est sous-saturée ( $\text{IS} < -0,5$ ) pour tous les forages.

**Aucun des paramètres géochimiques étudiés ne suggère le refroidissement ou le déclin énergétique des doublets et des triplets examinés.** En effet, les évolutions observées sur la période d'exploitation 1985-2010 sont à relier aux conditions d'exploitation des puits géothermiques (**débit**, traitements, travaux, etc.). Or, la chute de température du fluide produit sur le site d'Alfortville est un fait (chute mesurée : 2-3 °C). Il semblerait ainsi que les précurseurs chimiques identifiés précédemment (§ 4.1), tels que la concentration en silicium et l'IS de la calcédoine, ne soient pas suffisamment sensibles aux variations thermiques. Afin de répondre à ce questionnement, une analyse de sensibilité de ces paramètres chimiques aux variations thermiques sera menée dans le cadre du projet « Gestion du Dogger 2011 ».

Par ailleurs, au regard des évolutions du pH des fluides produits par les sites de L'Hay-les-Roses et de Sucy-en-Brie (sites supplémentaires de l'étude), **la chute générale du pH des fluides du Dogger abordée en Phase 3 semble se confirmer.** Malgré cela, il est toujours délicat d'affirmer que cette tendance est une vraie acidification du réservoir. Une nouvelle campagne de mesure de paramètres physico-chimiques clés

(T, débit, pH, Eh, etc.), prévue au cours de l'été 2011, devrait nous permettre d'éclaircir ce point, car, s'il s'avère que le réservoir s'est acidifié depuis le début de l'exploitation des doublets géothermiques, il paraît nécessaire d'adapter les conditions d'exploitation (débit, traitement, etc.) aux nouvelles caractéristiques physico-chimiques des fluides produits (la corrosivité d'un fluide augmente avec son acidité).

## 6. Bibliographie

**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 Île-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données - Rapport final de la phase 3. Rapport BRGM/RP-58834-FR, 77. p., 34 fig., 4 tabl., 11 ann.

**Goyénèche O., Desplan A., Bretteville V., Fabris H., Menjot 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 Île-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., Menjot 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 Île-de-France. Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-53782-FR, 110 p., 35 fig., 5 ann.

**Hamm V., Castillo C., Le Brun M., Goyénèche O.** (2010) – Mise en œuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-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.

**Ignatiadis I., Amalhay M., Abou A., Cotiche C.** (1996) – Analyse et conséquences de la prolifération bactérienne dans les puits géothermiques du Bassin de Paris. EDP Sciences (Ed.), « Biodétérioration des matériaux », chap. 16, 231-257.

**Ignatiadis I., Abou Akar A.** (1997) - Étude 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.



## **Annexe 1**

### **Définition des notions géochimiques usuelles**



## Potentiel redox

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>7</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<sup>8</sup>. 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 (96490 C/mol), la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K) et la température du fluide (K).

## Indice de saturation (IS)

L'indice de saturation d'une eau vis-à-vis d'un minéral est défini par :

$$IS = \log \frac{Q}{K}$$

où Q est le produit des activités ioniques calculé pour une réaction donnée et K est le produit de solubilité du minéral considéré à la température du fluide. L'équilibre est réalisé si IS est égal à 0 et le fluide est d'autant plus sursaturé (sous-saturé) par rapport au minéral considéré que IS est supérieur (inférieur) à 0.

---

<sup>7</sup> En conséquence, le potentiel redox mesuré doit être corrigé du potentiel du couple redox de l'électrode de référence (à la température de mesure) :  $Eh = Eh_{\text{mesuré}} + Eh_{\text{électrode de référence}}$ . Le potentiel d'une électrode de Ag/AgCl est de 0.197 V à 25°C. Ainsi, si l'on fait une mesure du potentiel redox d'une solution à 25°C en utilisant une électrode de Ag/AgCl, il faut ajouter 0.197 V à la valeur mesurée pour obtenir la valeur du potentiel redox par rapport à l'ENH.

<sup>8</sup> Le potentiel redox mesuré est pris égal au potentiel Eh dans cette étude.



## **Annexe 2**

### **Fiche descriptive des évolutions observées sur les sites supplémentaires de l'étude**



## L'Hay-les-Roses

### **Concentrations en éléments dissous**

Les concentrations en éléments dissous dans le fluide de L'Hay-les-Roses sont globalement stables depuis la mise en production du site, le fer et les sulfures mis à part. En effet, le fer et les sulfures dissous dans le fluide de L'Hay-les-Roses sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration (Figure 56).

La concentration en sulfures croît progressivement depuis 1990 ; elle a été multipliée par 2,5 environ. La concentration en fer dissous décroît jusqu'en 1996 puis tend à se stabiliser autour de  $1,82 \cdot 10^{-7}$  mol/kg d'eau ; elle a été divisée par 18 environ. On remarquera la similitude avec le site de Coulommiers (Figure 57 et Hamm *et al.*, 2010).

### **Potentiel redox et pH**

Le pH et le pe sont relativement stables depuis le début de l'exploitation (Figure 58). Le pH a néanmoins diminué de 0,10 unité depuis 2001 (Figure 59).

### **État d'équilibre thermodynamique**

Le comportement de la calcite est instable. Globalement saturée sur la période considérée, elle présente néanmoins un risque de précipitation ponctuel, à l'occasion de dégazage du fluide géothermal. Depuis 2001, avec la chute du pH, ce risque paraît limité ; la calcite est régulièrement sous-saturée (Figure 60).

Les saturations de la calcédoine, de l'anhydrite, de la fluorite, de la gibbsite et du feldspath potassique sont stables depuis le démarrage de la production. La calcédoine est saturée, l'anhydrite et la fluorite sous-saturée, la gibbsite et le feldspath potassique sursaturés (Figure 60).

Depuis la mise en place des traitements de fond de puits, la saturation de la mackinawite évolue parallèlement à la concentration en Fe(2) (Figure 6). Ainsi, elle a diminué depuis la mise en production du site. Saturée jusqu'en 1995, elle est globalement sous-saturée depuis. Le risque de précipitation de la mackinawite paraît ainsi limité depuis 1995, mais reste présent. La mackinawite peut précipiter ponctuellement, à l'occasion par exemple d'une réduction du débit d'exploitation, comme c'est le cas le 12/11/2007 (Figure 60).

La sidérite est sous-saturée depuis le début de l'exploitation. Le risque de précipitation de la sidérite est donc minime (Figure 60).

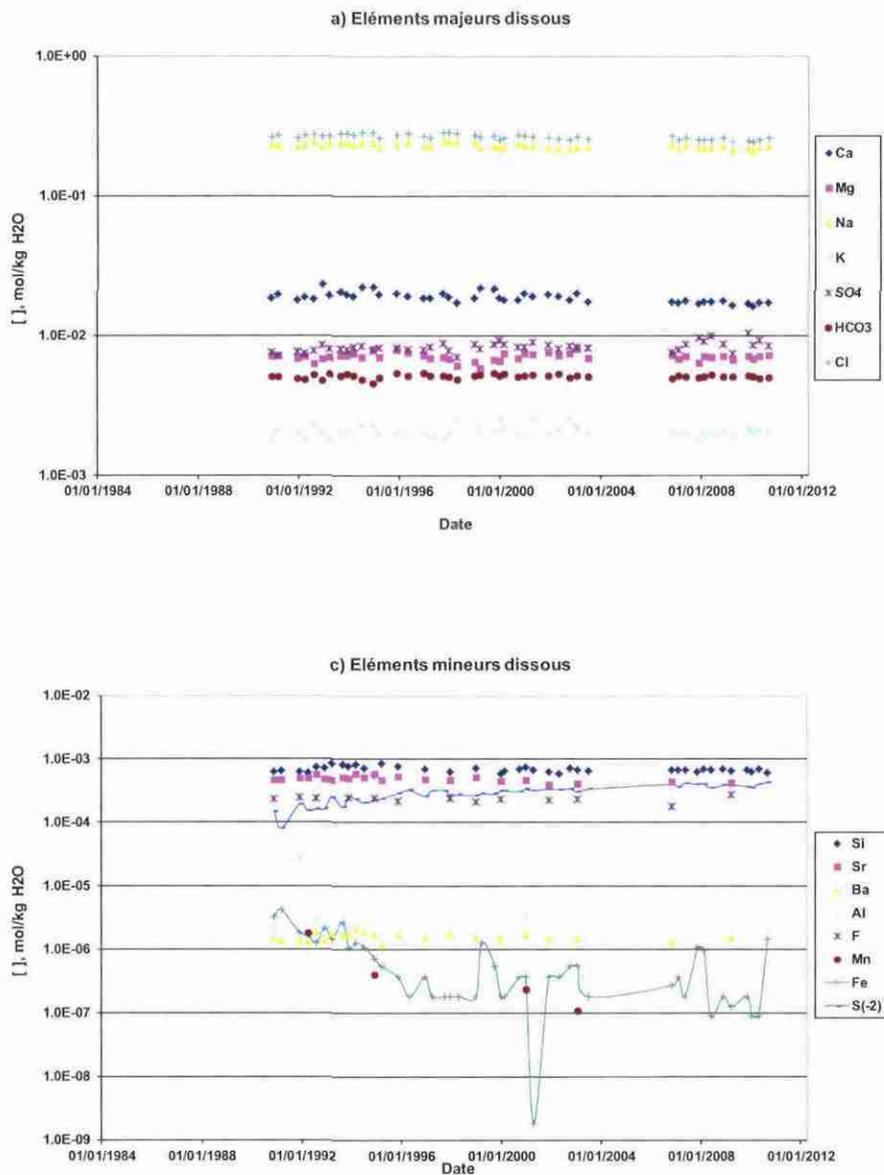


Figure 56 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).

