



Synthèse des résultats acquis sur le projet de Gestion du Dogger

Rapport final

BRGM/RP-63148-FR

janvier 2014



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Synthèse des résultats acquis sur le projet de Gestion du Dogger

Rapport final

BRGM/RP-63148-FR
janvier 2014

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

O. Goyénèche, V. Hamm, C. Castillo

Vérificateur :

Nom : A. Desplan

Date : 29/01/14

Signature :

Approbateur :

Nom : R. Vernier

Date : 03/02/14

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Dogger, Suivi et gestion, Synthèse, Île-de-France

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

Goyénèche O., Hamm V., Castillo C. (2014) – Synthèse des résultats acquis sur le projet de Gestion du Dogger. Rapport final. BRGM/RP-63148-FR, 62 p., 15 ill., 1 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre du projet « Animation du Centre Technique Géothermie » de la Convention ADEME-BRGM 2013 (Convention n° 12 05 C0131, notifiée le 24 juillet 2013).

Les principaux objectifs de ce projet sont les suivants :

- synthèse des résultats acquis depuis le début de la phase 3 du projet de Gestion du Dogger, soit à partir de l'année 2005 ;
- accompagnement du projet de Gestion du Dogger d'Île-de-France en 2013 ;
- accompagnement de la réalisation d'un guide de bonnes pratiques pour le dimensionnement des tests hydrauliques en géothermie basse et très basse énergie.

Dans la mesure où les deux derniers objectifs du projet font l'objet d'un rapport spécifique séparé qui mentionne l'apport, en termes d'animation, du présent projet, seul le premier objectif est développé dans le présent rapport.

L'annexe 1 du rapport présente le compte-rendu de la réunion du Comité Technique de Géothermie du 15 octobre 2013, au cours de laquelle différents sujets traités dans ce cadre ont été présentés.

Le présent rapport permet de mettre en lumière les apports scientifiques et techniques des travaux menés depuis presque dix ans, visant le développement et l'exploitation à long terme de l'aquifère du Dogger pour la valorisation de la filière géothermique Basse énergie en Ile-de-France.

La **mise en œuvre de la Base Dogger et sa gestion**, qui comprend notamment un grand nombre d'améliorations pour l'acquisition des données quotidiennes des 36 doublets exploitant aujourd'hui cet aquifère en région Ile-de-France, est une référence internationale unique, à notre connaissance, qui contribue à l'expertise de la France dans le domaine de la Géothermie Basse Énergie.

Les projets menés, inscrits jusqu'à fin 2011 dans la Gestion de l'aquifère du Dogger en Ile-de-France, ont conduit à des **travaux d'amélioration sensible de la modélisation thermo-hydrodynamique de l'aquifère** permettant aujourd'hui une prédiction très avancée de l'évolution des « bulles froides » et de la percée thermique des opérations en cours d'exploitation, ainsi que des nouvelles opérations faisant l'objet d'études de faisabilité.

L'animation du Centre technique géothermie a permis, à travers le projet inscrit dans la convention en 2012 de « Gestion de la Base Dogger », de réaliser avec succès et en recueillant l'accord unanime des maîtres d'ouvrages et de leurs délégataires, la mise à disposition de tous les opérateurs intéressés par l'exploitation du Dogger des données leur permettant de réaliser leurs études de permis de recherche, afin d'éviter les risques de conflits d'usage en cas de densité élevée d'opérations sur certaines zones géographiques.

De même, les **études géochimiques des fluides du Dogger** au cours des années 2009, 2010 et 2011, en utilisant notamment les données géochimiques recueillies par les sociétés de services en charge de ce suivi sur les sites, ont permis d'identifier les évolutions évoquées aux chapitres 3 et 5 de ce rapport. Ces observations ont conduit les géochimistes du BRGM à se

poser la question de faire évoluer la composition des inhibiteurs de corrosion–dépôts employés sur les sites d'Île-de-France depuis plus de 20 ans, afin de mieux les adapter aux nouvelles conditions d'exploitation et à la chimie des fluides, tout en essayant d'en limiter les concentrations et donc les coûts d'exploitation correspondants et leurs impacts potentiels.

Ce sont ces réflexions qui ont conduit la Division géothermie du BRGM à proposer en 2013 à l'ADEME deux projets de Recherche et Développement qui ont été approuvés et sont en cours de réalisation.

L'un de ces projets, intitulé « Test Dogger », doit permettre d'améliorer les connaissances sur l'aquifère du Dogger dans une zone du Val-de-Marne où il est densément exploité, en mesurant les interférences hydrauliques entre cinq doublets voisins. La fiabilité des modélisations thermo-hydrauliques destinées à une bonne gestion de la ressource sera ainsi accrue. Ces travaux s'achèveront à la fin de l'année 2014.

Le second projet s'intitule « InhibDogger » et a pour objectif de tester en laboratoire, à partir d'un fluide du Dogger reconstitué, six inhibiteurs proposés par les formulateurs sur la base du cahier des charges qui leur a été communiqué. Il s'agira de présélectionner les trois meilleurs produits susceptibles de faire évoluer la lutte contre la corrosion des installations de la boucle géothermale dont les tubages des puits, dans le contexte géochimique actuel du Dogger.

Pour finir, il convient de constater que les travaux menés dans le cadre du Centre Technique Géothermie (Axe 4 des Conventions) doivent être considérés comme un Etat de l'Art méthodologique pour la valorisation d'autres aquifères profonds, en adaptant, bien sûr, les méthodes à la géologie, au sens large, des formations exploitées dans cette filière de géothermie basse énergie.

Un exemple important est matérialisé par le projet qui concerne l'élaboration d'un Guide de réalisation des essais de production et d'injection dans les puits. Il formalise des règles de bonne conduite pour la réalisation de ces tests de fin de forage, indispensables pour évaluer les paramètres d'exploitation d'un doublet et, à terme, préciser les méthodes de développement des forages dans des formations géologiques différentes.

Ces travaux doivent donc conduire à promouvoir la connaissance et l'exploitation d'autres aquifères profonds en s'appuyant sur la méthodologie mise en place pour le Dogger depuis près de 15 ans.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Présentation synthétique des travaux réalisés sur le comportement de l'aquifère du Dogger depuis 2005.....	9
3. Apport de la Phase 3 du projet de gestion du Dogger.....	11
3.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GÉOCHIMIQUE	11
3.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION HYDRO-THERMIQUE À L'ÉCHELLE DU RÉSERVOIR.....	15
4. Apport du projet Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France de l'année 2010.....	19
5. Apport du projet Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France de l'année 2011.....	23
6. Apport du projet Gestion de la base de données du Dogger en Île-de-France - 2012.....	28
7. Conclusion.....	30
8. Bibliographie	33

Liste des illustrations

Figure 1 : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GCO1 (Coulommiers, secteur Est).	12
Figure 2 : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).	12
Figure 3 : Évolution du pH. Forages de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est), GAL2 (Alfortville, VDM) et GCO1 (Coulommiers, secteur EST).....	13
Figure 4 : Évolution du pe. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).	13
Figure 5 : Évolution du pe. Exemple Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).....	14
Figure 6: Bulles thermiques jusqu'en 2010	16
Figure 7 : Exemple des trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs du Val-de-Marne (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage du doublet de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976)	17
Figure 8 : Champ des températures à fin 2020	18
Figure 9 : Exemple : Evolution de la température (°C) au puits producteur d'Alfortville (doublet de la zone 1).....	20

Figure 10 : Exemple : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2010) – Zone 1 du Val-de-Marne = Alfortville, Bonneuil-sur-Marne, Créteil, Maisons-Alfort I et II, Sucy-en-Brie (triplet depuis 10/2008)	22
Figure 11 : Exemple : Impacts thermiques des doublets de la Zone 1 (fin 2020)	22
Figure 12 : Comparaison des résultats pour le doublet d'Alfortville de la date de percée thermique ($\Delta T > 0,5 \text{ °C}$) et la baisse de température à fin 2010	24
Figure 13 : Évolution de la concentration en sulfures dans les fluides du Dogger exploités en IdF	26
Figure 14 : Évolution du pH dans les fluides du Dogger exploités en IdF	26
Figure 15 : Site Web d'accès à la base Dogger	29

Liste des annexes

Annexe 1 : Compte-rendu de la réunion du Centre Technique Géothermie du 15 octobre 2013

1. Introduction

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre du projet « Animation du Centre Technique Géothermie » de la Convention ADEME-BRGM 2013 (Convention n° 12 05 C0131, notifiée le 24 juillet 2013).

Les principaux objectifs de ce projet sont les suivants :

- synthèse des résultats acquis depuis le début de la phase 3 du projet de « Gestion du Dogger », soit à partir de l'année 2005 ;
- accompagnement du projet « Gestion du Dogger d'Île-de-France en 2013 » ;
- accompagnement de la réalisation d'un guide de bonnes conduites pour le dimensionnement des tests hydrauliques en géothermie basse et très basse énergie.

Dans la mesure où l'accompagnement technique relatif au second et troisième objectif est, de fait, intégré dans les rapports des projets 14 et 15 de l'Axe 4 de la Convention, dont les résultats ont été présentés lors du COPIL élargi du 15 octobre 2013, il n'en sera pas fait état dans le présent rapport.

L'annexe 1 du rapport présente le compte-rendu de la réunion du Comité Technique de Géothermie du 15 octobre 2013, au cours de laquelle différents sujets traités dans ce cadre ont été présentés.

Il convient de considérer que l'objectif général du projet de gestion du Dogger est, depuis 2005, d'évaluer l'évolution des caractéristiques d'exploitation de cet aquifère, afin :

- d'anticiper les risques de désordres susceptibles de perturber l'exploitation de l'aquifère au sein de chacune des opérations en service : percée thermique, perturbation des paramètres de production ou d'injection, modification de la composition chimique du fluide et de l'efficacité des traitements appliqués, etc. ;
- de mettre en place les programmes de recherche et développement susceptibles d'améliorer la connaissance de l'aquifère et de corriger les méthodes de son exploitation tant physiques que chimiques ;
- de disposer de modèles de comportement de l'aquifère pour participer, à titre d'experts auprès de l'administration, à l'évaluation de l'impact de nouvelles opérations à réaliser, en prenant en compte l'impact technique sur les opérations existant dans un voisinage proche et réciproquement, l'impact sur la nouvelle opération du fait de sa conception (orientation des puits, distance entre les deux puits du doublet, mode d'exploitation et débit,...) ou de la présence proche d'opérations plus anciennes.

2. Présentation synthétique des travaux réalisés sur le comportement de l'aquifère du Dogger depuis 2005

Ce chapitre s'appuie essentiellement sur :

- **le projet « Gestion du Dogger – Phase 3 »** initié en 2005, qui s'est concrétisé en 2008 et s'est achevé par la publication du rapport final de la Phase 3 en novembre 2010 (Rapport BRGM/RP-58834-FR).

À noter que cette phase 3 du projet faisait suite à :

- la Phase 1 réalisée d'octobre 2001 à novembre 2002, laquelle avait été consacrée à la conception générale et à la construction de la base de données, dite « Base Dogger », comprenant les données relatives aux forages captant le Dogger (données géométriques, caractéristiques intrinsèques au réservoir), et à son exploitation (débits, températures, pressions, géochimie du fluide),
- et à la Phase 2, de décembre 2002 à mars 2005, qui a consisté en l'intégration de toutes les données disponibles dans la base Dogger et à la conception d'une méthode d'interprétation et de modélisation de l'aquifère.

La phase 3 du projet de « Gestion du Dogger » a permis, notamment, de **quantifier les évolutions des « bulles froides »** créées autour des puits injecteurs du fait de la réinjection du fluide refroidi et les **interférences hydrauliques entre doublets**, ainsi que **l'évolution thermique et physico-chimique du fluide produit**.

Les outils pour répondre à cette action ont alors été développés :

- modélisation couplée hydrodynamique et thermique,
 - calculs de spéciation chimique dans le temps et dans l'espace, afin de préciser les évolutions de la chimie de l'eau du Dogger et leurs causes ;
- **le projet « Gestion du Dogger – 2010 »** qui s'est déroulé d'avril 2010 jusqu'à la publication du rapport final en mai 2011 (Rapport BRGM/RP-59845-FR).

Parmi les éléments importants de cette phase du projet de gestion du Dogger, il faut retenir :

- la mise en place, en concertation avec les maîtres d'ouvrage et les exploitants des sites géothermiques, d'un fichier Excel standardisé pour la collecte des données d'exploitation, lequel est toujours utilisé aujourd'hui,
 - la réalisation d'un fichier, également normalisé, pour l'intégration des données physicochimiques du fluide du Dogger ;
- **le projet « Gestion du Dogger – 2011 »**, de mai 2011 jusqu'à la publication du rapport final en mars 2012 (Rapport BRGM/RP-60996-FR) a, outre la pérennisation délicate de la collecte des données d'exploitation physiques et chimiques des 35 doublets exploitant alors l'aquifère du Dogger en région Ile-de-France, été la dernière année, dans le cadre de la Convention annuelle ADEME-BRGM d'appui aux politiques publiques, d'analyse de l'évolution du comportement du Dogger en prenant en compte :

- l'affinage des modélisations de thermodynamique chimique du Dogger avec une étude d'inter-comparaison sur la modélisation de la percée thermique dans un doublet spécifique du Dogger pour lequel une baisse sensible de température au puits de production est observée,
 - une étude de sensibilité sur les paramètres influençant les transferts thermiques, comme le temps de percée thermique et la décroissance thermique au puits producteur, afin d'identifier ceux qui ont un impact important sur la précision des résultats obtenus et sur les minéraux potentiellement indicateurs de la percée thermique (SiO₂) vis-à-vis des variations de température et des incertitudes de mesures,
 - l'élaboration d'une cartographie des évolutions géochimiques des fluides du Dogger exploités en Ile-de-France de 1990 à 2011 et notamment des sulfures et du pH et leur impact sur les phénomènes de corrosion/dépôts des puits géothermiques ;
- **enfin, le projet 2012 de « Gestion de la base de données du Dogger en Île-de-France »** dont le rapport a été publié en mars 2013 (Rapport BRGM/RP-62030-FR), qui a eu pour objectif de rendre la base Dogger opérationnelle et accessible, via une application Web dédiée, à l'ensemble des professionnels œuvrant en géothermie sur l'aquifère du Dogger. Le but de ce travail est de permettre aux principaux acteurs des opérations au Dogger du bassin parisien (bureaux d'étude en charge de la réalisation de forages géothermiques ou du suivi réglementaire des opérations, maîtres d'ouvrages propriétaires de données de la base mais aussi tout bureau d'étude amené à réaliser l'étude de faisabilité d'une opération nouvelle), de s'y connecter après obtention d'un droit d'accès auprès du BRGM.

3. Apport de la Phase 3 du projet de gestion du Dogger

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

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

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

3.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GÉOCHIMIQUE

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

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

- les sulfures et le fer dissous sont les seules espèces présentant une variation significative de leur concentration et de façon indépendante de la température :
 - **la teneur en sulfures dissous** croît progressivement, puis tend à se stabiliser. Cette tendance générale est *a priori* dépendante du débit et des traitements de fond de puits. Ceci laisse envisager un contrôle plutôt cinétique des sulfures,

- **la teneur en fer dissous** décroît jusqu'en 2001, puis deux tendances se présentent suivant les sites :
 - stabilisation pour une minorité d'opérations ;
 - augmentation progressive pour la majorité des sites examinés. Ce comportement est *a priori* dû aux conditions d'exploitation (chemisage, débit, traitements, etc.). Comme pour les sulfures, le fer est visiblement contrôlé par des processus réactifs sans pour autant satisfaire parfaitement les conditions d'équilibre thermodynamique surtout en présence d'inhibiteur de corrosion-dépôt ;

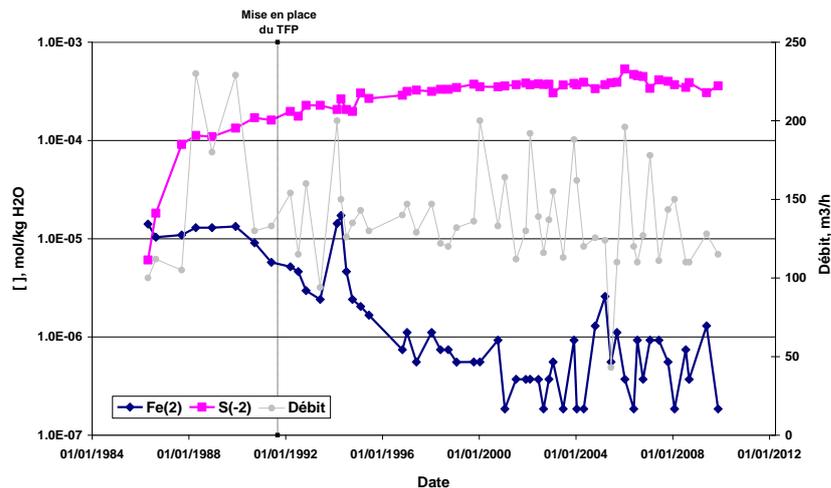


Figure 1. : Évolution des concentrations en sulfures et en fer dissous. Forage de production GCO1 (Coulommiers, secteur Est).

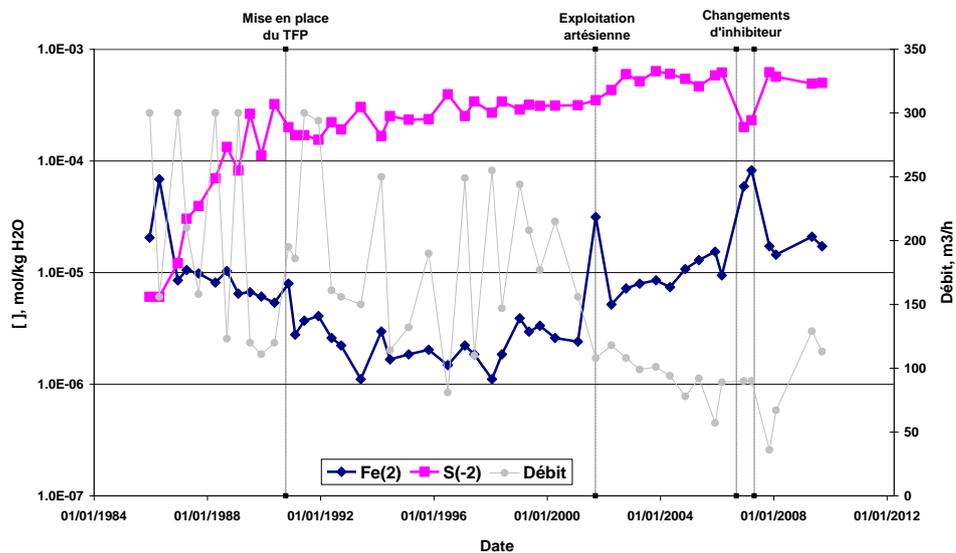


Figure 2. : Évolution des concentrations en sulfures et fer dissous - Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval1, secteur Est).

- **le pH** est globalement stable ($6 < \text{pH} < 7$). Il diminue en moyenne de 0,15 unité les dernières années d'exploitation (après 2001). La création de dépôts et leur vieillissement progressif dans le puits de production semblent être en partie à l'origine de cette diminution. Toutefois, la plus grande contribution pressentie à la diminution du pH est celle du réservoir, qui produirait un fluide de plus en plus acide après recirculation ;

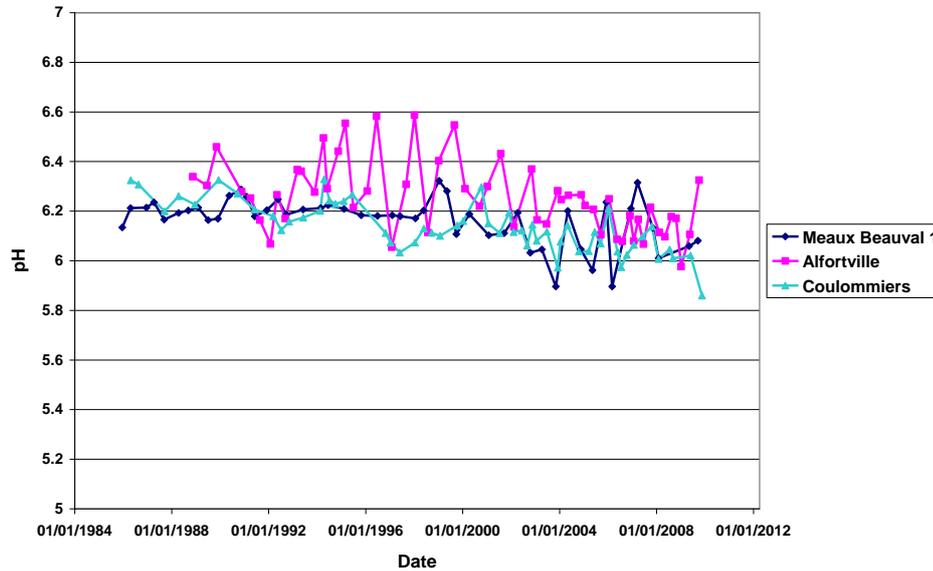


Figure 3. : Évolution du pH. Forages de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est), GAL2 (Alfortville, VDM) et GCO1 (Coulommiers, secteur EST).

- **le potentiel d'oxydo-réduction (pe)** est différent de celui recalculé à partir du couple ($\text{HS}^- / \text{SO}_4^{2-}$). Le pe diminue en moyenne de 1,5 unité pour tous les forages (sauf Alfortville et Montgeron pour lesquels le pe est stable). Cette diminution intervient dans les premières années d'exploitation (avant 1990), et se stabilise ensuite ;

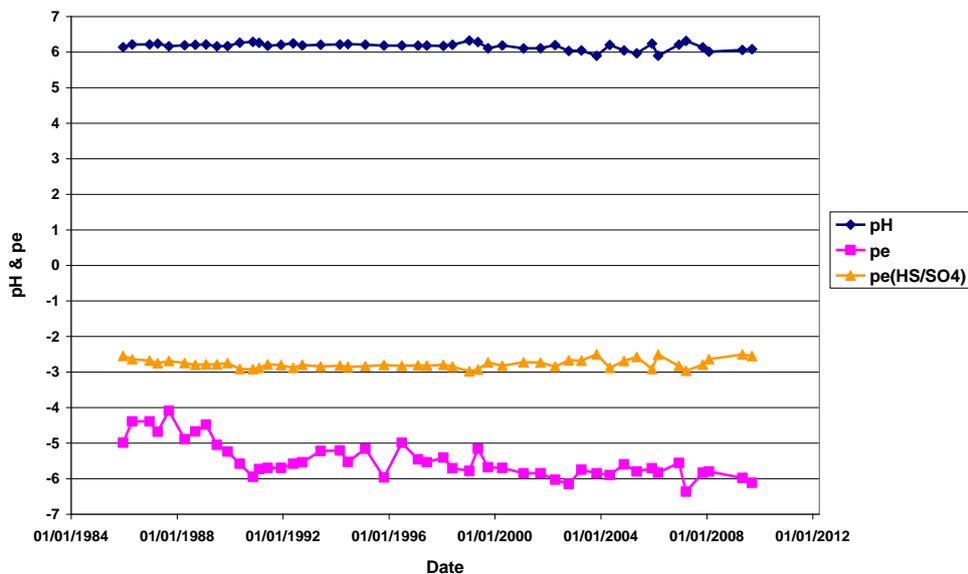


Figure 4. : Évolution du pe. Forage de production GMX5 (Meaux-Beauval 1, Est).

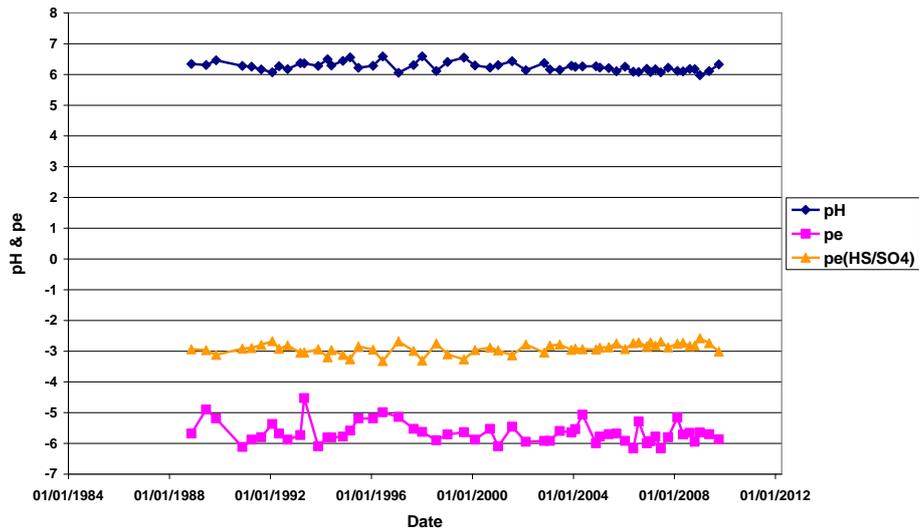


Figure 5. : Évolution du pe. Forage de production GAL2 (Alfortville, VDM).

- l'étude présente également les évolutions des indices de saturation de huit familles de minéraux, parmi lesquels on distingue la **mackinawite** (FeS) et la **calcite** (CaCO₃) qui sont les seuls minéraux pour lesquels l'indice de saturation évolue de manière sensible :
 - La **calcite** est saturée pour tous les puits (IS ~ 0). Elle reste néanmoins susceptible de précipiter en cas de dégazage. Ce risque paraît toutefois réduit les dernières années d'exploitation (2001-2009). En effet, la saturation de la calcite tend à diminuer en raison de la chute générale du pH des fluides,
 - La **mackinawite** est saturée (-0,5 < IS < +0,5) à sursaturée (IS > 0,5) pour tous les puits. De plus, malgré la mise en place des traitements de fond de puits, l'évolution de l'IS de la mackinawite épouse celle du Fe(2). Le risque de précipitation de la mackinawite a ainsi globalement augmenté les dernières années d'exploitation, notamment à cause de la baisse généralisée des débits d'exploitation ;
- les autres minéraux étudiés : **calcédoine** (SiO₂), **anhydrite** (CaSO₄), **fluorite** (CaF₂), **gibbsite** (Al(OH)₃), **feldspath potassique** (KAlSi₃O₈) et **sidérite** (FeCO₃) ne sont pas détaillés ici, mais présentent généralement des indices stabilisés tantôt sursaturés, saturés ou sous-saturés, en fonction des zones géographiques de l'Île de France.

Les tendances mises en évidence lors des phases 1 et 2 du projet se poursuivent sur la phase 3 (2005-2010) pour une part des paramètres analysés (pe, concentrations en majeurs dissous, S(-2) et indices de saturation) et différent pour l'autre part (Fe(2) et pH). Elles paraissent peu dépendantes du secteur géographique dans la mesure où les différences sont *a priori* à rechercher parmi les conditions d'exploitation (**débit**, traitements, travaux, etc.). La saturation de l'anhydrite à l'Est (région de Meaux et de Coulommiers) est la seule spécificité géographique réellement observée.

Lors de la phase 2 du projet, il avait été montré que certains éléments (Ca²⁺, HCO₃⁻ et Si) étaient sensibles à la température du fluide, car contrôlés par des minéraux à comportement prograde ou rétrograde. De plus, au regard des cinétiques de précipitation/dissolution des « minéraux de contrôle » des concentrations de ces éléments en solution, il a été précisé que

seul le **silicium** pourrait annoncer l'approche du front froid¹. Le fait que le calcium ne puisse pas être annonciateur du front froid serait établi, s'il était confirmé que le pH du réservoir a diminué depuis le démarrage des exploitations. En effet, l'augmentation de la teneur en Ca^{2+} due au refroidissement de l'eau géothermale serait amplifiée par celle due à l'acidification de l'eau du réservoir. Toutefois, nous ne constatons pas d'augmentation de Ca^{2+} , ni de variation de l'alcalinité (HCO_3^-), mais uniquement une chute du pH des fluides en tête de puits, apparemment seul paramètre responsable de la chute de l'IS de la calcite. Parallèlement, les phases qui contrôlent les concentrations en silicium (silicates et aluminosilicates) dans les fluides géothermaux sont « potentiellement indicatrices du refroidissement ». Néanmoins, les données en aluminium étant rares, l'état de saturation de la **calcédoine** reste la fonction active susceptible d'annoncer l'arrivée du front froid dans le domaine du proche puits de production.

Au regard de l'absence de variations de la concentration en silicium et de l'IS de la calcédoine sur la période d'exploitation, **le front froid n'a pas encore, du point de vue de la géochimie, atteint les puits de production examinés**. Cette conclusion semble corroborée par le suivi des paramètres d'exploitation des sites et tout particulièrement la température de production. Toutefois, nous excluons de ces conclusions le site d'Alfortville, où malgré l'absence de variations en silicium et de l'IS de la calcédoine, la percée thermique, serait confirmée depuis environ trois ans, par une chute de température mesurée (environ $0.2^\circ\text{C}/\text{an}$) et par les modélisations hydrodynamiques.

3.2. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION HYDROTHERMIQUE À L'ÉCHELLE DU RÉSERVOIR

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

Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte l'évolution de la température du réservoir exploité pour, d'une part, contrôler le recyclage aux puits de production des eaux froides injectées et ainsi anticiper la baisse de température du fluide prélevé et, d'autre part, déterminer l'extension des zones envahies par la baisse de température (bulle froide) pour éviter tout refroidissement prématuré lors de la réalisation de nouvelles opérations.

Le rapport de la Phase 3 présentait trois approches de modélisation du comportement hydraulique et thermique à l'échelle du puits ou de l'ensemble des doublets géothermiques :

- la première approche, basée sur une représentation mathématique simplifiée, **considère chaque puits injecteur avec un écoulement de type « piston » sans tenir compte du puits producteur et des puits voisins**. La bulle est représentée par un cercle centrée sur le puits injecteur, la surface du cercle donne la zone envahie par la baisse de température. Cette approche très simplifiée permet d'avoir un ordre de grandeur rapide de la progression du front froid et de le mettre en relation avec des aménagements de type réseau de chaleur en surface ;

¹ Le silicium est contrôlé par la solubilité de minéraux caractérisés par des cinétiques lentes : les silicates et les aluminosilicates. Au contraire, le bicarbonate (HCO_3^-) et le calcium sont contrôlés par des minéraux à cinétiques rapides (carbonates et sulfates). Il n'est donc pas envisageable d'identifier des évolutions des concentrations en HCO_3^- et en Ca, susceptibles d'annoncer l'approche du front froid, à des temps bien antérieurs à son arrivée ;

Bulles thermiques jusqu'en 2010

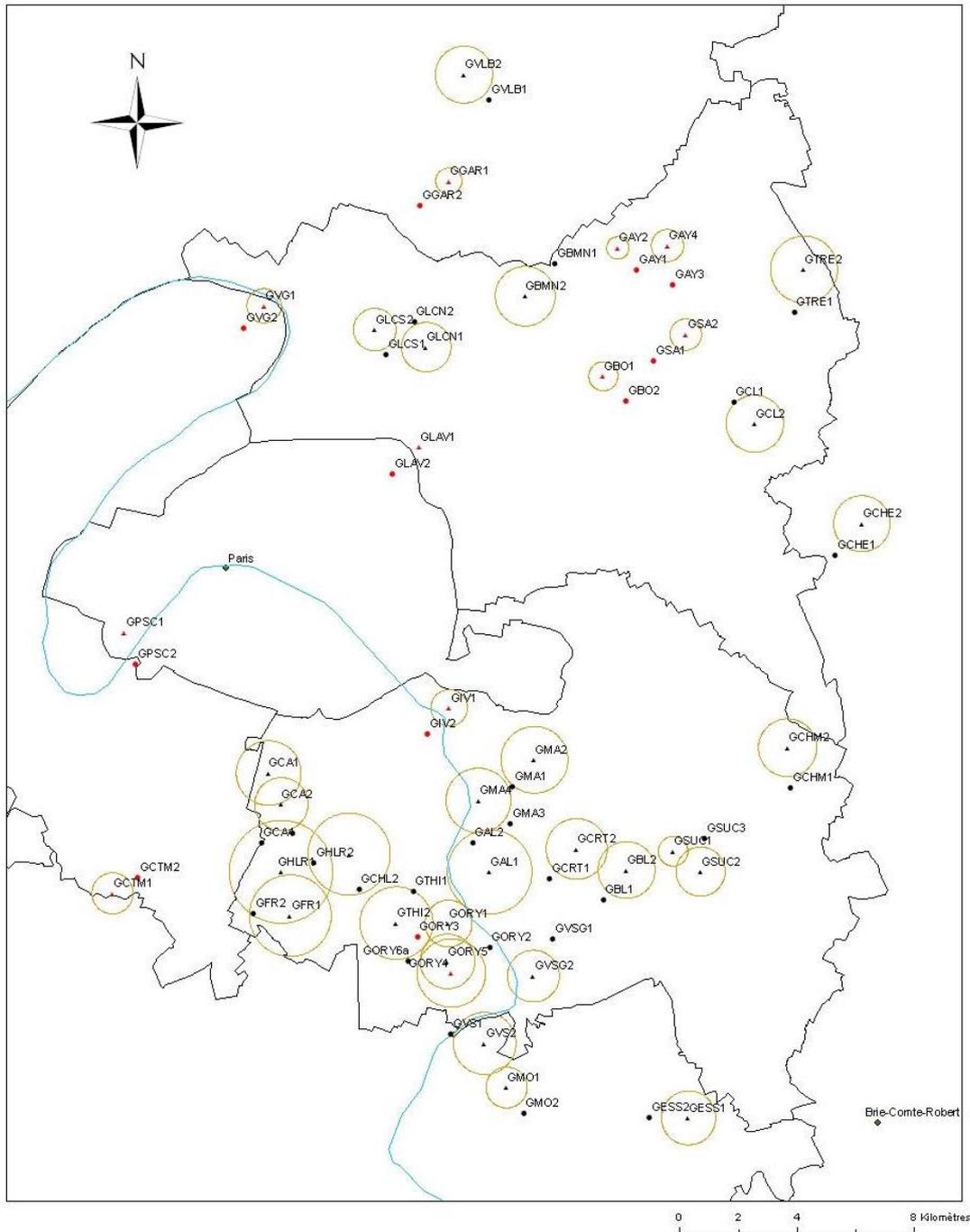


Figure 6. : Bulles thermiques jusqu'en 2010.