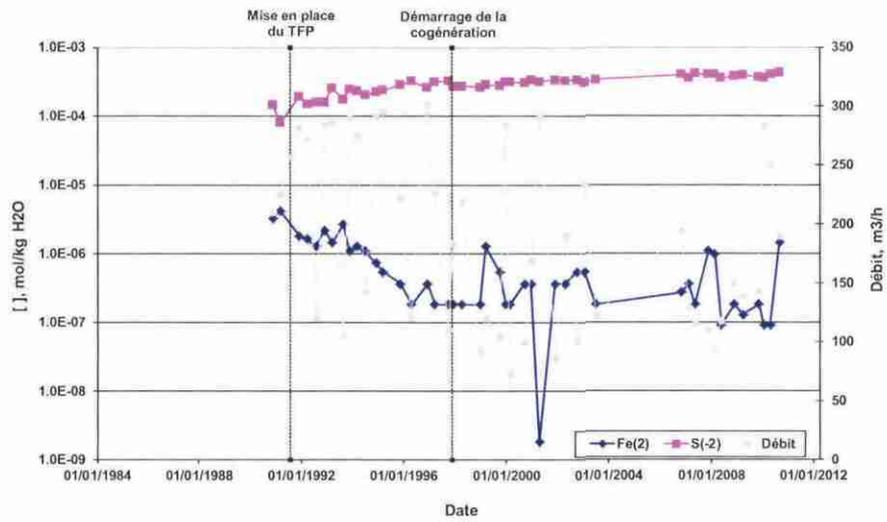


Figure 57 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).

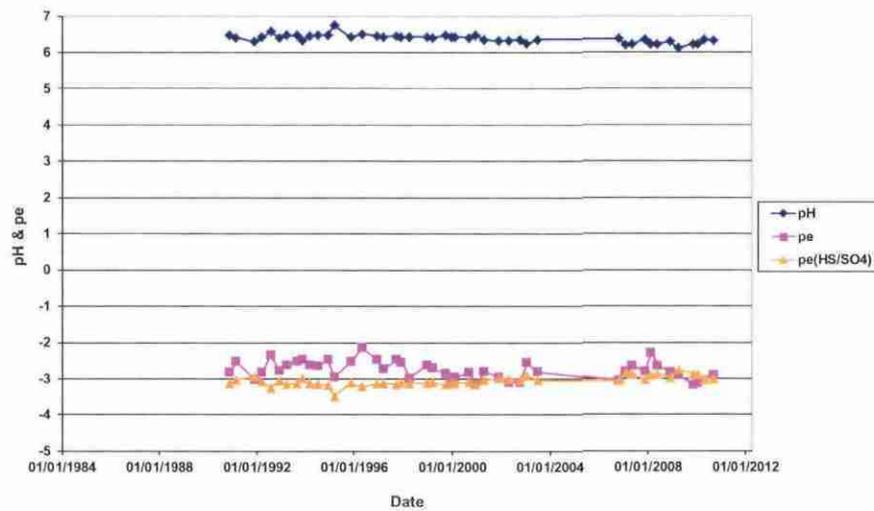


Figure 58 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).

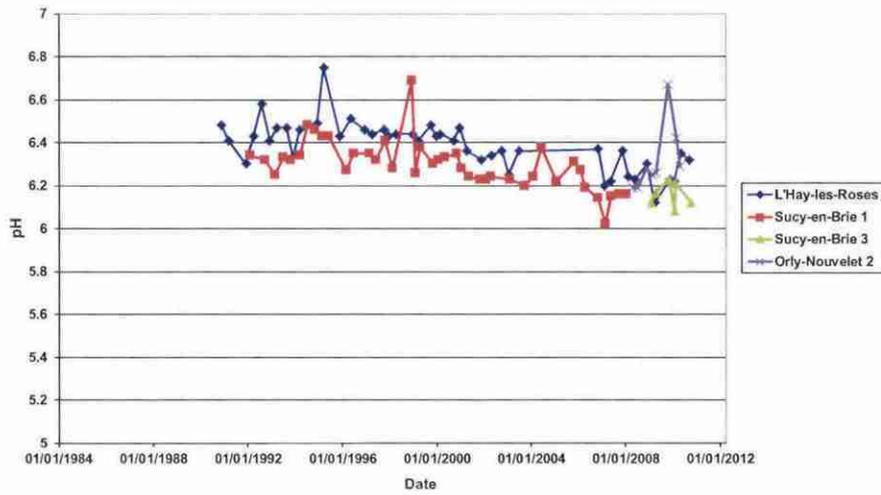


Figure 59 : Évolution du pH. Forages de production GCHLR2 (L'Hay-les-Roses, VDM), GSUC1 et 3 (Sucey-en-Brie, VDM) et GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).

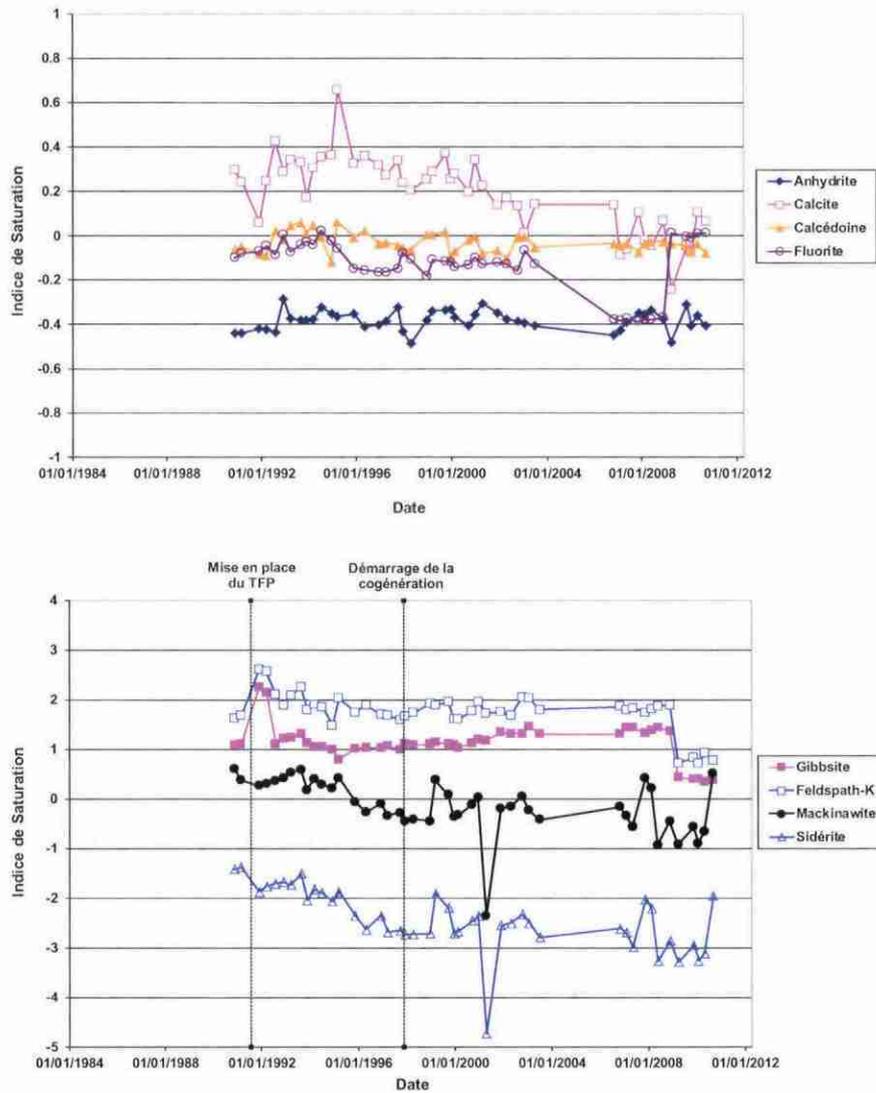


Figure 60 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).

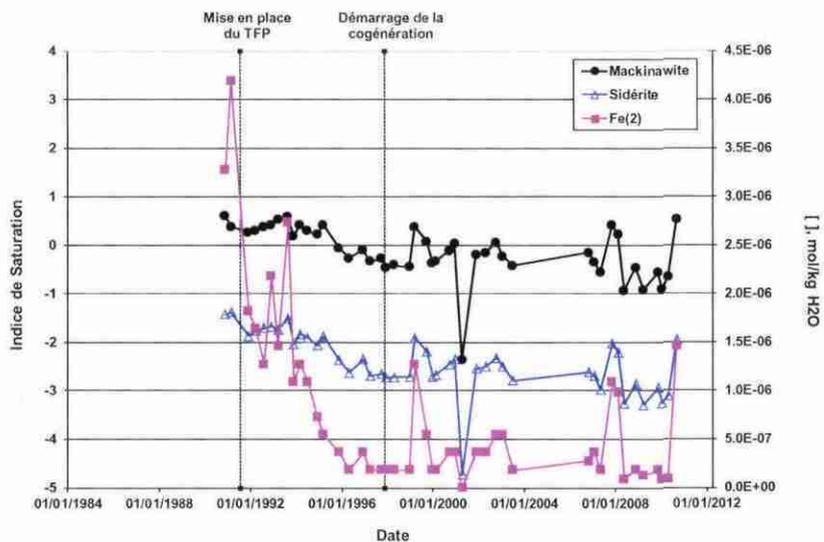


Figure 61 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forage de production GCHLR2 (Hay-les-Roses, VDM).

## Sucy-en-Brie

### Informations générales

Le réseau de géothermie de la ville de Sucy-en-Brie s'est étendu en 2008 avec la réalisation d'un nouveau puits (GSUC3). Il se compose désormais de trois puits : deux injecteurs (GSUC1 – ancien producteur réhabilité, et GSUC2) et un producteur (GSUC3).

### Concentrations en éléments dissous

Le fer et les sulfures dissous dans les fluides de Sucy-en-Brie sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration (Figure 60 et Figure 61).