- la seconde approche, basée sur un modèle hydrodynamique, considère **un calcul du déplacement de particules d'eau froide**. L'ensemble des puits ainsi que l'hétérogénéité du milieu (perméabilité, épaisseur productive) sont pris en compte dans le modèle. Ce calcul permet de **préciser les interférences hydrauliques entre doublets et vers quel puits seront recyclées les eaux froides injectées**. L'extension des bulles (zone envahie par les particules) est plus précise du fait que chaque doublet est pris dans son environnement réel ;

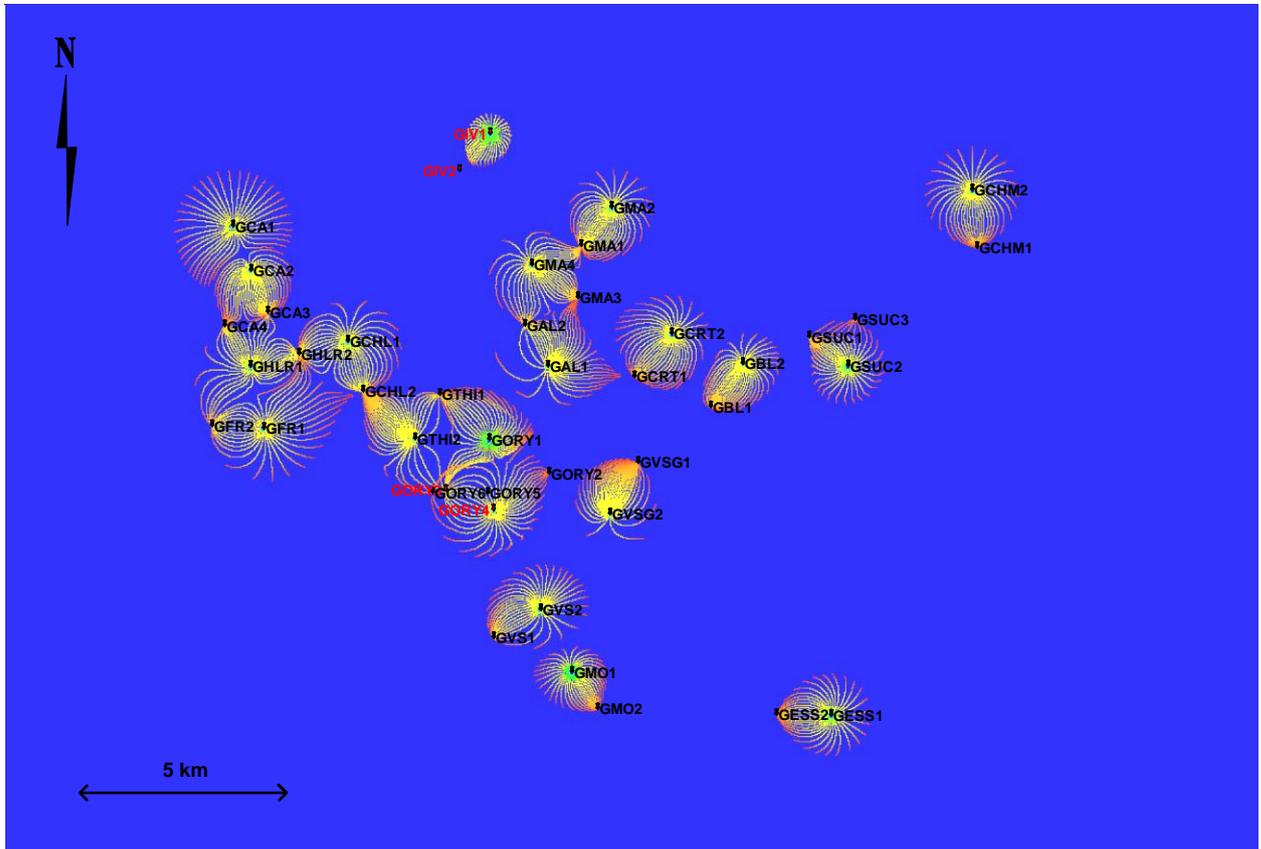


Figure 7. : Exemple des trajectoires des particules d'eau froide autour des puits injecteurs du Val-de-Marne (l'échelle des couleurs correspond au temps en mois, écoulé depuis le début de la simulation prise au démarrage du doublet de Villeneuve-la-Garenne en décembre 1976).

- la troisième approche est basée également sur un modèle hydrodynamique auquel sont ajoutés **les processus de transfert thermique**. À la différence du modèle précédent, la température du milieu est calculée en chaque maille du modèle **et permet notamment de tenir compte du stock de chaleur contenu dans les épontes qui va ralentir le refroidissement du réservoir**. Cette dernière approche, plus précise mais aussi la plus lourde en termes de mise en œuvre et de calcul, a permis **de réaliser une cartographie de l'extension des bulles froides à fin 2010 et une prévision à fin 2020 ainsi que de sortir des courbes d'évolution de la température du fluide à chaque puits de production**.

Champ des températures à fin 2020

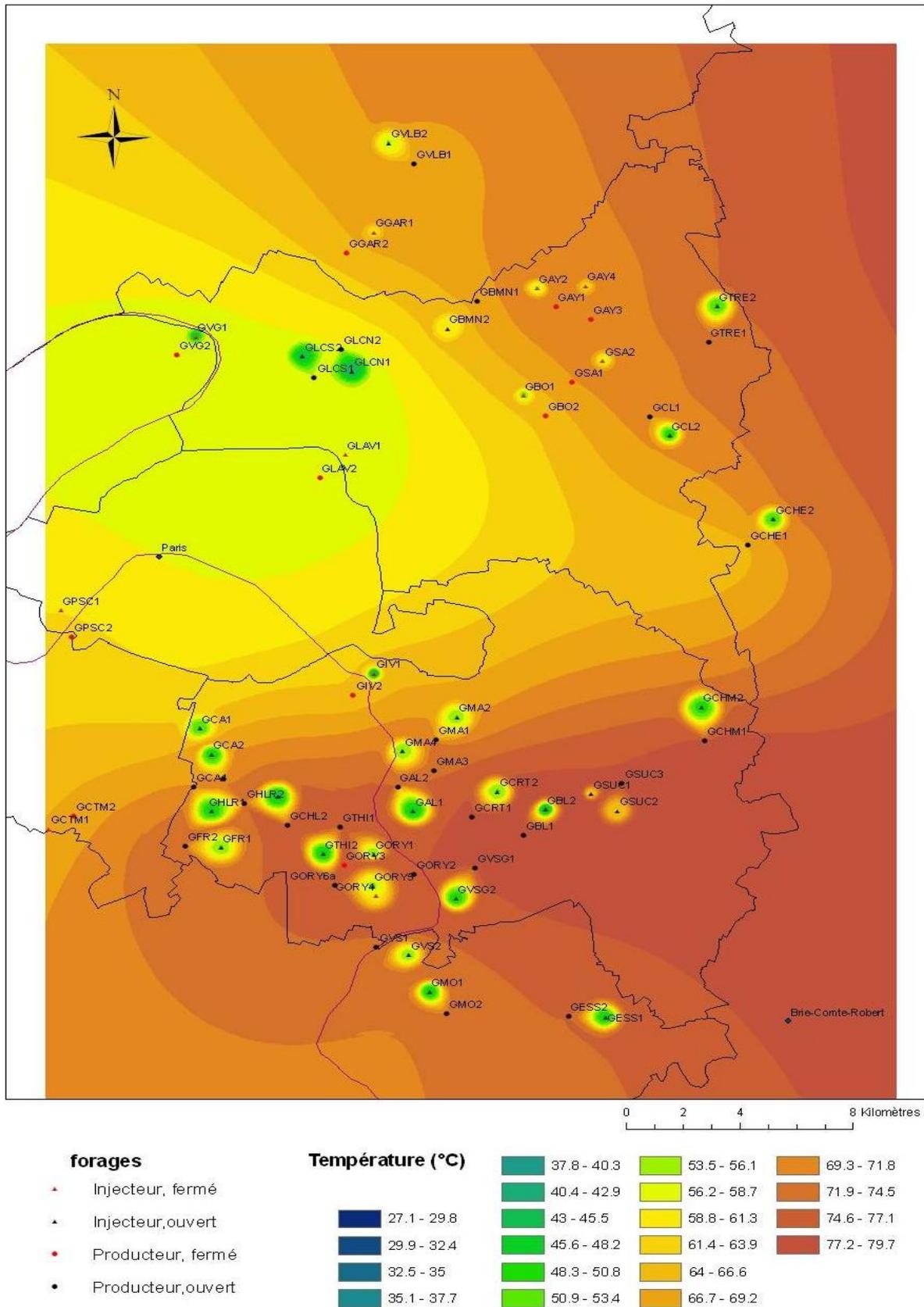


Figure 8. : Champ des températures à fin 2020.

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

En Seine-Saint-Denis où de nombreux doublets sont arrêtés et généralement plus espacés les uns des autres, ce sont uniquement les doublets de La Courneuve Nord et Sud qui interfèrent.

Au niveau de l'évolution de la température modélisée au puits de production de chaque doublet, les résultats montraient que 6 puits auraient dû présenter une baisse de température supérieure ou égale à 1 °C actuellement. Ces doublets étaient : Maisons-Alfort I, Alfortville, Chevilly-Larue, Fresnes, l'Hay-Les-Roses et Champigny-sur-Marne. **Ceux qui, selon le modèle, présentaient une courbe de décroissance de température la plus marquée (en moyenne 0,15 °C/an) sont Alfortville et l'Hay-Les-Roses.** Il était alors noté que le suivi régulier de la température en tête des puits producteurs par les bureaux d'étude sous-sol montrait que seul le site d'Alfortville présentait une température du fluide prélevé en cours de décroissance.

4. Apport du projet Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France de l'année 2010

Ce rapport présente les avancées acquises à la suite de la phase 3 du projet de « Gestion du Dogger » évoqué au chapitre précédent.

Il convient de noter que, dans un souci de déontologie, ce rapport a été publié avec "accès réservé", dans l'attente d'un accord de l'association des maîtres d'ouvrages AGEMO, dans la mesure où il identifiait des évolutions sensibles de la production de certains doublets d'Île-de-France.

Ainsi, il faisait notamment le point sur :

- l'état d'acquisition des données quotidiennes d'exploitation des 33 doublets et du 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 avait pris du retard du fait d'envois tardifs des données pour un certain nombre de 34 sites exploités fin 2010. L'application Oracle pour l'intégration des données d'exploitation dans la base avait été finalisée fin 2010 et était présentée dans ce rapport. Un nouveau fichier normalisé était 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 montraient 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/hiver moyennés sur la durée d'exploitation) aboutissait à une décroissance moins rapide de la température du fluide prélevé mais confirmaient les tendances annoncées dans la Phase 3 du Dogger, à savoir :

- la décroissance thermique au puits producteur d'**Alfortville** était alors confirmée par la modélisation qui indiquait une diminution de la température du réservoir de l'ordre de 2 °C et prédisait 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 de réinjection qu'en 2010. Les mesures de la température en tête de puits producteur indiquaient alors une baisse de l'ordre de 3 °C,

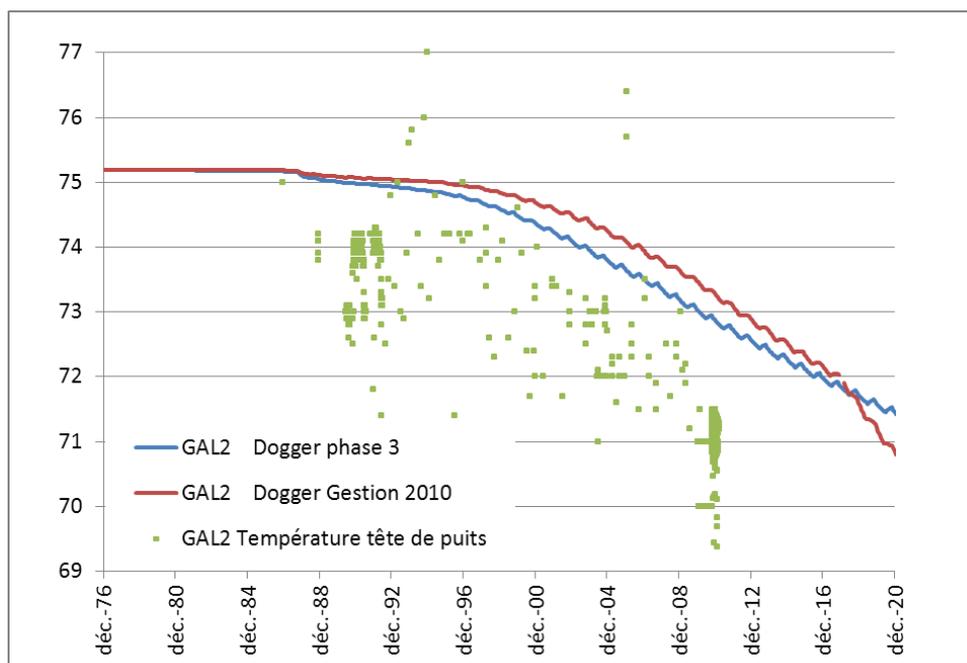


Figure 9. : Évolution de la température (°C) au puits producteur d'Alfortville (doublet de la zone 1).

- la décroissance thermique calculée au puits producteur de **l'Hay-Les-Roses** ressortait 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 était également observée sur les mesures en tête de puits (inférieure à 1 °C). Il était ainsi prévu de vérifier si cette tendance devait être confirmée dans les années ultérieures,

- la modélisation du doublet de **Maisons-Alfort 1** indiquait, de son côté, 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 permettait pas de statuer sur un refroidissement du fluide extrait de ce puits (absence de données entre 2004 et 2010) qui serait donc à surveiller dans les années suivantes,
- les températures calculées aux puits producteurs de **Champigny-sur-Marne, Chevilly-Larue et Fresnes** indiquaient une baisse comprise entre 1 °C et 1,5 °C devant se produire entre 2012 et 2020. La mesure en tête de puits ne permettait pas non plus d'observer une baisse éventuelle de la température. Ces puits seraient donc également à surveiller dans les années suivantes, étant noté que le doublet de Champigny-sur-Marne devait être réhabilité sous peu en triplet,
- la modélisation du puits de la **Courneuve Nord** présentait une baisse de sa température annoncée proche de 1 °C en 2020. Cependant, la simulation prévisionnelle ne tenait pas compte du fait que le doublet devait être réhabilité dès 2012 en triplet (nouveau puits producteur). La température mesurée en tête semblait 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 était à confirmer ou infirmer.

Les mesures réalisées en tête de puits permettaient 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, ne permettaient pas de statuer par rapport aux résultats des modélisations.

La température variait proportionnellement au débit, en reflétant la température du réservoir pour les forts débits.

Le rapport concluait à l'intérêt de pouvoir équiper l'ensemble des sites d'une GTC afin de disposer de mesures de la température et du débit en continu. Seuls 6 sites étaient alors 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 (7 zones géographiques modélisées) a permis de visualiser la taille, en 2010 et 2020, 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 puits producteur mais aussi de puits 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 vieillissement grandissant des puits (entre 23 et 29 ans d'âge en 2010), soit de réaliser un nouveau doublet, ce qui nécessite une connaissance la plus précise possible des bulles froides.

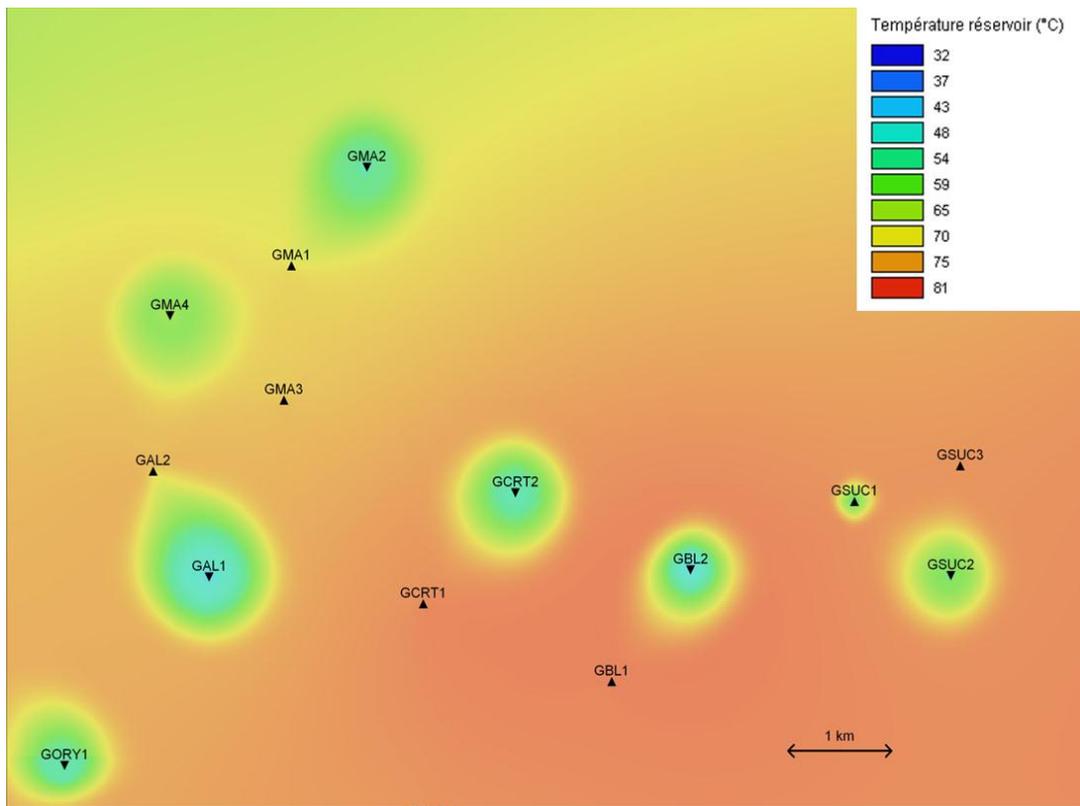


Figure 10. : Exemple : Impacts thermiques des doublets de la zone 1 (fin 2010) – Zone 1 du Val-de-Marne = Alfortville, Bonneuil-sur-Marne, Créteil, Maisons-Alfort I et II, Sucy-en-Brie (triplet depuis 10/2008).

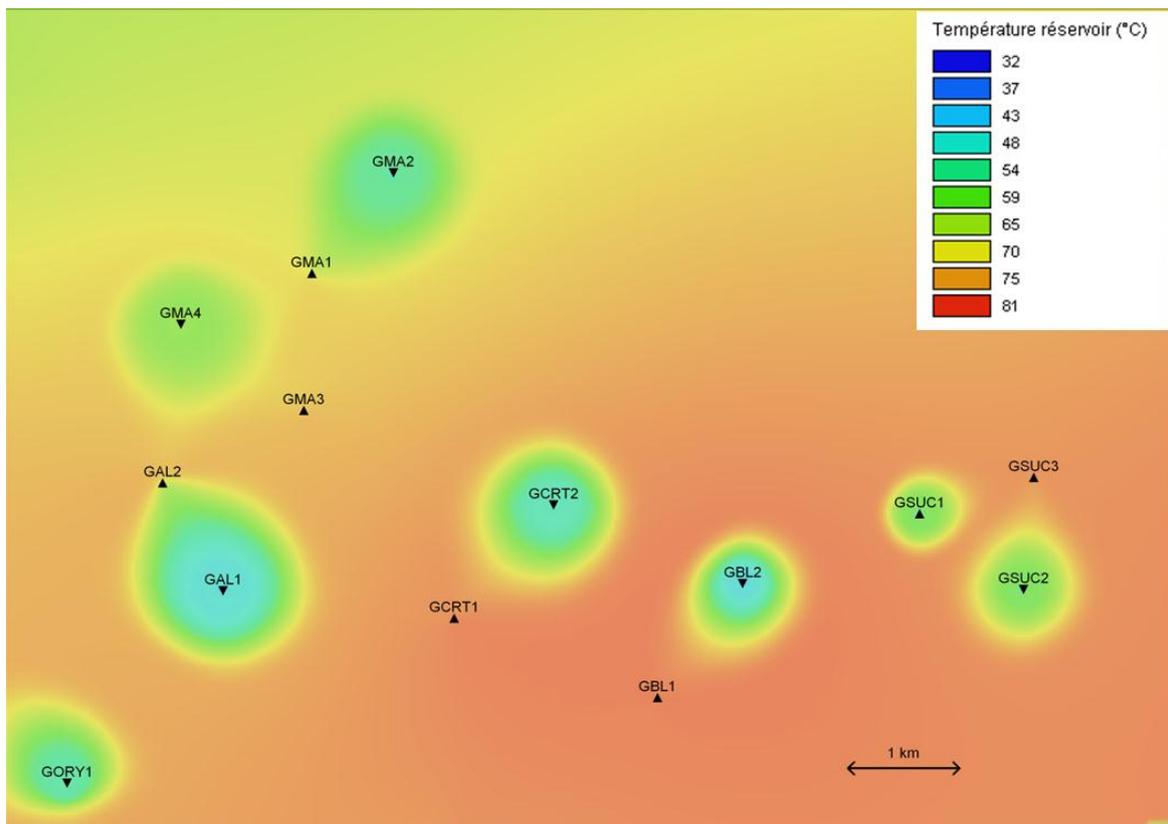


Figure 11. : Exemple : Impacts thermiques des doublets de la Zone 1 (fin 2020).

5. Apport du projet Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France de l'année 2011

Au cours de l'exercice 2011, les principaux objectifs du projet ont consisté à :

- réaliser une étude de sensibilité, d'une part, sur les paramètres influençant les transferts thermiques (notamment le temps de percée thermique et la décroissance thermique au puits de production) afin d'identifier ceux qui ont le plus grand impact sur la précision des résultats obtenus, et d'autre part, sur les indices de saturation des minéraux potentiellement indicateurs de la percée thermique (SiO₂) vis-à-vis des variations de température et incertitudes de mesures ;
- affiner les modélisations thermo-hydrodynamiques du Dogger avec notamment une étude d'intercomparaison sur la modélisation de la percée thermique d'un doublet spécifique du Dogger pour lequel une baisse sensible de température au puits de production est observée ;
- pérenniser la collecte des données au Dogger (données d'exploitation physico-chimiques, hydrogéologiques...) notamment via des fichiers Excel standardisés et une routine d'intégration dans la base Dogger ;
- définir un cadre et des spécifications pour la réhabilitation d'un ancien puits géothermique (puits producteur GCO-1 de Coulommiers) en puits d'observation pour le suivi à long terme du réservoir ;
- élaborer une cartographie des évolutions géochimiques des fluides du Dogger des années 1990 à 2011, notamment des sulfures et du pH et leur impact sur les phénomènes de corrosion/dépôts des puits géothermiques.

Les deux premiers objectifs ont été traités dans le **rapport intermédiaire BRGM/RP-60399-FR** d'octobre 2011 :

- **les paramètres étudiés pour la sensibilité sur les transferts thermiques** sont les épaisseurs des épontes intercalaires entre niveaux producteurs, la structure verticale du réservoir (modèles bi ou multicouches), la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs, les propriétés thermiques de la roche (conductivité thermique, capacité calorifique, dispersivité), les paramètres d'exploitation (débit, température d'injection) et l'écartement entre l'impact au réservoir des puits de production et d'injection.

Les résultats de ce chapitre de l'étude montrent que les paramètres les plus sensibles, à la fois sur le temps de percée thermique (début du recyclage de l'eau froide injectée) et sur l'amplitude de la décroissance thermique sont :

- le débit,
- la température d'injection,
- l'écartement entre puits,
- l'épaisseur des épontes entre niveaux producteurs.

Ces paramètres doivent donc être introduits dans les modèles de simulation numérique de la manière la plus précise possible afin de ne pas générer d'incertitudes importante sur les résultats finaux. En particulier, l'amélioration de la modélisation des « bulles froides » se développant dans l'aquifère du Dogger pour prévoir la durabilité des exploitations géothermiques ne pourra se faire qu'à la condition d'obtenir et d'archiver des données fiables sur les débits et les températures injectés.

Par ailleurs, l'analyse de sensibilité sur les données de la silice ne permet pas de dégager de façon claire l'annonce de l'approche du front froid (cas du doublet d'Alfortville). En effet, les techniques analytiques actuelles ne permettent pas de doser la silice dissoute dans le Dogger avec une incertitude inférieure à 10 %, ce qui conduit à considérer que la température du fluide produit devrait s'abaisser au moins de 5 °C pour pouvoir être mesurée avec les géothermomètres à silice ou l'indice de saturation (IS) de la calcédoine. L'utilisation de ces paramètres comme précurseurs de l'arrivée du front froid ne semble donc pas adaptée ;

- ***l'exercice d'inter-comparaison des modélisations du doublet d'Alfortville*** réalisées dans le contexte régional par différentes équipes de modélisation (ANTEA, CFG Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM) a montré un refroidissement du fluide produit fin 2010 compris entre -1,5 et -3,8 °C suivant les modèles, pour une baisse estimée actuellement à -3 °C. Cette partie de l'étude confirme et finalise les travaux antérieurs relatifs aux pratiques de modélisation du Dogger (Cf. Rapport BRGM/RP-59591-FR de mars 2011, intitulé « Pratiques de modélisation hydraulique et thermique pour des exploitations géothermiques au Dogger dans la région parisienne »). Cette tâche du Projet 2011 a permis de comparer différentes méthodes d'interprétation et de traitement des données, ainsi que différents modèles conceptuels et logiciels (COMSOL, MARTHE, METIS et TOUGH2).

	ANTEA	BRGM	CFG	GPC	MINES	Mesures
Date percée thermique ($\Delta T > 0.5$ °C)	2003	2001	1996	1997	1997	1999-2002
Baisse de température fin 2010 (°C)	1,5	2	2,2	3,8	3	≈ 3

Figure 12. : Comparaison des résultats pour le doublet d'Alfortville de la date de percée thermique ($\Delta T > 0,5$ °C) et la baisse de température à fin 2010.

Le **rapport final** traitait, par conséquent, les trois derniers points mentionnés ci-dessus.

- ***en ce qui concernait la collecte des données d'exploitation de la boucle géothermale sur l'aquifère du Dogger***, le bilan était mitigé puisque seul un tiers des exploitants avaient alors pris « l'habitude » de remplir trimestriellement le fichier Excel tandis que pour deux tiers d'entre eux, ce n'était toujours pas acquis. Sur ces deux tiers, la moitié envoyait un autre fichier contenant ces données et pour l'autre moitié aucun envoi n'était réalisé. La question se posait alors d'une réflexion sur le moyen à mettre en œuvre pour « contraindre » les exploitants à suivre la procédure définie en 2010.

Pour la collecte des données physico-chimiques réalisée par les bureaux d'études sous-sol lors de leurs visites sur sites, un fichier similaire a été créé en 2011 afin d'assurer également l'enregistrement des données dans la base Dogger ;

- pour la gestion à long terme de la ressource géothermique, **le calage des modèles prédictifs de propagation des « bulles froides » représente un enjeu scientifique et économique important.** Un des enjeux est donc de pouvoir accéder à **des mesures directes dans le réservoir**, soit par l'intermédiaire d'anciens puits reconvertis en puits d'observation, soit dans des puits en cours d'exploitation. C'est pourquoi a été réalisée au cours de l'exercice 2011 une étude de préfaisabilité sur l'utilisation d'un ancien puits géothermique (puits producteur de Coulommiers GCO1) en puits d'observation. Du point de vue du calage de modèles évoqué ci-avant, ce puits offrait l'avantage de se trouver en position intermédiaire entre les deux puits injecteurs, l'ancien et le nouveau implanté dans la bulle froide initiale à 200m environ du premier et le nouveau puits producteur, à environ 2/3 de distance des puits injecteurs.

Différentes solutions ont été comparées dans le rapport, du point de vue des contraintes techniques et d'investissement pour la transformation du puits, de son équipement, de son entretien périodique et de son abandon ultérieur.

Le rechemisage du puits en diamètre 5" (le puits était tubé en 7") sur toute sa hauteur semblait la solution la plus avantageuse en termes de coût d'investissement initial, périodique et final ainsi qu'en terme de protection des aquifères stratégiques. Cette solution semblait également avantageuse du point de vue des technologies d'instrumentation du puits mises en œuvre qui pourraient être applicables à un puits en production (intégration des capteurs de mesure à un tube de traitement de la corrosion en fond de puits). Le projet n'a pas abouti pour des raisons administratives, budgétaires et de responsabilités respectives mais il constitue une première approche pour d'autres opportunités du même type, en vue d'améliorer les connaissances et la gestion de l'aquifère du Dogger ;

- **les évolutions physico-chimiques des fluides du Dogger depuis les années 1990 à 2011** montrent que la *teneur en sulfures* dissous en tête de puits de production n'a cessé d'augmenter au sud et à l'est de Paris. Cette augmentation témoigne essentiellement d'une activité bactérienne passée sur les parois des tubages avec un réservoir produisant un fluide de plus en plus riche en sulfures.

Parallèlement, depuis la fin des années 90, le *pH* des fluides produits par les puits du sud et de l'est de Paris a diminué de 0,17 unité en moyenne ;

- **la teneur en fer dissous en tête des puits de production a augmenté pour 30 % des sites en activité, alors qu'elle diminuait jusqu'alors.** La teneur en sulfure et le pH sont deux facteurs essentiels des processus de corrosion-dépôts. Toutefois, leur évolution dans les dix dernières années ne semble pas être la cause principale de cette augmentation. En effet, 60 % des sites affectés par cette reprise de la corrosion produisent par artésianisme et 50 % font, de plus, partie des sites les plus riches en chlorures (facteur réduisant l'efficacité des inhibiteurs) ;

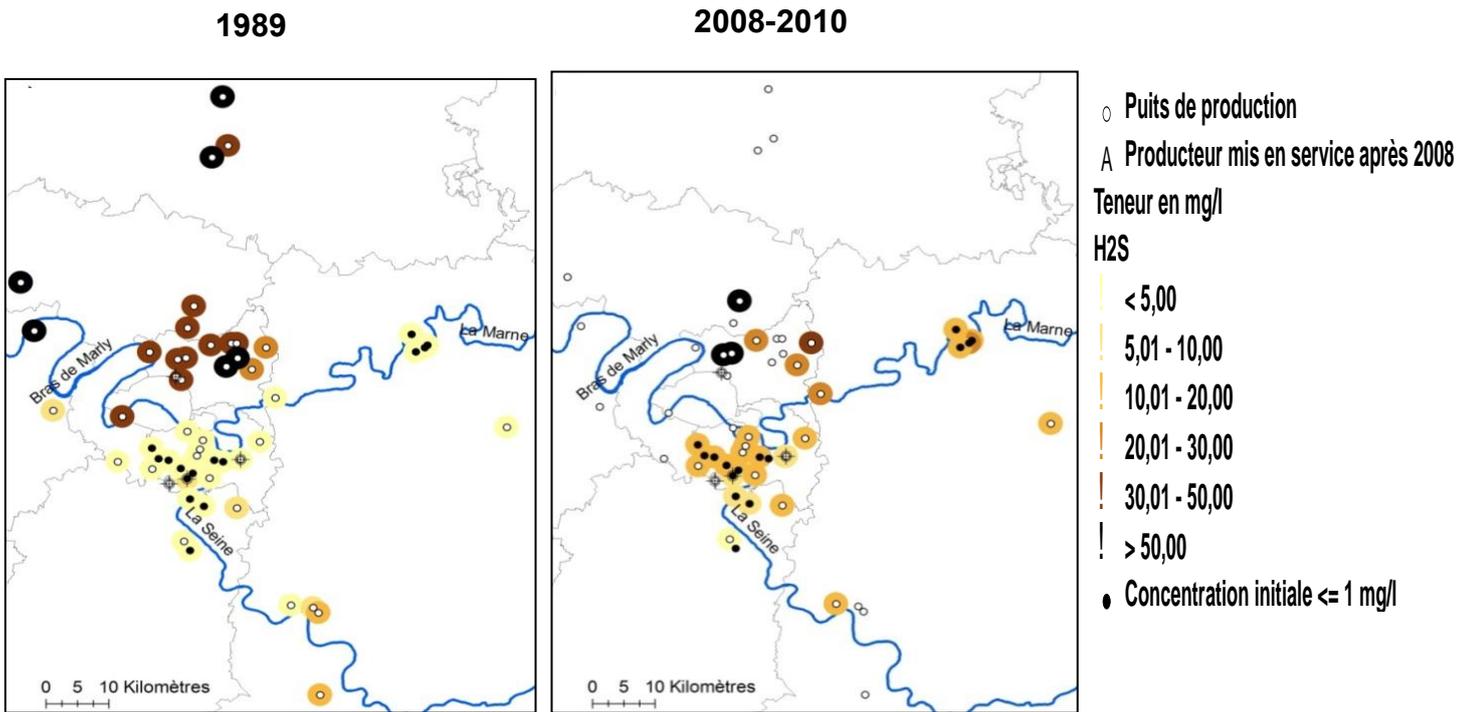


Figure 13. : Évolution de la concentration en sulfures dans les fluides du Dogger exploités en IdF.

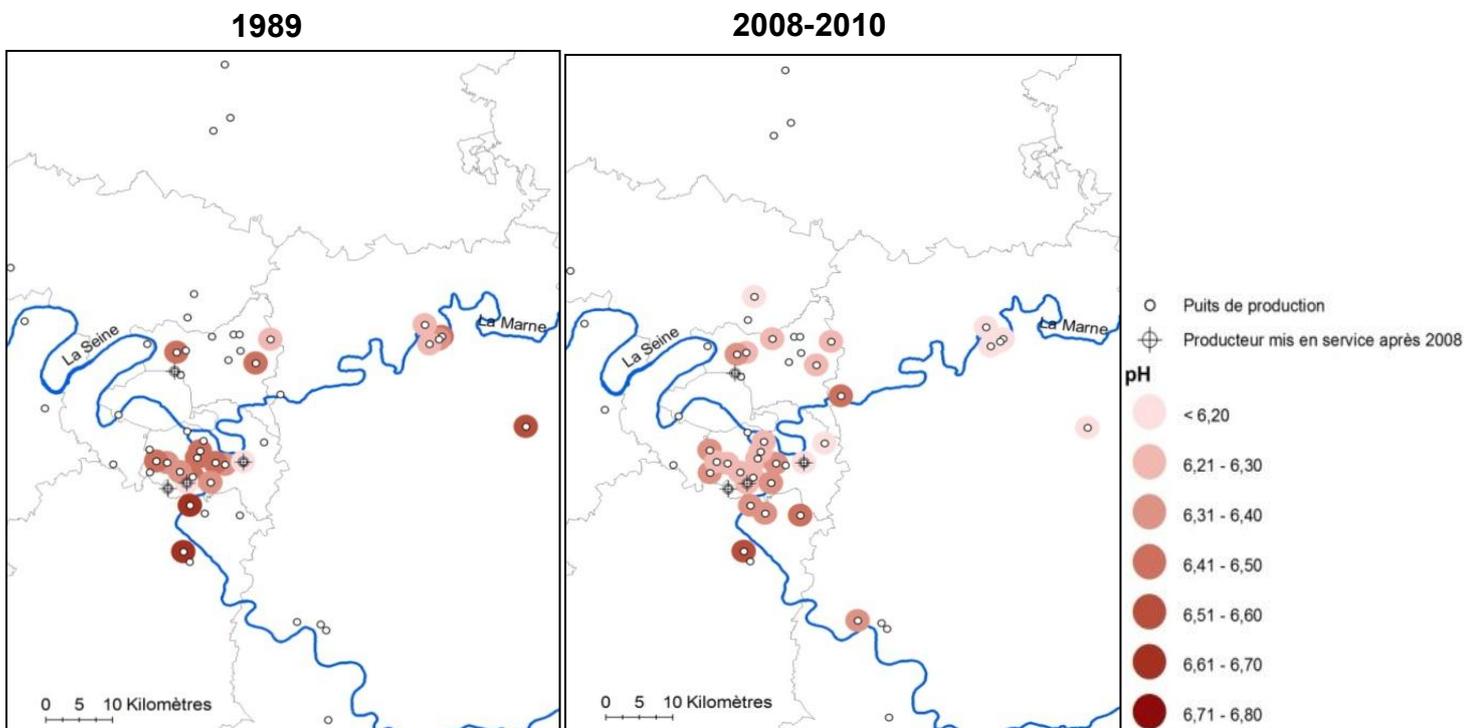


Figure 14. : Évolution du pH dans les fluides du Dogger exploités en IdF.