La concentration en sulfures, mesurée en tête des puits de production successifs du site de Sucy-en-Brie, croît progressivement depuis leur mise en production respective. Elle a été multipliée par 10 durant l'exploitation de GSUC1 (de 1992 à 2008) et par 4,5 depuis la mise en exploitation de GSUC3 en 2008. Au contraire, la concentration en fer dissous décroît. Elle s'est néanmoins globalement stabilisée, autour de  $2 \cdot 10^{-6}$  mol/kg d'eau dans le producteur GSUC1 après 1996 et de  $3,9 \cdot 10^{-6}$  mol/kg d'eau dans le producteur GSUC3 après 2010. On remarquera la similitude avec le site de Coulommiers (Figure 62 et Hamm *et al.*, 2010).

### Potentiel redox et pH

Le pH et le  $p_e$  sont relativement stables depuis le début de l'exploitation (Figure 63). Le pH du fluide du producteur GSUC1 a néanmoins diminué de 0,15 unité depuis 2001 (Figure 58).

### État d'équilibre thermodynamique

La saturation de la calcite a diminué dans le fluide extrait par le puits GSUC1 durant son exploitation. Elle était saturée à sursaturée ( $IS_{\text{moyen}} \sim 0,4$ ) jusqu'en 2001 puis, saturée par la suite. Néanmoins, elle était globalement instable. La calcite présentait donc un risque de précipitation ponctuel dans ce puits, à l'occasion de dégazage du fluide géothermal. La calcite est saturée dans le fluide extrait par GSUC3 (Figure 64).

Les saturations de la calcédoine, de l'anhydrite, sont stables depuis la mise en production respective de chaque puits. La calcédoine est saturée et l'anhydrite sous-saturée (Figure 64).

La saturation de la fluorite a diminué dans les fluides produits par GSUC1 et GSUC3 depuis leur mise en production respective. Elle est saturée jusqu'en 2003 dans le fluide extrait par GSUC1 et 2010 dans celui extrait par GSUC3, puis, globalement sous-saturée ensuite (Figure 64).

La gibbsite et le feldspath potassique sont globalement sursaturés dans les fluides de Sucy-en Brie (Figure 64).

Depuis la mise en place des traitements de fond de puits, la saturation de la mackinawite évolue parallèlement à la concentration en Fe(2) (Figure 66). Elle a ainsi diminué dans le fluide produit par le puits GSU3. Par contre, elle est restée globalement stable dans celui produit par GSUC1. La mackinawite est néanmoins sursaturée dans les deux fluides produits depuis le début de l'exploitation. Le risque de précipitation de la mackinawite est permanent sur le site de Sucy-en-Brie (Figure 64).

La sidérite est sous-saturée dans les fluides de Sucy-en-Brie. Le risque de précipitation de la sidérite est donc minime (Figure 64).

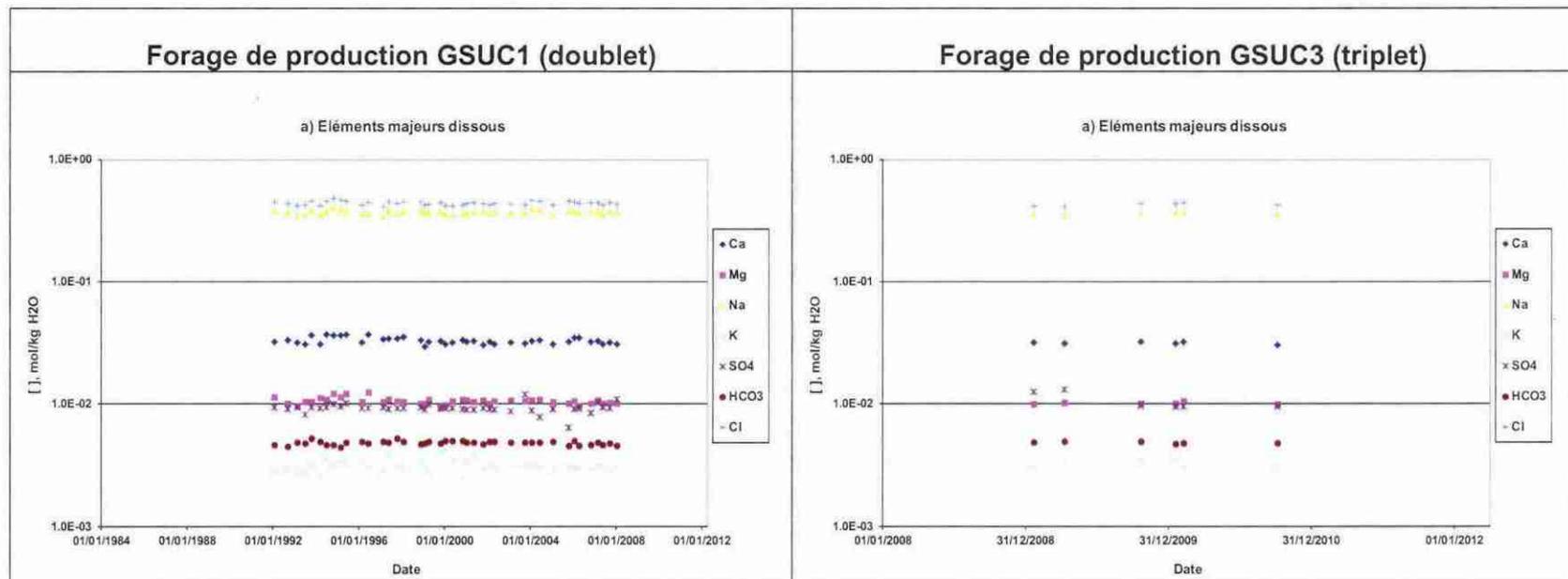


Figure 60 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (majeurs) dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

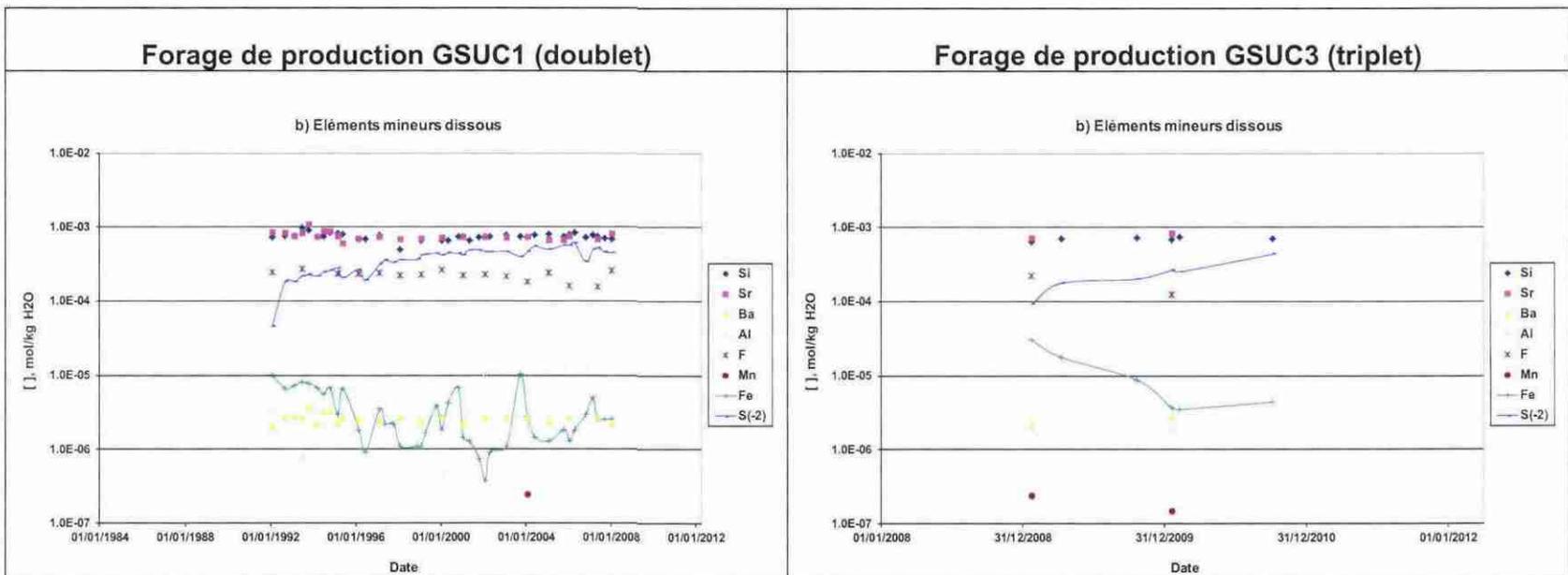


Figure 61 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (mineurs) dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