- **les quantités d'inhibiteur injectées en fond de puits ont été réajustées depuis la fin des années 1990.** Elles étaient en 2011 comprises entre 2 et 4 mg/l sur les sites « non artésiens » et de 7-8 mg/l sur les sites artésiens, alors qu'elles n'étaient que de 2,5 mg/l initialement (sauf exception). **Ces réajustements s'avéraient, cependant, encore inadaptés à quelques opérations exploitant le Dogger, en particulier aux sites artésiens.** Il apparaissait ainsi que chacun des traitements appliqués devait être adapté à la spécificité de chaque fluide (pH, teneur en HS⁻, Cl⁻, etc.) et de chaque exploitation (vitesses de circulation du fluide). En ce sens et en conclusion de ce chapitre, il apparaissait intéressant aux ingénieurs géochimistes qui ont réalisé cette partie de l'étude, de travailler, spécifiquement, sur chacun des sites où la reprise de la corrosion était avérée. Il s'agissait, par exemple, de tester (en laboratoire, puis sur site) l'efficacité des inhibiteurs disponibles sur le marché sur chacun des fluides produits, aux conditions d'exploitation fixées dans chaque cas (vitesse de circulation du fluide) ;
- par ailleurs, dans le cadre de cette phase 2011 du projet « Gestion du Dogger », a été effectué, à l'occasion du forage du nouveau puits injecteur (GCO4) à Coulommiers (77) proche de l'ancien injecteur (GCO2), **un prélèvement de fond. Les caractéristiques physicochimiques et la composition chimique de cet échantillon de fluide ont été analysées en vue de déterminer notamment la présence de produit inhibiteur résiduel.**

Les principaux résultats ont été les suivants :

- le puits GCO4 est impacté thermiquement, chimiquement et microbiologiquement par son voisin injecteur (GCO2) ;
- les caractéristiques physicochimiques de l'eau de GCO4 sont proches de celles du producteur GCO1, sauf pour les paramètres suivants :
 - la teneur en sulfures dissous est d'au moins 3,5 mg/L supérieure à celle du producteur GCO1 ;
 - les rapports isotopiques, $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ et $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ sont respectivement plus faible et plus fort que ceux du producteur, montrant ainsi que l'eau du puits GCO4 a subi une sulfato-réduction plus prononcée que celle du producteur GCO1 ;
 - la teneur en fer dissous est supérieure à celle du producteur GCO1 et à toutes celles de tous les fluides géothermaux rencontrés dans le Dogger, montrant ainsi non seulement une accumulation du fer par corrosion, mais aussi une dissolution de phases porteuses de fer (comme la sidérite qui a un comportement prograde) du fait d'une plus faible température d'eau avoisinant ce puits ;
 - la teneur en bicarbonates est presque deux fois supérieure à celle du fluide du producteur GCO1, montrant non seulement une dissolution des carbonates du fait d'une plus faible température d'eau avoisinant ce puits, mais aussi une dégradation des produits inhibiteurs injectés et transformés en CO₂/HCO₃⁻ ;
- la teneur en résidu d'inhibiteur est **faible**. La chromatographie en phase gazeuse de la matière organique extraite de cette eau montre que des fractions d'inhibiteurs sont encore présentes, mais à une teneur faible puisque tout le carbone organique, déterminé par une analyse COT (carbone organique total) est égale à 7 mg/L.

Néanmoins l'analyse chromatographique du fluide prélevé ne permettait pas de conclure sur la teneur résiduelle exacte en Norust 491 (produit inhibiteur de marque CECA utilisé).

En effet, le BRGM ne dispose pas des standards purs de chacun des composés du Norust 491. Il n'était donc pas possible de les rechercher spécifiquement. La recherche du Norust 491 dans le fluide prélevé au puits GCO4 et l'analyse de sa dégradation s'est donc faite par comparaison avec le profil chromatographique d'un échantillon pur de Norust 491. Ces identifications devaient être confirmées par l'injection des standards purs des composés qui constituent cet inhibiteur de corrosion (ceux-ci étant absents de la bibliothèque des spectres de masses du BRGM).

En conclusion et sous les réserves qui viennent d'être énoncées, il semblerait que le Norust 491 soit biodégradable, du moins en grande partie dans un proche périmètre (environ 200 m) du débouché du puits injecteur d'un doublet.

6. Apport du projet Gestion de la base de données du Dogger en Île-de-France - 2012

La base dite « Dogger » des données géothermiques de l'aquifère du Dogger avait été développée sous Access entre 2003 et 2005 dans le cadre de deux conventions successives, dites Phase 1 et 2, entre l'ADEME et le BRGM, en vue de mettre en place un outil de gestion de la ressource géothermique du Dogger alimentant des réseaux de chaleur en région Île-de-France.

L'interface de gestion de la base sous Access a été complétée depuis, dans le cadre des projets « Gestion du réservoir du Dogger – Phase 3 » puis des conventions successives 2010 et 2011 comme indiqué dans les chapitres précédents. Ces interfaces de gestion ont été ainsi complétées par des routines d'intégration des données d'exploitation de la boucle géothermale (débits, températures, pressions) et des données physico-chimiques (mesures in situ, analyses du fluide géothermal, traitement anticorrosion).

Le projet « Gestion de la base de données du Dogger en Île-de-France » de la Convention ADEME-BRGM 2012 avait pour objectif principal de rendre cette base opérationnelle et accessible, via une application Web dédiée, à l'ensemble des professionnels en géothermie profonde. Les principaux acteurs des opérations de géothermie profonde du bassin parisien peuvent ainsi s'y connecter après obtention d'un droit d'accès auprès du BRGM. Il a fait l'objet du rapport final BRGM/RP-62030-FR publié en mars 2013.

Sont concernés notamment, les bureaux d'études en charge du suivi de réalisation des forages géothermiques ou du suivi réglementaire des opérations, les maîtres d'ouvrage propriétaires des données mais aussi tout bureau d'études amené à réaliser des études de faisabilité avec modélisation des impacts hydrauliques et thermiques lors de la réalisation d'une nouvelle opération au Dogger.

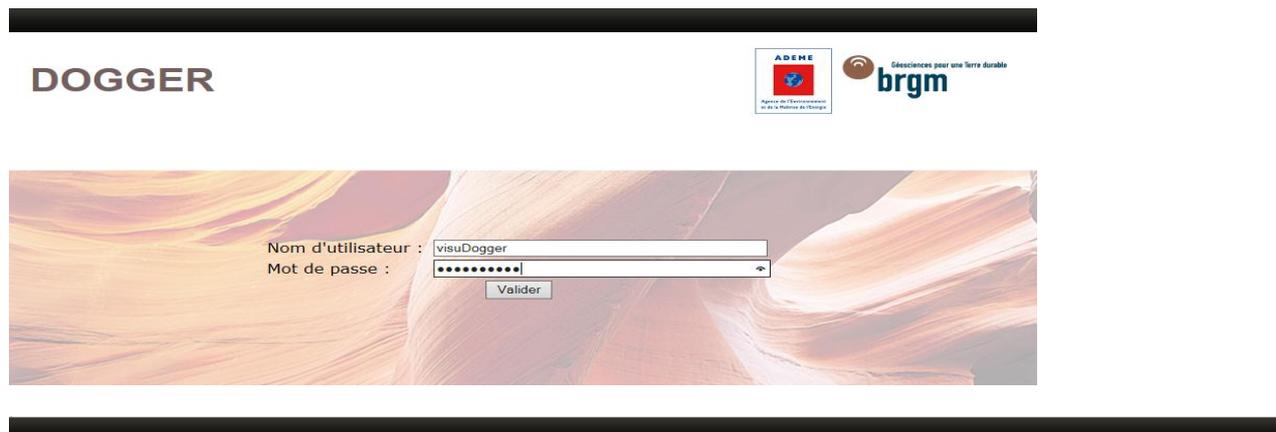
Avec l'application Web, les utilisateurs bénéficieront toujours et automatiquement de la version à jour de la base de données et de façon gratuite.

La structure de l'application Web comprend une partie relative à l'import des données et une seconde relative à leur gestion :

- la partie « Import des données » concerne l'import des fichiers Excel trimestriels des données d'exploitation fournis par chaque exploitant, ainsi que l'import des données géochimiques réalisées par le bureau d'étude en charge du suivi réglementaire de l'opération. Cette partie n'est pas accessible aux utilisateurs mais exclusivement à l'administrateur de la base pour limiter les erreurs possibles, ce qui a permis d'éviter de mettre en place un système de validation de données qui avait été envisagé initialement ;
- la mise à jour de la base est réalisée par le BRGM avec une sous-traitance aux bureaux d'étude CFG Services et GPC I&P qui sont actuellement en charge du suivi périodique de l'ensemble des opérations au Dogger à l'exception de Bonneuil-sur-Marne, Melun l'Almont et Ris-Orangis ;
- la partie « Gestion des données » a une structure similaire à l'ancienne interface Access mais dispose d'une ergonomie accrue. Elle comprend quatre champs principaux qui sont Opération, Exploitation, Ouvrage et Lexiques. Le dernier champ est uniquement visible par l'administrateur et permet de gérer le contenu des tables de la base de données.

L'interface Web de la base Dogger a été mise en place une fois l'accord des Maîtres d'Ouvrages obtenu, à la mi-2013, par le biais d'un courrier signé conjointement du BRGM et de la DRIEE Ile-de-France pour l'accès aux données de la base par les utilisateurs

La demande d'ouverture de compte doit être faite auprès du BRGM et l'URL d'accès à la base Dogger est : <http://dogger-idf.brgm.fr>



DOGGER - Réservoir

ADEME Agence de l'Environnement et de la Transition Écologique | brgm Géosciences pour une Terre durable

↳ OPERATIONS ↳ EXPLOITATIONS ↳ OUVRAGES

Exporter

↳ Tubage
↳ Mise en place tubage
↳ Contrôle tubage
↳ Réservoir
↳ Analyse
↳ Mesures
↳ Point Bulle
↳ Corrosion
↳ Traitement anti corrosion

Filter: Fresnes

Site	Ouvrage	Date de l'essai	Durée de l'essai (heures)	Durée produit (heures)			Fin gueur niveau électif n/sol)	Nombre de niveau productif	Diamètre du réservoir	Épaisseur cumulée productive (m)	Température de la sonde en débit (°C)	Pression statique extrapolée (bars/relatifs)	Profondeur déviée de la sonde (m/sol)	Pression statique au sol (bars/relatifs)	Débit artésien maxi au sol (m3/h)	Contre pression en tête débit max (bars/relatifs)	Transmissivité (Darcy.m)
FRESNES	GFR1	06/02/1986	10	3.			1872	4	8"1/2	8.8000002	72.199997	162.677	-1614	3.4000001	50	0	10.5
FRESNES	GFR1	07/02/1986	8	2.			1872	4	8"1/2	8.8000002	72.199997	165.61301	-1614		37	0.2	10.7
FRESNES	GFR1	08/02/1986	9	3	10.5	1835.5	1872	4	8"1/2	8.8000002	72.099998	165.707	-1614	4			10.3
FRESNES	GFR1	12/02/1986	9.25	3	10.5	1835.5	1872	4	8"1/2	8.8000002	71.099998	165.61301	-1614	4.0999999	51	0	9.6000004
FRESNES	GFR1	13/02/1986	27.25	8.9200001	10.5	1835.5	1872	4	8"1/2	8.8000002	71.699997	165.63699	-1614	4.1999998	46	0.2	11.9
FRESNES	GFR2	20/03/1986	13.5	4.5	8	1871	1895	5	8"1/2	6.6999998	74.300003	165.17999	-1578		51		12.4
FRESNES	GFR2	21/03/1986	14	3.8299999	8	1871	1895	5	8"1/2	6.6999998	74.300003	165.2	-1578		126		9.6000004
FRESNES	GFR2	22/03/1986	28.5	9.5	8	1871	1895	5	8"1/2	6.6999998	74.300003	165.08	-1578		150		10.6

Figure 15. : Site Web d'accès à la base Dogger.

7. Conclusion

Le présent rapport permet de mettre en lumière les apports scientifiques et techniques des travaux menés depuis presque dix ans, visant le développement et l'exploitation à long terme de l'aquifère du Dogger pour la valorisation de la filière géothermique Basse énergie en France.

La mise en œuvre de la Base Dogger et sa gestion, qui comprend notamment un grand nombre d'améliorations pour l'acquisition des données quotidiennes des 36 doublets exploitant aujourd'hui cet aquifère en région Île-de-France, est une référence internationale unique, à notre connaissance, et qui contribue à l'expertise de la France dans le domaine de la Géothermie Basse Énergie.

Les projets menés, inscrits jusqu'à fin 2011 dans la Gestion de l'aquifère du Dogger en Île-de-France, ont conduit à des travaux d'amélioration sensible de la modélisation thermo-hydrodynamique de l'aquifère permettant aujourd'hui une prédiction très avancée de l'évolution des « bulles froides » et de la percée thermique des opérations en cours d'exploitation, ainsi que des nouvelles opérations faisant l'objet d'étude de faisabilité.

L'animation du Centre technique géothermie a permis, à travers le projet inscrit dans la convention en 2012 de « Gestion de la Base Dogger », de réaliser avec succès et en recueillant l'accord unanime des maîtres d'ouvrages et de leurs délégataires, la mise à disposition de tous les opérateurs intéressés par l'exploitation du Dogger des données leur permettant de réaliser leurs études de permis de recherche, afin d'éviter les risques de conflits d'usage en cas de densité élevée d'opérations sur certaines zones géographiques.

De même, les études géochimiques des fluides du Dogger au cours des années 2009, 2010 et 2011, en utilisant notamment les données géochimiques recueillies par les sociétés de services en charge de ce suivi sur les sites, ont permis d'identifier les évolutions évoquées aux chapitres 3 et 5 ci-avant. Ces observations ont conduit les géochimistes du BRGM à se poser la question de faire évoluer la composition des inhibiteurs de corrosion-dépôts employés sur les sites d'Île-de-France depuis plus de 20 ans, afin de mieux les adapter aux nouvelles conditions d'exploitation et à la chimie des fluides, tout en essayant d'en limiter les concentrations et donc les coûts d'exploitation correspondants et leurs impacts potentiels.

Ce sont ces réflexions qui ont conduit la Division géothermie du BRGM à proposer en 2013 à l'ADEME deux projets de Recherche et Développement qui ont été approuvés et sont en cours de réalisation.

L'un de ces projets, intitulé « Test Dogger », doit permettre d'améliorer les connaissances sur l'aquifère du Dogger dans une zone du Val-de-Marne où il est densément exploité, en mesurant les interférences hydrauliques entre cinq doublets voisins. La fiabilité des modélisations thermo-hydrauliques destinées à une bonne gestion de la ressource sera ainsi accrue. Ces travaux s'achèveront à la fin de l'année 2014.

Le second projet s'intitule « InhibDogger » et a pour objectif de tester en laboratoire, à partir d'un fluide du Dogger reconstitué, six inhibiteurs proposés par les formulateurs sur la base du cahier des charges qui leur a été communiqué. Il s'agira de présélectionner les trois meilleurs produits susceptibles de faire évoluer la lutte contre la corrosion des installations de la boucle géothermale dont les tubages des puits dans le contexte géochimique actuel du Dogger.

Pour finir, il convient de constater que les travaux menés dans le cadre du Centre Technique Géothermie (Axe 4 des Conventions) doivent être considérés comme un État de l'Art méthodologique pour la valorisation d'autres aquifères profonds, en adaptant, bien sûr, les

méthodes à la géologie, au sens large, des formations exploitées dans cette filière de géothermie basse énergie.

Un exemple important est matérialisé par le projet qui concerne l'élaboration d'un Guide de réalisation des essais de production et d'injection dans les puits. Il formalise des règles de bonne conduite pour la réalisation de ces tests de fin de forage, indispensables pour évaluer les paramètres d'exploitation d'un doublet et, à terme, préciser les méthodes de développement des forages dans des formations géologiques différentes.

Ces travaux doivent donc conduire à promouvoir la connaissance et l'exploitation d'autres aquifères profonds en s'appuyant sur la méthodologie mise en place pour le Dogger depuis près de 15 ans.

8. 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 Ile-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.

Hamm V., Castillo C., Goyeneche O. (2011)- Gestion de la ressource géothermique du Dogger en Île-de-France – année 2010- Rapport final – BRGM/RP-59845-FR, 107 p., 79 fig., 4 tabl., 2 ann.

Hamm V., Castillo C., Evrard M., Fisseau A., Ignatiadis I., Borozdina O., Ligneau G. et Goyénèche O. (2011) - Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France – Année 2011. Rapport final BRGM/RP-60996-FR, 63 p, 25 fig., 5 tabl., 5 ann.

Le Brun M., Hamm. V., Lopez S., Antics M., Ausseur J.Y., Cordier E., Giuglaris E., Goblet P., Lalos P., Unguemach P., Goyénèche O. (2011) – Pratiques de modélisation hydraulique et thermique pour des exploitations au Dogger dans la Région parisienne. Rapport final. BRGM/RP-595916FR, 102 p., 34 fig., 8ann.

Hamm V., Treil J. (2013) – Gestion de la base de données du Dogger en Île-de-France. Rapport BRGM/RP 62030-FR, 30 p., 10 fig., 2 tab., 3ann.

Annexe 1

Compte-rendu de la réunion du Centre Technique Géothermie
du 15 octobre 2013

THERMO2PRO ET CENTRE TECHNIQUE GEOTHERMIE

**COMPTE-RENDU DE LA REUNION DU COMITE D'UTILISATEURS ET DU CENTRE TECHNIQUE
GEOTHERMIE DU 15 OCTOBRE 2013
BRGM, PARIS**

Réf. BRGM : DGR/REG 81/13 PC/EO

PRÉSENTS

- Y. Anaud, Agence COFELY
GDF SUEZ Nord
- J-Y Ausseur, ANTEA
- F. Bugarel, CFG
- P. Calcagno, BRGM
- M. Chabrel, COFELY
- A. Chamaret, Adret et
Territoires
- J. Dentzer, BRGM
- S. Gabillard, BRGM
- E. Giuglaris, BRGM
- O. Goyeneche, BRGM
- V. Hamm, BRGM
- J. Irani, Géothermie La
Coumeuve
- J Leroyer, SOGESUB /
GEOTHYLLIS / COFELY
GDF SUEZ
- S. Lopez, BRGM
- C. Mayot, DRIEE
- P. Merle, Géothermie de
Bonnetuil-sur-Mame (SETBO)
/ AGEMO
- E. Nunge, GEOVAL / Dalkia
- G. Perrin, ADEME IDF
- H. Raimbault, SAF
Environnement

LISTE DE DIFFUSION

- Présents
- Mme Abadou, SOCACHAL
- M. Andres, SEMHACH
- J. Bello, SOFREGE
- M. Benoist, SEAPFA
- N. Beyer, CHELLES
CHALEUR
- N. Bommensatt, ADEME
- O. Borozdina, GPC
INSTRUMENTATION
PROCESS
- M. Boucault, SCUC
- G. Calpas, VALOPHIS
HABITAT
- P. De La Chapelle, SMGC
- A. Desplan, BRGM
- Mme A. Faure, STHAL
- A.L. Gille, CFG Services
- G. Gurliat, ANTEA Group
- P. Jamet, Dalkia
- J-M Joubert, CGCU
- P. Lentz , Saunier & Associés
- G. Lacombe, DALKIA
- P. Laplaige, ADEME
- E. Lasne, CFG Services J.
- P. Lesage, SMGLC
- I. Czernichowski, BRGM
- V. Maurer, ES Géothermie
- S. Maury, BRGM
- N. Monneyron, COFELY
- JL. Nicaise,
SEMGEMA/AGEMO
- G. Ouzounian, SAGECHAU
- E. Ortega, BRGM
- D. Pineau, CGCU/
CORIANCE Groupe A2A
- G. Planchot, IDEX
- J.Y Porsmoguer VALOPHIS
HABITAT
- F. Puig, CORIANCE Groupe
A2A
- M. Rasolofonirina, DALKIA
- Mme Scelle Maury, SEMPEG
- H. Silvestri, STVLBG
- R. Vernier, BRGM
- B. Sanjuan, BRGM
- D. Zamet, SCVG

OBJECTIFS DE LA RÉUNION

Comme elle se produit désormais une fois par an, cette réunion était également l'occasion de faire un état des lieux des travaux réalisés par le Centre Technique Géothermie en recherche, recherche et développement ainsi qu'en activités de service public sur les aquifères géothermiques profonds.

DÉROULÉ DE LA RÉUNION

Présentations (voir les présentations en Annexes 2 à 5) :

< Évaluation du potentiel géothermique du bassin de Paris	J. Dentzer	10 mns
< Site Web de la base Dogger	V. Hamm	10 mns
< Projet R&D TestDogger	V. Hamm	10 mns
< Essais de production et d'injection : règles de bonne conduite et outils d'interprétation	E. Giuglaris	5 mns

6.1 – Évaluation du potentiel géothermique du bassin de Paris (Présentation en Annexe 2)

Jacques Dentzer, qui présente l'état d'avancement de ce travail d'évaluation du potentiel géothermique des aquifères profonds d'Ile-de-France, prépare une thèse co-animée par l'Université Pierre et Marie Curie, l'École des Mines ParisTech et la BRGM.

L'objet de cette thèse est de s'intéresser au potentiel géothermique global du bassin Parisien, prenant en compte tous les aquifères profonds mais en dehors des zones intensément exploitées, c'est à dire là où ces aquifères sont moins bien connus.

Pour ce faire, le travail s'appuie sur une meilleure compréhension des anomalies thermiques et du fonctionnement hydrodynamique et thermique du bassin de Paris mais également sur la reconnaissance des processus physiques qui sont responsables de la distribution de la chaleur dans le bassin.

Son intervention dans le cadre de cette réunion a été proposée par son responsable de thèse à la Division Géothermie du BRGM : Simon Lopez.

6.2 – Site Web de la base Dogger (Présentation en Annexe 3)

La base Dogger, dont le BRGM est l'unique administrateur, est désormais accessible aux bureaux d'études sous-sol intervenant en géothermie profonde sur cet aquifère, avec l'accord des maîtres d'ouvrage et des exploitants des sites de l'Ile-de-France.

Cette application WEB DOGGER est accessible à l'adresse : <http://dogger-idf.brgm.fr> , sous condition d'obtention d'un droit d'accès à demander auprès du BRGM

6.3 – Projet de Recherche et Développement « TestDogger » (Présentation en Annexe 4)

Dans un contexte de relance de la géothermie au Dogger où de nouvelles opérations et des réhabilitations d'opérations existantes se font jour, ce projet, cofinancé par l'ADEME et le BRGM, a pour objectif d'accroître la

fiabilité des modélisations réalisées dans le cadre des demandes de permis de recherche et d'ouverture de travaux au sens du Code Minier.

Pour le BRGM, il a également pour fonction d'améliorer la compréhension du fonctionnement thermo-hydraulique de réservoir du Dogger

Après une consultation menée par le BRGM en mai et juin 2013, un marché a été passé au groupement CFG Services et GPC IP, ainsi qu'au sous-traitant, la Société FLODIM.

La réalisation technique de l'essai s'est déroulée du 16 au 20 septembre 2013 sur les cinq sites sélectionnés : l'Hay-les-Roses, Chevilly-Larue, Fresnes et Cachan 1 & 2.

L'interprétation de l'essai est actuellement en cours et s'achèvera au printemps 2014.

6.4 – Essais de production et d'injection : règles de bonne conduite et outils d'interprétation (Présentation en Annexe (5))

L'amélioration de la mise en place et de l'interprétation des essais hydrauliques de fin de forage est indispensable pour progresser dans la connaissance des ressources en géothermie et dans leur gestion à court et long termes. L'objectif de ce projet, également cofinancé par l'ADEME et le BRGM, est d'une part, d'appliquer de bonnes conduites dans la réalisation et l'interprétation des essais de puits, d'autre part, de réaliser un outil d'interprétation et de dimensionnement des essais, destiné aux professionnels de la géothermie.

Cet outil : OUtil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essais (OUAIP) prendra en compte dans une première phase :

- Les effets de la température ;
- Le Dimensionnement spécifique ;
- Le travail en pression ;
- La pression initiale ;
- et des explications sur la nomenclature, (passage du pétrolier à l'hydrogéologie)

Une version uniquement hydrogéologique est déjà disponible en ligne sur le site ouaip.brgm.fr. La première version « géothermie » sera disponible début 2014 et téléchargeable en version « bêta testeur ».

Les bureaux d'études sous-sol ou toute personne intéressée par ce développement pourront ainsi prendre en main l'outil et contribuer à son évolution en retournant des remarques ou suggestions au BRGM.

Les personnes intéressées par ce projet peuvent se manifester dès à présent auprès de e.giuglaris@brgm.fr ou a.gutierrez@brgm.fr ou encore via le site internet de OUAIP.



Evaluation du potentiel géothermique des aquifères profonds d'Ile de France

Doctorant: Jacques Dentzer

Encadrants: Sophie Violette (UPMC), Simon Lopez
(BRGM), Dominique Bruel (Mines ParisTech)

1

Plan de la présentation

- I) Problématique et enjeux
- II) Méthodologie
- III) Analyse critique des données disponibles
 - Température
 - Flux
 - Perméabilité
 - Failles
- IV) Outils de modélisation

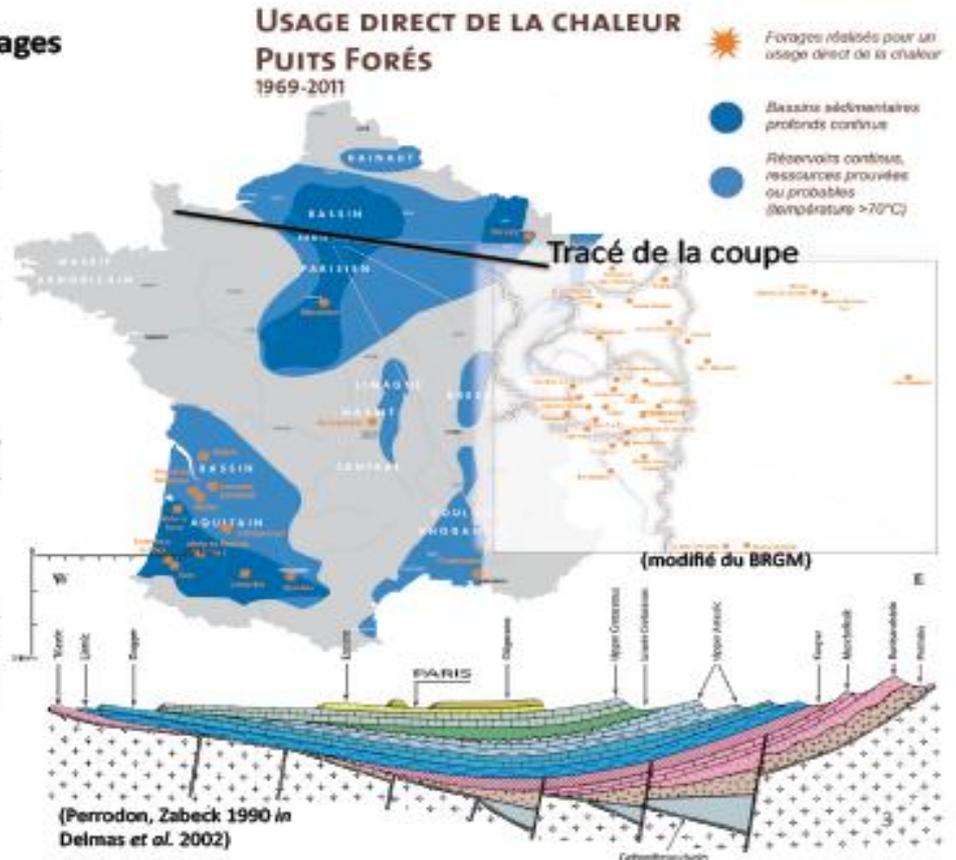
Synthèse et axes de recherche

2

I) Problématique et enjeux

Potentiel géothermique et usages

- Grande étendue de la ressource et un usage restreint dans l'espace
- Contrainte de la distribution de l'habitat en surface
- Forte densité en particulier en Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne
- Plusieurs aquifères concernés par cette ressource, mais le Dogger est le principal aquifère utilisé dans le bassin de Paris



• Quel est le potentiel géothermique du bassin de Paris?

→ tous aquifères du bassin confondus

→ en dehors des zones intensément exploitées

• Meilleure compréhension des anomalies thermiques et du fonctionnement hydrodynamique et thermique du bassin de Paris

• Quels sont les processus physiques responsables de la distribution de la chaleur dans le bassin?

II) Méthodologie

- Analyse critique des données disponibles
- Mise en cohérence des données pertinentes via l'élaboration d'un modèle conceptuel de fonctionnement hydrodynamique et thermique du bassin
- Mise en œuvre d'un outil numérique pour tester la validité du modèle proposé (échelles du bassin et de la Région île de France)

III) Analyse critique des données disponibles: Température

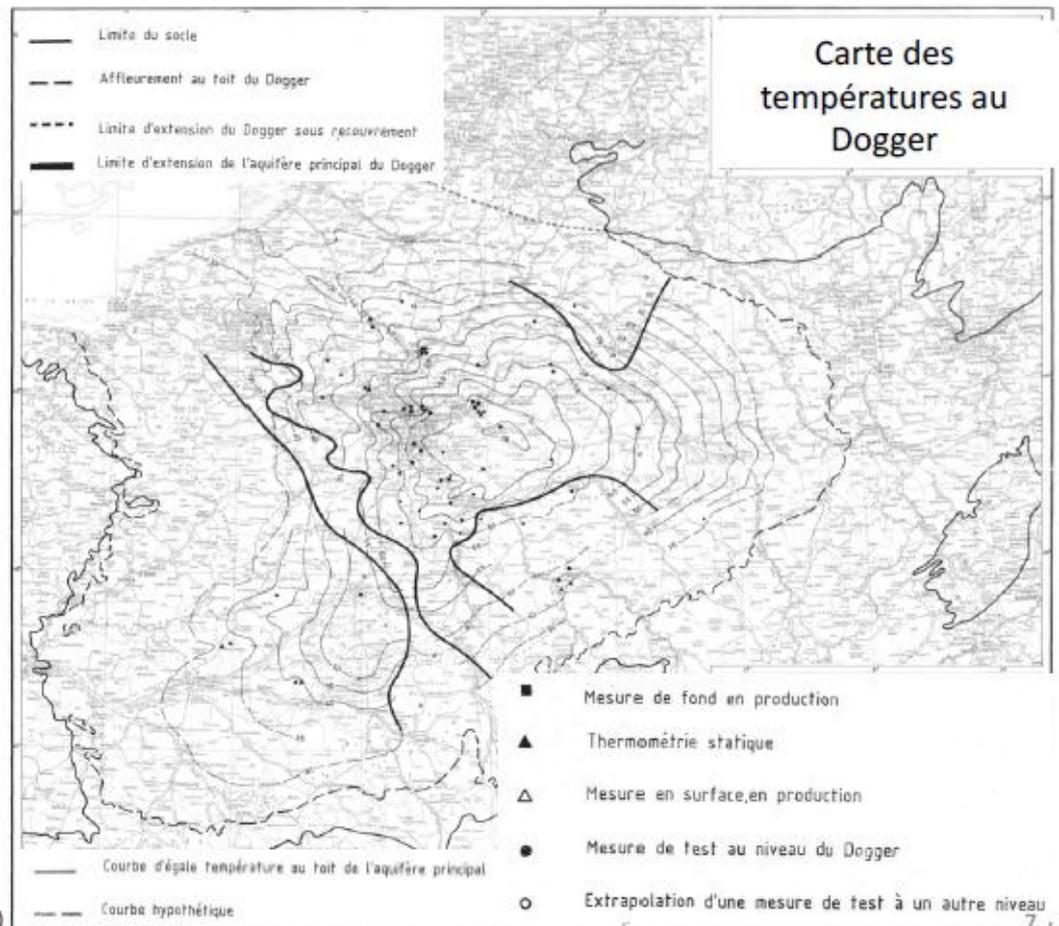
Diversité des mesures de la température

- Forages débitants (eau potable,...)
 - Tests de formation DST (Drill Stem Test)
+/- 2 à 5°C
 - Température max. atteinte BHT (diagraphie)
+/- 25 à 30°C \longrightarrow +/- 5 à 10°C
retraitement
 - Température max. atteinte (géothermie)
+/- 0,1 à...°C
 - Thermométrie de puits au repos \longrightarrow Coleno (1987), Demongodin (1992), Burrus (1997)
+/- 0,01 à...°C
 - Thermométrie dynamique (géothermie)
-
- Traitement géostat. (Bonte et al., 2007)
- Foissard (2011)
- Traitement géostat. (Bouchot et al., 2008)
- Traitement géostat. (Rojas et al., 1989, Hamm et al., 2011)
- Cartes sans trait. géostat. (Gable, 1986)
- Cartes sans trait. géostat. (Maget, 1983)
- Wei (1990), Castro (1995)

III) Analyse critique des données disponibles: Température

- Etat des connaissances et des méthodes de correction au début des années 80
- Diversités des sources de mesure de la température
- Interpolation "à la main" en prenant en compte l'effet des irrégularités géologiques
- Représentation selon la formation géologique
- A l'échelle du bassin de Paris et pour les différentes formations (Trias, Dogger,...)

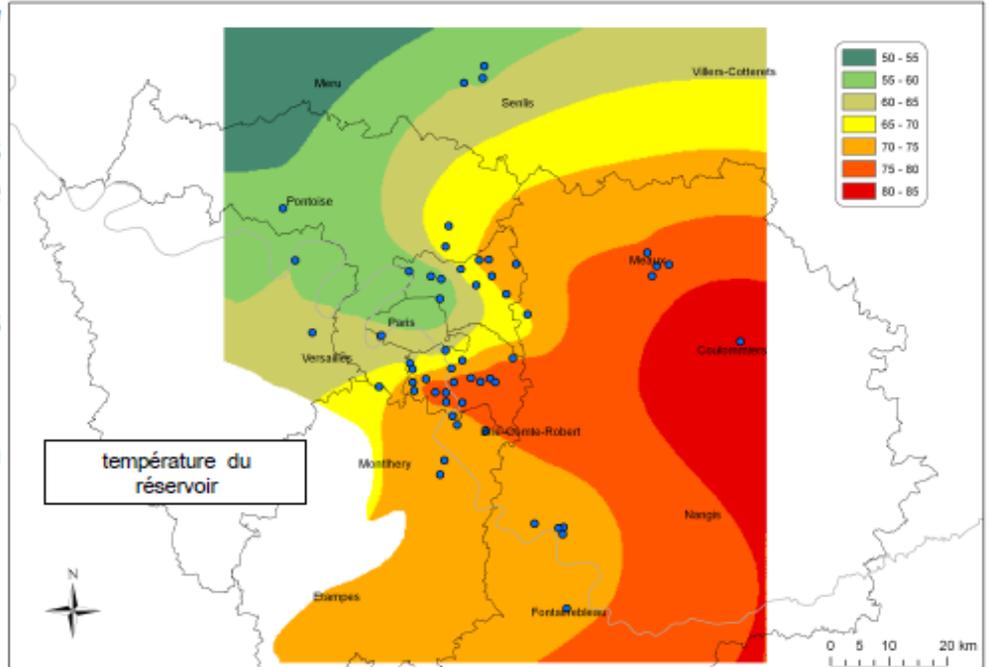
(Maget, 1983)



III) Analyse critique des données disponibles: Température

Températures au toit du Dogger:

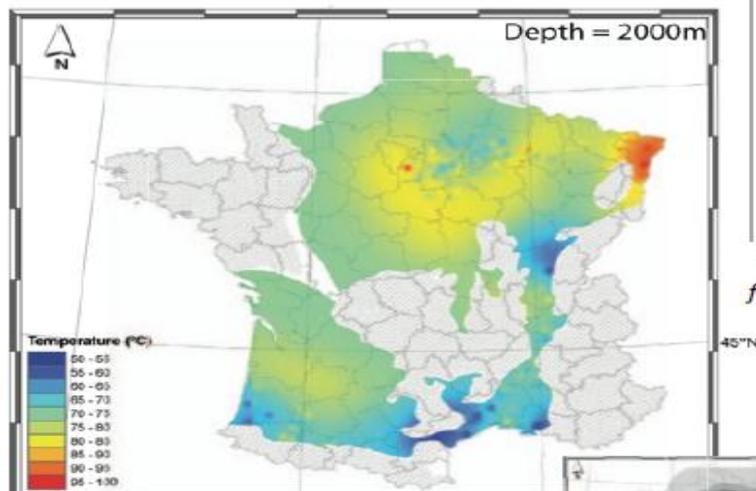
- Homogénéité des sources de mesure de la température (base de données Dogger)
- Interpolation par des méthodes géostatistiques
- Représentation selon la formation géologique
- A l'échelle de l'Île de France