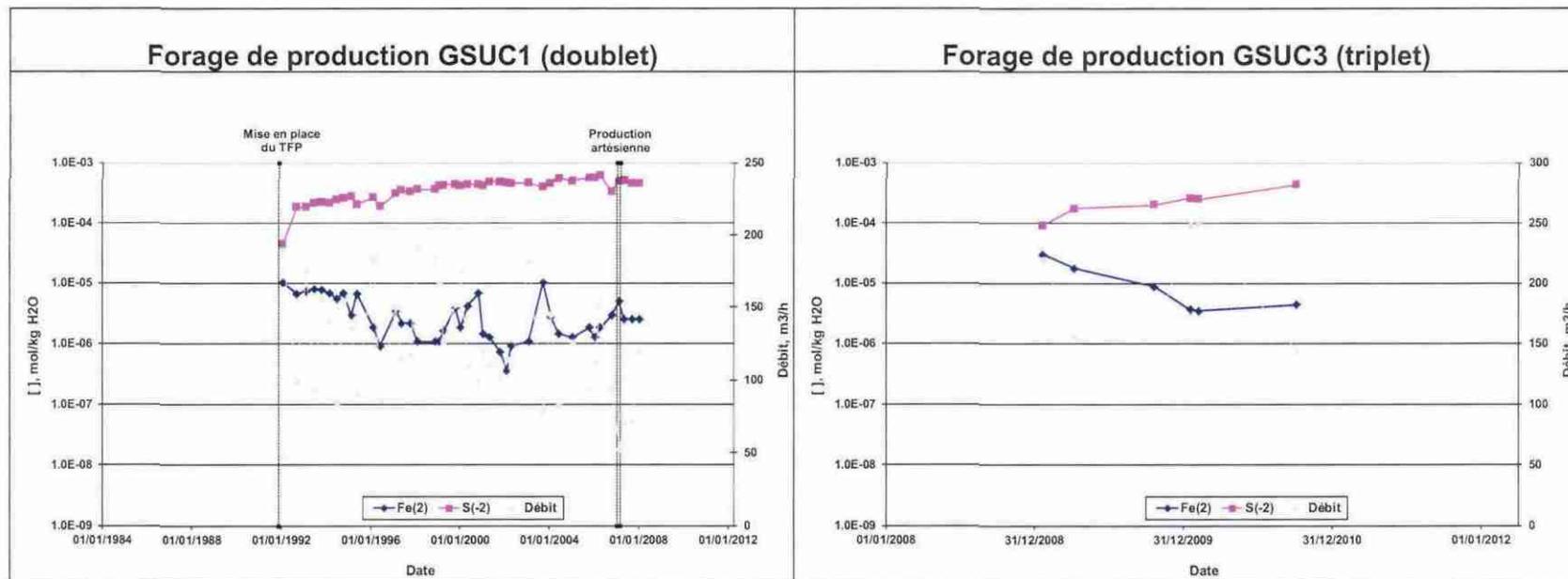


Figure 62 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

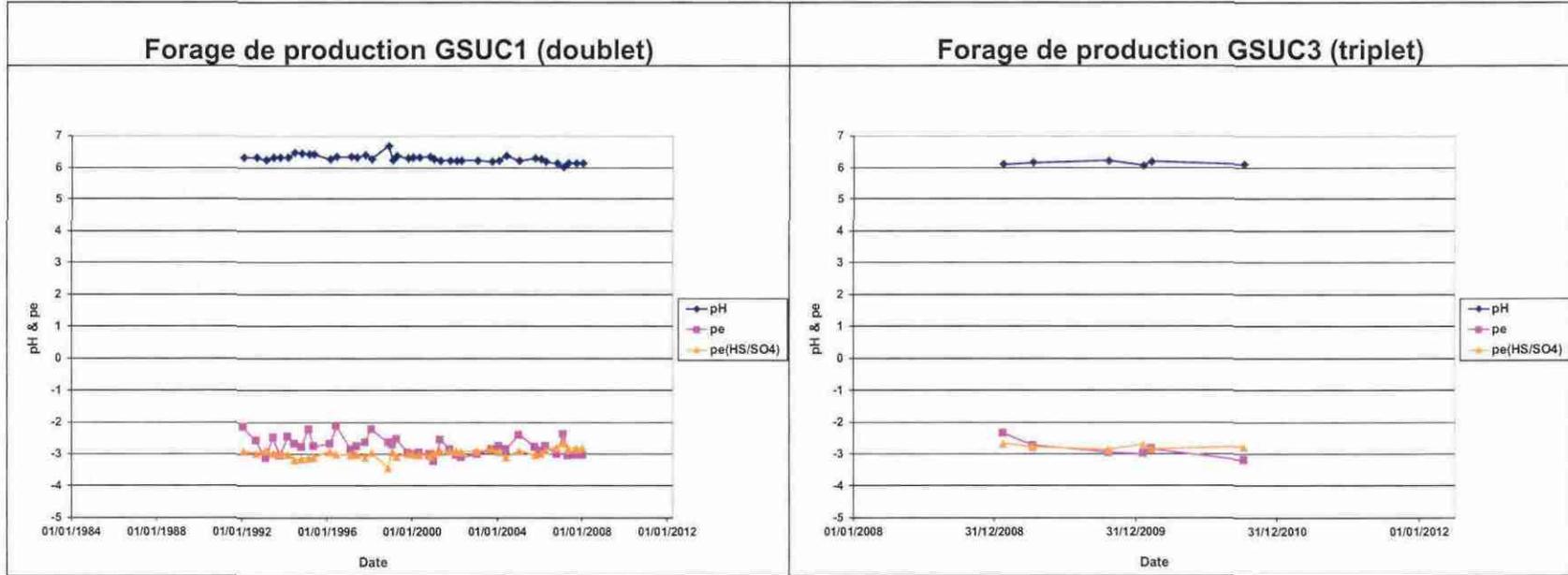


Figure 63 : Évolution du pH et du pe. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

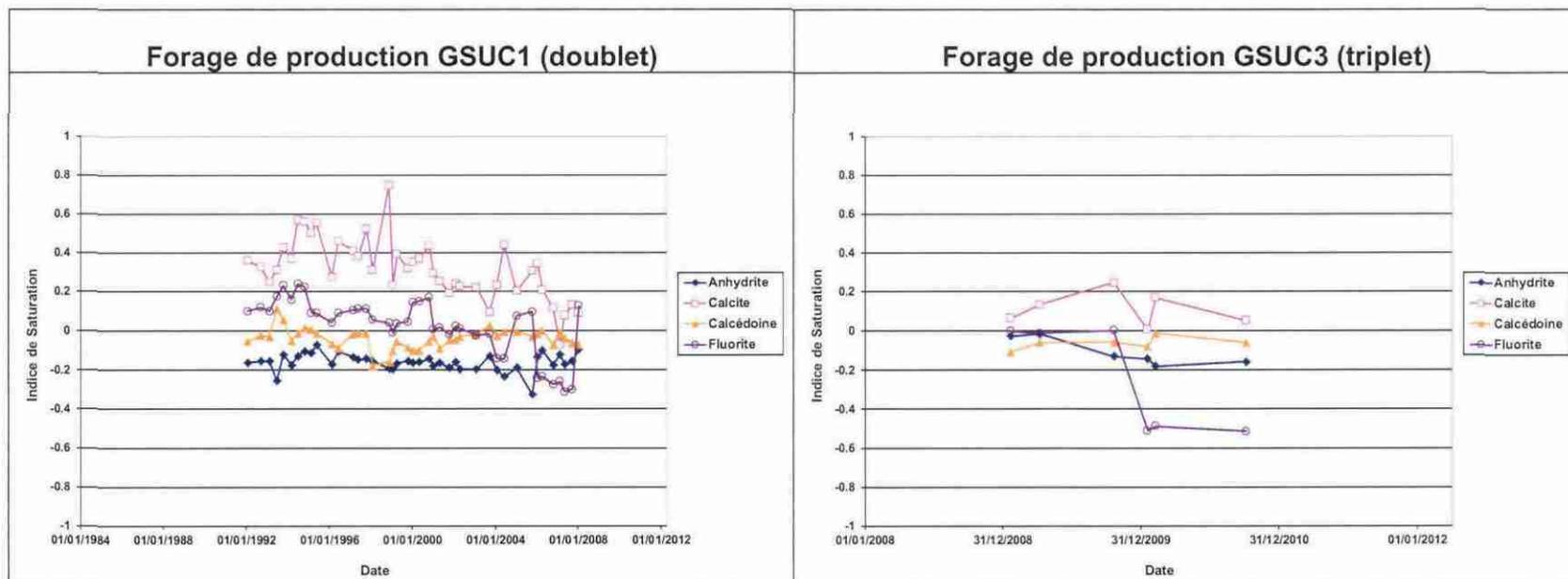


Figure 64 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

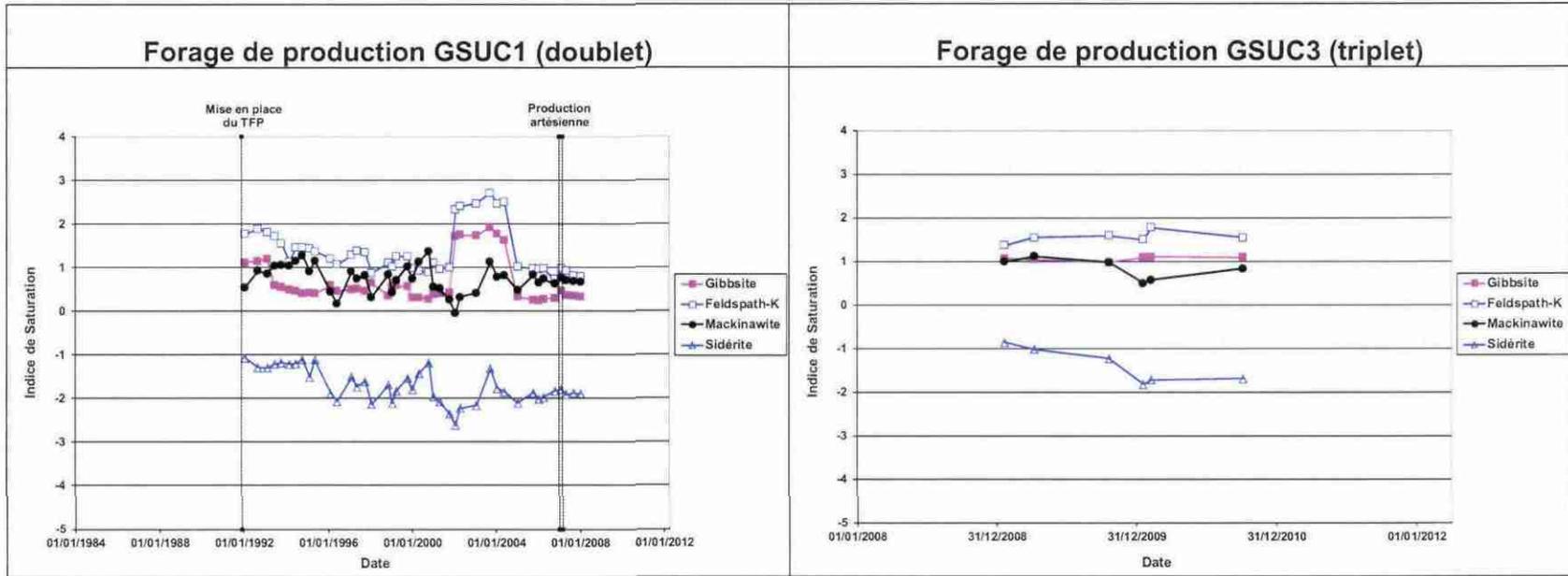


Figure 65 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production (suite). Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

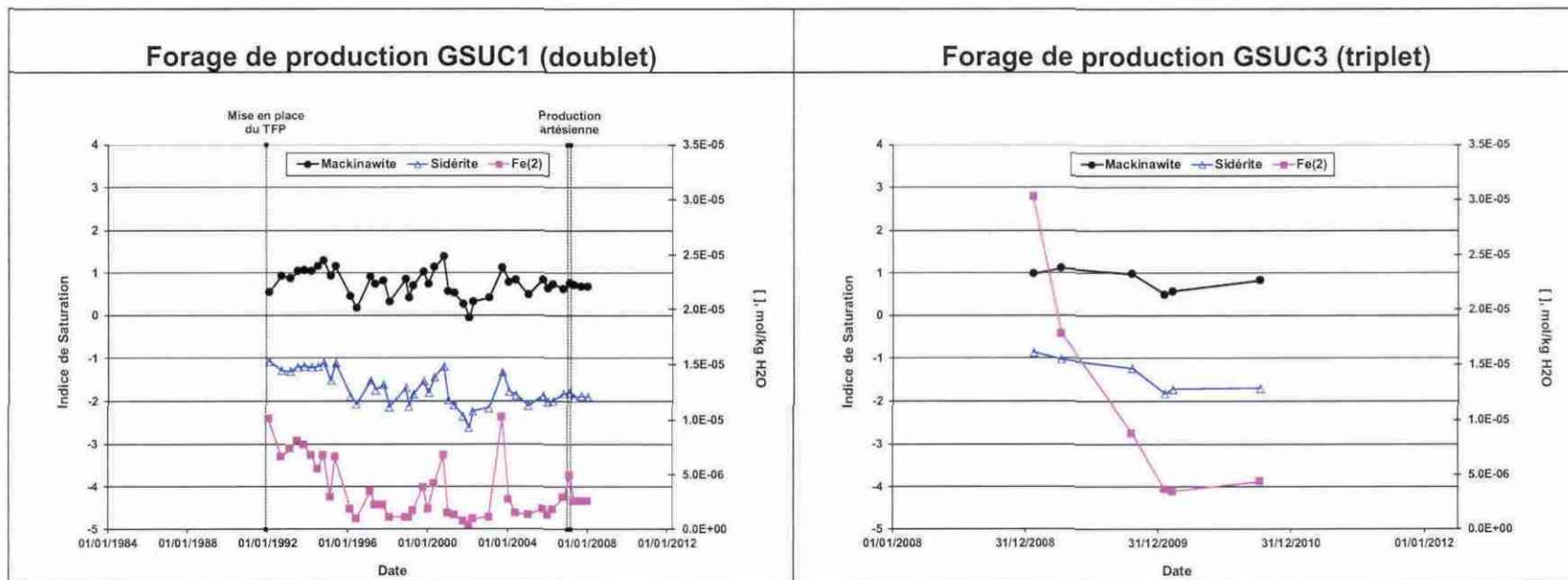


Figure 66 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forages de production GSUC1 et GSUC3 (Sucy-en-Brie, VDM).

## Orly-Nouvelet 2

### **Concentrations en éléments dissous**

Le fer dissous dans le fluide du site d'Orly-Nouvelet 2 est la seule espèce présentant une variation de sa concentration. Néanmoins, elle reste sensiblement stable sur la période considérée (autour de  $2,5 \cdot 10^{-6}$  mol/kg d'eau) (Figure 60 et 70).

### **Potentiel redox et pH**

Le pH et le pe sont relativement stables depuis le début de l'exploitation (Figure 69). On relèvera le pH du 06/10/2009 dont la valeur est relativement élevée par rapport aux autres données pH disponibles (de 0,4 unité en moyenne). Cette valeur de pH élevée est probablement due à un important dégazage du fluide géothermal au moment des analyses.

### **État d'équilibre thermodynamique**

Le comportement de la calcite est globalement stable sur la période considérée. Néanmoins, au regard de la sursaturation du 06/10/2009, la calcite présente un risque de précipitation ponctuel à l'occasion de dégazage du fluide géothermal (Figure 70).

Les saturations de la calcédoine, de l'anhydrite, de la fluorite, de la mackinawite et de la sidérite sont relativement stables depuis le début de l'exploitation du site d'Orly-Nouvelet2. La calcédoine est saturée, l'anhydrite, la fluorite et la sidérite, sous-saturées, et la mackinawite globalement sursaturée (Figure 70). La mackinawite présente ainsi un risque de précipitation permanent.

Le feldspath potassique est sursaturé depuis le démarrage de l'exploitation. La saturation de la gibbsite a diminué depuis 2010. Sursaturée jusqu'en 2010, elle est saturée depuis (Figure 70).

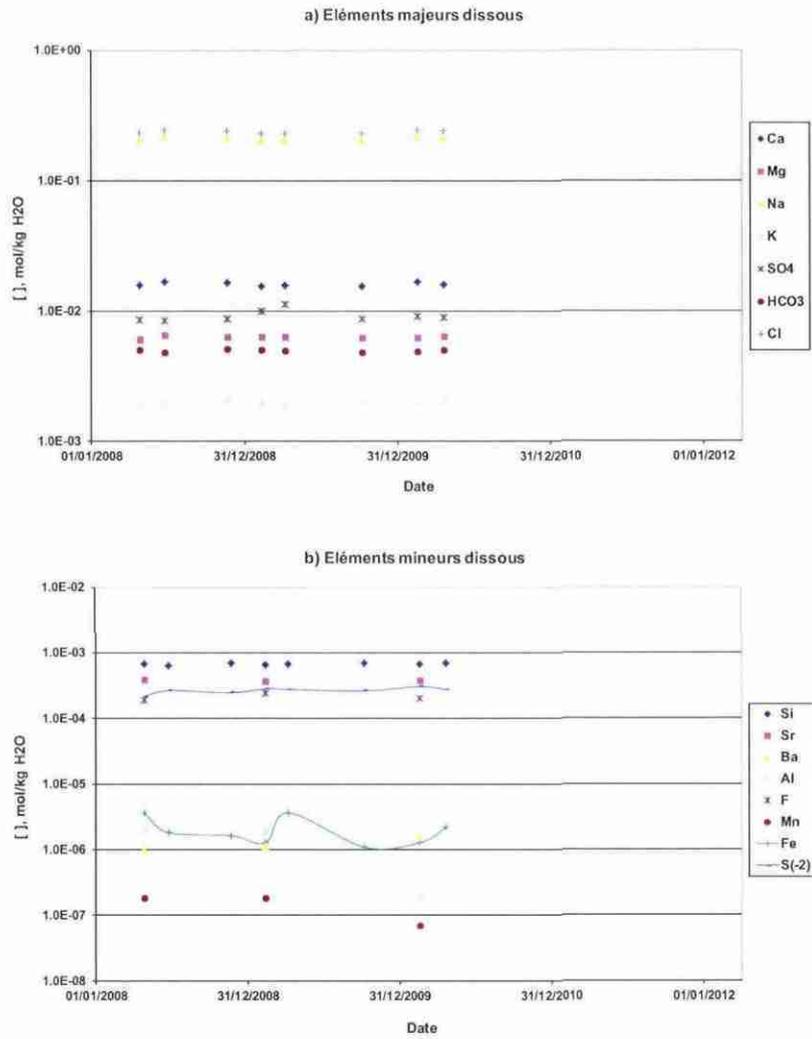


Figure 67 : Évolution des concentrations en éléments chimiques dissous. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).

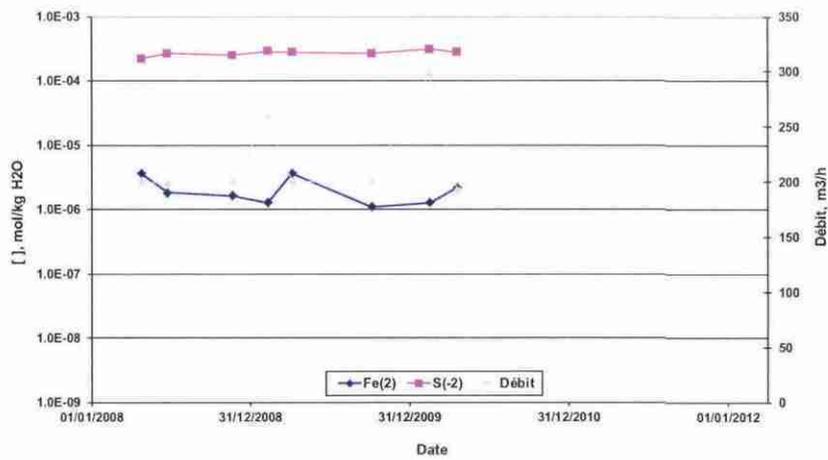


Figure 68 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).

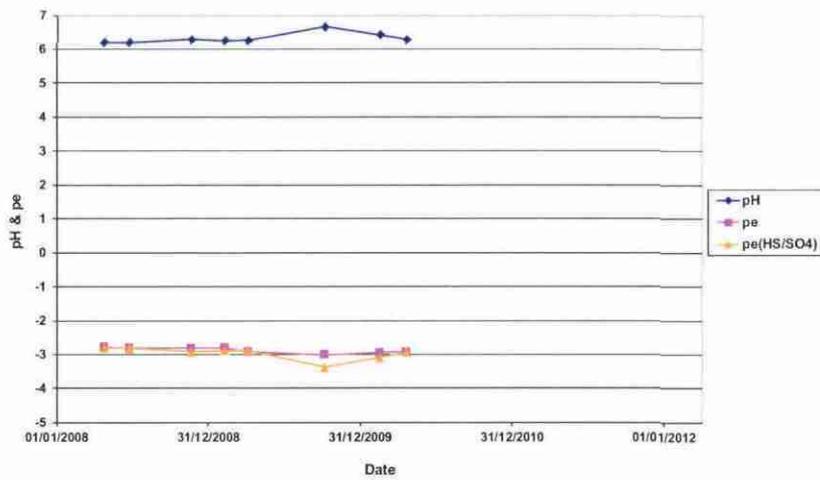


Figure 69 : Évolution du pH et du pe. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).

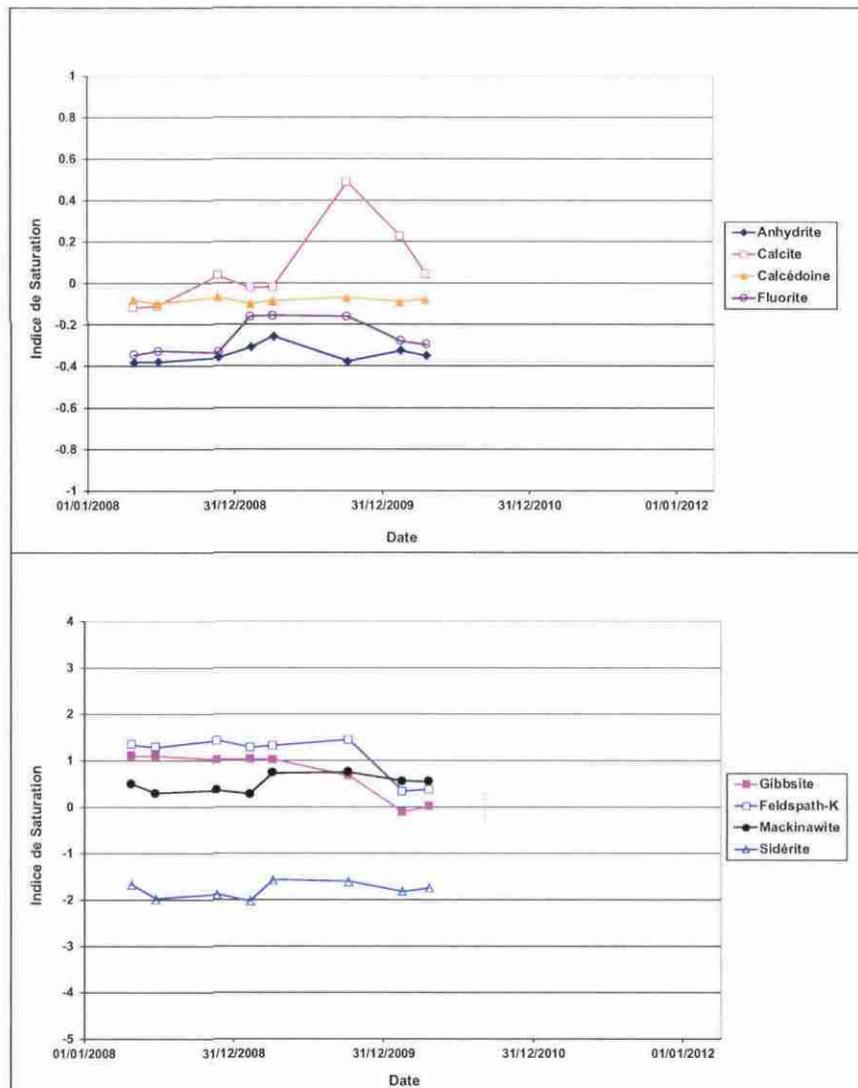


Figure 70 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forage de production GOR6 (Orly-Nouvelet2, VDM).

## Melun-l'Almont

### **Informations générales**

La centrale géothermique de Melun-l'Almont est le plus ancien site géothermique exploitant la nappe du Dogger du Bassin parisien (premier doublet foré en 1969). Elle fonctionne actuellement en doublet, mais a fonctionné en triplet entre 1995 et 1999. Pendant cette période, elle se composait de deux puits de production artésiens dont les tubages étaient constitués de matériaux différents (PM2 – acier au carbone, et PM4 – composite), et d'un injecteur (PM3). Le puits de production PM2 a été fermé en 2000.

Le puits PM4 (actuel producteur) a entièrement été tubé en matériau composite pour éviter la corrosion (phénomène ayant entraîné la fermeture en 1989 du premier injecteur du site de Melun-l'Almont, PM1).

Les données actuellement disponibles sur la physico-chimie des fluides produits par les puits PM2 et PM4 du site de Melun-l'Almont sont limitées en nombre. Les périodes couvertes par ces données sont : 1997-2000 pour le puits PM2 et 1995-2007 pour le puits PM4.

### **Concentrations en éléments dissous**

Les teneurs en sulfures dosées en tête des puits de production PM2 (acier au carbone) et PM4 (composite) sont stables et identiques (de l'ordre de  $4,4 \cdot 10^{-4}$  mol/kg d'eau). En effet, seule la concentration en fer dissous mesurée en tête de puits PM4 varie de façon significative sur les périodes considérées. Elle diminue progressivement entre 1995 et 2000, puis, tend à se stabiliser autour de  $1,5 \cdot 10^{-7}$  mol/kg d'eau (Figure 71, Figure 72 et Figure 73). De ces faits, il semble qu'une activité bactérienne soit présente sur les tubages du puits PM4. Le fer dosée en tête de puits PM4 (dont, rappelons-le, les tubages sont en matériau composite) correspondrait ainsi à la teneur dissoute dans le réservoir alimentant PM4 soustraite de la part de fer dissous précipitant sur les tubages sous forme de sulfures.

### **Potentiel redox et pH**

Le pH et le pe sont relativement stables sur les périodes considérées pour chaque puits (Figure 74).

### **État d'équilibre thermodynamique**

La calcite est globalement saturée ( $IS_{\text{moyen}} \sim 0.25$ ) dans les fluides extraits par les puits PM2 et PM4 sur les périodes considérées (Figure 75). Au regard des sursaturations ponctuelles, elle risque néanmoins de précipiter lors de dégazage du fluide géothermal.

Les saturations de la calcédoine et de l'anhydrite sont stables sur les périodes considérées pour chaque puits. La calcédoine est saturée et l'anhydrite sous-saturée (Figure 75).

La saturation de la fluorite est stable dans les fluides produits par le puits PM2 entre 1997 et 2000 ; elle est légèrement sous-saturée ( $IS_{\text{moyen}} \sim -0.16$ ). Au contraire, elle a augmenté dans les fluides produits par le puits PM4 entre 1995 et 2007 ; elle est sous-saturée jusqu'en 2005 ( $IS_{\text{moyen}} \sim -0.2$ ) puis saturée ensuite (Figure 75).

Nous disposons de très peu d'informations sur les teneurs en aluminium des fluides produits par les puits de Melun-l'Almont. Toutefois, au regard des IS des fluides produits vis-à-vis de la gibbsite et du feldspath potassique aux points de données, la gibbsite et le feldspath potassique sont *a priori* sursaturés dans les fluides de Melun-l'Almont (Figure 76).

La saturation de la mackinawite évolue parallèlement à la concentration en Fe(2) (Figure 76 et Figure 77). Elle est ainsi stable dans les fluides produits par le puits PM2 entre 1997 et 2000 ; elle est sursaturée (risque de précipitation). Au contraire, elle a diminué dans les fluides produits par le puits PM4 entre 1995 et 2007 ; elle est sursaturée jusqu'en 1998 et globalement sous-saturée depuis (risque de précipitation réduit).

La sidérite est sous-saturée dans les fluides de Melun-l'Almont. Le risque de précipitation de la sidérite est donc minime (Figure 76).



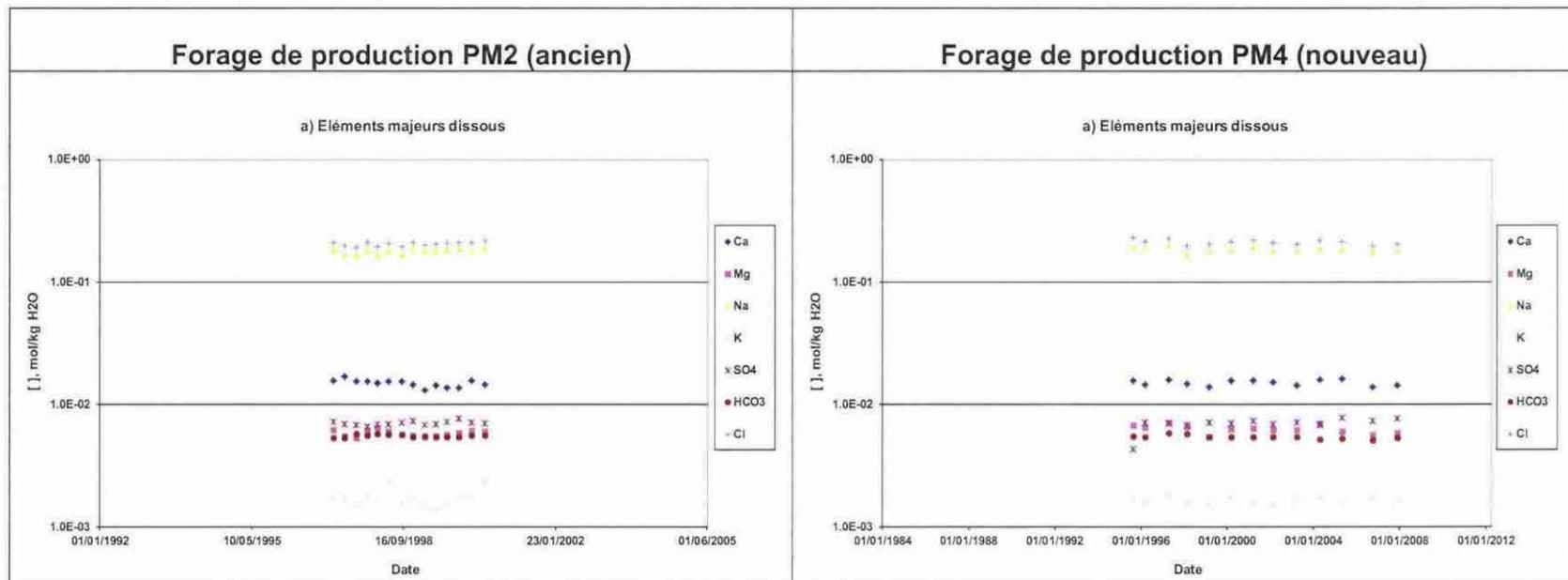


Figure 71 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (majeurs) dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

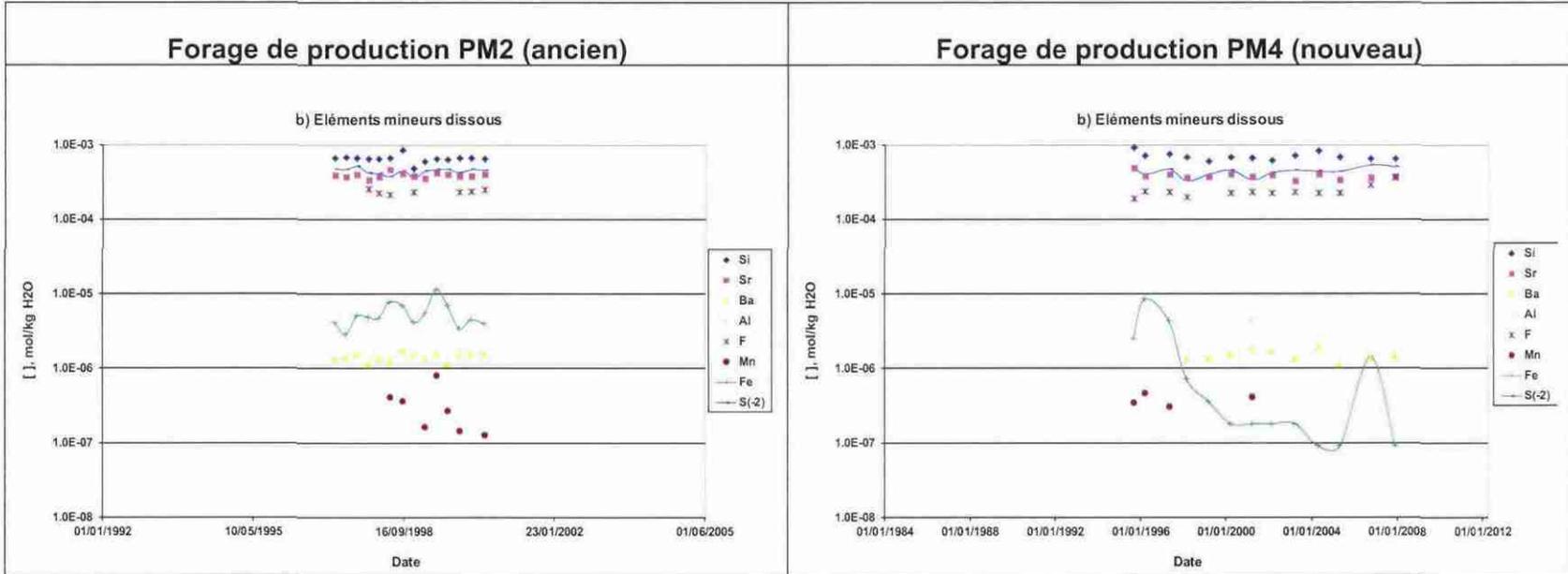


Figure 72 : Évolution des concentrations en éléments chimiques (mineurs) dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

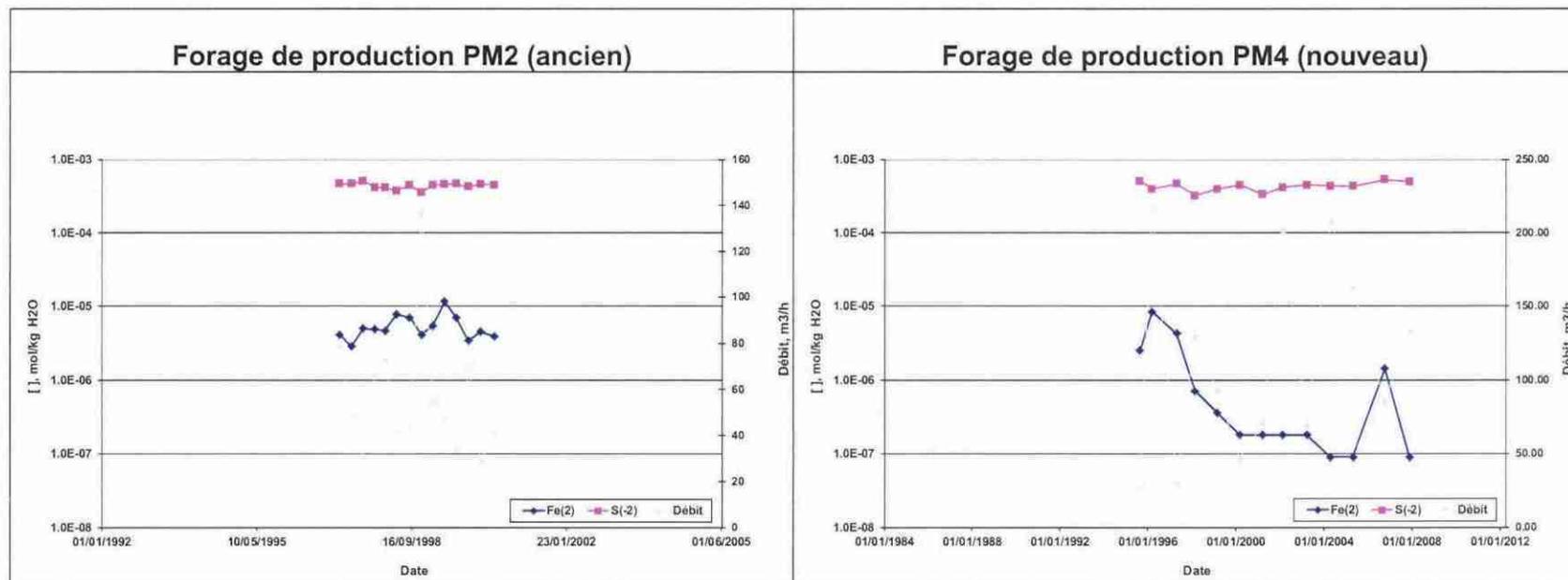


Figure 73 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

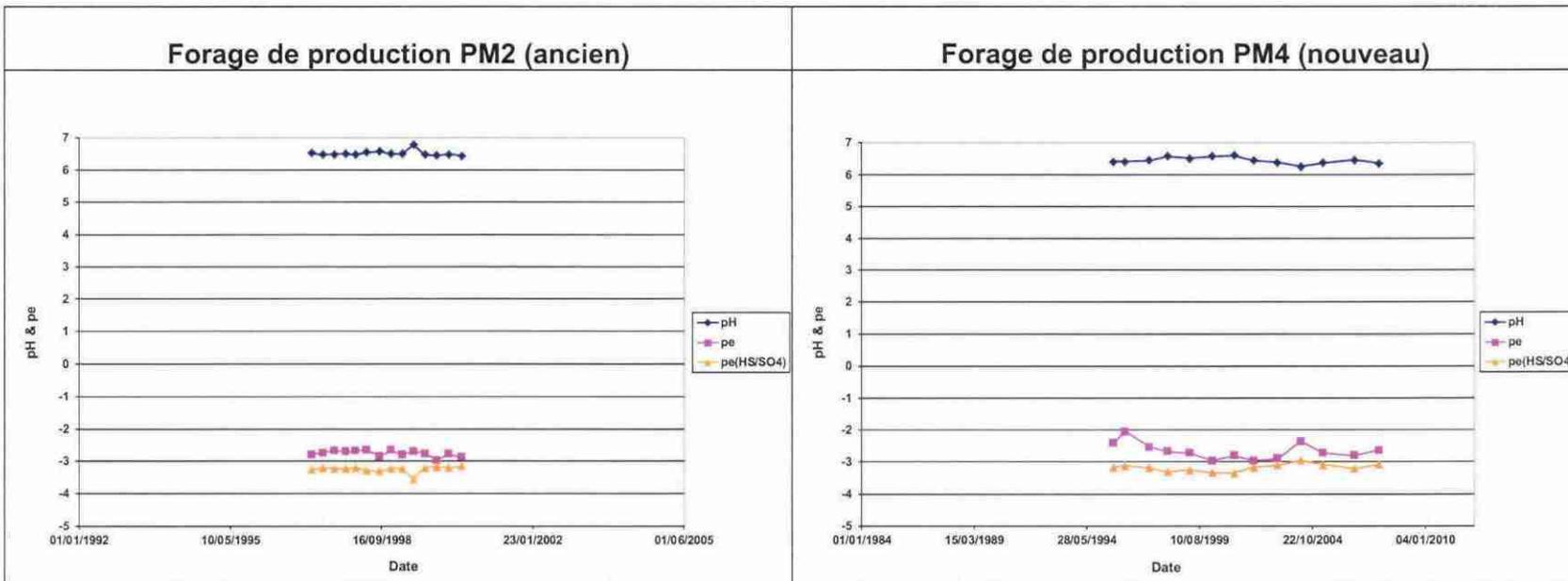


Figure 74 : Évolution du pH et du pe. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

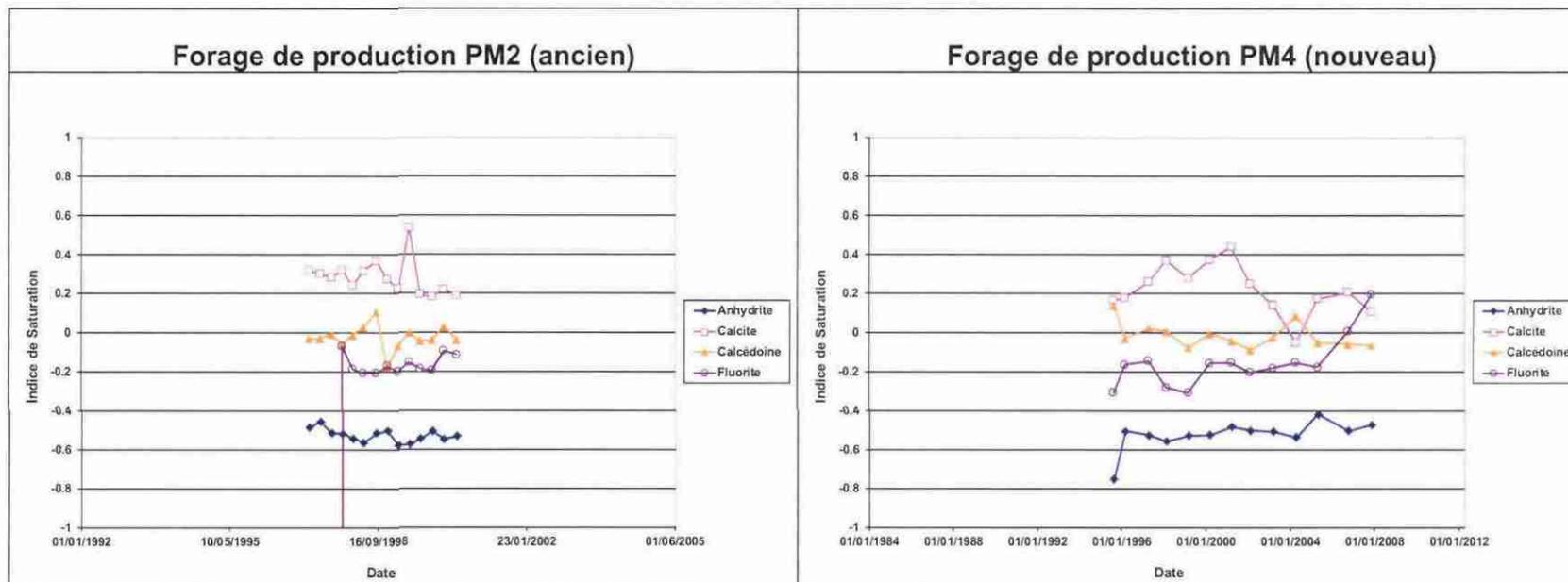


Figure 75 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

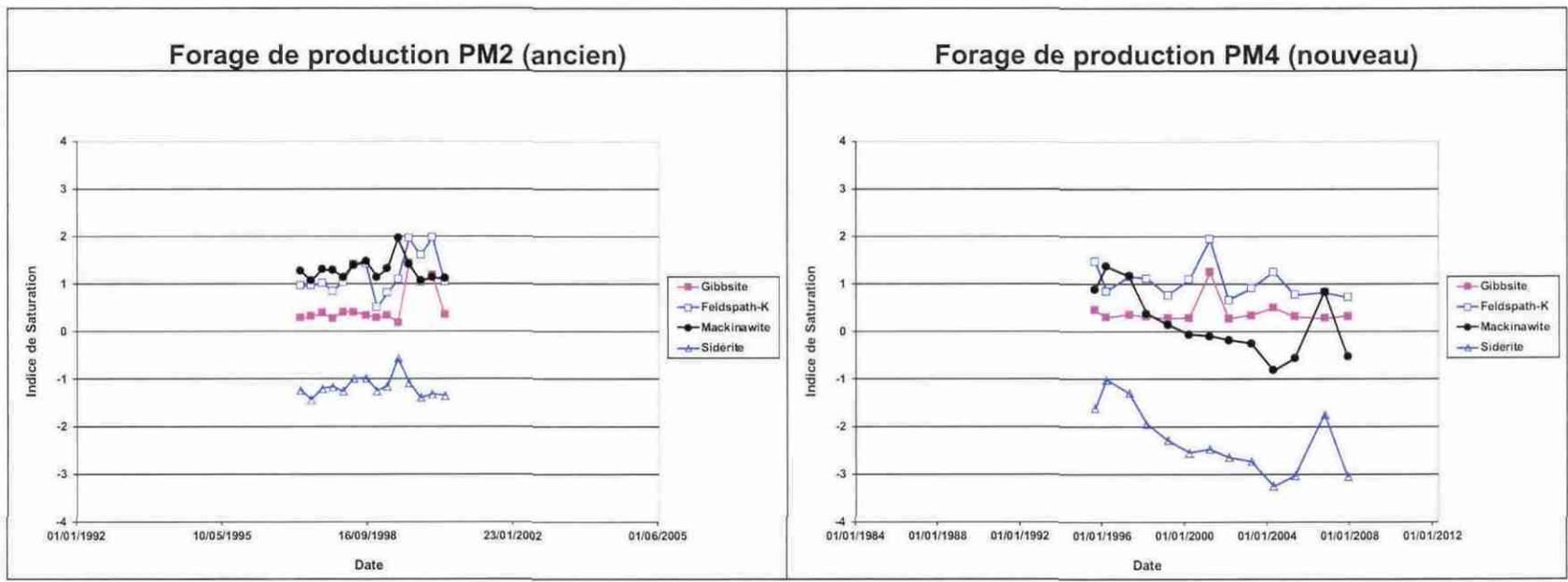


Figure 76 : Évolution de l'indice de saturation des minéraux d'intérêts en conditions de réservoir et de puits de production (suite). Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).

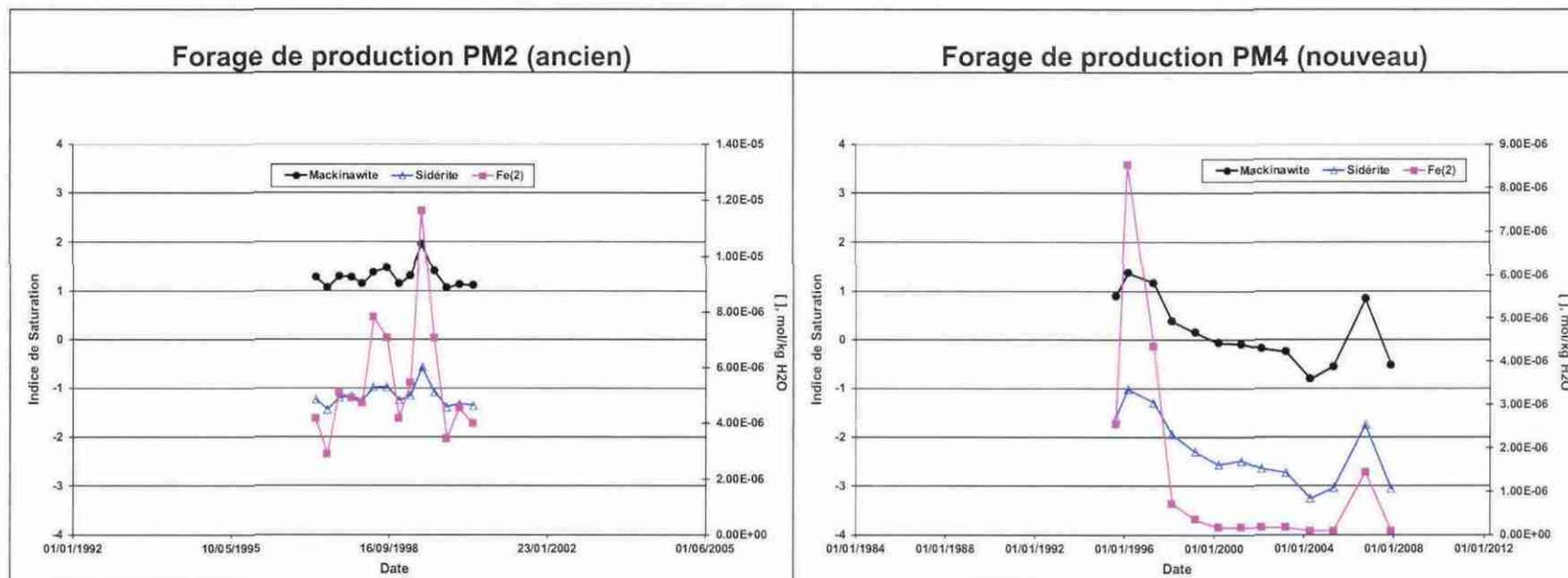


Figure 77 : Comparaison de l'évolution des IS de la mackinawite et de la sidérite en conditions de réservoir avec l'évolution de la teneur en fer dissous mesurée en tête de puits de production. Forages de production PM2 et PM4 (Melun-l'Almont, SUD).



**Centre scientifique et technique**  
**Département géothermie**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34