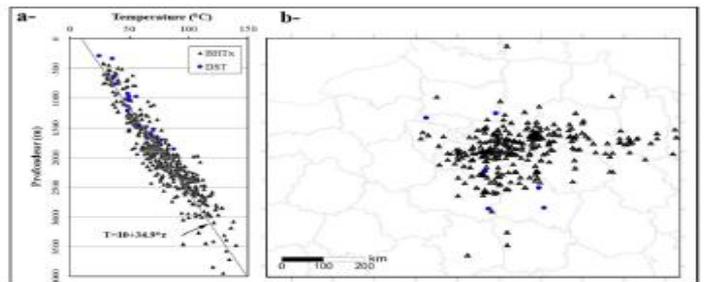
(Hamm et al., 2011)

III) Analyse critique des données disponibles: Température

Carte de température à l'isopropondeur 2000 m



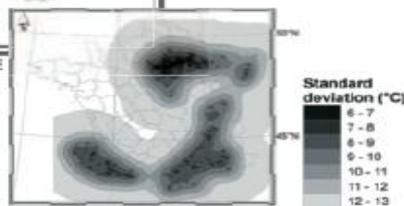
(Bonté et al., 2007)



Températures en fonction de la profondeur et position des forages pétroliers dans le bassin de Paris (Bonté et al., 2007)

Bloc thermique des 5000 premiers mètres de profondeur interpolés par des méthodes statistiques (Bonté et al., 2007)

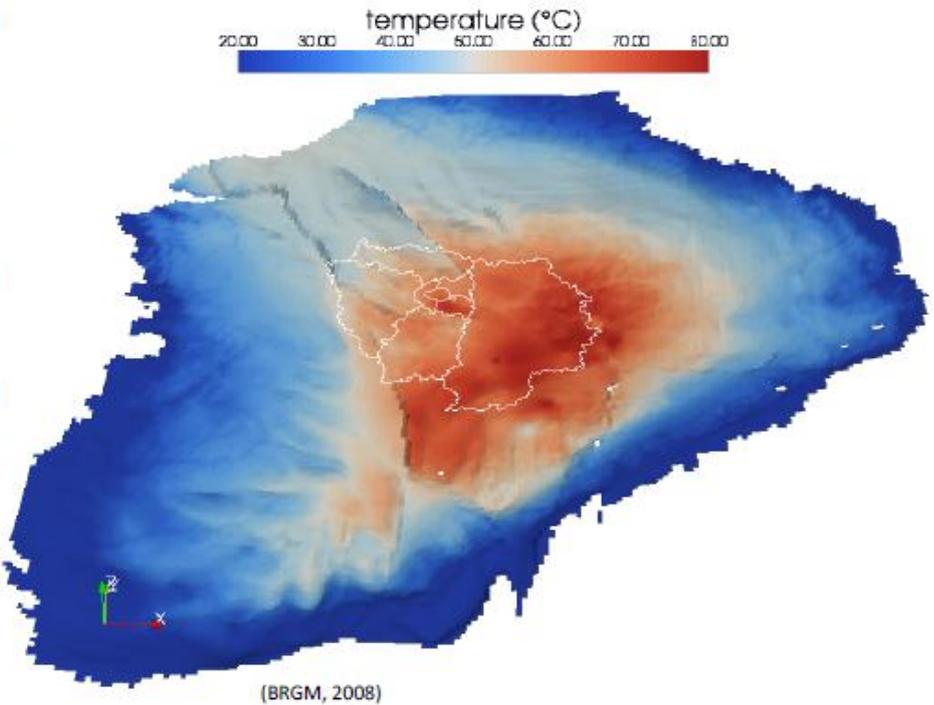
- 496 mesures BHT pour le bassin de Paris sur les 2443 mesures existantes
- 15 mesures de tests de formations DST pour le bassin de Paris



III) Analyse critique des données disponibles: Température

Carte des températures au toit du Dogger:

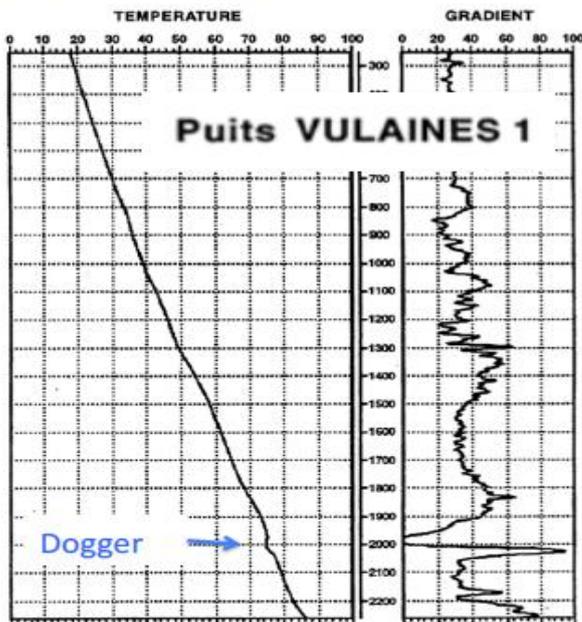
- Héritée du modèle de Bonté et al. (2007)
- Données géothermiques en plus des données pétrolières
- Interpolation au toit du Dogger et non à une isoprofondeur
- A l'échelle du bassin de Paris



10

III) Analyse critique des données disponibles: Température

Particularités thermiques:

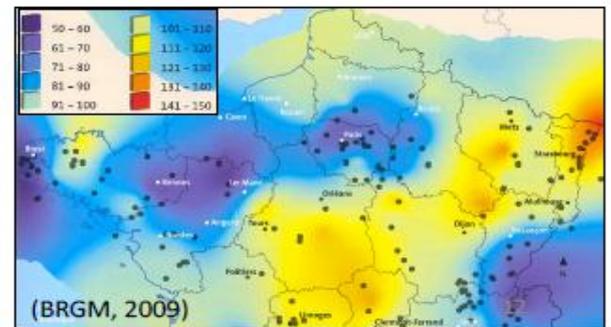
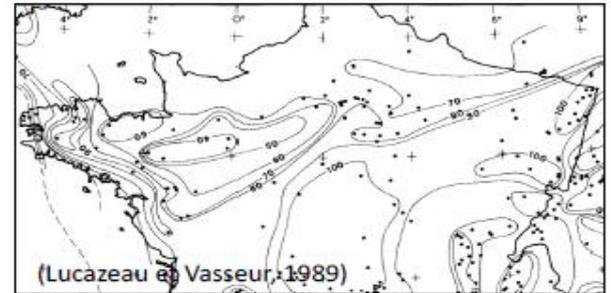
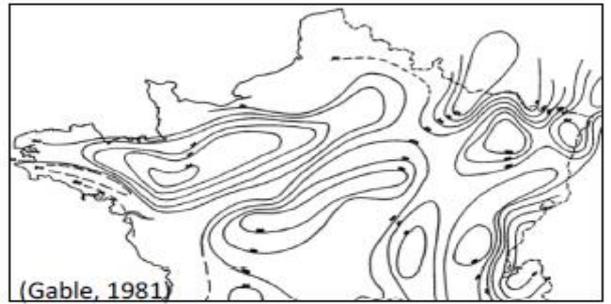


(Burrus, 1997)

- 2°C d'amplitude à Vulaines (2000 m)
- 2,4°C d'amplitude à la Courneuve (1690 m)
- 3,5°C d'amplitude à Aulnay-sous-Bois (1730 m)
-Chevilly-Larue

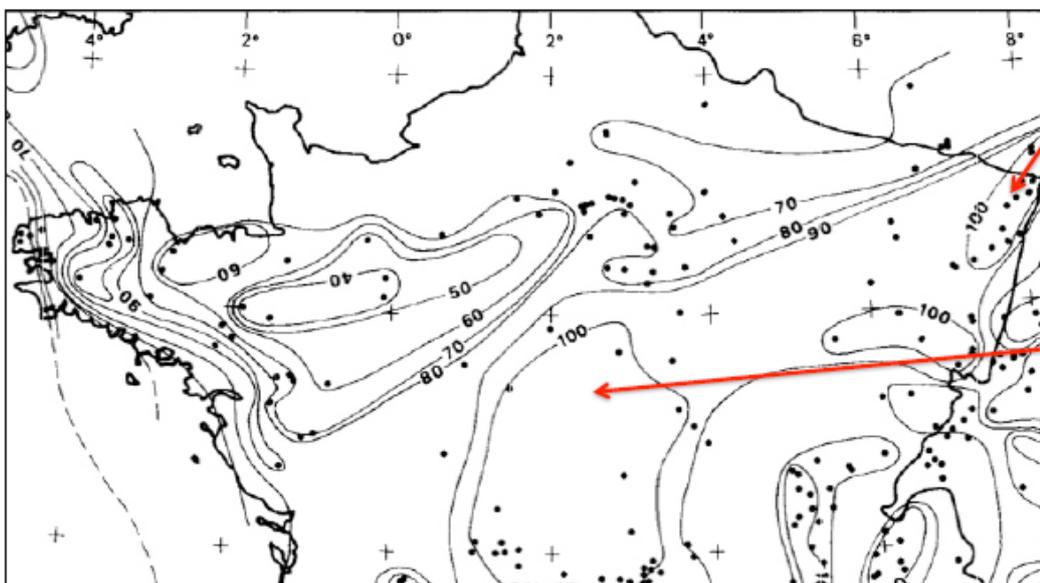
III) Analyse critique des données disponibles: **flux** (mW/m²)

- Flux de chaleur calculé à partir de puits de faible profondeur et de forages pétroliers
- L'estimation de flux est basée sur celle du gradient thermique et de la conductivité thermique
- Incertitude de 10-15 mW/m² sur le flux compte tenu des méthodes d'estimation de la température et de la conductivité thermique (Lucazeau et Vasseur, 1989)
- Réinterprétation de ces mesures de flux en mW/m² par le BRGM en 2009 et interpolation par des méthodes géostatistiques



III) Analyse critique des données disponibles: **flux**

Le flux, une résultante de plusieurs mécanismes, est une grandeur complexe à interpréter:



Le flux fort à l'est du bassin de Paris serait interprété par le rifting au Cénozoïque du fossé rhénan (Le Solleuz et al., 2004).

Le flux fort au sud du bassin de Paris serait interprété par la remontée d'un diapir au niveau du Massif Central sur la période du Cénozoïque et du Quaternaire (Le Solleuz et al., 2004).

(Lucazeau et Vasseur, 1989)

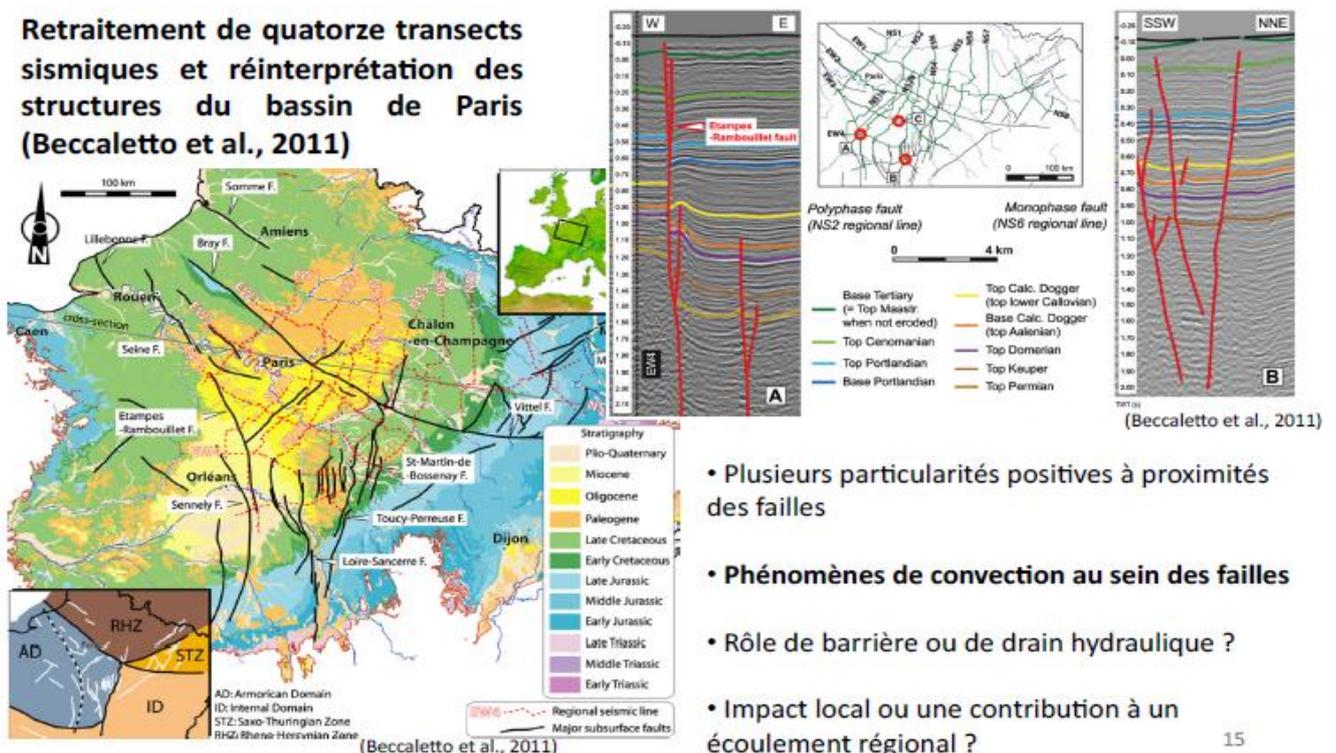
III) Analyse critique des données disponibles: perméabilité

Diversité des données hydrodynamiques

- Essais de débits de longue durée → Albien (Lemoine et al., 1939)
Néocomien (Pennequin, 1984)
 - Essais de production en géothermie
 - Test de formation DST pétroliers
 - Test de formation DST Gaz De France
 - Relation porosité – perméabilité
 - Perméabilité sur carotte
 - Méthodes électromagnétiques → Callovo-Oxfordien (Distinguin et Lavanchy, 2007)
-

III) Analyse critique des données disponibles: failles

Retraitement de quatorze transects sismiques et réinterprétation des structures du bassin de Paris (Beccaletto et al., 2011)



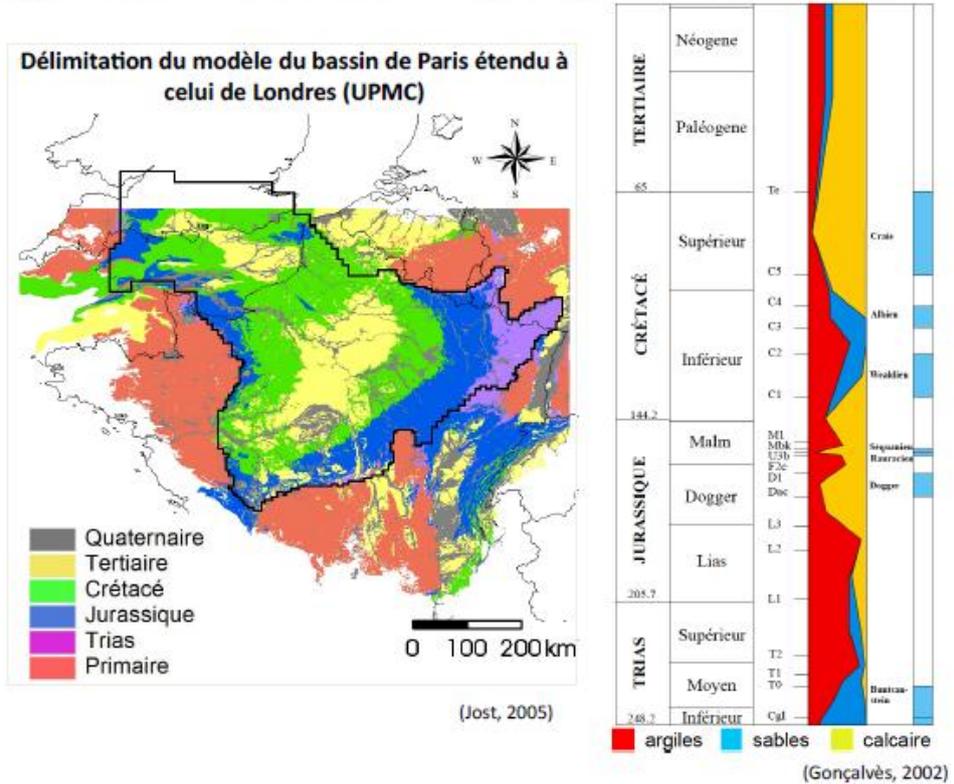
- Plusieurs particularités positives à proximités des failles
- Phénomènes de convection au sein des failles
- Rôle de barrière ou de drain hydraulique ?
- Impact local ou une contribution à un écoulement régional ?

IV) Outils de modélisation

Modèle régional d'écoulement en 3D au sein du bassin de Paris étendu au bassin de Londres

La géométrie:

- la topographie
- 19 marqueurs stratigraphiques
- le substratum
- au total 20 couches



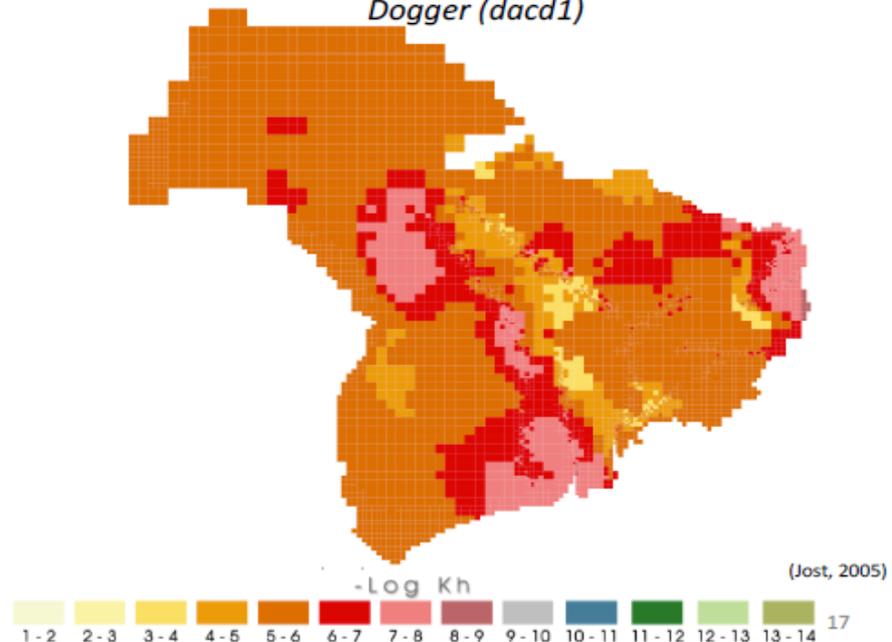
IV) Outils de modélisation

Modèle régional d'écoulement en 3D au sein du bassin de Paris étendu au bassin de Londres

Distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques:

- héritée de l'histoire géologique du bassin (248 Ma)
- le reflet des données disponibles spatialisées par krigeage
- calée en l'absence de données

Champs des perméabilités horizontales en $-\text{Log}(Kh(m/s))$ du Dogger (dacd1)



Synthèse et axes de recherche

- Forte hétérogénéité des données et de leur signification (exemple: thermométrie VS mesure ponctuelle), de leur incertitude
 - Importance des bases de données (température, débits, pressions, perméabilités, conductivités thermiques...), de la répartition dans l'espace mais également du suivi temporel
 - Utilisation des avancées scientifiques sur la modélisation du bassin de Paris en 3D (géologie, l'hydrogéologie...) à des fins géothermiques
- Mise en cohérence des données existantes
- Quantification des processus par modélisation numérique couplée des écoulements, du transport de chaleur et de matière en 3D à l'échelle du bassin et de la Région Ile de France



ANNEXE 3 : SITE WEB DE LA BASE DOGGER



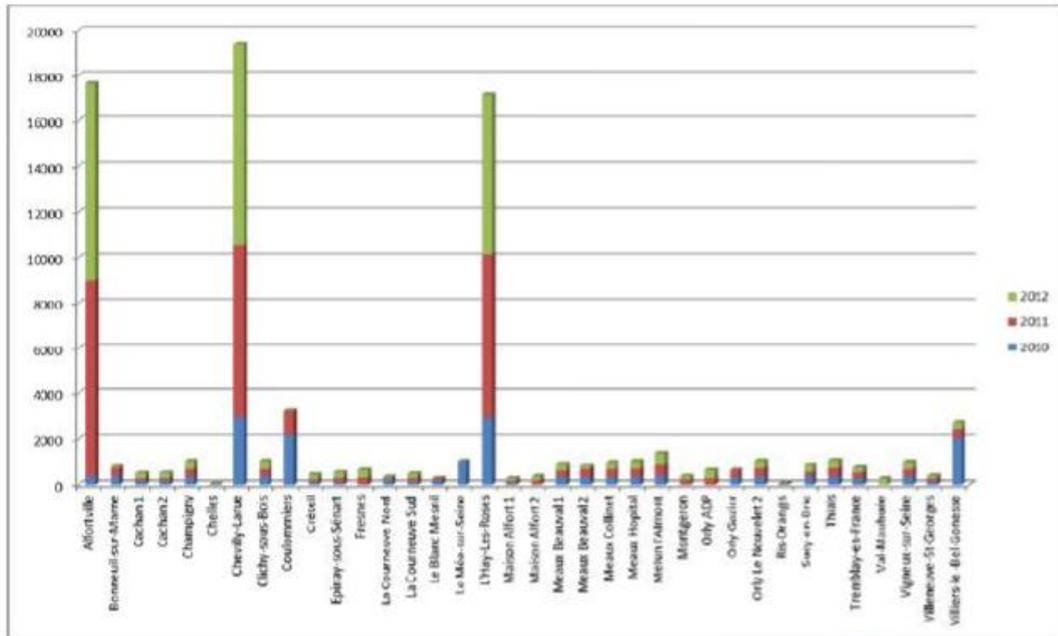
Développement d'un nouvel outil de gestion de la base Dogger

- > Objectif majeur visé: rendre **la base opérationnelle et accessible à l'ensemble des professionnels intervenant en géothermie profonde et notamment aux BE** en charge des études de faisabilité lors des demandes de permis de recherche et d'ouverture des travaux
- > Utilisateurs bénéficient en permanence d'une **version actualisée de la base** dont le BRGM est administrateur
- > **2 versions de l'application WEB :**
 - 1 version utilisateur (lecture + export des données)
 - 1 version administrateur (modification des données)
- > **Adresse de l'application Web:** <http://dogger-idf.brgm.fr>

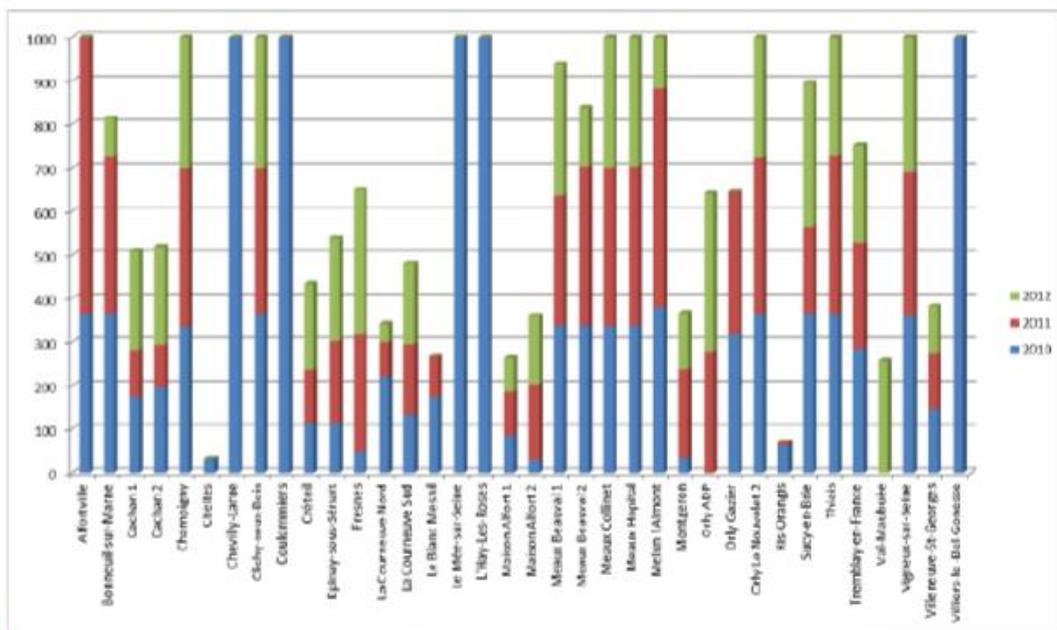


> 2

Bilan de récupération des données d'exploitation entre 2010 et 2012



Bilan de récupération des données d'exploitation entre 2010 et 2012





Contexte et objectifs du test d'interférence

- > Contexte de **relance de la géothermie au Dogger** ces dernières années avec de nombreux nouveaux projets de doublets ou de réhabilitations d'opérations existantes réalisés ou de dossiers en cours d'instruction
- > Des **opérations de plus en plus resserrées** dans un « mouchoir de poche » (cf. secteur Ouest du Val de Marne, secteur Est de la Seine St-Denis)
- > **Nécessité d'accroître la fiabilité des modélisations** réalisées dans le cadre des demandes de permis de recherche et d'ouverture des travaux souvent peu calibrées faute de données en fond
- > **Accroître notre compréhension du fonctionnement thermo-hydraulique du réservoir** (notamment interférences en pression entre puits, hétérogénéités)



> 2

Les différentes phases du projet

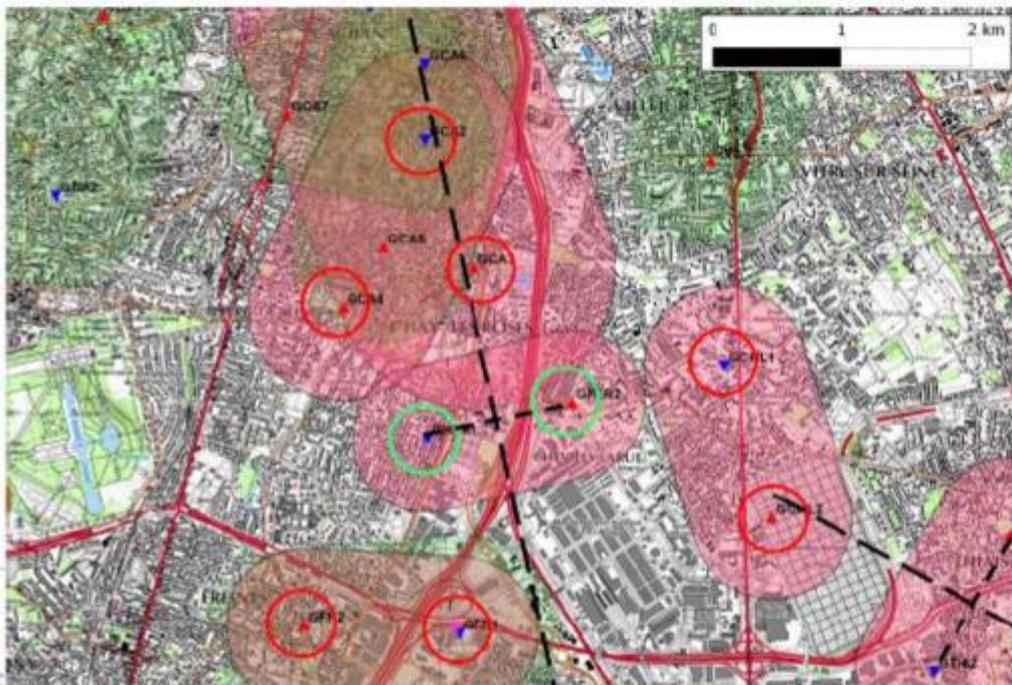
- > Ouverture d'une consultation par le BRGM en **mai-juin 2013** pour fixer le prestataire des travaux
 - Marché notifié au groupement **CFG Services – GPC IP** avec une **sous-traitance FLODIM** pour les mesures en fond de puits
- > Réalisation technique de l'essai du **16/09/2013 au 20/09/2013**
- > Interprétation et présentation des résultats prévues au **printemps/été 2014**



> 3

Zone ciblée par le test d'interférence

- > **Secteur Ouest du Val-de-Marne** (essai de production à l'Hay-Les-Roses et mesure des impacts en pression aux puits de Chevilly-Larue, Fresnes et Cachan 1&2)



Déroulement du test d'interférence

- > **16/09/2013 12:00:** Arrêt de toutes les exploitations concernées et instrumentation des puits en surface
- > **17/09/2013 7:00 au 18/09/2013 00:00 :** Installation de l'instrumentation en fonds de puits (puits injecteurs de Cachan 2, Chevilly-Larue et Fresnes)
- > **18/09/2013 00:00:** Mise en production du doublet de l'Haÿ-Les-Roses à débit max (280 m³/h) pendant **54h** (Chevilly, Cachan 1&2 et Fresnes à l'arrêt)
- > **20/09/2013 06:00:** Arrêt de la production à l'Haÿ-Les-Roses et mesure de la recompression du réservoir pendant 6h
- > **20/09/2013 12:00:** Fin de l'opération et retrait du matériel de mesure



> 5

Instrumentation des puits en surface

- > **5 doublets équipés en surface**
 - Capteurs de pression (capteurs 0 – 10 à 0 - 60 bars)
 - Capteurs de température
 - Centrale d'acquisition
 - Rabattemètre sur le tube bulle à bulle pour le puits GHLR-2



> 6

Instrumentation des puits injecteurs pour les mesures en fond

> 3 puits injecteur (GCHL-1, GFR-1, GCA2)

- 3 Grues 15 m (20 – 30 Tonnes)
- 3 Unités de Wireline Logging
- SAS, BOP, Stuffing box connectés sur la tête de puits
- Sonde de pression (quartz, précision 1 PSI) et température PT-1000 (0 - 75°C) au toit du réservoir
- Enregistrement pas 60 secondes
- Démontage des têtes de puits, connexion bride 3"



> 7

Instrumentation des puits injecteurs pour les mesures en fond



Instrumentation des puits injecteurs pour les mesures en fond

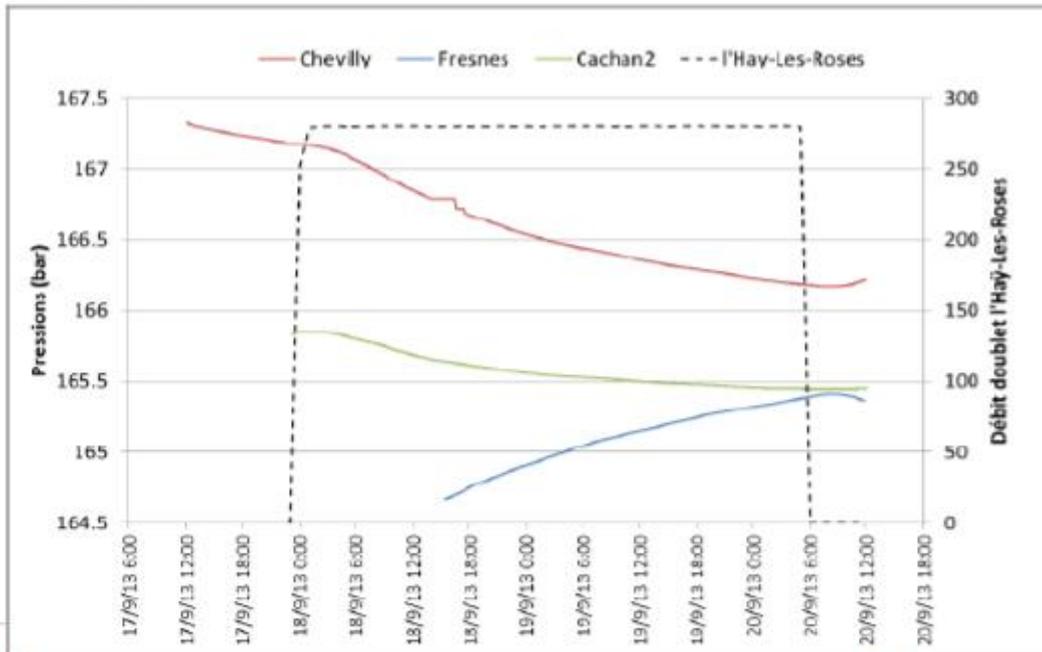


> 9

Instrumentation des puits injecteurs pour les mesures en fond

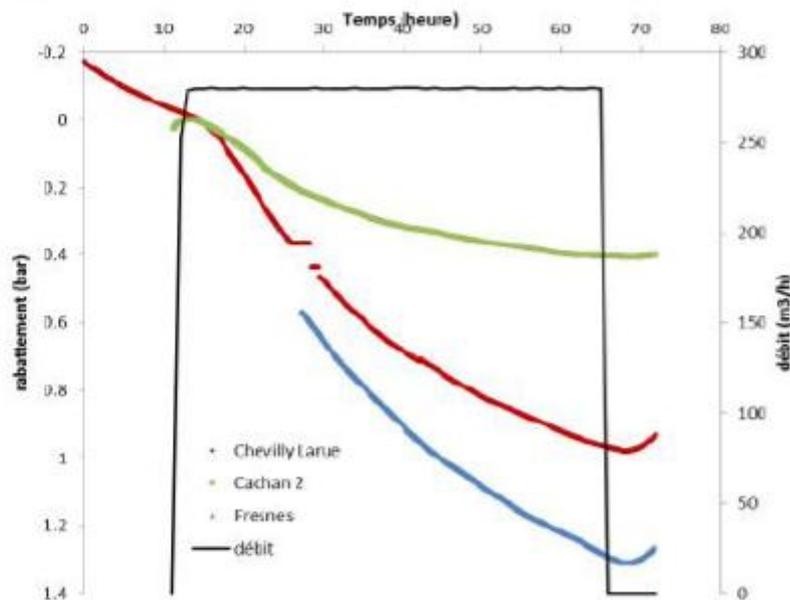


Evolutions des pressions en fond (GCHL-1, GFR-1, GCA2)



> 11

Evolutions des pressions en fond (GCHL-1, GFR-1, GCA2)



> 12

ANNEXE 5 : ESSAIS DE PRODUCTION ET D'INJECTION : RÈGLES DE BONNE CONDUITE ET OUTILS D'INTERPRÉTATION



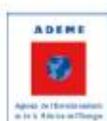
Présentation du projet

Contexte :

- > L'acquisition de données : indispensable pour avancer dans la connaissance des ressources en géothermie et leur gestion sur le court et le long terme ;
- > Amélioration de la mise en place et des interprétations des essais hydrauliques → fiabilité des calculs qui en découlent (modélisation, dimensionnement d'exploitation, etc...) ;

Objectif :

- > « Bonnes conduites » pour le dimensionnement, la réalisation et l'interprétation des essais. *Incluant la caractérisation d'aquifères non connus/conventionnels ou pouvant présenter des aléas techniques;*
- > **Mise en place d'un outil d'interprétation et de dimensionnement des essais hydrauliques à la disposition des professionnels de la géothermie.** *Plusieurs niveaux d'utilisations, allant du simple pré-dimensionnement aux interprétations nécessitant des connaissances approfondies en hydrogéologie ou en ingénierie de réservoir;*



> 2

L'outil : « OUAIP »

- > OUAIP : **O**utils d'**A**ide à l'**I**nterprétation des **P**ompages d'essais

- > **Logiciel diffusé en version bêta sur:**
<http://ouaip.brgm.fr> déjà disponible !

- > **Module géothermie : sortie en janvier 2014 !!**
 - Effets de la température
 - Dimensionnement spécifique
 - Travail en pression
 - Pression initiale
 - Nomenclature
 - ...





Centre scientifique et technique
Direction Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr