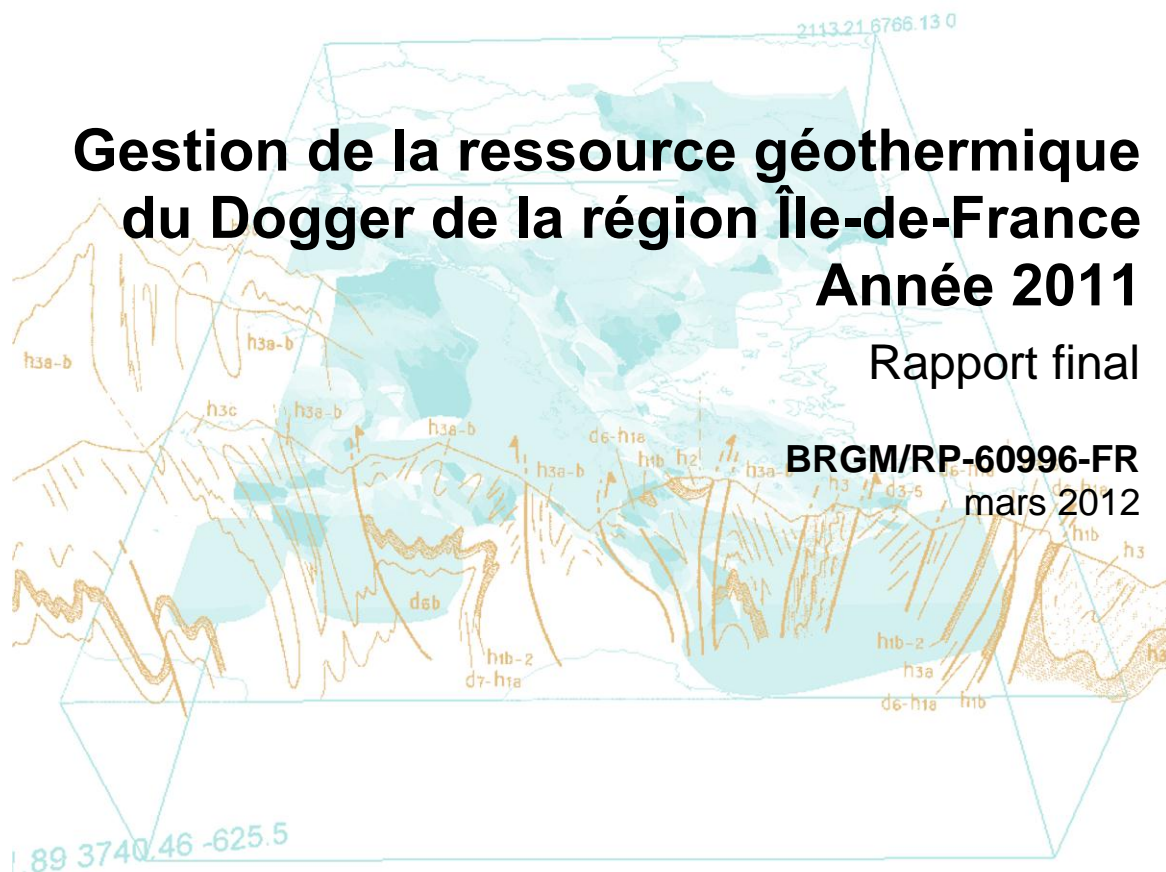




Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France Année 2011

Rapport final

BRGM/RP-60996-FR
mars 2012



Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France Année 2011

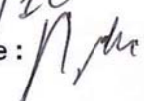
Rapport final

BRGM/RP-60996-FR
mars 2012

Étude réalisée dans le cadre de la convention
ADEME-BRGM n° 09 05 C 0119

V. Hamm, C. Castillo, I. Ignatiadis (BRGM)
M. Evrard, A. Fisseau, G. Ligneau (CFG Services)
O. Borozdina (GPC-I&P)

Vérificateur :
Nom : Goyénèche Olivier
Date : 21/05/12
Signature : 

Approbateur :
Nom : Desplan Alain
Date : 26/05/12
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 : Dogger Île-de-France, Base de données, Données d'exploitation, Données physico-chimiques, Réhabilitation, Puits producteur de Coulommiers, Puits d'observation, Cartographie, Sulfures, pH, Inhibiteurs.

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

Hamm V., Castillo C., I. Ignatiadis, Evrard M., Fisseau A., Ligneau G. et Borzdina O. (2012) - Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France – Année 2011. Rapport final. BRGM/RP-60996-FR, 131 p., 25 fig., 5 tabl., 5 ann.

Synthèse

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet « Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France – Année 2011 » (PSP11GTH20) de la convention de Service Public ADEME-BRGM notifiée le 16 mai 2011. Les principaux objectifs du projet sont :

- affiner les modélisations thermo-hydrodynamiques du Dogger avec notamment une étude d'inter-comparaison sur la modélisation de la percée thermique sur un doublet spécifique du Dogger pour lequel une baisse sensible de température au puits de production est observée ;
- réaliser une étude de sensibilité, d'une part, sur les paramètres influant 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 (SiO_2) vis-à-vis des variations de température et incertitudes de mesures ;
- 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 90 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. **Le présent rapport décrit, par conséquent, les trois derniers points qui sont la poursuite et l'état de la collecte des données au Dogger en 2011, une étude de pré faisabilité pour la réhabilitation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation et une cartographie géochimique des eaux du Dogger de 1990 à 2011.**

Concernant la collecte des données d'exploitation de la boucle géothermale sur l'aquifère du Dogger, le bilan des deux dernières années, correspondant à la mise en place d'un fichier Excel standardisé à remplir par chaque responsable technique de site, est mitigé. En effet, seuls 1/3 des exploitants ont pris « l'habitude » de remplir trimestriellement le fichier Excel alors que pour 2/3 d'entre eux ce n'est toujours pas acquis. Sur ces 2/3, la moitié enverrait un autre fichier contenant ces données et pour l'autre moitié aucun envoi n'est réalisé. Ainsi, une réflexion est nécessaire en 2012 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 BESS lors de leurs visites sur sites, un fichier similaire a été créé en 2011 pour 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. Il est ainsi réalisé **une étude de pré faisabilité sur l'utilisation d'un ancien puits géothermique (puits producteur de Coulommiers GCO1) en puits d'observation.** Différentes solutions sont comparées 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" (7" actuellement) sur toute sa hauteur semble 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 est également avantageuse du point de vue des technologies d'instrumentation du puits mises en œuvre qui peuvent être applicables à un puits en production (intégration des capteurs de mesure à un tube de traitement de la corrosion en fond de puits).

Les évolutions physico-chimiques des fluides du Dogger depuis les années 90 à 2011 montrent que :

- la teneur en sulfure 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 sulfure. 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 de 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) ;
- **les quantités d'inhibiteur injectées en fond de puits ont été réajustées depuis la fin des années 1990.** Elles sont actuellement 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'avèrent, cependant, encore inadaptés à quelques opérations exploitant le Dogger, en particulier aux sites artésiens.** Il apparaît ainsi que chacun des traitements appliqués doit 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, à l'avenir, il nous paraît intéressant de travailler, spécifiquement, sur chacun des sites où la reprise de la corrosion est avérée. Il s'agira, par exemple, de tester (en laboratoire et 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, à l'occasion du forage du nouveau puits injecteur (GCO4) à Coulommiers (77) proche de l'ancien injecteur (GCO2), **un prélèvement de fond a été effectué et ses caractéristiques physicochimiques et sa composition chimique ont été analysées en vue de déterminer notamment la présence de produit inhibiteur résiduel, mais également de comparer ses caractéristiques avec l'ancien producteur et injecteur.** Les principaux résultats sont :

- 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 sulfure dissous 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, FeCO_3 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 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$,
 - le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}(\text{CITD})$ du GCO4, comparé à celui du GCO1, témoigne d'un enrichissement en ^{13}C dans le CITD, et donc d'un processus de biodégradation du carbone organique dans l'eau du GCO4 ;
- la teneur en résidu d'inhibiteur est **a priori** 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 **a priori** faible puisque tout le carbone organique, déterminé dans l'eau par une analyse COT (carbone organique total) est égale à 7 mg/L. Notons que la teneur moyenne d'inhibiteur Norust 491 injecté dans le GCO1 depuis plus de 15 ans est de 4,5 mg/L.

Néanmoins, l'analyse chromatographique du fluide prélevé ne permet pas à l'heure actuelle 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 des composés du Norust 491. Il n'est 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 doivent 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.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Poursuite de la collecte des données au Dogger – Année 2011	13
2.1. ÉTAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNÉES DEPUIS LA MISE EN PLACE D'UNE PROCÉDURE SPÉCIFIQUE EN 2010	13
2.1.1. Récupérations des données pour l'année 2011	13
2.1.2. Évolution du nombre de mesures enregistrées dans la base Dogger depuis la mise en place du fichier Excel en 2010	15
2.2. NOUVEAU FICHIER EXCEL POUR L'INTÉGRATION DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES EN 2011	15
2.3. ÉVOLUTIONS DE LA BASE DOGGER EN 2012	17
3. Proposition de rehabilitation de l'ancien puits producteur de Coulommiers GCO-1 en puits d'observation au Dogger	19
3.1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	19
3.2. SPÉCIFICATIONS POUR LA RÉHABILITATION D'UN PUIITS GÉOTHERMIQUE EN PUIITS D'OBSERVATION	20
3.2.1. Cadre réglementaire actuel	20
3.2.2. Conditions nécessaires pour la transformation du puits	20
3.2.3. Conditions techniques et financières	22
3.2.4. Récapitulatif des coûts	28
3.2.5. Cadre réglementaire et administratif à définir	28
3.3. CONCLUSION	29
4. Évolutions physico-chimiques des fluides au Dogger	31
4.1. INTRODUCTION	31
4.2. CARTOGRAPHIES ET SUIVIS DE LA TENEUR EN SULFURE DES FLUIDES DU DOGGER	32
4.2.1. Cartographie initiale	32
4.2.2. Cartographies et suivis physico-chimiques et isotopiques des années 1990	33
4.2.3. Cartographie des teneurs en sulfure et évolutions nouvelles (post 2008)	39

4.3. CARTOGRAPHIES ET SUIVIS DU PH DES FLUIDES	42
4.3.1. Cartographie initiale.....	42
4.3.2. Cartographie et suivis physico-chimiques des années 90.....	43
4.3.3. Cartographie actuelle du pH des fluides et évolutions nouvelles (post 2008).....	44
4.4. IMPACT DES ÉVOLUTIONS OBSERVÉES SUR LES PHÉNOMÈNES DE CORROSION-DÉPÔTS.....	47
4.4.1. Évolutions des teneurs en fer dissous dans les fluides du Dogger.....	47
4.4.2. Les traitements inhibiteurs.....	50
4.4.3. Devenir des produits inhibiteurs dans l'aquifère du Dogger	52
4.5. CONCLUSION DE L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DES FLUIDES	54
5. Conclusions.....	57
6. Bibliographie	61

Liste des figures

Figure 1 : Extrait de l'applicatif Access « VersORACLE » complété par la nouvelle application.	16
Figure 2 : Localisation des impacts des puits à Coulommiers.	21
Figure 3 : Coupe technique du puits GCO1 rechemisé en diamètre 5" (Source : CFG Services).	24
Figure 4 : Schéma de principe de l'enrobage des câbles électriques dans le santoprène du TCTFP (Source : CFG Services).	25
Figure 5 : Schéma du puits GCO1 équipé d'une complétion amovible (Source : CFG Services).	27
Figure 6 : Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, lors de la mise en exploitation (données en mg/l).	33
Figure 7 : Évolution de la teneur en sulfure dissous prélevée en tête du puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 avec le temps.	34
Figure 8 : Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 1995-1997.	34
Figure 9 : Évolution de la teneur en sulfure dissous prélevée en tête du puits de production GLCS1 de La Courneuve Sud avec le temps.	35
Figure 10 : Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GLCN1 de La Courneuve Nord en fonction de l'inverse du débit pour trois années différentes (1988, 1990 et 1994).	36

Figure 11 :	Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour quatre années différentes (1987, 1990, 1994 et 1996).	36
Figure 12 :	Évolutions comparées de $[S^{2-}]$ et de $\delta^{34}(HS^-)$ au sein du fluide prélevé en tête du puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour l'année 1990.	38
Figure 13 :	Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 2008-2010.	40
Figure 14 :	Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GHLR2 de L'Hây-les-Roses (haut) et GCHL2 de Chevilly-Larue (bas) pour quatre années différentes.	41
Figure 15 :	Carte de répartition du pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, lors de la mise en exploitation.	42
Figure 16 :	Évolution du pH des fluides prélevés en tête des puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 (en haut) et GLCS1 de La-Courneuve-Sud (en bas) avec le temps.	43
Figure 17 :	Carte de répartition de pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 1995-1997 (données relevées).....	44
Figure 18 :	Évolution du pH des fluides prélevés en tête du puits de production GHLR2 de L'Hây-les-Roses avec le temps.	45
Figure 19 :	Carte de répartition du pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 2008-2010 (données relevées).....	46
Figure 20 :	Évolution du pH des fluides prélevés (en 2011) en tête de puits de L'Hây-les-Roses, Chevilly-Larue, Alfortville et Maisons-Alfort II (sites situés au sud de Paris) en fonction de l'inverse du débit d'exploitation.	46
Figure 21 :	Évolution de la concentration en fer dissous prélevée en tête de puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour quatre années différentes (1987, 1990, 1994 et 1996).	48
Figure 22 :	Évolution de la teneur en fer dissous prélevée en tête des puits de production GCO1 de Coulommiers (haut) et GCHM1 de Champigny-sur-Marne (bas) avec le temps.....	48
Figure 23 :	Évolution de la teneur en fer dissous dans les fluides en tête des puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-1 (haut), GMX1 de Meaux-Collinet (centre) et GCL1 de Clichy-sous-Bois (bas) en fonction du temps.	50
Figure 24 :	Évolution de la quantité d'inhibiteur de corrosion-dépôt injectée au fond des puits de production artésiens GMX1 de Meaux-Collinet (haut) et GCL1 de Clichy-sous-Bois (bas) en fonction du temps.	51
Figure 25 :	Évolution de la quantité d'inhibiteur de corrosion-dépôt injectée au fond des puits de production non artésiens GAL2 d'Alfortville (haut) et GCHM1 de Champigny-sur-Marne (bas) en fonction du temps.	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Taux et mode de récupération des données d'exploitation en 2011.	12
Tableau 2 : Nombre d'enregistrements dans la base Dogger en 2010 et 2011.	14
Tableau 3 : Récapitulatif des coûts par type de solution – k€ HT.....	28
Tableau 4 : Évolution des teneurs en sulfure du réservoir $[S^2]_R$ en fonction du temps pour les sites du sud et de l'est de Paris.....	37
Tableau 5 : Valeurs de $\delta^{34}(HS^-)$ et teneurs en sulfures correspondantes en fonction du temps pour neuf sites géothermaux, dont un se situe au nord de Paris (Villeneuve la Garenne).	39

Liste des annexes

Annexe 1 : Fichier Excel données géochimiques	65
Annexe 2 : Étude de préfaisabilité de rehabilitation de l'ancien puits producteur de Coulommiers en puits d'observation	69
Annexe 3 : Étude de préfaisabilité de mise en place de capteurs de pression et température en fond de forage géothermique de Coulommiers comme puits d'observation	87
Annexe 4 : Rappels nécessaires pour comprendre les évolutions des concentrations en fer et en sulfures dissous observées en tête de puits.....	111
Annexe 5 : Note technique relative à l'analyse de fluide prélevé en fond du nouveau puits injecteur de Coulommiers afin de détecter la présence éventuelle de produit inhibiteur	117

1. Introduction

Ce document finalise les travaux du projet « Gestion de la ressource géothermique du Dogger en Île-de-France » de la convention ADEME-BRGM 2011 (convention n° 0905C0119 notifiée le 16 mai 2011). Les principaux objectifs du projet sont :

- affiner les modélisations thermo-hydrodynamiques du Dogger avec notamment une étude d'inter-comparaison sur la modélisation de la percée thermique sur un doublet spécifique du Dogger pour lequel une baisse sensible de température au puits de production est observée ;
- réaliser une étude de sensibilité, d'une part, sur les paramètres influant 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 (SiO_2) vis-à-vis des variations de température et incertitudes de mesures ;
- 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. **Le présent rapport décrit par conséquent les trois derniers points qui sont la poursuite et l'état de la collecte des données au Dogger en 2011, une étude de préfaisabilité pour la réhabilitation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation et une cartographie géochimique des eaux du Dogger de 1990 à 2011.**

SITE	EXPLOITANT	Société de Service sous-so	1er trimestre	2nd trimestre	3ème trimestre	4ème trimestre	Commentaire	Mode récupération des données
ALFORTVILLE	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
BONNEUIL-SUR-MARNE	SETBO	AQUAPROX	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
CACHAN 1	DALKIA	GPC I&P	0	1	1	1		Relevé sur site
CACHAN 2	DALKIA	GPC I&P	0	1	1	1		Relevé sur site
CHAMPIGNY	COFELY	CFG Services	1	1	1	1		Relevé sur site
CHEVILLY-LARUE	SEMHACH	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
CRETEIL MONT MESLY	DALKIA/SCUC	GPC I&P	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
EPINAY-SOUS-SENMART	DALKIA	GPC I&P	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
FRESNES	COFELY	CFG Services	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
L'HAY-LES-ROSES	SEMHACH	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
MAISON ALFORT 1	DALKIA	GPC I&P	1	1	1	1		Relevé sur site
MAISON ALFORT 2	DALKIA	GPC I&P	1	1	1	1		Relevé sur site
MONTGERON	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1		Relevé sur site
ORLY 1 GAZIER	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1	site fermé depuis le 14/12/2011	Relevé sur site
ORLY 2 LE NOUVELET 2	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
ORLY ADP	COFELY	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
SUCY-EN-BRIE	COFELY	CFG Services	0	1	1	1		Envoi du fichier Excel
THIAIS	COFELY	CFG Services	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
VIGNEUX-SUR-SEINE	IDEX	GPC I&P	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
VILLENEUVE ST-GEORGES	DALKIA/SCVG	GPC I&P	1	1	1	1	en attente	Relevé sur site
CHELLES	CORIANCE 2A	GPC I&P					arrêté depuis fin novembre 2010	
CLICHY-SOUS-BOIS	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1		Relevé sur site
LA COURNEUVE NORD	CORIANCE 2A	GPC I&P	1	1	1	1	arrêté, nouveau puits producteur en foration	Relevé sur site
LA COURNEUVE SUD	CORIANCE 2A	GPC I&P	1	1	1	1		Relevé sur site
LE BLANC MESNIL	CORIANCE 2A	GPC I&P	1	1	1	1	arrêté pour travaux, pb de traitement	Envoi du fichier Excel
TREMBLAY-EN-FRANCE	COFELY	GPC I&P	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
VILLIERS-LE-BEL-GONNESSE	CORIANCE 2A	GPC I&P	1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
COULOMMIERS	DALKIA	CFG Services	1	1	1	1	nouveau doublet foré fin 2011	Envoi des données sous un autre format
LE MEE SUR SEINE	IDEX/CPCU	GPC I&P					arrêté depuis fin août 2010	
MEAUX BEAUVAL 1	CORIANCE 2A	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
MEAUX BEAUVAL 2	CORIANCE 2A	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
MEAUX COLLINET	CORIANCE 2A	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
MEAUX HOPITAL	CORIANCE 2A	CFG Services	1	1	1	1		Envoi des données sous un autre format
IMELUN	DALKIA/STAHL		1	1	1	1		Envoi du fichier Excel
RIS ORANGIS	CORIANCE 2A	Sautier & Associés	1	1	1	1	arrêté pour travaux de rechemisage	Envoi du fichier Excel
35		TOTAL	29	32	31	29		
		STATISTIQUE (%)	82.9	91.4	88.6	82.9		

Légende :
 : Sites du département du Val-de-Marne
 : Sites du département de Seine-Saint-Denis
 : Autres Sites
 : Sites à l'arrêt

Envoi par l'exploitant des données dans le fichier Excel normalisé mis en place par le BRGM
 Envoi des données soit dans un tableau Excel autre, soit copie des mains courantes par fax
 Récupération des mains courantes par CFG ou GPC sur site

Envoi du fichier Excel
 Envoi sous un autre format
 Relevé sur site

Tableau 1 : Taux et mode de récupération des données d'exploitation en 2011.

2. Poursuite de la collecte des données au Dogger – Année 2011

2.1. ÉTAT DU PROCESSUS D'ACQUISITION DES DONNÉES DEPUIS LA MISE EN PLACE D'UNE PROCÉDURE SPÉCIFIQUE EN 2010

Suite aux actions mises en place lors du projet « phase 3 du Dogger » (rapport BRGM/RP-58834-FR) et du projet « Gestion du Dogger 2010 » (rapport BRGM/RP-59845-FR), sur la mise en place d'un fichier Excel standardisé pour la collecte des paramètres d'exploitation au Dogger et une routine d'intégration des données dans la base, un premier bilan de fonctionnement est dressé.

2.1.1. Récupérations des données pour l'année 2011

Le [tableau 1](#) ci-contre récapitule l'état d'acquisition des données d'exploitation pour les 35 opérations géothermiques au Dogger et le mode de transmission de ces données. Ce tableau appelle différentes observations :

- certains sites sont totalement arrêtés depuis 2010 (Chelles et Le Mée-sur-Seine) et seront remplacés par des nouveaux doublets en 2012 ou 2013 ;
- un site est arrêté depuis décembre 2011, il s'agit du doublet de Orly-Gazier et qui ne sera pas remplacé ;
- certains sites sont ou ont été arrêtés provisoirement pour travaux, c'est le cas de Le Blanc-Mesnil en début d'année 2011 et des sites de Ris-Orangis et de La Courneuve-Nord qui, pour le premier, est en cours de rechemisage et pour le second, un nouveau puits producteur a été foré en 2011 pour un futur fonctionnement en triplet ;
- le taux de récupération des données de fonctionnement de la boucle géothermale par trimestre varie entre 82,9 et 91,4 % ;
- le moyen de transmission des données aux bureaux d'études en charge du suivi des opérations géothermiques (CFG Services et GPC I&P) est très variable suivant le site considéré. On note ainsi que seuls **12 sites sur 32 encore en activités fin 2011** transmettent leurs données dans le fichier Excel normalisé mis en place fin 2010.

Ainsi, si le taux de récupération semble très bon, il ne reflète pas la difficulté à obtenir les données des exploitants. **Bon nombre d'entre eux (20 au total) ne remplissent pas le fichier Excel qui a été mis en place par le BRGM pour assurer la pérennité de l'acquisition des données au Dogger.** La moitié d'entre eux utilisent leur propre fichier Excel pour les données d'exploitation et l'autre moitié ne fournissent aucunes données directement aux BESS qui doivent récupérer les mains courantes lors de leur visite sur site et remplir ensuite le fichier Excel.

SITE	GTC	ANNEE 2010	ANNEE 2011
Total ALFORTVILLE	oui (depuis 2011)	352	8630
Total BONNEUIL-SUR-MARNE	oui	365	360
Total CACHAN 1	non	157	96
Total CACHAN 2	non	109	83
Total CHAMPIGNY	non	335	365
Total CHELLES	non	33	0
Total CHEVILLY-LARUE	oui	2967	7544
Total CLICHY-SOUS-BOIS	non	373	335
Total COULOMMIERS	oui	2179	1082
Total CRETEIL MONT MESLY	non	39	123
Total EPINAY-SOUS-SENART	non	107	191
Total FRESNES	non	48	272
Total LA COURNEUVE NORD	non	220	80
Total LA COURNEUVE SUD	non	132	163
Total LE BLANC MESNIL	non	174	92
Total LE MEE-SUR-SEINE	oui	1054	0
Total L'HAY-LES-ROSES	oui	2971	7150
Total MAISON ALFORT 1	non	63	100
Total MAISON ALFORT 2	non	21	184
Total MEAUX BEAUVAL 1	non	338	298
Total MEAUX BEAUVAL 2	non	338	365
Total MEAUX COLLINET	non	336	365
Total MEAUX HOPITAL	non	338	365
Total MELUN L'ALMONT2	non	378	420
Total MONTGERON	non	365	365
Total ORLY 1 GAZIER	non	217	358
Total ORLY 2 LE NOUVELET	non	365	357
Total ORLY ADP	non	0	346
Total RIS ORANGIS	non	64	1
Total SUCY-EN-BRIE	non	365	227
Total THIAIS	non	432	362
Total TREMBLAY-EN-FRANCE	non	284	242
Total VIGNEUX-SUR-SEINE	non	366	328
Total VILLENEUVE ST-GEORGES	non	125	128
Total VILLIERS-LE-BEL-GONESSE	oui	2052	363
Total général		18062	31740

Tableau 2 : Nombre d'enregistrements dans la base Dogger en 2010 et 2011.

(un enregistrement correspond à une date pour laquelle il y a eu une mesure des différents paramètres d'exploitation)

Il reste donc encore un travail important pour « convaincre » les responsables techniques des sites à remplir trimestriellement le fichier Excel mis à leur disposition. Il est très probable que cela ne pourra se faire sans un appui, voire un cadre réglementaire à définir avec la DRIEE Île-de-France.

2.1.2. Évolution du nombre de mesures enregistrées dans la base Dogger depuis la mise en place du fichier Excel en 2010

Le [tableau 2](#) récapitule le nombre d'enregistrements réalisés dans la base Dogger en 2010 et 2011 depuis la mise en place du fichier Excel spécifique aux données d'exploitation. On constate que ce dernier a globalement augmenté, mais cette augmentation est surtout due à un accroissement de données sur les sites équipés d'une GTC. Pour les autres sites, le nombre d'enregistrement reste relativement stable, il est de un à deux enregistrements journaliers ou moins suivant les sites. Le but à court terme est de pouvoir obtenir *a minima* un enregistrement par jour pour chacun des sites (relevé quotidien des données d'exploitation).

2.2. NOUVEAU FICHIER EXCEL POUR L'INTÉGRATION DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES EN 2011

Sur le même principe que les données d'exploitation, il a été proposé de développer un fichier similaire pour la collecte des données physico-chimiques (mesures effectuées sur sites et résultats des analyses en laboratoire). Le fichier est présenté en [annexe 1](#). Ce fichier a pour objectif de renseigner cinq tables de la base Dogger qui sont :

- « **Analyse** » : table qui donne pour chaque ouvrage la date du prélèvement, le type de prélèvement (tête ou fond de puits), la température du fluide prélevé et le débit effectif lors du prélèvement ;
- « **Mesure** » : table qui donne pour chacun des prélèvements de la table précédente, les différents éléments mesurés (sur site ou en labo) et leur valeur ;
- « **Point-bulle** » : table qui contient pour chaque analyse la température et pression du point bulle ;
- « **Corrosion** » : table contenant pour chaque ouvrage la vitesse de corrosion avec trois types de mesure (valeur corrosimètre, valeur par coupon ou flux de fer dissous) ;
- « **Traitement anticorrosion** » : table contenant les dates de début et fin du traitement, le point d'injection (surface ou fond), le débit de production pour la période considérée, le type de produit et sa concentration.

Le fichier Excel créée comprend deux onglets principaux dénommés « données physico-chimiques » et « Traitement anticorrosion », ainsi qu'un onglet spécifique de la version du fichier.

Le premier onglet contient les informations sur les mesures effectuées in situ (T, pH, Eh, conductivité, corrosion...) les analyses bactériologiques (BSR et BTR), les

analyses de la composition chimique (espèces ioniques et gazeuses) du fluide géothermal. Cet onglet renseigne les quatre premières tables ci-dessus.

Le second onglet contient les informations sur les traitements anticorrosion qui sont appliqués et renseigne la table « Traitement anticorrosion ».

L'applicatif Access « VersORACLE » développé lors de la phase précédente (Gestion du Dogger 2010, rapport BRGM/RP-59845-FR) a été complété pour tenir compte de ce nouveau fichier (cf. [figure 1](#)). Ainsi, de la même manière que pour les données d'exploitation, il est désormais possible de lire un fichier standardisé de données géochimiques et d'intégrer les données dans les tables correspondantes de la base Dogger.

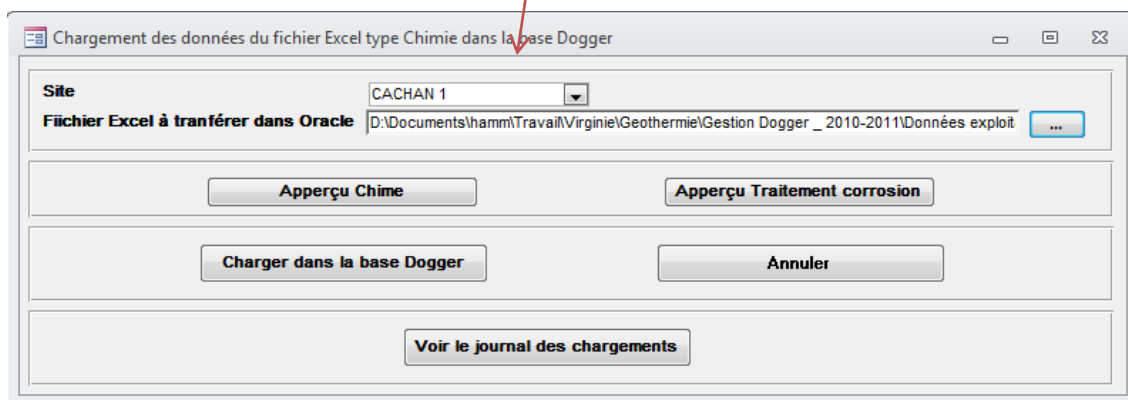


Figure 1 : Extrait de l'applicatif Access « VersORACLE » complété par la nouvelle application.

2.3. ÉVOLUTIONS DE LA BASE DOGGER EN 2012

La base Dogger (base de données Oracle) a été développée entre 2003 et 2005 (phases 1 et 2 du projet Gestion du Dogger) à l'initiative de l'ADEME et du BRGM en vue de mettre en place un outil de gestion de l'aquifère géothermique du Dogger en Île-de-France. Cette base développée sous Access, a été depuis complétée avec des routines d'intégration des données d'exploitation de la boucle géothermale (débits, températures, pressions) et des données physico-chimiques (pH, potentiel redox, analyses du fluide géothermal) avec les projets « Dogger phase 3 » et « Gestion du Dogger 2010 et 2011 ». Seul actuellement, le BRGM qui gère cette base a accès à l'ensemble des données.

L'objectif du projet « Gestion base de données DOGGER IDF » de la convention ADEME-BRGM 2012, est de rendre cette base opérationnelle et accessible tant aux bureaux d'étude en charge du suivi d'exploitation des forages géothermiques, qu'aux Maîtres d'Ouvrage propriétaires des données, mais aussi à l'administration ou à tout bureau d'étude travaillant en maîtrise d'œuvre sur l'aquifère du Dogger. Ainsi, cette dernière sera basculée depuis Access vers un applicatif Web avec des droits spécifiques par type d'utilisateur (écriture et lecture, lecture seule, données accessibles limitées définies comme publics ou privées...) et sera mis à disposition via l'espace professionnel du site « géothermie-perspectives » du BRGM.

Le BRGM se pose en outre la question de remplacer, en étroite concertation avec la DRIEE Île-de-France, les données reçues par l'administration, par application des arrêtés préfectoraux d'exploitation au titre du Code minier, par un accès à la Base Dogger des ingénieurs de la DRIEE en charge de ces arrêtés. Cette solution, si elle pouvait être mise en place, aurait en outre l'avantage de décharger le BRGM de la responsabilité de confier des informations à des utilisateurs dont il ne peut assurer le contrôle.

3. Proposition de rehabilitation de l'ancien puits producteur de Coulommiers GCO-1 en puits d'observation au Dogger

3.1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre de l'exploitation géothermique de l'aquifère du Dogger, avec la réalisation de la majorité des puits dans les années 1980, nombre d'entre eux arrivent en fin de vie et sont amenés à être abandonnés (bouchage définitif du puits selon la réglementation de la RGIE) ou dans certains cas peuvent être transformés après rechemisage en puits d'injection (réhabilitation d'un doublet en triplet).

D'un point de vue « gestion » de la ressource, le calage des modèles prédictifs de propagation des « bulles froides » représente un enjeu scientifique et économique important. Or pour cela il est nécessaire de disposer de points de mesure de la pression et température du réservoir sur le long terme afin de caler les modèles. Actuellement les seules mesures disponibles sont les mesures de pression et température en tête de puits (producteur et injecteur) qui sont la conséquence à la fois du réservoir mais aussi de la fonction de transfert au puits pour la température et la pression (cf. rapport BRGM/RP-60774-FR sur l'étude de sensibilité des puits au Dogger). En effet, les seules mesures réalisées directement dans le réservoir sont faites en fin de forage lors de l'essai de production et, dans certains cas, à l'occasion de travaux d'entretien et de réparation des puits. En règle générale, au cours de leur exploitation, un suivi périodique est réalisé en tête de puits. Ainsi, pour caler les modèles, en particulier pour les aspects thermiques, seuls les puits montrant une baisse significative de la température en tête de puits (1 seul cas confirmé actuellement à notre connaissance) peuvent être des points potentiels de calage (cf. rapport BRGM/RP-60399-FR) avec néanmoins une correction à appliquer suivant le débit du fait de la contribution du forage entre le réservoir et la surface.

Un des enjeux est donc de pouvoir accéder à des mesures directes au réservoir, soit par l'intermédiaire d'anciens puits reconvertis en puits d'observation, soit sur des puits en cours d'exploitation. Il est ainsi proposé d'étudier les conditions nécessaires, la faisabilité technique et le coût financier que représenterait l'utilisation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation. Nous verrons par ailleurs qu'une des solutions proposées est transposable, après une phase d'expérimentation, à un puits producteur en exploitation, ce qui permettrait de suivre directement la pression et la température du réservoir.

Par ailleurs, du point de vue environnemental, on connaît actuellement très mal le devenir des produits inhibiteurs de corrosion/dépôts injectés au sabot du puits producteur via la ligne de traitement fond de puits (TCTFP ou TAI) et qui ensuite circulent le long des puits producteur et injecteur. L'un des enjeux serait aussi de pouvoir mesurer l'impact environnemental (produits traces ou dérivés dans l'aquifère

du Dogger) par des prélèvements périodiques en fond qui pourraient être réalisés sur un ancien puits transformé en puits d'observation.

À la demande du BRGM, CFG Services a contribué à la rédaction du cahier des charges des différentes solutions techniques proposées ci-après (cf. [annexe 2](#) et [annexe 3](#)), qui comprend la description des solutions envisagées et leur coût estimatif après consultation d'entreprises spécialisées sur les mesures dans les puits géothermiques.

3.2. SPÉCIFICATIONS POUR LA RÉHABILITATION D'UN PUITTS GÉOTHERMIQUE EN PUITTS D'OBSERVATION

3.2.1. Cadre réglementaire actuel

La réglementation actuelle (Code Minier) d'abandon des anciens ouvrages consiste en la réalisation pour chaque puits de deux à trois phases qui sont :

- un diagnostic détaillé de l'ouvrage avec des diagraphies de contrôle de l'état des tubages (encrassement, percement et étanchéité) et des cimentations (étanchéité verticale entre aquifères) ;
- la mise en sécurité de certaines zones du puits, si des fuites sont avérées, par des bouchons de ciment ;
- la fermeture du puits avec sa mise en sécurité vis-à-vis des risques de circulations de fluide géothermaux depuis l'intérieur vers l'extérieur et inversement suivant les prescriptions de la RGIE.

Le puits abandonné revient, à l'issue de ces travaux, sous la responsabilité de l'Etat. Le coût d'un abandon d'un doublet de puits ne présentant pas de risque particulier est estimé à environ 700 K€ soit environ 350 k€ par puits. Ce coût est à la charge du maître d'ouvrage propriétaire des puits, au titre de l'arrêté préfectoral ayant autorisé l'exploitation de l'ouvrage.

3.2.2. Conditions nécessaires pour la transformation du puits

Avec l'ancienneté grandissante des forages exploitant l'aquifère du Dogger (entre 23 et 29 ans d'âge), de plus en plus de doublets seront à réhabiliter en nouveaux doublets (nouveaux puits producteur et injecteur et abandon des anciens puits) ou en triplets (utilisation, après rechemisage, des anciens puits producteurs en injecteurs et réalisation d'un nouveau producteur).

Or, dans certaines conditions favorables, **lorsque l'un des anciens puits est situé dans une zone parcourue par la « bulle froide » créée par le nouveau doublet**, un suivi de la température du réservoir au droit de l'ancien puits permettrait d'accéder à la température du réservoir en amont du nouveau puits de production et ainsi d'améliorer les modélisations prédictives de la percée thermique.

Un site présente actuellement cette condition favorable : il s'agit du doublet de Coulommiers qui a été remplacé par un nouveau doublet fin 2011. Le puits producteur de l'ancien doublet (CGO1) est un puits vertical diagnostiqué en « bon état », dont l'impact au réservoir se situe sur l'axe reliant les impacts des deux nouveaux ouvrages déviés (GCO3 et GCO4), à environ 600 m du nouveau producteur et 800 m du nouvel injecteur qui se situe à proximité immédiate de l'ancien injecteur (cf. [figure 2](#)).

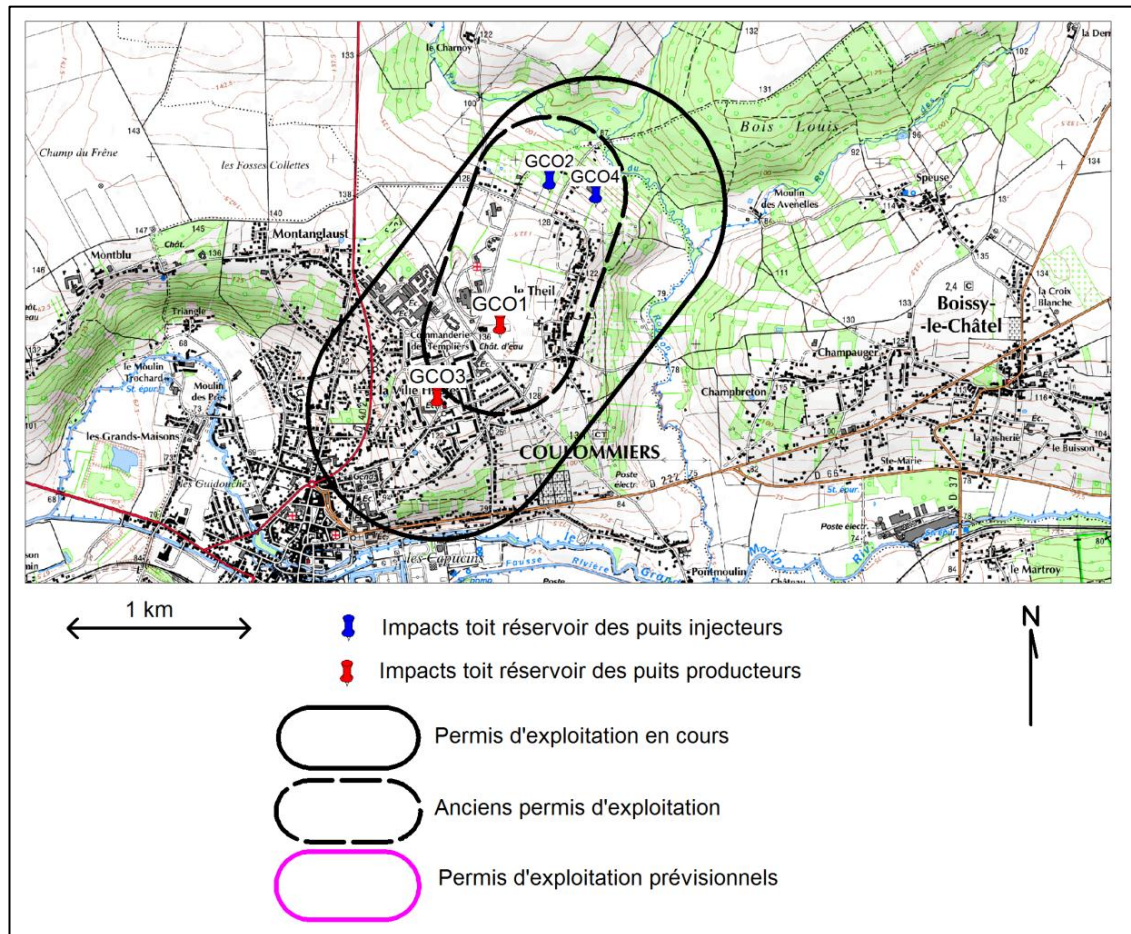


Figure 2 : Localisation des impacts des puits à Coulommiers.

Il est à noter par ailleurs que la réhabilitation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation est surtout intéressante pour le puits producteur, car dans le cas de l'ancien puits injecteur (quels que soient son état et sa localisation), la mesure de la température au sein du réservoir est « polluée » par la présence de l'ancienne bulle froide.

3.2.3. Conditions techniques et financières

Paramètres à prendre en compte pour la transformation du puits

Dans le cas où le puits GCO-1 ne serait pas définitivement abandonné, sa réhabilitation en puits d'observation doit prendre en compte différentes contraintes :

- contraintes liées aux capteurs ;
- contraintes liées aux prélèvements de fond ;
- contraintes réglementaires de protection des aquifères stratégiques.

• Contraintes liées aux capteurs

Différents types de capteurs doivent pouvoir être mis en place dans le puits pour enregistrer la température et la pression dans le réservoir. Les capteurs peuvent être mis en place soit de manière permanente intégrés à une compléation spécifique avec transmission de l'enregistrement en surface en temps réel à l'aide d'un câble électrique conducteur ou d'une fibre optique, soit de manière provisoire par un câble électrique conducteur, ou à l'aide d'un câble standard permettant de mettre en place des capteurs à mémoire, l'information étant récupérée lorsque le capteur est remonté en surface.

• Contraintes liées aux prélèvements de fond

Des prélèvements de fond peuvent être réalisés dans tout puits à l'aide d'un préleveur de fond descendu au câble à la profondeur voulue à condition que la géométrie de l'ouvrage et les équipements de la tête de puits permettent la mise en œuvre de cet outil dont le diamètre est généralement de 1"11/16 (43 mm). La chambre de prélèvement est mise sous vide avant la descente, l'ouverture et la fermeture de celle-ci est commandée électriquement au travers du câble. Le volume de l'échantillon ainsi prélevé est de l'ordre de 0.5 à 0.6 litre. Certaines sociétés de services proposent de descendre plusieurs éléments en tandem de manière à augmenter le volume prélevé en une seule descente. Pour descendre le préleveur les capteurs doivent pouvoir être remontés en surface.

Il convient de noter que, le puits GCO-1 n'étant pas artésien, la mise en œuvre de capteurs et de préleveurs de fond ne posera pas de difficultés très importantes au niveau de la tête de puits.

• Contraintes réglementaires de protection des aquifères stratégiques

Le puits producteur GCO-1 est soumis à une inspection réglementaire de ses tubages tous les cinq ans, consistant à évaluer l'épaisseur résiduelle des tubages et à détecter le cas échéant des indices de percement. Cette inspection a pour objectif principal de vérifier l'isolation des aquifères d'eau potable que traverse l'ouvrage, notamment l'aquifère stratégique de l'Albien qui dans le cas précis du puits de Coulommiers n'est recouvert que par un seul tubage. **Cette fréquence d'inspection devra être**

poursuivie jusqu'à l'abandon définitif du puits, ce qui implique de libérer le puits de tout équipement au moins une fois tous les cinq ans. Toute identification de percement devra faire l'objet de travaux de réparation, afin de garantir l'isolation des aquifères traversés par l'ouvrage et assurer l'intégrité des tubages.

Solutions techniques et financières de transformation et équipement du puits GCO-1

Deux solutions sont proposées pour réhabiliter l'ancien puits de production GCO-1 en puits d'observation :

- un rechemisage du puits avec un tubage en acier de diamètre 5" et une sonde de pression et température intégrée au TCTFP de CFG-Services (cette solution serait transposable également à un puits en exploitation pour des mesures directes au réservoir) ;
- une colonne de complétion composée de tubing 3"1/2 ancrée dans un packer qui isolerait le réservoir du reste du puits avec des capteurs de pression et température descendus dans le tubing.

- **Rechemisage du puits avec un tubage en acier de diamètre 5" et capteurs intégrés au TCTFP**

Le puits producteur de Coulommiers a été réalisé de mai à juillet 1980, avec la maîtrise d'œuvre confiée au BRGM. La dernière diaggraphie du puits réalisée en 2009 a montré que les traitements de fond étaient relativement efficaces avec une très légère tendance à l'incrustation sur les tubages 7" et 10" ³/₄.

Néanmoins, le bon état apparent des tubages du puits GCO-1 ne présage en rien de l'épaisseur résiduelle de l'acier des tubages et encore moins de leur état extérieur. Ainsi le rechemisage complet du puits par un tubage 5" neuf, intégralement cimenté dans l'annulaire 5"-7", assurerait une certaine pérennité de l'ouvrage, environ 20 ans sur la base d'une vitesse de corrosion d'environ 0.5 mm/an et d'une épaisseur originelle d'acier de 10 mm (cf. [figure 3](#)). Il est à noter, par ailleurs, que ce puits ne présente pas de double tubage au droit des aquifères de l'Albien et du Néocomien, le rechemisage complet du puits permettrait donc d'avoir un double, voire triple tubage, pour protéger les aquifères de fuites éventuelles de fluide géothermal. Par ailleurs, dans l'intervalle de 20 ans, il faut prévoir au minimum une opération de curage du puits de manière à :

- éliminer les dépôts qui pourraient compromettre l'utilisation des capteurs et du préleveur de fond ;
- avoir un accès à l'état réel interne du tubage 5".

Le contrôle périodique par diaggraphies (tous les 5 ans) restera une obligation réglementaire.

Le coût de l'opération de nettoyage du puits (curage hydraulico-mécanique) et de rechemisage intégral en diamètre 5" est estimé à **550 k€ HT** avec un contrôle périodique de l'état des tubages tous les 5 ans d'un montant de **20 k€ / 5 ans**.

Par ailleurs, l'abandon final du puits suivant la réglementation de la RGIE est estimé à **200 k€, soit 80 % du coût d'abandon en l'état** (250 k€ pour un forage en bon état).

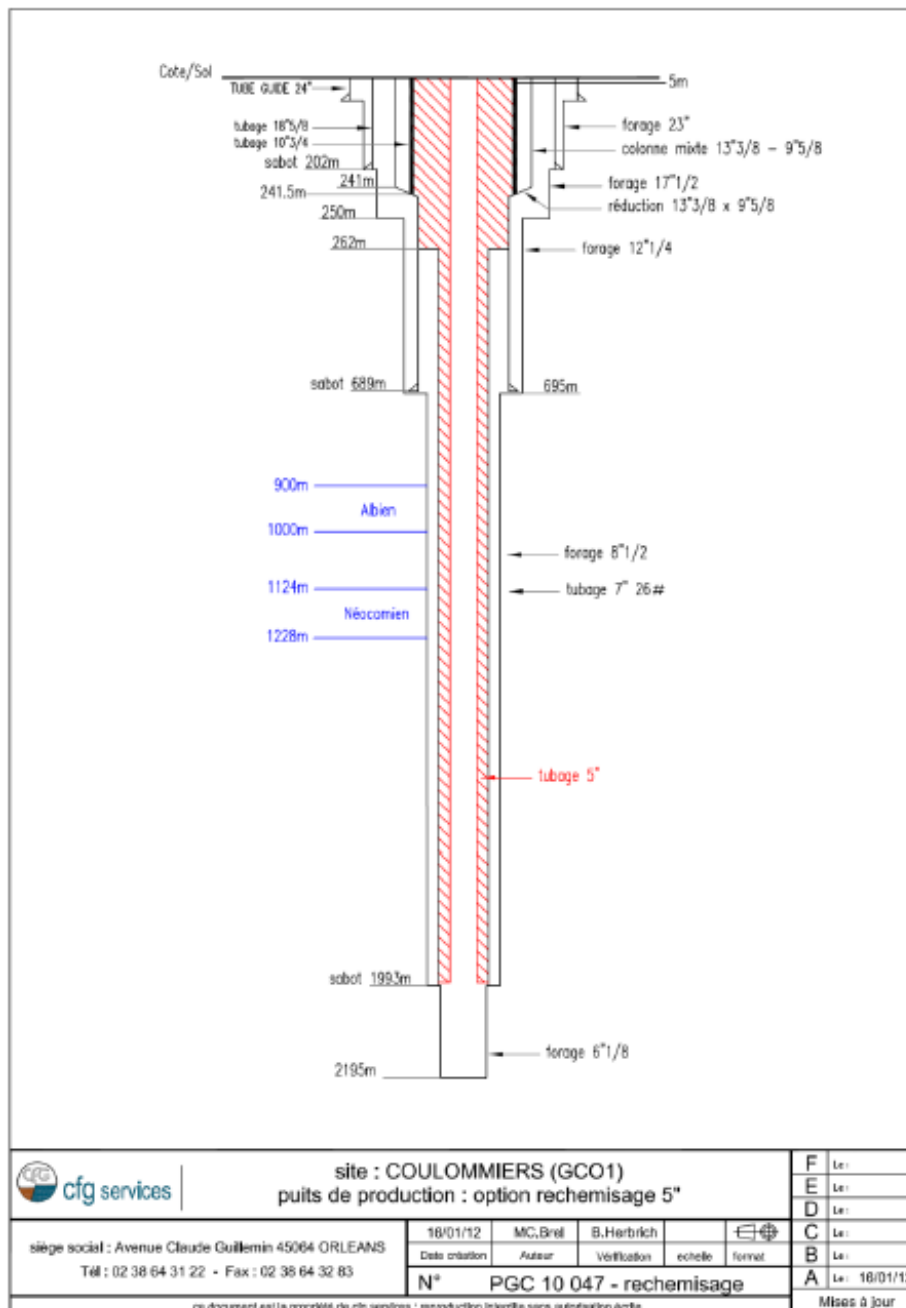


Figure 3 : Coupe technique du puits GCO1 rechemisé en diamètre 5" (Source : CFG Services).

L'instrumentation du puits doit répondre aux exigences suivantes :

- les capteurs restent à demeure au sabot du puits à une profondeur de 1 993 m ;
- diamètre externe des capteurs : < 100 mm (en cas de rechemisage en 5", le diamètre interne du puits est de 10,86 cm) ;
- précision sur la mesure de température: $\pm 0,1$ °C ;
- plage de mesure de température : 0-100 °C ;
- précision sur la mesure de débit : $\pm 0,2$ bar ;
- plage de mesure de pression : 0-250 bars ;
- durée de vie des équipements : 3 à 5 ans minimum.

Le capteur de température utilise la technologie de mesure de température par résistance de platine et offre une plus grande précision et stabilité que les thermocouples (cf. principe en [annexe 3](#)).

Pour la mesure de pression, il s'agit d'un capteur de pression hydrostatique qui émet un signal électrique proportionnel à la pression appliquée sur la membrane du capteur. **Il est proposé d'intégrer les capteurs de mesures et câble de transmission dans la ligne de traitement fond de puits.** Le capteur de pression et le capteur de température seraient montés dans la tête d'injection tandis que les câbles électriques seraient protégés dans l'enrobage du nouveau TCTFP (cf. [figure 4](#)).

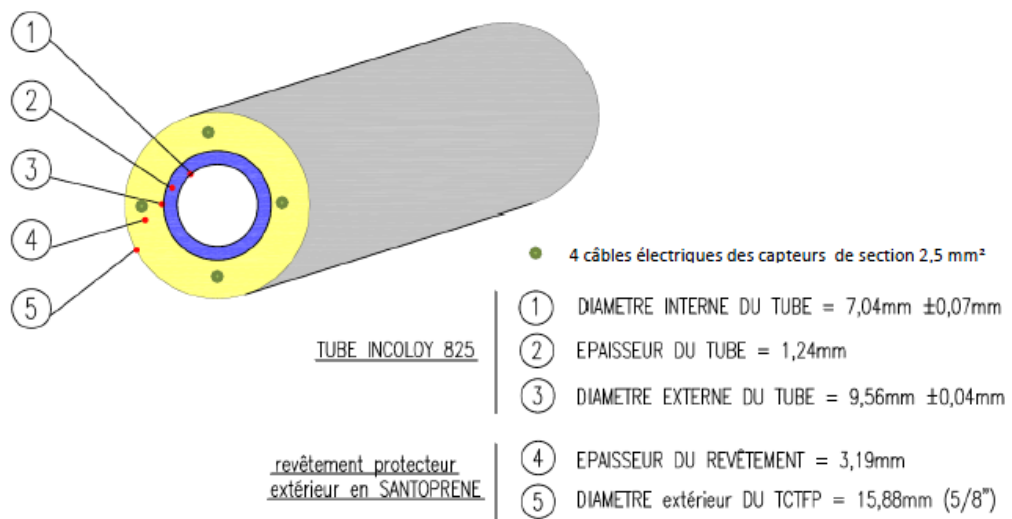


Figure 4 : Schéma de principe de l'enrobage des câbles électriques dans le santoprène du TCTFP (Source : CFG Services).

Le capteur de pression de type hydrostatique aurait une gamme de mesure 0-300 bars avec une précision de 0,01 % sur toute l'échelle (FS = Full Scale). Le capteur de température serait une sonde PT 1000. Les données enregistrées dans un logger en

surface seraient transmises par système GPRS à un ordinateur équipé du logiciel Data Transfer WebDavis.

Le coût d'enrobage des capteurs au TCTFP (détaillée dans l'annexe 3) s'élève à **48 k€ HT** sans la fourniture du tube d'injection avec câble encapsulé par une société américaine qui pourrait être estimée **entre 30 et 40 k€ HT**.

On note que dans ce cas il est nécessaire de remonter le TCTFP pour effectuer un prélèvement de fluide en fond.

- **Mise en place d'une colonne de complétion composée d'un tubing 3''1/2 avec instrumentation et ancrée dans un packer permanent en fond de puits**

Afin de s'affranchir de l'état des tubages et de leur évolution dans le temps, une solution serait de mettre en place dans le puits une complétion amovible. Celle-ci serait constituée :

- d'un packer permanent ancré dans le tubage 7'' au-dessus du sabot ;
- d'une colonne de complétion composée de tubing en acier de 3''1/2 ancrée dans le packer permanent et reliée à la tête de puits, isolant ainsi les tubages actuels du puits du fluide géothermal ;
- d'un dispositif de mesures (capteurs de pression et température) ancrée dans le tubing.

L'espace annulaire entre les tubages du puits et les tubings 3''1/2 serait rempli d'un fluide inhibé comprenant de l'inhibiteur de corrosion, de l'anti oxygène et du bactéricide. Une description de la complétion est visible sur la [figure 5](#).

L'avantage de la complétion est de pouvoir extraire et remplacer le tubing 3''1/2 chaque fois que son état de corrosion le nécessite, cette opération pouvant même être programmée de manière systématique à titre préventif à intervalle de temps régulier. Par ailleurs, l'utilisation d'une complétion en matériau chimiquement inerte au contact du fluide géothermal (matériau composite en fibre de verre-résine Epoxy) permettrait de s'affranchir de ce remplacement systématique. Comme il n'y a jamais de contact entre les tubages permanents du puits et le fluide géothermal cette solution garantit une durée de vie très longue à l'installation.

Des capteurs permanents de température et de pression peuvent être mis en place dans la colonne de tubings et la mesure transmise en surface par un câble électrique, lui-même connecté à un boîtier permettant la lecture et l'enregistrement des données.

Le coût d'investissement pour la transformation du puits avec une **complétion amovible acier** est estimée à **320 k€ HT** (hors remontée des équipements et curage du puits de l'ordre de 200 k€). Dans le cas d'une **complétion amovible en fibre de verre**, ce coût est compris entre **590 et 640 k€ HT**. Il est à noter que dans ce cas, l'entretien périodique du puits est alors beaucoup plus élevé, de l'ordre de **225 k€ / 5 ans**, le surcoût à l'entretien concerne la remontée et la redescente de la colonne de

tubing 3''1/2. Néanmoins, dans ces conditions d'utilisation (pas de fluide géothermal en contact direct avec le tubage 7''), nous n'avons pas la confirmation d'une obligation de faire une diagraphie périodique du tubage. Il est probable qu'un test en pression de l'espace annulaire tubing / tubage soit suffisant pour confirmer l'étanchéité de l'ouvrage.

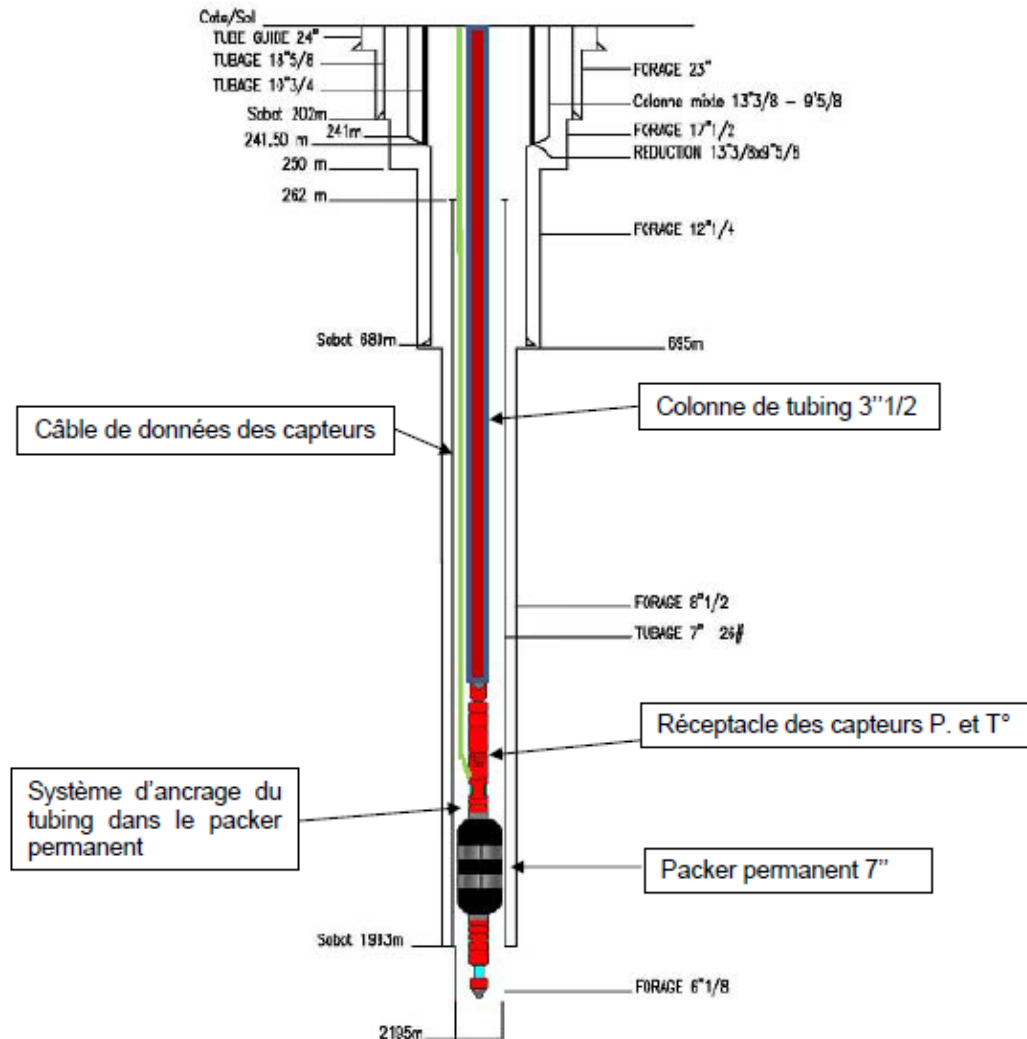


Figure 5 : Schéma du puits GCO1 équipé d'une complétion amovible (Source : CFG Services).

Enfin, l'opération d'abandon du puits est estimée à **350 k€**, soit **140 % du coût dans le cas d'un abandon du puits dans l'état actuel** (surcoût dû à la remontée de la colonne de tubing et de la destruction par reforage du packer permanent).

Pour l'instrumentation du puits, les capteurs de pression et température seront intégrés dans la colonne du tubing 3''1/2 et laissés de manière permanente dans le puits (sauf en cas de remontée du tubing). Le coût est estimé à **90 k€ HT**. La descente d'un

préleveur de fond se ferait à l'intérieur des tubings sans avoir à remonter les capteurs en surface.

3.2.4. Récapitulatif des coûts

Le [tableau 3](#) ci-dessous résume les coûts d'investissement initial, d'entretien et d'abandon du puits. La solution encadrée en rouge est celle actuellement préconisée en termes de coût d'investissement initial, périodique et final ainsi qu'en terme de protection des aquifères stratégiques. Cette solution est également avantageuse en termes de technologie de l'instrumentation du puits mise en œuvre qui peut être applicable à un puits en production.

Solution	Pérennité	Investissement initial		Entretien périodique (tous les 5 ans)	Abandon final	Coût total estimé (hors entretien périodique)
		Transformation du puits	Capteurs			
Puits en l'état	<= 5 ans	200 k€ (remontée des équipements de production et curage du puits)	78 à 88 k€ (intégrés au TCTFP)	23 k€ / 5 ans	250 k€	538 k€
Rechemisage en diamètre 5"	15 à 20 ans	350 k€	78 à 88 k€ (intégrés au TCTFP)	20 k€ / 5 ans	200 k€	838 k€
Complétion amovible acier composée d'un tubing 3"1/2	> 20 ans	320 k€	90 k€ (intégrés au tubing)	225 k€ / 5ans	350 k€	960 k€
Complétion amovible fibre de verre composée d'un tubing 3"1/2	> 20 ans	590 à 640 k€	90 k€ (intégrés au tubing)	250 k€ / 5 ans	350 k€	1280 k€

Tableau 3 : Récapitulatif des coûts par type de solution – k€ HT.

(remarque : la première solution non développée dans le texte correspond au cas de l'utilisation du puits sans transformation préalable)

3.2.5. Cadre réglementaire et administratif à définir

Il a été proposé ci-dessus différentes solutions, **autre que la procédure classique d'abandon**, qui permettrait de convertir cet ancien puits (sous certaines conditions) **en puits d'observation** (mesures de pression et température au niveau du réservoir). La solution proposée permettrait également de réaliser des prélèvements de fluide géothermal en fond de puits pour le suivi géochimique des eaux au Dogger (mesures actuelles en tête) mais aussi d'étudier à long terme les impacts environnementaux des produits inhibiteurs injectés au niveau du puits de production via la ligne de traitement (recherche de traces d'inhibiteurs ou de leurs produits dérivés dans le réservoir).

En ce qui concerne les aspects administratifs et juridiques, la DRIEE Île-de-France envisage que, dans la mesure où le puits ne serait ni abandonné, ni destiné à l'exploitation ultérieure d'une substance minière, la propriété de l'ouvrage transformé

en puits d'observation ne serait plus gérée dans le cadre du Code Minier. Dans ce cadre, le maître d'ouvrage resterait propriétaire du puits. Il convient alors de rechercher un accord entre les différentes parties (BRGM, SMGC, DRIEE Île-de-France, ADEME...) définissant :

- les conditions de la transformation du puits en piézomètre (investissement initial) ;
- les conditions d'utilisation du puits à des fins scientifiques, comprenant son entretien et la responsabilité civile ;
- enfin, l'abandon définitif du puits lorsque l'usage scientifique sera achevé.

Le financement d'investissement de l'opération pourrait se faire dans le cadre d'une convention spécifique tripartite à établir entre l'ADEME, le Conseil Régional Île-de-France et le BRGM.

3.3. CONCLUSION

De nouvelles solutions de réhabilitation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation ont été proposées. Les points critiques actuels pour la mise en œuvre sont, d'une part, le financement de l'opération évaluée **entre 538 et 1 280 k€ HT**, suivant la solution envisagée qui représente un coût relativement onéreux par rapport au coût d'abandon du puits (entre 2 à 5 fois plus cher), et d'autre part, la responsabilité de l'ouvrage qui ne sera plus géré dans le cadre du règlement général des industries extractives (pas d'exploitation minière, ni d'abandon du puits).

L'abandon des anciens puits géothermiques de Coulommiers devraient se faire fin 2012, début 2013, d'ici là une décision devra être prise entre le BRGM, l'ADEME, la DRIEE et le SMGC.

4. Évolutions physico-chimiques des fluides au Dogger

4.1. INTRODUCTION

La plupart des installations géothermiques exploitant l'aquifère carbonaté du Dogger du Bassin de Paris (BP) ont connu des problèmes de corrosion et de dépôts. L'acier au carbone constituant les tubages des puits ne résiste pas à l'eau géothermale, milieu anaérobie, légèrement acide et fortement minéralisé caractérisé principalement par la présence de Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$, $\text{H}_2\text{S}/\text{HS}^-$. La mise en œuvre de traitements anti-corrosion (essentiellement à base d'agents tensio-actifs cationiques) depuis 1989 a permis de résoudre une grande partie des problèmes de corrosion-dépôts identifiés.

Jusqu'à la fin des années 1990, ces produits, constitués en majorité de dérivés azotés du type sels d'ammonium quaternaires, étaient injectés à des teneurs faibles (2-3 mg/l). Ce dosage estimé suffisant dans le passé ne semble plus adapté aux propriétés physico-chimiques actuelles des fluides du Dogger (plus riches en sulfure et plus acides), ainsi qu'aux conditions d'exploitation (nombreux passages en production artésienne). En effet, depuis les années 2000, les teneurs en fer dissous produites par 30 % des sites géothermiques en activité ne cessent d'augmenter, alors qu'elles diminuaient jusqu'alors (Hamm *et al.*, 2010 ; 2011).

Dès 1985, la teneur en sulfure d'hydrogène a été identifiée comme un des facteurs contrôlant les phénomènes de corrosion-dépôts ; les puits produisant un fluide de forte teneur en sulfure étant les plus touchés par ces processus (Ignatiadis *et al.*, 1995). Plusieurs études de l'importance et du développement du sulfure contenu dans les fluides du Dogger ont ainsi été menées dans les années 90 (Ignatiadis *et al.*, 1991 ; 1995 ; 1998 a ; 1998 b, etc.). Elles ont permis d'expliquer l'augmentation de la teneur en sulfure (observée entre 1989 et 2000 en tête des puits du sud et de l'est de Paris), sa relation avec le débit et de définir son rôle exact sur les phénomènes de corrosion-dépôts.

Cependant, depuis 2000, aucune étude globale de ce type n'a été réalisée sur les fluides du Dogger alors que l'on assiste depuis à une reprise de la corrosion des tubages de plusieurs puits.

Une nouvelle étude globale de l'importance et du développement du sulfure dans les fluides du Dogger sur la période 2000-2011 a donc été entreprise et est l'objet de ce rapport. Précisément, cette étude fait la synthèse des évolutions des teneurs en sulfure observées depuis la mise en service (MES) des puits au Dogger et des connaissances acquises depuis. Elle est, ainsi, fortement basée sur les conclusions des travaux antérieurs (Lemale et Pivin, 1987 ; Ignatiadis *et al.*, 1991 ; 1994 ; 1995 ; 1998a ; 1998b). Elle s'intéresse également à la diminution du pH des fluides du Dogger (observée depuis 2000) ; ce paramètre géochimique essentiel intervient également, directement, dans les mécanismes de corrosion-dépôts.

L'objectif est, en fait, de comprendre les dernières évolutions observées sur les fluides du Dogger (stabilisation de la teneur en sulfure, diminution du pH, etc.) et leurs possibles conséquences sur les processus de corrosion-dépôts afin de pouvoir, à l'avenir, adapter au mieux les consignes d'exploitation (débit critique, type et concentration d'inhibiteur, etc.).

Ce chapitre présente :

- l'évolution de la teneur en sulfure (§ 4.2.) et du pH (§ 4.3.) des fluides géothermaux du Dogger depuis la mise en production des puits ;
- une première tentative de corrélation entre ces évolutions, l'augmentation de la teneur en fer dissous en tête de certains puits, observée depuis la fin des années 1990 et les traitements anti-corrosion-dépôts réalisés (§ 4.4.) ;
- un rappel des concepts primordiaux à connaître pour comprendre les évolutions de la chimie des fluides géothermaux entre le réservoir et la tête de puits ([annexe 4](#)).

4.2. CARTOGRAPHIES ET SUIVIS DE LA TENEUR EN SULFURE DES FLUIDES DU DOGGER

4.2.1. Cartographie initiale

Très rapidement, et suite aux recommandations du BRGM, la teneur en sulfures dissous dans les fluides du Dogger du bassin de Paris a été suivi systématiquement par les maîtres d'œuvres et les spécialistes du sous-sol (comme CFG Services et GPC I&P par exemple).

Deux zones chimiquement distinctes ont ainsi rapidement été mises en évidence : une zone à forte teneur en sulfure (de 30 à 100 mg/l) et caractérisée par un important colmatage des puits (Fouillac *et al.*, 1989) au nord et à l'ouest de Paris et une zone à faible teneur en sulfure (de 0 à 10 mg/l) au sud et à l'est de Paris.

La cartographie correspondante est présentée sur la [figure 6](#) ; elle a été réalisée d'après les travaux de Lemale et Pivin (1987) et de Rojas *et al.* (1989). Cette répartition géographique de la teneur en sulfure correspond à celle de l'isotope stable du soufre ³⁴S des sulfates (Fouillac *et al.*, 1990) montrant une zone confinée (fluide réduit) au nord et à l'ouest et un fluide moins réduit au sud et à l'est de Paris.

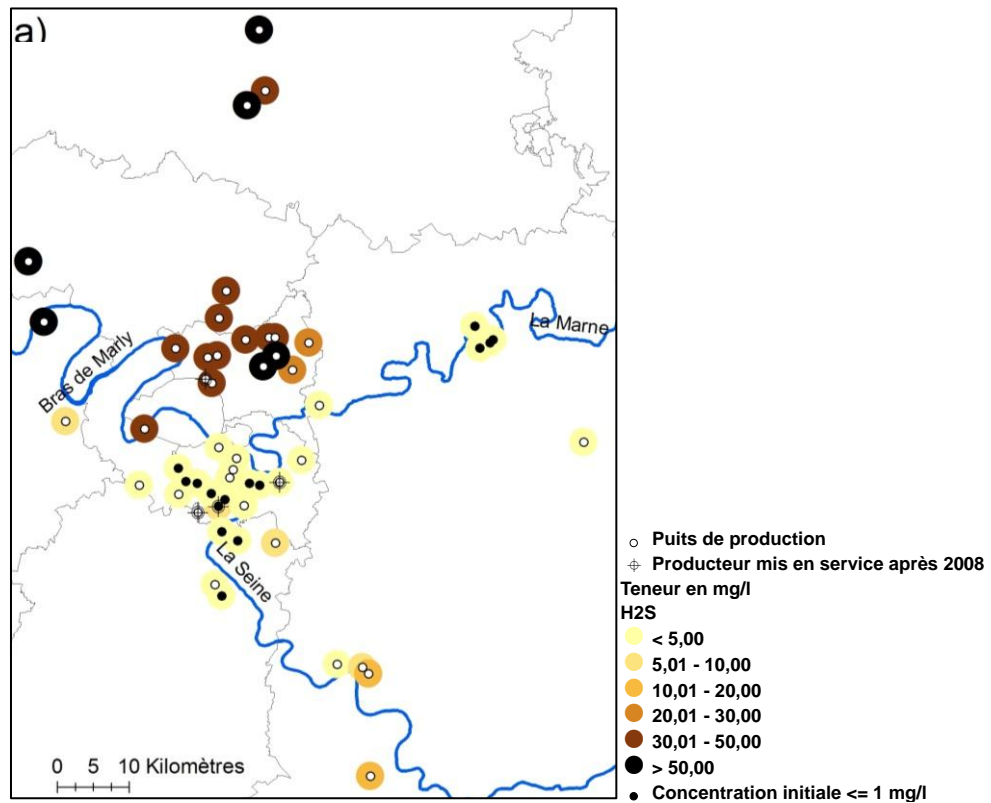


Figure 6 : Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, lors de la mise en exploitation (données en mg/l).

4.2.2. Cartographies et suivis physico-chimiques et isotopiques des années 1990

Dès 1989, les analyses d'eaux prélevées en tête de puits de production des **sites situés au sud et à l'est de Paris** (pour lesquels la teneur initiale en sulfure était nulle ou faible (< 5 mg/l)) montrent une augmentation de la teneur en sulfure dissous. À débit constant, cette teneur a augmenté régulièrement depuis la mise en service des puits ([figure 7](#)). Afin de comprendre l'origine de cette hausse « localisée » de la teneur en sulfure et sa relation avec le débit d'exploitation, le BRGM a entrepris en 1989 plusieurs études de l'importance et du développement du sulfure contenu dans les fluides prélevés au Dogger. Ces études (Ignatiadis *et al.*, 1991, 1995, 1998 a ; 1998 b, etc.), réalisées entre 1989 et 1998, ont consisté à établir deux nouvelles cartes de répartition des teneurs en sulfures dissous et à suivre l'évolution de la composition des eaux prélevées en fonction du débit d'exploitation.

Les deux nouvelles cartes de répartition, ainsi réalisées, concordent en partie avec celles effectuées préalablement (Lemale et Pivin, 1987 ; Rojas *et al.*, 1989). La cartographie correspondante est présentée sur la Figure 8 ; elle a été réalisée d'après les travaux de Ignatiadis *et al.*, 1991 ; 1995. En effet, les deux zones, (à forte et faible teneur en sulfure, définies précédemment restent observables. Néanmoins, il apparaît que la teneur en sulfure dissous dans les fluides produits au sud et à l'est de Paris a

augmenté significativement depuis la MES des puits, alors qu'elle a peu évolué dans ceux prélevés au nord et à l'ouest ([figure 7](#), [figure 8](#) et [figure 9](#)).

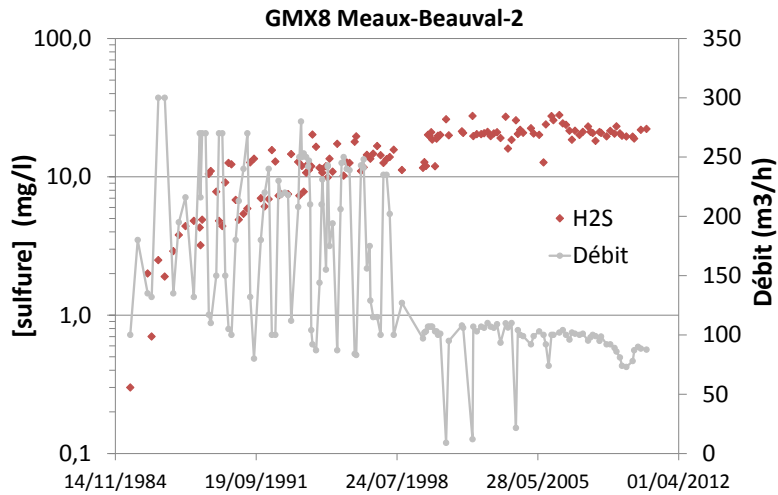


Figure 7 : Évolution de la teneur en sulfure dissous prélevée en tête du puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 avec le temps.

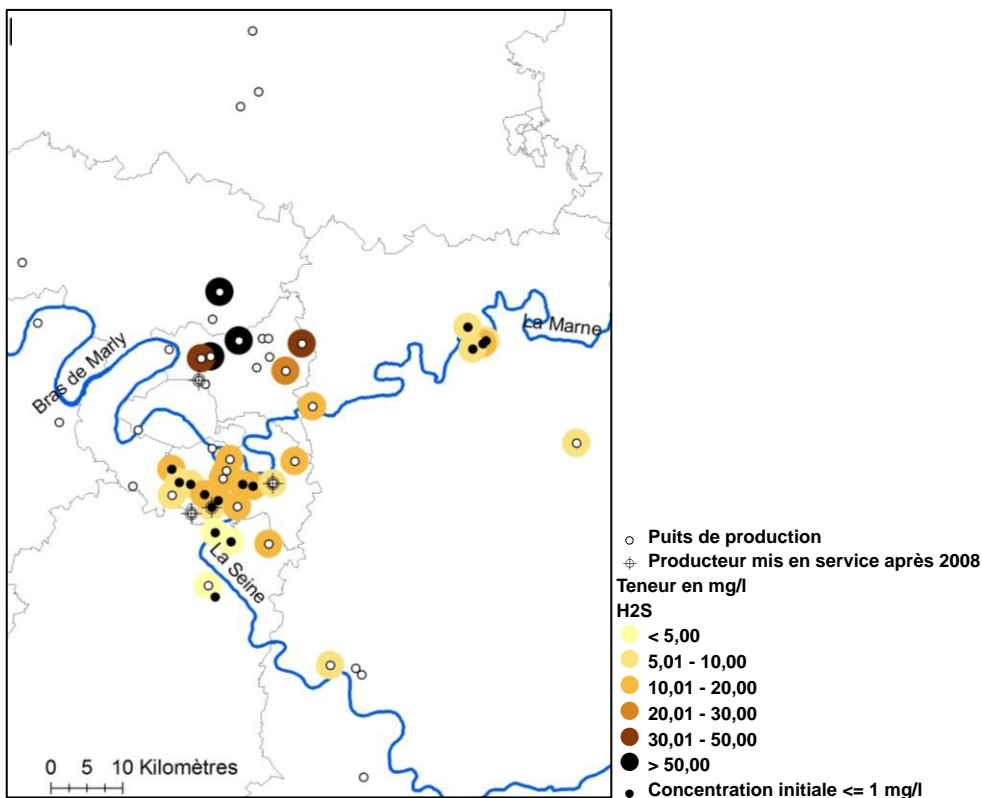


Figure 8 : Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 1995-1997. (données en mg/l relevées ou extrapolées pour un débit de référence de 150 m³/h).

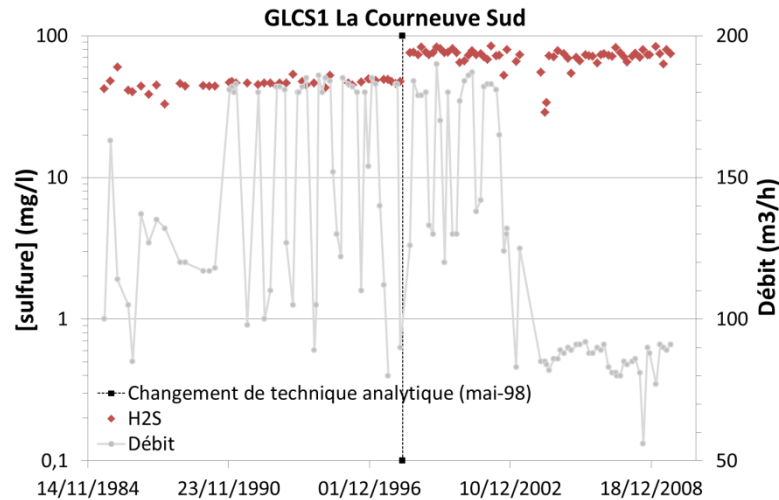


Figure 9 : Évolution de la teneur en sulfure dissous prélevée en tête du puits de production GLCS1 de La Courneuve Sud avec le temps.

Par ailleurs, les diverses campagnes de suivi de la physico-chimie des fluides du Dogger en fonction du débit d'exploitation (Ignatiadis *et al.*, 1990 ; 1991 ; 1992 ; 1994 ; 1995 ; 1997a ; 1997b ; 1997c ; 1998a ; 1998b) montrent que :

- la teneur en sulfure dissous dans les fluides produits au nord et à l'ouest de Paris ne présente pas, non plus, de variation significative en fonction du débit. De ce fait, elle est assimilable à la teneur réservoir. La $[S^{2-}]_T$, et donc la $[S^{2-}]_R$, est ainsi d'environ 35 mg/l depuis 1988 pour le site de La Courneuve Nord ([figure 10](#)) ;
- la teneur en sulfure prélevée en tête de puits au sud et à l'est de Paris varie, au contraire, linéairement en fonction de l'inverse du débit (elle augmente lorsque le débit diminue). De ce fait, il apparaît que la $[S^{2-}]_R$, ainsi définie par l'ordonnée à l'origine de la droite $[S^{2-}]_T = f(1/Q)$, a augmenté depuis 1989. Inférieure à 2 mg/l en 1987, la teneur réservoir du site de Meaux-Beauval-2 est par exemple évaluée à 8,40 mg/l en 1996. Parallèlement, la pente de la droite $[S^{2-}]_T = f(1/Q)$, représentant la production de sulfure par l'activité bactérienne et sa consommation par précipitation de Fe_xS_y ($\Phi_{\text{sulf bact}} - \Phi_{\text{sulf dépôts}}$), est restée relativement stable dans le temps (autour de 900 g/h pour le puits de Meaux-Beauval-2) ([figure 11](#)). Il apparaît ainsi que l'activité bactérienne présente dans les tubages et le proche réservoir n'est plus entièrement responsable de l'augmentation des teneurs produites par les puits du sud et de l'est de Paris (comme c'était le cas les premières années d'exploitation). En effet, dès 1990, le réservoir produit un fluide de plus en plus riche en sulfure (+4 mg/l en moyenne entre 1990 et 1994, [tableau 4](#)), ce qui témoigne de sa recirculation dans la boucle géothermale.

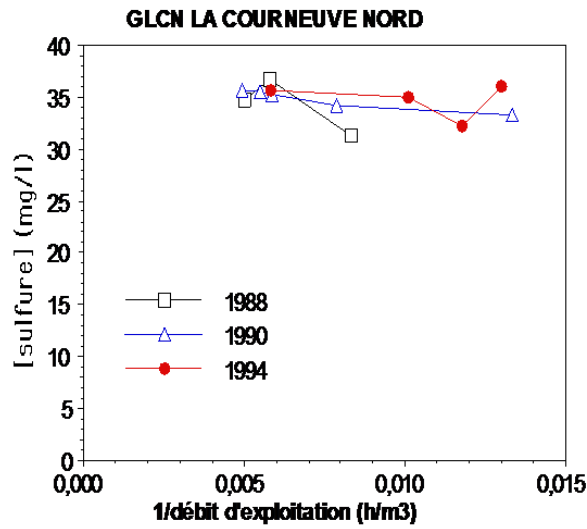


Figure 10 : Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GLCN1 de La Courneuve Nord en fonction de l'inverse du débit pour trois années différentes (1988, 1990 et 1994).

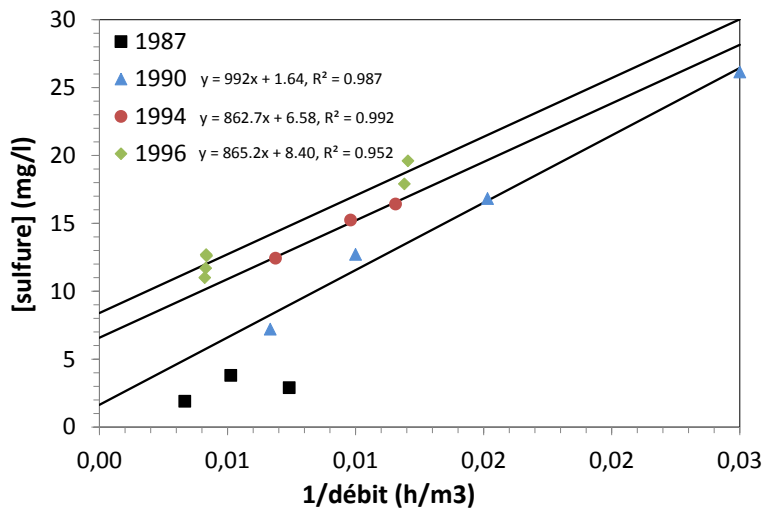


Figure 11 : Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour quatre années différentes (1987, 1990, 1994 et 1996).

Site	$[S^{2-}]_R$ ou teneur en sulfure du réservoir (mg/l)			
	Teneur en sulfure (mg/l) mesurée lors de la MES (d'après Rojas <i>et al.</i> , 1989)	1990	1994	2011
Créteil	0.00	2.93	7.00	18.18
Fresnes	2.90	0.14	4.49	13.27
Meaux-Beauval-1	0.90	1.24	2.58	14.00
Meaux-Beauval-2	0.30	1.64	6.58	20.52
Orly-1	0.24	5.80	6.08	10.38
Chevilly-Larue	0.87	1.41	4.35	13.06
Bonneuil-sur-Marne	0.00	2.70	7.69	Données non disponibles depuis 2008
Alfortville	3.10	5.58	11.15	16.56
Maisons-Alfort-2	1.39	4.30	10.10	14.96
Hay-les-Roses	0.66	5.30	5.90	13.70
Coulommiers	1.60	4.03	5.60	12.29

Tableau 4 : Évolution des teneurs en sulfure du réservoir $[S^{2-}]_R$ en fonction du temps pour les sites du sud et de l'est de Paris.

Les analyses de la composition isotopique du soufre (^{34}S et ^{32}S) du sulfure et des sulfates en fonction du débit d'exploitation réalisées en parallèle des suivis physico-chimiques (Ignatiadis, 1994 ; Ignatiadis *et al.*, 1997a ; 1997 b ; 1997c ; 1998a ; 1998b) montrent que :

- le $\delta^{34}(\text{SO}_4^{2-})$ dépend faiblement du débit (la teneur en sulfate du réservoir est trop élevée pour que ses variations soient observables) ;
- le $\delta^{34}(\text{HS}^-)$ augmente significativement avec le débit (la contribution du sulfure provenant du réservoir augmente aux dépens du sulfure bactérien plus pauvre en ^{34}S). Un exemple est donné [figure 12](#) pour le site de Meaux-Beauval-2 en 1990 ;
- à débit comparable, le $\delta^{34}(\text{HS}^-)$ des fluides analysés a, par contre, diminué depuis la MES des puits concernés (16 producteurs du sud et de l'est de Paris). Il a, par exemple, diminué de 2 ‰ dans les fluides produits sur les sites de Meaux-Beauval-1 et Meaux-Beauval-2 entre 1990 et 1995 ([tableau 5](#)). Ainsi, il apparaît que les sulfures produits en tête de puits sont majoritairement (et de plus en plus avec le temps) d'origine bactérienne.

Dans le [tableau 5](#) ont été ajoutées, lorsque disponibles, les données de 2011. Ces données confortent les conclusions préalablement exposées (pour plus de détail, cf. § 4.2.3.).

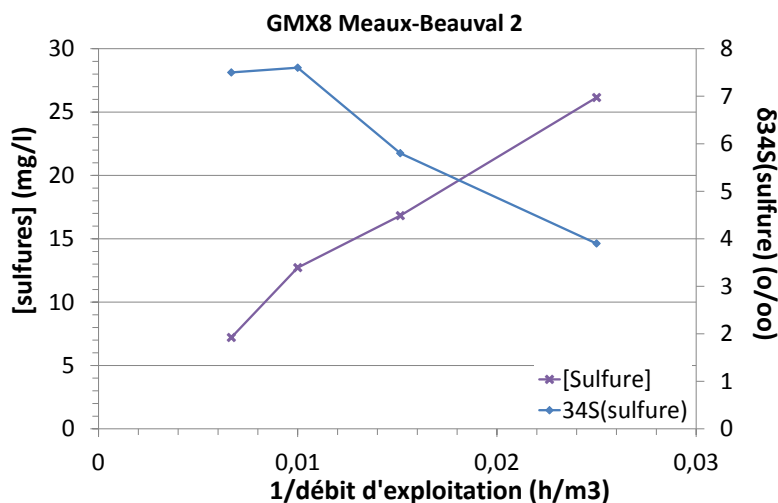


Figure 12 : Évolutions comparées de [S²⁻] et de δ³⁴(HS⁻) au sein du fluide prélevé en tête du puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour l'année 1990.

Site	Date	Débit (m ³ /h)	Teneur en sulfure [S ²⁻] _T (mg/l)	δ ³⁴ (HS ⁻) (‰)	δ ³⁴ (SO ₄ ²⁻) (‰)
Meaux-Hôpital (GMX3)	1986	120	0,89	-	-
	1995	201	9,00	1,7	24,0
	2011	101	19,67	0,2	25,0
Meaux-Beauval-1 (GMX5)	82/86	-	0,90	-	23,5
	1990	120	11,05	7,1	24,5
	1995	132	7,70	5,3	24,3
	2011	65	22,62	6,0	25,4
Meaux-Beauval-2 (GMX8)	1990	150	7,21	7,5	24,2
	1994	145,5	12,43	6,1	24,3
	1995	155	11,90	5,1	24,4
Chevilly-Larue (GCHL2)	2011	85	21,00	3,7	26,3
	1986	180	0,87	4,1	23,4
	1994	142	8,03	0,7	25,2
Coulommiers (GCO1)	2011	180	13,65	-5,2	28,0
	83/87	150	1,60	9,6	23,6
	1995	143	10,00	5,3	24,3
	1996	185	9,96	4,9	24,6
Sucy en Brie (GSUC1)	2011	113	13,55	-	-
	1985	90	0,08	-	23,1
	1996	130	10,56	7,5	24,2
Melun (GMEL2)	1983	90	8,6	10,6	25,7
	1991	35	17,32	3,8	25,6
	1996	110	14,75	2,9	22,1
	1997	79	14,92	2,2	24,7
Thiais (GTHI1)	1988	-	0,14	12	24,2
	1995	120	9,5	4,6	25,8

Site	Date	Débit (m ³ /h)	Teneur en sulfure (mg/l) [S ²⁻] _T	$\delta^{34}(\text{HS}^-)$ (‰)	$\delta^{34}(\text{SO}_4^{2-})$ (‰)
Orly 1 (GOR2)	1989	131	1,87	7,4	24,8
	1994	110	7,51	5,3	25,2
Cachan Sud 2 (GCDS2)	1985	-	3,10	3,4	25,4
	1992	-	10,00	-5,4	-
Bonneuil sur Marne (GBO1)	1987	-	0,05	-	25,3
	1994	129	11,06	5,6	25,1
Alfortville (GAL2)	1988	-	3,10	-	26,9
	2011	150	17,83	-2,6	28,9
Maisons-Alfort-2 (GMA3)	1987	-	1,39	-	24,9
	2011	150	15,64	-0,1	27,8
L'Hay Les Roses (GHLR-2)	1985	180	0,66	-	-
	2011	180	13,48	-4,9	28,0
Villeneuve la Garenne (GVG1)	1987	55	32,9	-3,0	41,7
	1992	55	33,3	-5,0	-

Tableau 5 : Valeurs de $\delta^{34}(\text{HS}^-)$ et teneurs en sulfures correspondantes en fonction du temps pour neuf sites géothermaux, dont un se situe au nord de Paris (Villeneuve la Garenne).

4.2.3. Cartographie des teneurs en sulfure et évolutions nouvelles (post 2008)

La teneur en sulfure dissous en tête de puits de production du Dogger n'a pas été cartographiée depuis les années 90 (Ignatiadis *et al.*, 1998b).

Une nouvelle cartographie des teneurs prélevées sur la période 2008-2010 a donc été entreprise dans cette étude. Les données utilisées pour établir cette nouvelle cartographie ont été collectées auprès des maîtres d'œuvre actuellement en charge de la quasi-totalité des installations géothermales du Dogger du Bassin parisien : CFG Services et GPC I&P. Les données ainsi amassées ont été répertoriées dans la Base DOGGER (Goyénèche *et al.*, 2004 ; 2005 ; Hamm *et al.*, 2010 ; 2011). La cartographie des teneurs en sulfure obtenue est présentée [figure 13](#).

Les deux zones définies précédemment (à forte et faible teneur en sulfure) restent distinguables, bien que la teneur en sulfure dissous en tête de puits de production ait continué de croître au sud et à l'est de Paris et soit restée stable ailleurs. Inférieure à 5 mg/l lors de la MES, la teneur en sulfure prélevée dans les puits du sud et de l'est de Paris approche désormais 20 mg/l, voire les égale (cas des puits de Meaux-Beauval-2 (GMX8) et de Chelles (GCHL2A)).

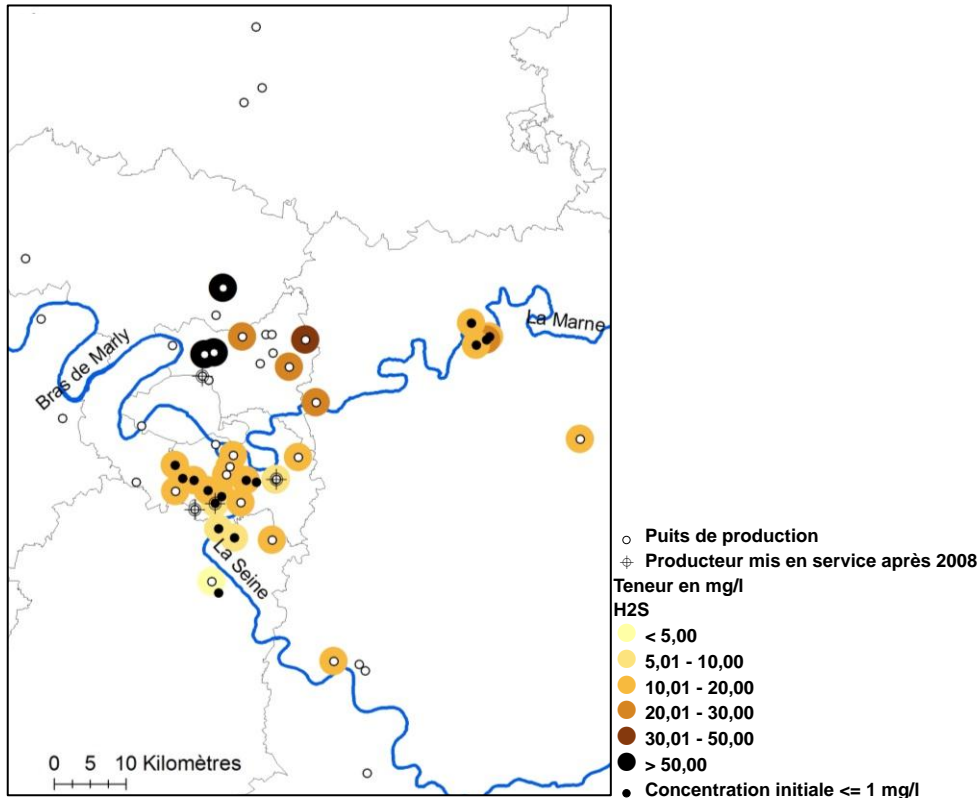


Figure 13 : Carte de répartition des teneurs en sulfures dissous dans les fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 2008-2010. (données en mg/l relevées ou extrapolées pour un débit de référence de 150 m³/h).

La nouvelle campagne de suivi physico-chimique et isotopique des fluides du Dogger en fonction du débit d'exploitation, réalisée en 2011 (cf. rapport BRGM/RP-60774-FR du projet « Étude de sensibilité du comportement des puits au Dogger à l'échelle de l'ouvrage et du réservoir par modélisation et tests hydrogéologiques »), montre que dans le sud et l'est de Paris :

- la pente de la droite $[S^{2-}] = f(1/Q)$, représentant la différence $\Phi_{\text{sulf bact}} - \Phi_{\text{sulf dépôts}}$, a diminué. Elle a, par exemple, été divisée par 4 au puits de production de Chevilly-Larue depuis 1994 (figure 14). La production de sulfure par les BSR présentes sur les tubages et le proche réservoir a ainsi diminué et/ou les dépôts de sulfure augmenté. La teneur en sulfure prélevée en tête de puits varie toujours linéairement en fonction de l'inverse du débit, mais, tend donc à se stabiliser. D'ailleurs, ceci est déjà le cas pour le puits de L'Hây-les-Roses où la teneur produite est désormais stable ($\Phi_{\text{sulf bact}} - \Phi_{\text{sulf dépôts}}=0$) et représentative de la teneur réservoir $[S^{2-}]_R$;
- la $[S^{2-}]_R$ a poursuivi sa croissance. Comprise entre 4 et 7 mg/l en 1994, elle est actuellement de 14,6 mg/l en moyenne (tableau 4) ;
- le flux de sulfure du réservoir est largement et de plus en plus prépondérant par rapport au flux de sulfure bactérien actuel.

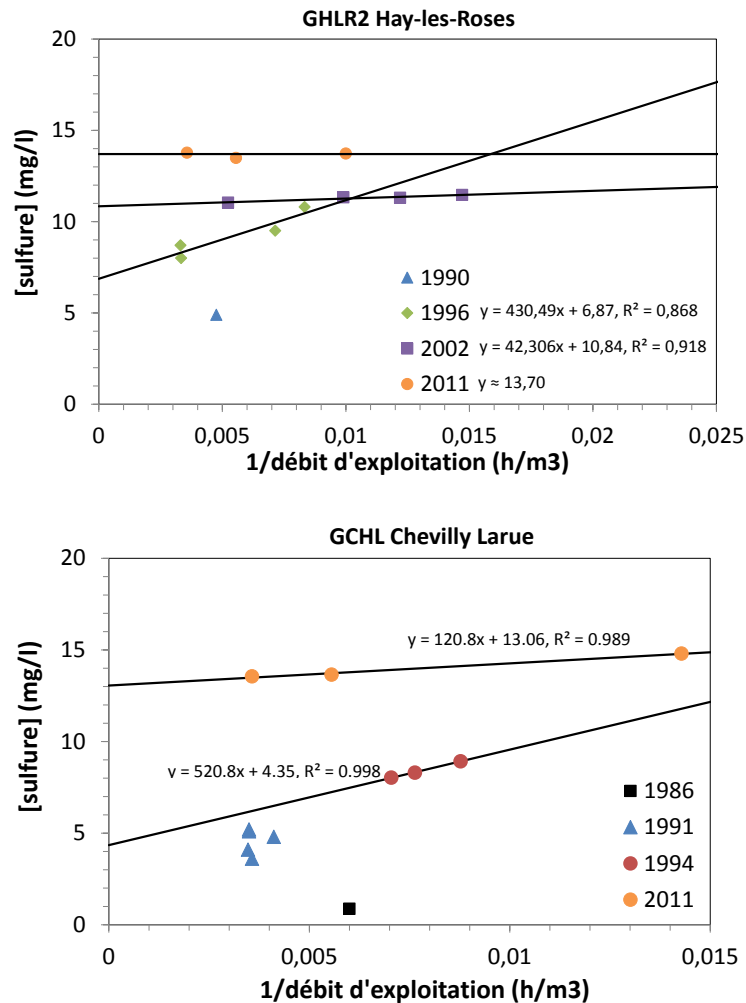


Figure 14 : Évolution de la concentration en sulfure dissous prélevée en tête de puits de production GHLR2 de L'Hây-les-Roses (haut) et GCHL2 de Chevilly-Larue (bas) pour quatre années différentes.

Les nouvelles analyses de la composition isotopique du soufre (^{34}S et ^{32}S) du sulfure et des sulfates en fonction du débit d'exploitation montrent que :

- à débit comparable, le $\delta^{34}(\text{HS}^-)$ continue de décroître depuis les années 1990. Il a par exemple diminué de 6 ‰ dans les fluides produits à Chevilly-Larue depuis 1994. Parallèlement, le $\delta^{34}(\text{SO}_4^{2-})$ a augmenté (de 4,6 ‰ depuis 1986) (tableau 5). Les fluides produits par les sites du sud et de l'est de Paris sont, ainsi, de plus en plus riches en sulfures bactériens témoignant d'une activité passée.

Le flux de sulfures bactériens ($\Phi_{\text{sulf bact}} - \Phi_{\text{sulf dépôts}}$) a sensiblement chuté depuis la fin des années 90 (figure 14). De ce fait, cette diminution du $\delta^{34}(\text{HS}^-)$ témoigne, essentiellement, de la recirculation des fluides (progressivement appauvris en ^{34}S lors de leurs passages successifs dans les puits de production et d'injection par l'activité bactérienne) dans la boucle géothermale.

4.3. CARTOGRAPHIES ET SUIVIS DU PH DES FLUIDES

Aucune cartographie du pH des fluides géothermiques du Dogger du Bassin parisien n'est disponible.

Toutefois, depuis 1987, la plupart des sites font l'objet d'un suivi géochimique régulier de la part des maîtres d'œuvres du sous-sol. Les données nécessaires pour établir les cartographies du pH en fonction du temps, présentées dans ce paragraphe, ont donc été collectées auprès de CFG Services et GPC I&P. Les données amassées ont, comme pour les teneurs en sulfure, été répertoriées dans la Base DOGGER.

4.3.1. Cartographie initiale

La cartographie du pH correspondant aux premières années d'exploitation (≤ 5 ans) des puits de production est présentée [figure 15](#). Aucune zonation du pH n'est clairement identifiable. Le pH des fluides produits au Dogger est, en effet, compris entre 6,30 et 6,50 pour la plupart des sites géothermiques renseignés. Il est, par contre, plus faible (autour de 6,15) en tête des puits de production mis en service après 2008 (Orly-le-Nouvelet-2 et Sucy-en-Brie-3).

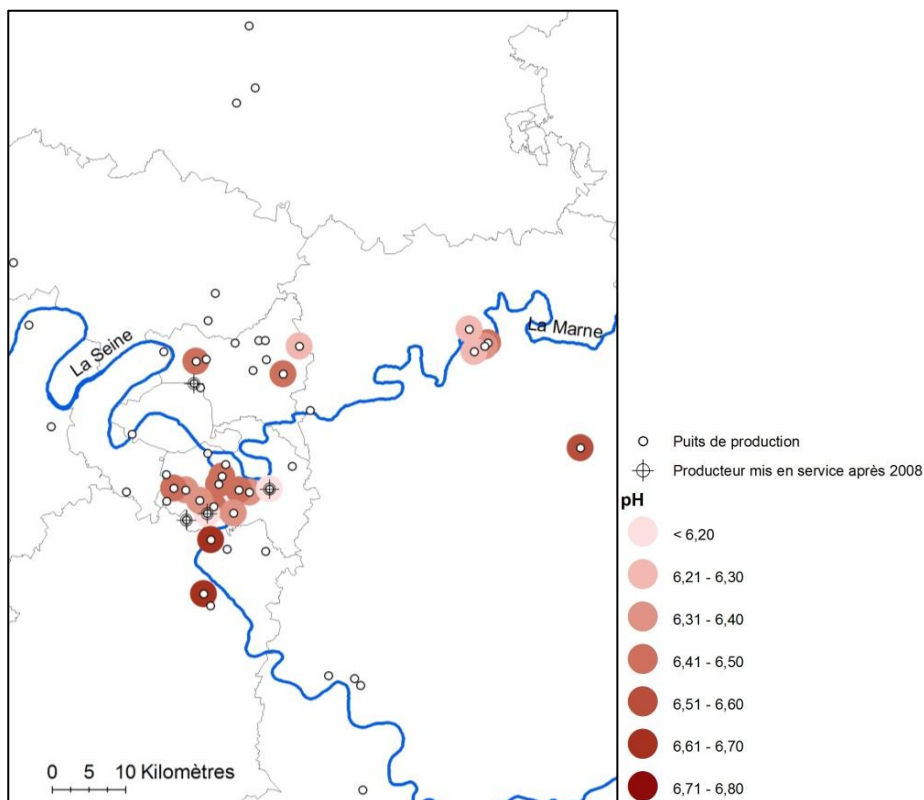


Figure 15 : Carte de répartition du pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, lors de la mise en exploitation.

4.3.2. Cartographie et suivis physico-chimiques des années 90

Depuis la mise en exploitation des sites au Dogger, les analyses d'eaux prélevées régulièrement en tête de puits de production montrent une légère diminution du pH des fluides produits par quelques puits (ex. de Meaux-Beauval-2 et de La-Courneuve-Sud, [figure 16](#)). Cependant, cette diminution n'est significative ($> 0,1$ unité pH - incertitude analytique) que pour 19 % des puits renseignés (soit 4 puits : Meaux-Beauval-1, Meaux-Beauval-2, Coulommiers et Maisons-Alfort-2). Cette diminution touche, ainsi, en particulier les fluides prélevés à l'est de Paris (plus chauds et plus salés que la moyenne).

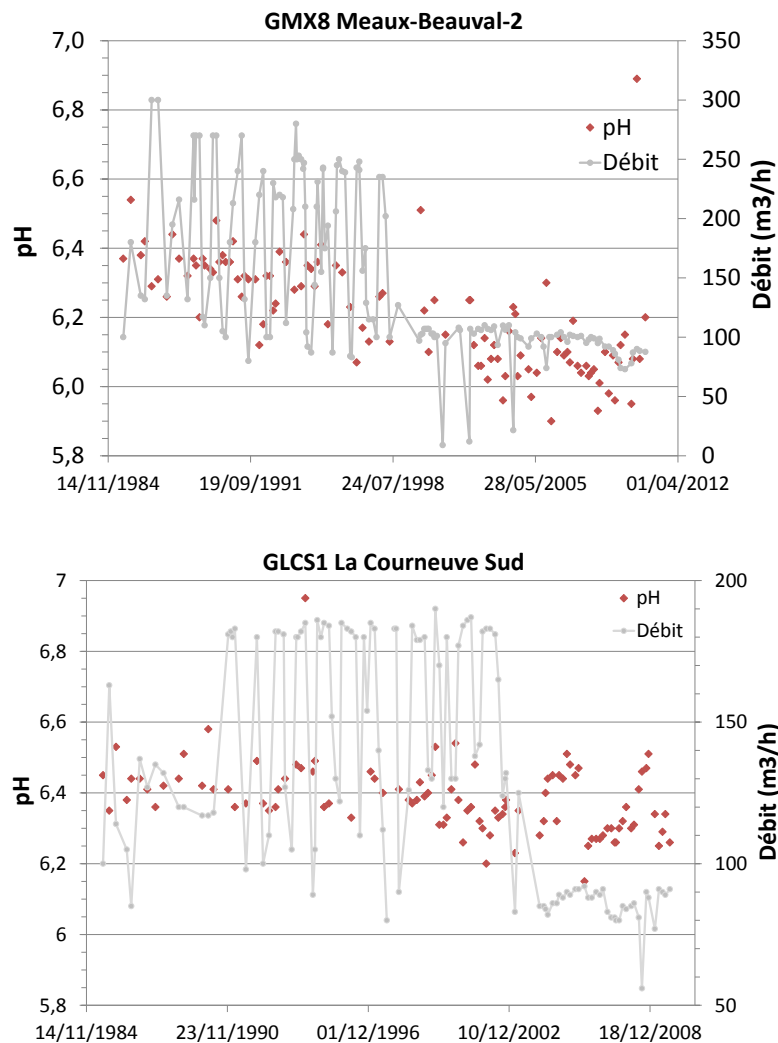


Figure 16 : Évolution du pH des fluides prélevés en tête des puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 (en haut) et GLCS1 de La-Courneuve-Sud (en bas) avec le temps.

Cette légère diminution du pH des fluides produits par quelques puits du Dogger est observable sur la cartographie réalisée à partir des données de pH collectées sur la période 1995-1997 et présentée [figure 17](#).

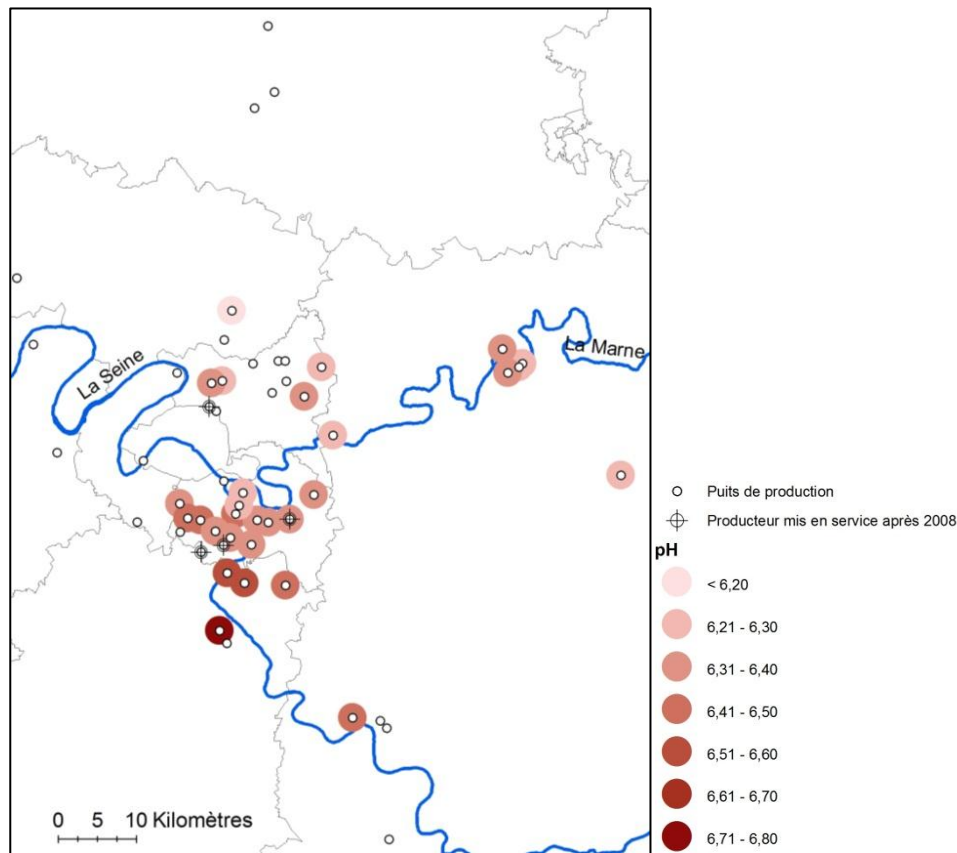


Figure 17 : Carte de répartition de pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 1995-1997 (données relevées).

Par ailleurs, parmi les suivis physico-chimiques réalisés à débits variables depuis 1989, rares sont ceux pour lesquels le pH a été renseigné dans la littérature aux débits imposés. Toutefois, lorsqu'il est précisé, le pH ne varie pas significativement avec le débit. C'est le cas, par exemple, pour la campagne de suivi menée en juillet 1996 sur le site de Coulommiers durant laquelle le pH reste stable à 6,18 alors que le débit varie entre 185 et 39 m³/h (Ignatiadis et Chéradame, 1997c).

De ce fait, si on applique le même raisonnement que pour les sulfures, le pH des fluides du Dogger mesuré en tête de puits ne rendrait pas compte des phénomènes de corrosion-dépôts présents dans les tubages et le proche réservoir. Il serait donc directement représentatif du pH des fluides dans le réservoir. Depuis la MES des puits, le pH du réservoir aurait donc diminué au droit des sites de l'est de Paris et de Maisons-Alfort-II, et serait resté stable autour de 6,3-6,5 ailleurs.

4.3.3. Cartographie actuelle du pH des fluides et évolutions nouvelles (post 2008)

La diminution du pH, initiée à l'est de Paris et sur le site de Maisons-Alfort-II dans les années 1990, est désormais un fait pour plus de 60 % des puits en activité depuis plus

de 5 ans (diminution de 0,17 unité en moyenne depuis la fin des années 90). Stable autour de 6,45 jusqu'en 2000, le pH des fluides produits sur le site de L'Hây-les-Roses a, ainsi, diminué de 0,18 unité pH depuis [\(figure 18\)](#).

Précisons que les fluides prélevés au nord de Paris ne présentent pas de diminution significative de leur pH (ex. de La Courneuve-Sud, [figure 16](#)). En effet, la plus forte diminution du pH des fluides produits dans ce secteur est observée sur le site de Clichy-sous-Bois et est seulement de 0,13 unité depuis la fin des années 90. En fait, la diminution du pH touche principalement les fluides produits au sud et à l'est de Paris (80 % des puits de ce secteur en activité depuis plus de 5 ans sont concernés). Ainsi, la diminution du pH des fluides produits à l'est est relativement importante depuis leur MES, celle-ci ayant souvent été initiée dès les années 1990. Le pH des fluides produits sur les sites de Meaux-Beauval-1 et Meaux-Beauval-2 ont, par exemple, diminué de 0,3 unité en moyenne depuis 1985 ([figure 16](#)).

Cette large diminution du pH des fluides produits par les puits du Dogger est nettement observable sur la cartographie réalisée à partir des données de pH collectées sur la période 2008-2010 et présentée [figure 19](#).

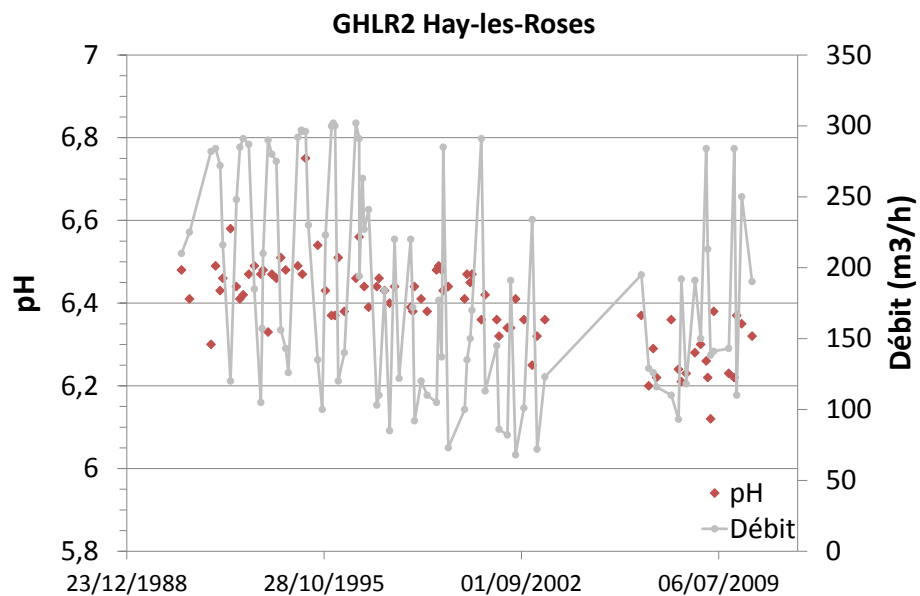


Figure 18 : Évolution du pH des fluides prélevés en tête du puits de production GHLR2 de L'Hây-les-Roses avec le temps.

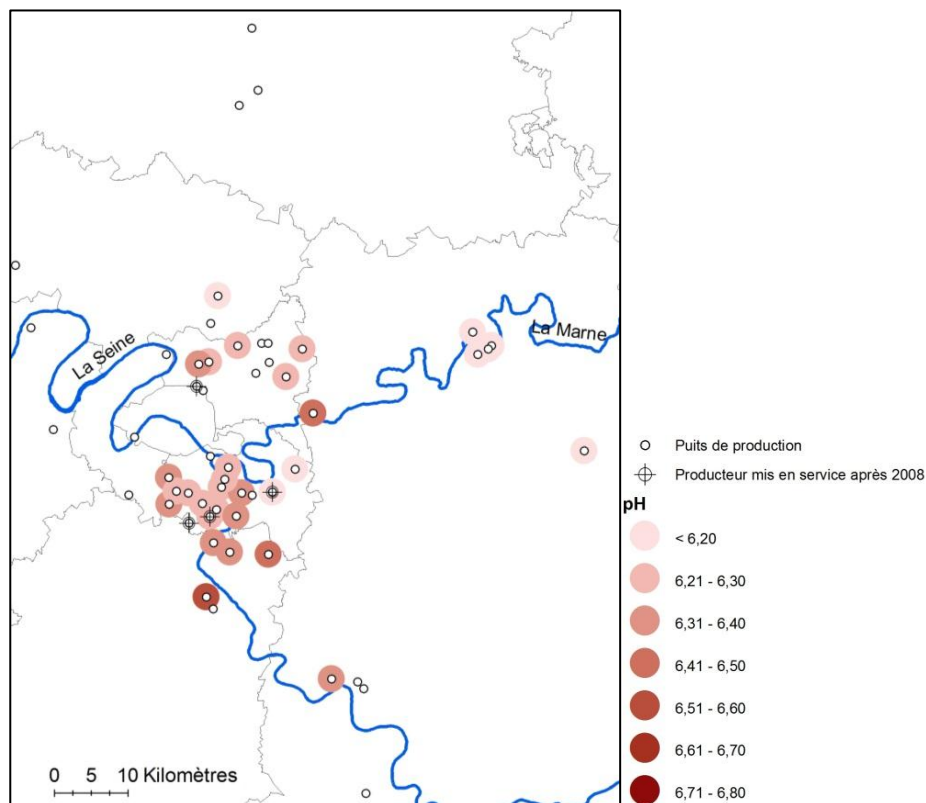


Figure 19 : Carte de répartition du pH des fluides prélevés, en tête de puits de production, pendant la période 2008-2010 (données relevées).

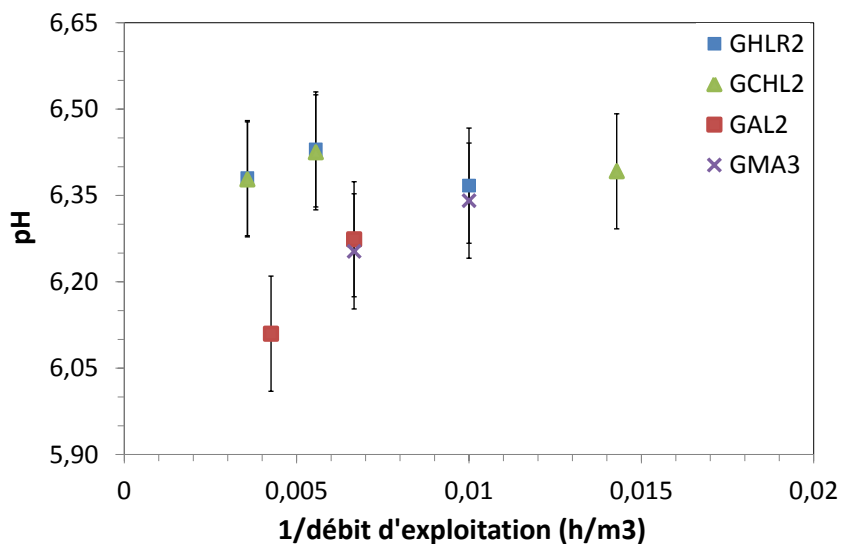


Figure 20 : Évolution du pH des fluides prélevés (en 2011) en tête de puits de L'Hây-les-Roses, Chevilly-Larue, Alfortville et Maisons-Alfort II (sites situés au sud de Paris) en fonction de l'inverse du débit d'exploitation.

La campagne de suivi réalisée en 2011 sur quatre sites géothermiques du sud de Paris (Val-de-Marne) montre que le pH ne varie pas avec le débit ([figure 20](#)). Le pH mesuré en tête de puits est donc représentatif du pH en fond de puits. De ce fait, il semblerait que le réservoir du Dogger se soit réellement acidifié au droit des sites du sud et de l'est de Paris depuis les années 1970-1980 (époque du lancement des premiers sites géothermiques).

Cette diminution « localisée » du pH des fluides produits (et du réservoir) n'est pas sans rappeler l'augmentation « localisée » de la teneur en sulfure (cf. §4.2). L'hypothèse avancée dans l'étude de Hamm *et al.* (2010) pourrait donc s'avérer vraie : « au cours de son parcours entre les puits injecteur et producteur, le fluide, désormais enrichi en sulfures, précipite le fer et les autres cations dissous dans le réservoir libérant ainsi des protons »¹. Il est toutefois délicat de l'affirmer connaissant le pouvoir tampon de la matrice carbonatée du Dogger, bien que le lien entre la diminution du pH du réservoir et l'augmentation des teneurs en sulfure paraisse évident.

4.4. IMPACT DES ÉVOLUTIONS OBSERVÉES SUR LES PHÉNOMÈNES DE CORROSION-DÉPÔTS

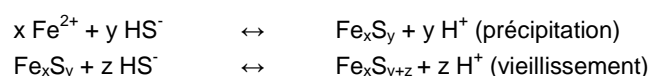
4.4.1. Évolutions des teneurs en fer dissous dans les fluides du Dogger

Suivis physico-chimiques des années 1990

La mise en œuvre de traitements anti-corrosion au début des années 1990 a permis de réduire significativement la corrosion des tubages des puits (cf. l'évolution du terme $\Phi_{\text{fer corr.}} - \Phi_{\text{fer dépôts}}$ établie pour le site de Meaux-Beauval-2, [figure 21](#)).

Entre 1990 et 2000, la teneur en fer dissous en tête de puits de production a ainsi été divisée en moyenne par 15 sur l'ensemble des sites exploités ([figure 22](#)). La teneur en fer dissous prélevée à la fin des années 1990 est ainsi de l'ordre de 0,1 mg/l en moyenne sur l'ensemble des sites géothermiques du bassin de Paris.

¹ La précipitation de sulfures de fer et leur vieillissement entraînent une production de H⁺ (pH↓) selon les réactions :



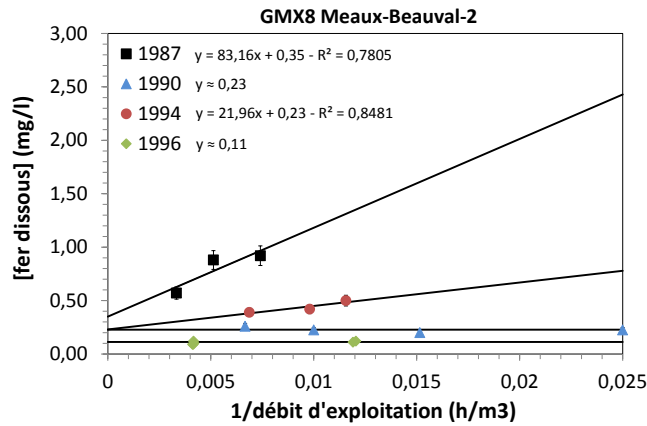


Figure 21 : Évolution de la concentration en fer dissous prélevée en tête de puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-2 en fonction de l'inverse du débit pour quatre années différentes (1987, 1990, 1994 et 1996).

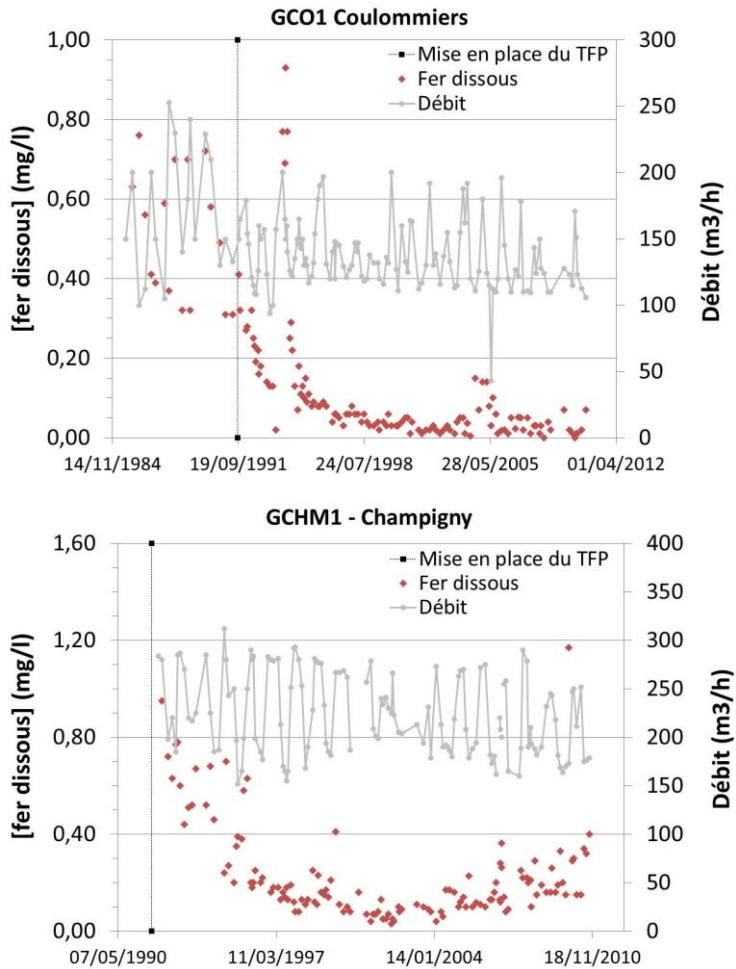


Figure 22 : Évolution de la teneur en fer dissous prélevée en tête des puits de production GCO1 de Coulommiers (haut) et GCHM1 de Champigny-sur-Marne (bas) avec le temps.

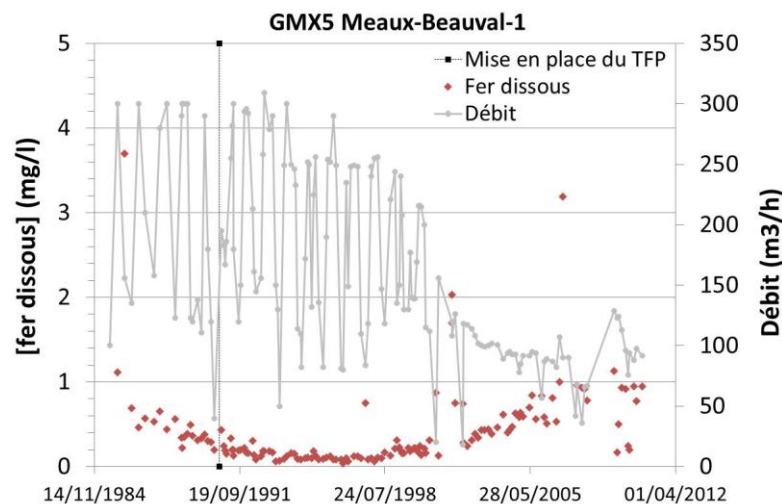
Évolutions nouvelles (post 2008)

Depuis la fin des années 90, les analyses d'eaux prélevées régulièrement en tête de puits de production montrent une augmentation de la teneur en fer dissous pour 30 % des sites actuellement en activité (ex. de Champigny-sur-Marne, [figure 22](#) et [figure 23](#)). Parmi ces sites, 60 % sont exploités depuis lors sans pompe immergée (production artésienne). C'est le cas, par exemple, de trois des quatre puits de production situés sur la commune de Meaux et de celui de Clichy-sous-Bois ([figure 23](#)).

La campagne de suivi physico-chimique à débit variable réalisée en 2011 ne porte pas sur les puits concernés par cette augmentation de la teneur en fer.

Or, après plusieurs tentatives, nous ne sommes pas parvenus à établir de relation $[Fe^{2+}]_T = f(1/Q)$ satisfaisantes à partir des prélèvements et analyses réalisés sur site par CFG Services et GPC I&P sur la période 2000-2010. Il nous est donc difficile de qualifier et de quantifier la production actuelle de fer dans ces puits par la corrosion des tubages. Néanmoins, quoiqu'il en soit, il apparaît clairement et il a déjà été établi dans la littérature (Ignatiadis *et al.*, 1998a ; 1998b) que la cause principale de cette augmentation est la réduction du débit d'exploitation (60 % des cas concernés).

Il n'est, toutefois, pas impossible que l'augmentation de la teneur en sulfure et la diminution du pH du réservoir, observée au sud et à l'est de Paris, accentuent le phénomène. D'ailleurs, on remarquera que le passage en artésien du site de Clichy-sous-Bois ne s'accompagne pas immédiatement d'une élévation de la concentration en fer dissous dans le fluide. Par ailleurs, ces deux facteurs jouent probablement un rôle important dans les augmentations des teneurs constatées dans les 40 % des cas restants (ex. de Champigny-sur-Marne, [figure 22](#)).



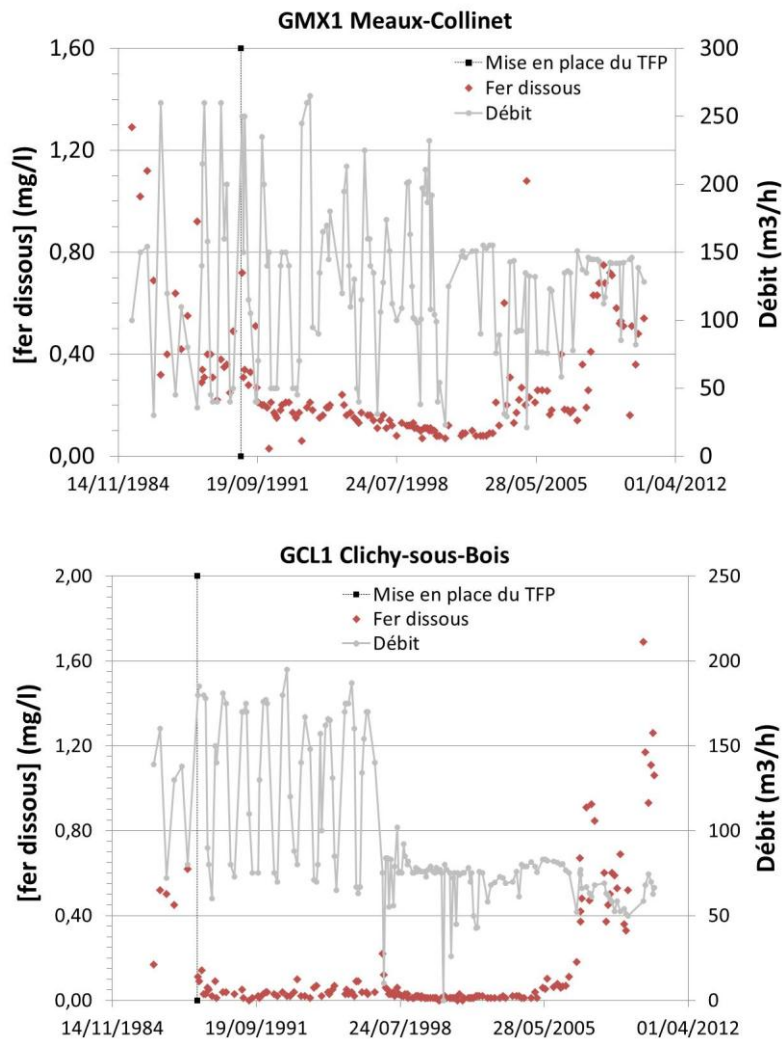


Figure 23 : Évolution de la teneur en fer dissous dans les fluides en tête des puits de production GMX8 de Meaux-Beauval-1 (haut), GMX1 de Meaux-Collinet (centre) et GCL1 de Clichy-sous-Bois (bas) en fonction du temps.

4.4.2. Les traitements inhibiteurs

Afin d'anticiper l'augmentation des processus de corrosion-dépôts (fonction inverse du débit), les quantités d'inhibiteur injectées en fond de puits sont augmentées lors du passage des sites en artésien. Les teneurs injectées dans les puits « nouvellement » artésiens depuis les années 2000 (Clichy-sous-Bois, La Courneuve-Sud, les puits de Meaux, etc.) exploitant la ressource géothermale du Dogger du BP sont ainsi, désormais, de l'ordre de 7-8 mg/l, alors qu'elles n'étaient que de 3 mg/l environ jusqu'en 2000 (figure 24). Or, au regard des teneurs en fer dissous prélevées depuis 2000 en tête de ces puits, ces teneurs bien qu'élevées s'avèrent souvent insuffisantes (figure 23).

Une des exceptions à cela est représentée par le site de Meaux-Beauval-2, traité depuis 2008 avec plus de 10 mg/l d'inhibiteur en moyenne, et pour lequel les concentrations en fer prélevées sont relativement stables autour de 0,2 mg/l depuis le milieu des années 1990.

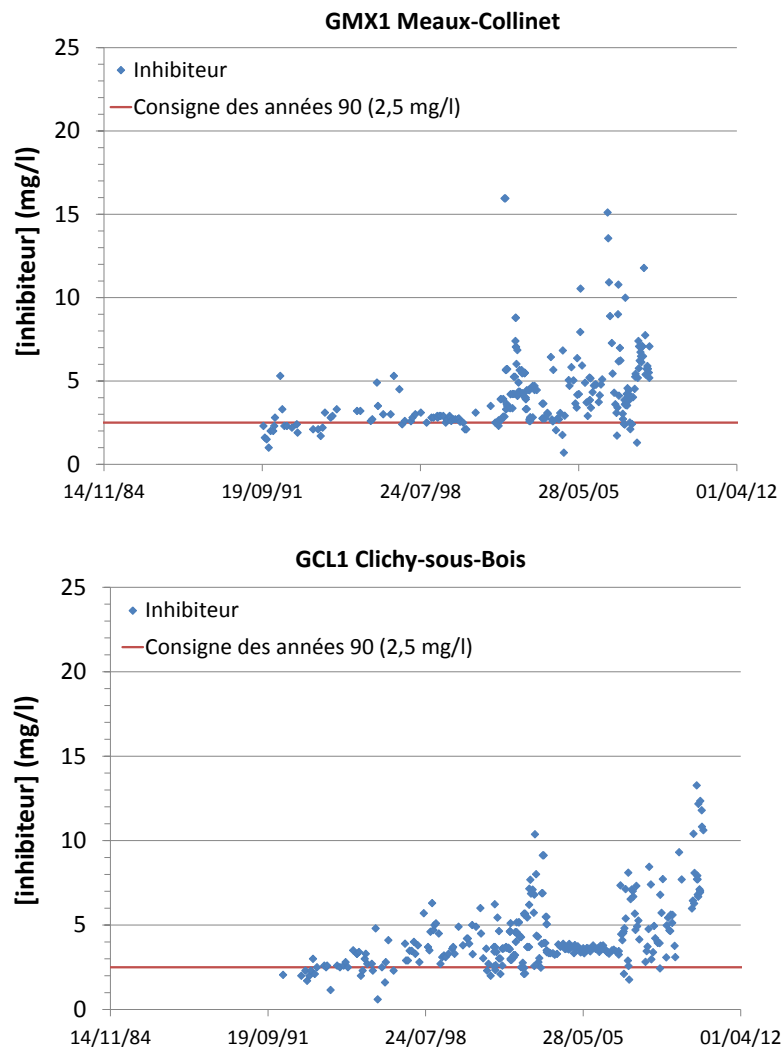


Figure 24 : Évolution de la quantité d'inhibiteur de corrosion-dépôt injectée au fond des puits de production **artésiens** GMX1 de Meaux-Collinet (haut) et GCL1 de Clichy-sous-Bois (bas) en fonction du temps.

Concernant les sites « non artésiens », les quantités d'inhibiteur injectées en fond de puits de production sont restées stables (ex. de Coulommiers et d'Alfortville) ou ont légèrement augmenté (entre 0,5 et 1,0 mg/l, ex. de Chevilly-Larue et de Champigny-sur-Marne), depuis les années 1990. Par contre, il semblerait que les inhibiteurs soient injectés, plus régulièrement à forte concentration (>> 2-3 mg/l), bactéricides ([figure 25](#)).

Les évolutions des propriétés physico-chimiques des fluides du Dogger observées ne sont donc probablement pas sans conséquence sur les sites « non artésiens », même si les teneurs en fer prélevées sont souvent restées stables dans ces cas.

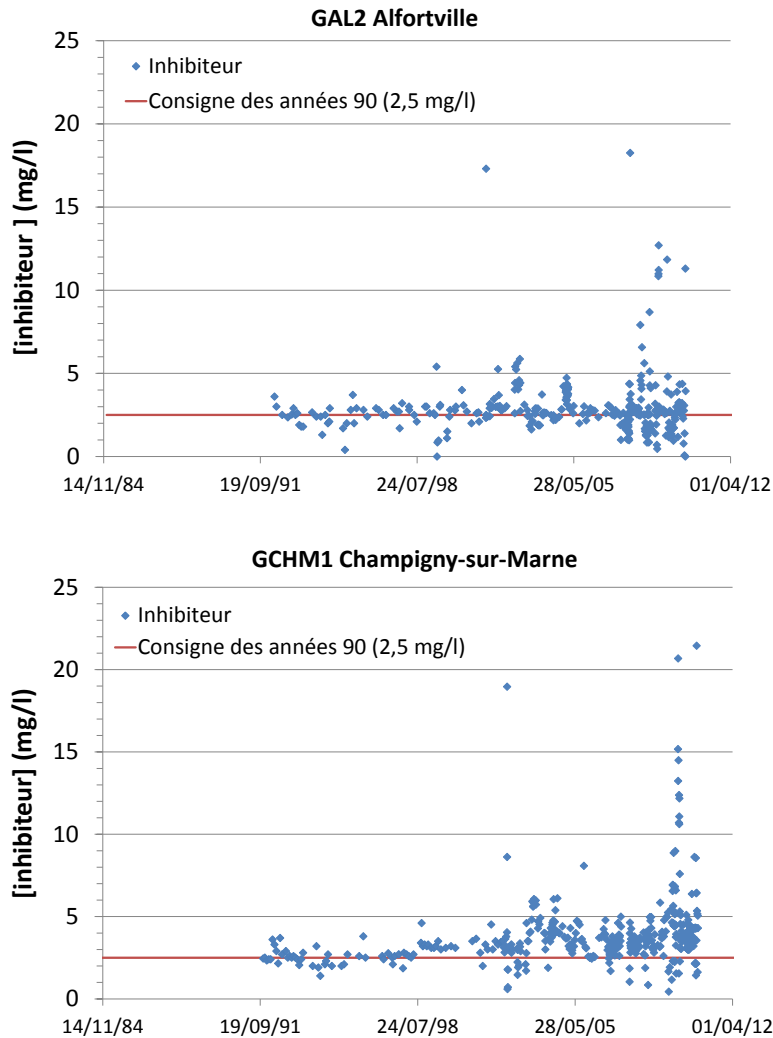


Figure 25 : Évolution de la quantité d'inhibiteur de corrosion-dépôt injectée au fond des puits de production **non artésiens** GAL2 d'Alfortville (haut) et GCHM1 de Champigny-sur-Marne (bas) en fonction du temps.

4.4.3. Devenir des produits inhibiteurs dans l'aquifère du Dogger

Les produits de traitement anti-corrosion sont constitués en majorité de dérivés azotés du type sels d'ammonium quaternaires, injectés en fond du puits de production à des teneurs allant de 2 à 10 mg/l. Ces derniers sont très toxiques même à faible concentration pour les milieux aquatiques, bactériostatiques ou bactéricides à plus forte dose et susceptibles de persister et de s'accumuler dans l'environnement. Il paraît

donc nécessaire de connaître leur devenir dans le réservoir du Dogger du Bassin Parisien.

Le forage du nouveau puits d'injection de Coulommiers (GCO4) réalisé d'octobre à novembre 2011 proche de l'ancien injecteur (GCO2), a permis au BRGM de récupérer deux échantillons de fond de puits du fluide du Dogger. Les prélèvements ont été réalisés par la société Schlumberger, le 18 novembre 2011, à l'aide de deux préleveurs de type Single-phase Sample Bottles (SSB), résistants aux fortes teneurs en sulfures et chlorures dissous et permettant de conserver l'échantillon prélevé dans les conditions de pression du réservoir. Ils ont, ensuite, été récupérés et analysés par le BRGM.

La note technique, présentée en [annexe 5](#), donne les résultats des analyses effectuées par le BRGM sur les deux échantillons identiques prélevés dans le forage GCO4. Nous ne reprenons ici que les principales conclusions sur les analyses du fluide échantillonné :

- 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 sulfure dissous 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 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$,
 - le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}(\text{CITD})$ du GCO4, est supérieur à celui du GCO1, témoignant d'un enrichissement en ^{13}C dans le CITD de l'eau du GCO4, et donc d'un processus de biodégradation du carbone organique dans l'eau du GCO4 ;
- la teneur en résidu d'inhibiteur est **a priori** 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 **a priori** 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 permet pas à l'heure actuelle 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 des composés du Norust 491. Il n'est 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 doivent 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).

Outre l'utilisation de la méthode de chromatographie en phase gazeuse pour la détection de concentrations des inhibiteurs présents dans l'eau du Dogger, il conviendrait, si le suivi des concentrations en ces produits devait apparaître comme un standard des contrôles d'exploitation des fluides du Dogger, de doter le BRGM d'autres méthodes de détection et de d'analyse de concentrations, parmi lesquelles, on peut citer des méthodes colorimétriques réalisées en laboratoire ou par kits-test spécifiques du commerce.

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.

4.5. CONCLUSION DE L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DES FLUIDES

Depuis 1989, la **teneur en sulfure dissous** en tête de puits de production n'a cessé d'augmenter au sud et à l'est de Paris. La production actuelle de sulfure bactérien par réduction des sulfates sur les parois des tubages et le proche réservoir n'est plus entièrement responsable de cette augmentation (comme cela pouvait être le cas les cinq premières années d'exploitation). En effet, depuis 1990, le réservoir produit un fluide de plus en plus riche en sulfure au sud et à l'est de Paris. Initialement de quelques mg/l, la teneur en sulfure du réservoir est actuellement de 14,6 mg/l en moyenne dans cette zone. Dans le détail, il semblerait que cette teneur réservoir limite, désormais, l'activité des BSR présentes sur les tubages et dans le proche réservoir (teneur bactériostatique). Les sulfures prélevés actuellement en tête de puits de production proviennent, ainsi, essentiellement du réservoir. Parallèlement, depuis la fin des années 1990, le **pH des fluides** produits par les puits du sud et de l'est de Paris a diminué de 0,17 unité en moyenne.

Depuis la fin des années 1990, la **teneur en fer dissous** en tête de 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, leurs évolutions des dix dernières années ne semblent 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) du bassin Parisien. Néanmoins, ces évolutions ne sont probablement pas

sans conséquence, comme on peut le voir sur quelques sites « non artésiens » (ex. de Champigny-sur-Marne).

Les **quantités d'inhibiteur injectées** en fond de puits ont été réajustées depuis la fin des années 1990. Elles sont actuellement 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'avèrent, cependant, encore inadaptés à quelques opérations du Dogger, en particulier aux sites artésiens. Il apparaît ainsi que chacun des traitements appliqués doit 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, à l'avenir, il nous paraît intéressant de travailler, spécifiquement, sur chacun des sites où la reprise de la corrosion est avérée. Il s'agira, par exemple, de tester (en laboratoire et 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).

5. Conclusions

Ce rapport, en complément du rapport intermédiaire d'octobre 2011, plus spécifiquement consacré aux travaux de modélisation et à une étude de sensibilité des résultats correspondants, finalise les travaux relatifs à la gestion de l'aquifère du Dogger pour l'année 2011 et répond ainsi aux objectifs fixés dans la convention :

- pérenniser la collecte des données d'exploitations et l'élargir aux données du suivi physico-chimiques des opérations au Dogger ;
- définir un cahier des charges avec différentes solutions de réhabilitation d'un ancien puits géothermique en puits d'observation pour le suivi à long terme du réservoir ;
- cartographier les évolutions physico-chimiques des fluides du Dogger par secteur géographique (sulfures, pH) et relier ces évolutions aux phénomènes de corrosion/dépôts.

Concernant la collecte des données d'exploitation de la boucle géothermale sur l'aquifère du Dogger, le bilan des deux dernières années, correspondant à la mise en place d'un fichier Excel standardisé à remplir par chaque responsable technique de site, est mitigé. En effet, seuls 1/3 des exploitants ont pris « l'habitude » de remplir trimestriellement le fichier Excel alors que pour 2/3 d'entre eux ce n'est toujours pas fait. Sur ces 2/3, la moitié envoie un autre fichier contenant ces données et pour l'autre moitié aucun envoi n'est réalisé.

Ainsi, une réflexion est nécessaire en 2012 sur les moyens 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 BESS lors de leurs visites sur sites, un fichier similaire a été créé en 2011 pour assurer de même l'enregistrement des données dans la base Dogger.

Pour la gestion à long terme de la ressource géothermale, **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 au réservoir**, soit par l'intermédiaire d'anciens puits reconvertis en puits d'observation, soit sur des puits en cours d'exploitation. Il est ainsi réalisé **une étude de pré faisabilité sur l'utilisation d'un ancien puits géothermique (puits producteur de Coulommiers GCO-1) en puits d'observation**. Différentes solutions sont comparées 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" (7" actuellement) sur toute sa hauteur semble 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 est également avantageuse en termes de technologie d'instrumentation du puits mise en œuvre qui peut être applicable à un puits en production (intégration des capteurs de mesure au TCTFP).

Les évolutions physico-chimiques des fluides du Dogger depuis les années 90 à 2011 montrent que :

- **la teneur en sulfure 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 sulfure. Parallèlement, depuis la fin des années 1990, **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 de 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, leurs évolutions des dix dernières années ne semblent 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) ;
- **les quantités d'inhibiteur injectées en fond de puits ont été réajustées depuis la fin des années 1990.** Elles sont actuellement 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'avèrent, cependant, encore inadaptés à quelques opérations du Dogger, en particulier aux sites artésiens.** Il apparaît ainsi que chacun des traitements appliqués doit être adaptés à la spécificité de chaque fluide (pH, teneur en HS^- , Cl^- , etc.) et de chaque exploitation (vitesses de circulation du fluide). En ce sens, à l'avenir, il nous paraît intéressant de travailler, spécifiquement, sur chacun des sites où la reprise de la corrosion est avérée. Il s'agira par exemple de tester (en laboratoire et 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, à l'occasion du forage du nouveau puits injecteur à Coulommiers (77) proche de l'ancien injecteur (GCO2), **un prélèvement de fond a été effectué et ses caractéristiques physicochimiques et sa composition chimique ont été analysées en vue de déterminer notamment la présence de produit inhibiteur résiduel.** Les principaux résultats sont :

- 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 sulfure dissous 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 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$,
- le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}(\text{CITD})$ du GCO4, est supérieur à celui du GCO1, témoignant d'un enrichissement en ^{13}C dans le CITD de l'eau du GCO4, et donc d'un processus de biodégradation du carbone organique dans l'eau du GCO4 ;
- la teneur en résidu d'inhibiteur est **a priori** 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 **a priori** 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 permet pas à l'heure actuelle 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 des composés du Norust 491. Il n'est 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 doivent 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).

Outre l'utilisation de la méthode de chromatographie en phase gazeuse pour la détection de concentrations des inhibiteurs présents dans l'eau du Dogger, il conviendrait, si le suivi des concentrations en ces produits devait apparaître comme un standard des contrôles d'exploitation des fluides du Dogger, de doter le BRGM d'autres méthodes de détection et de d'analyse de concentrations, parmi lesquelles, on peut citer des méthodes colorimétriques réalisées en laboratoire (Ignatiadis et Police, 1991) ou par kits-test spécifiques du commerce pour composés tensioactifs cationiques, anioniques et non ioniques.

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. Bibliographie

Castillo C., Ignatiadis I. (2012) - Sulfate-reduction state of the geothermal Dogger aquifer, Paris basin (France) after 35 years of exploitation: analysis and consequences of bacterial proliferation in casings and reservoir. In the Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012, SGP-TR-194, 10 pages.

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

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

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.

Hamm V., Castillo C., Goyénèche 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.

Hamm V., Le Brun M., Castillo C., Ignatiadis I., Ausseur J.Y., Borozdina O., Bugarel F., Cordier E., Goblet P., Joubert J.M., Rives D., Ungemach P., Maragna C., Goyénèche O. (2011) - Etude de sensibilité du comportement des puits au Dogger à l'échelle de l'ouvrage et du réservoir par modélisation et tests hydrogéologiques. Rapport final BRGM/RP-60774-FR, 100 p, 48 fig., 17 tabl., 8 ann.

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

Ignatiadis I., Police O. (1991) - Méthodes de dosage d'agents tensio actifs organiques utilisés comme inhibiteurs de corrosion en géothermie. Rapport BRGM n° R 33517 IRG SGN 91, 80 p.

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

Ignatiadis I., Abou Akar A., Lafforgue M., Bray Ph. (1992) - Prélèvement d'échantillons de fluide géothermal par le tube d'injection d'additifs en fond de puits de production sur le site d'Orly 1 (GOR-2). Rapport BRGM R 34513 IRG SGN 92, 76 p.

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

Ignatiadis I., Amalhay M., Abou Akar A., Cotiche C. (1995) - Analyse et conséquences de la prolifération bactérienne sur les tubages et dans le réservoir (proche ou lointain) des doublets géothermiques du bassin de Paris. Rapport final (convention ADEME-BRGM 4.05.0040). Rap. BRGM R 39028, 128 p., 32 fig., 15 tabl.

Ignatiadis I., Abou Akar A. (1997a) - 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.

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

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

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

Ignatiadis I., Menjot A., Jaudin F. (1998b) – Situation et bilan des travaux de recherche sur le Dogger du bassin de Paris dans le cadre du programme Géothermie. Rap. BRGM R 40237, 158 p., 37 fig., 19 tabl., 6 ann.

Lemale J., Pivin M. (1987) - La filière géothermique – Premier bilan – AFME, 2^e édition, 80 p.

Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.-M., Criaud A., Fouillac Ch., Brach M., Menjot A., Martin J.-C., Lambert M. (1989) - Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin parisien, France, rapport final. Rap. BRGM R 30169 IRG SGN 89, 240 p.

Annexe 1

Fichier Excel données géochimiques

Ouvrage	jour (jj/mm/aaaa)	type de prélèvement	Débit (m3/h)	T (°C)	pH	Eh (mV)	O2 (ppb)	Conductivité (mS/cm)	Réserve alcaline	V_Corrosimètre (µm/an)	V_Coupon (µm/an)	H2S (mg/l)	Fer dissous (mg/l)	Fer total (mg/l)	Flux fer dissous (g/h)	PBulle (bar)	TBulle (C°)	GLR (%)	BSR (nombre/mg fluide)	BTR (nombre/mg fluide)	

Ouvrage	jour (jj/mm/aaaa)	type de prélèvement	Débit (m3/h)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	NH4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	B (mg/l)	SiO2 (mg/l)	F (mg/l)	Sr (mg/l)	Ba (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	Li (mg/l)	CO2 (%)	Ar (%)	He (%)	N2 (%)	H2 (%)	H2S (%)	CH4 (%)	C2H5 (%)	C3H8 (%)	IC4 (%)	NC4 (%)	C5 (%)	C6 (%)

Ouvrage	Date début (jj/mm/aaaa)	Date fin (jj/mm/aaaa)	Point d'injection	Débit de production	Type de produit	Etape de traitement	Type de traitement	Concentration moyenne (mg/l)	Commentaire

Annexe 2

Étude de pré faisabilité de rehabilitation de l'ancien puits producteur de Coulommiers en puits d'observation

GEOOTHERMIE COULOMMIERS

UTILISATION DU Puits GCO-1 COMME Puits D'OBSERVATION

Affaire n° PGC 11 082

Novembre 2011

11 CFG 73



Avenue Claude Guillemin - B.P. 6429
45064 ORLEANS CEDEX 2 France

QUALITE

N° affaire : PGC 11 082

N° rapport : 11 CFG 73

Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
A. FISSEAU	B. HERBRICH	E. LASNE

REVISION

Indice	Date	Chapitre	Modification
A	18/11/2011		1 ^{ère} version du document
B			
C			
D			
E			
F			

CLIENT

<p>BRGM Département GTH 3 Avenue Claude Guillemin – BP 36009 45060 Orléans cedex 2</p>
--

Diffusion

5 exemplaires

SOMMAIRE

1	CONTEXTE	4
2	ETAT DE L'OUVRAGE	4
3	PROGRAMME D'ABANDON DU Puits GCO-1	5
4	PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA TRANSFORMATION DU Puits.....	8
4.1	CONTRAINTES LIEES AUX CAPTEURS.....	8
4.2	CONTRAINTES LIEES AUX PRELEVEMENTS DE FOND.....	8
4.3	CONTRAINTES LIEES A LA PROTECTION DES AQUIFERES D'EAU POTABLE	9
5	SOLUTIONS TECHNIQUES PROPOSEES ET CHIFFRAGE.....	9
5.1	SOLUTION 1 : UTILISATION DU Puits GCO-1 EN L'ETAT	9
5.2	SOLUTION 2 : RECHEMISAGE DEFINITIF DU Puits GCO-1	10
5.3	SOLUTION 3 : RECHEMISAGE PROVISoire DU Puits GCO-1	10
5.4	COMPARAISON SYNTHETIQUE DES SOLUTIONS TECHNIQUES	13
6	PROGRAMME D'ABANDON FUTUR ET CHIFFRAGE.....	14
7	CONCLUSION.....	14

1 CONTEXTE

Le département Géothermie du BRGM souhaite étudier les possibilités d'utiliser le puits géothermique de Coulommiers GCO-1 comme puits d'observation permettant sur un site en exploitation :

- l'accès à des mesures de pression et température au niveau du réservoir,
- la réalisation de prélèvements de fluide géothermal en fond de puits pour le suivi géochimique des eaux au Dogger
- l'étude des impacts environnementaux des produits inhibiteurs de corrosion.

2 ETAT DE L'OUVRAGE

- L'ouvrage

Le puits producteur du gîte géothermique de Coulommiers (GCO-1) a été réalisé de mai à juillet 1980. Le SMGC avait confié la maîtrise d'œuvre au BRGM. L'exploitation de la boucle géothermale avec production sur la totalité du réseau se fait courant 1982.

- L'état du cuvelage du puits de production

La dernière diagraphie d'auscultation périodique du puits de production GCO1 réalisée en 2009 confirme la maîtrise du phénomène de corrosion qui avait été observée les dix premières années d'exploitation entre 1982 et 1993, le traitement de fond demeure efficace même si il est à déplorer une très légère tendance à l'incrustation sur la paroi des tubages 7" et 10"3/4. Aucune anomalie n'a été détectée sur la paroi des tubages pouvant mettre en doute son intégrité. Le tableau ci-après donne la moyenne des épaisseurs minimales et maximales des tubages :

TABLEAU 1 : EVOLUTION DES EPAISSEURS DES TUBAGES GCO-1

Tubage	10"3/4	9"5/8	7"
Epaisseur nominale	8,89 mm	8,94 mm	9,19 mm
Disposition et cotes	De 0 à 241,50 m	De 241,5 m à 689 m couvert par le 7" entre 689m et 262m	De 262 m à 1993 m
Longueur (en contact avec le fluide géothermale)	241,50 m	20 m	1731 m
Année de mise en place	2001	1980	1980
Moyenne des épaisseurs minimales au 2 juillet 2009	8.37 mm	5, 89 mm	5,96 mm

Ecart moyenne épaisseurs minimales / sept. 2004	+0,46 mm	+0.39 mm	+0,50 mm
Moyenne des épaisseurs maximales au 2 juillet 2009	10,75 mm	13.07 mm	7,99 mm
Ecart moyenne épaisseurs maximales / 2 mai 2001	+0.67 mm	+1.38 mm	+0,29 mm

3 PROGRAMME D'ABANDON DU Puits GCO-1

SI le puits GCO-1 est abandonné définitivement après que le nouveau doublet aura été mis en service, le programme prévisionnel d'abandon est le suivant :

Les opérations d'abandon comprennent (cf. figure 1) :

- la neutralisation de l'artésianisme du puits par injection de saumure,
- la remontée de la colonne d'exhaure et du groupe électropompe,
- la remontée du tube de traitement de fond de puits,
- le démontage de la tête de puits et la mise en place de l'obturateur de sécurité (BOP),
- la réalisation des diagraphies de calibrage par diamètreur multi palpeurs des tubages 10"3/4, 9"5/8 et 7" sur toute leur hauteur,
- le curage des tubages 10"3/4, 9"5/8 et 7", le cas échéant, au vu du résultat des diagraphies de calibrage,
- la réalisation des diagraphies de contrôle de cimentation par CBL/VDL des tubages 10"3/4, 9"5/8 et 7" sur toute leur hauteur,
- la mise en place d'un bouchon de ciment d'au moins 100 m de hauteur à la base du tubage 7" destiné à l'isolation du découvert, le bouchon étant placé à cheval sur au minimum 50 m de part et d'autre du sabot, soit entre les cotes 1950 m et 2050 m.
- mise en place d'un bouchon d'isolation de 430 m de hauteur positionné ainsi :
 - base du bouchon à 50 m en dessous du mur du Néocomien, soit sensiblement à 1280 m,
 - sommet du bouchon à 50 m au-dessus du toit de l'Albien, soit sensiblement à 850 m.
- la mise en place d'un bouchon de ciment d'au moins 120 m de hauteur isolant le pied de la chambre de pompage et le sommet du tubage 7", soit sensiblement entre 190 m et 310 m de profondeur.
- la mise en place d'un bouchon de ciment d'au moins 50 m de hauteur, en surface entre 5 m et 55 m environ.

- la découpe en fond de cave des tubages 10"3/4 et 13"3/8,
- le remplissage au ciment du tubage 10"3/4 et des annulaires 10"3/4 x 13"3/8 et 13"3/8 x 10"3/4 jusqu'à la découpe du tubage 13"3/8,
- la fourniture et soudage d'une plaque pleine en acier d'épaisseur minimale 20 mm sur le tubage 13"3/8,
- le remblayage de la cave.
- le compactage du remblai de la cave de tête de puits avec mise à niveau à la cote de la dalle béton.

Notas :

1. Selon les résultats des mesures de calibrage des tubages et après concertation avec la DRIEE, les tubages 10"3/4, 9"5/8 et 7" feront l'objet d'un curage hydraulico-mécanique.

Cette opération sera réalisée proposée en tranche conditionnelle.

2. Selon les résultats des CBL et après concertation avec la DRIEE, les cimentations des annulaires seront complétées si nécessaire pour isoler l'aquifère intermédiaire de l'Albien.

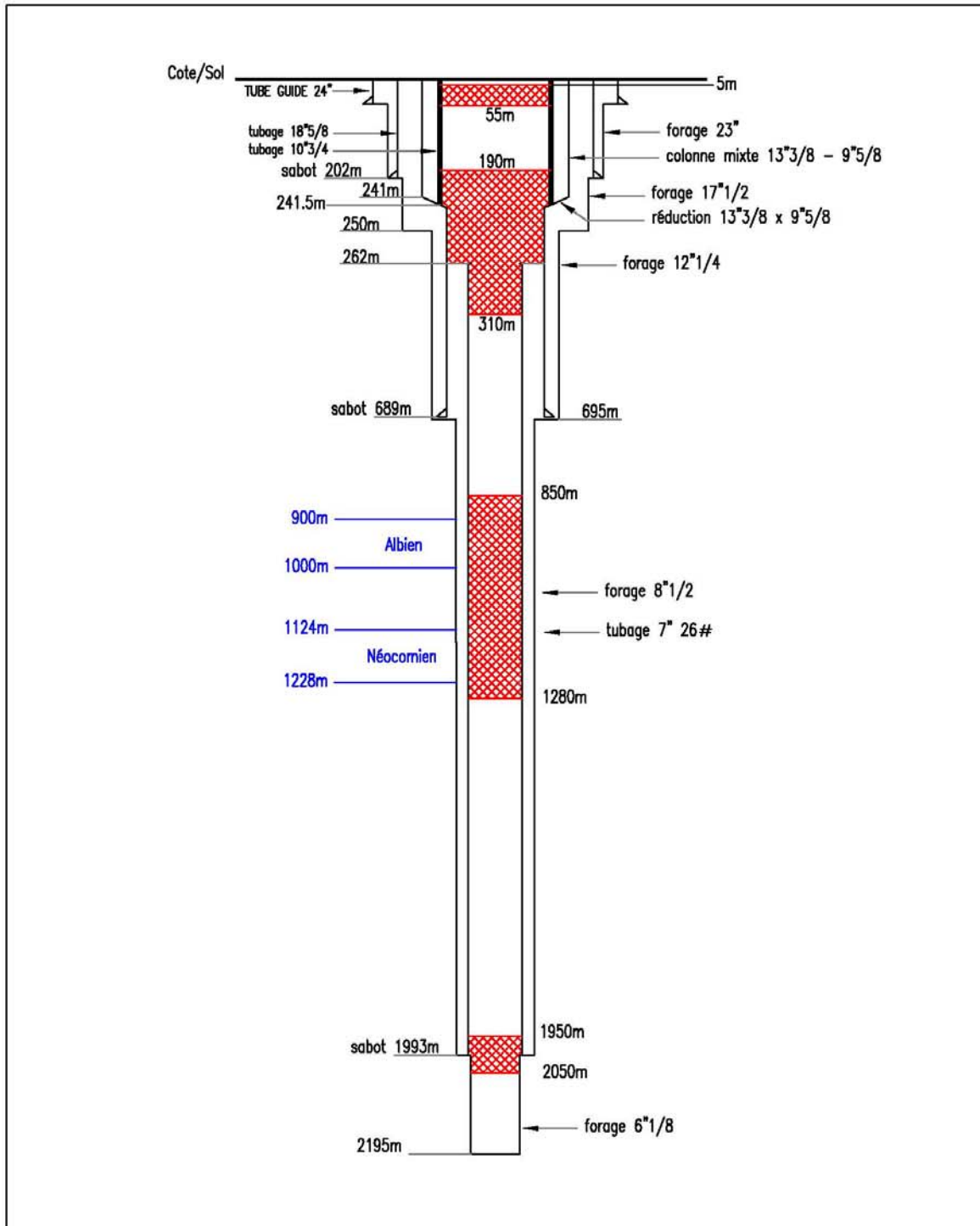
Ces opérations seront proposées en tranche conditionnelle.


Chaque opération comprend deux (2) séries de perforations du tubage (10"3/4, 9"5/8 ou 7"), deux squeeze de ciment ainsi que les diagraphies de contrôle (CBL/VDL).

Le dispositif de perforation (type de charge, nombre de charge au mètre, longueur perforée etc.) sera décrit par le soumissionnaire dans sa note technique.

Un squeeze (esquiche) de ciment sera injecté à travers ces perforations. Il sera utilisé une formulation de laitier de ciment qui sera également décrite dans la note technique.

Figure 1 : Puits GCO-1 Localisation des bouchons d'abandon



	site : COULOMMIERS (GCO1) puits de production : bouchons d'abandon					F	Le :				
						E	Le :				
					D	Le :					
siège social : Avenue Claude Guillemin 45064 ORLEANS Tél : 02 38 64 31 22 - Fax : 02 38 64 32 83					21/12/10	MC.Brel	B.Herbrich			C	Le :
					Date création	Auteur	Vérification	echelle	format	B	Le :
N° PGC 10 047 - bouchons abandon							A	Le : 21/12/10			
ce document est la propriété de cfg services ; reproduction interdite sans autorisation écrite								Mises à jour			

4 PARAMETRES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA TRANSFORMATION DU PUIT

Dans le cas où le puits GCO-1 ne serait pas définitivement abandonné, son utilisation comme puits d'observation doit prendre en compte les contraintes techniques suivantes :

- contraintes liées aux capteurs
- contraintes liées aux prélèvements de fond
- contraintes réglementaires

4.1 CONTRAINTES LIEES AUX CAPTEURS

Différents types de capteurs doivent pouvoir être mis en place dans le puits pour enregistrer la température et la pression dans le réservoir.

Les capteurs peuvent être mis en place :

- de manière permanente avec transmission de l'enregistrement en surface à l'aide d'un câble spécifique ou d'une fibre optique,
- de manière provisoire soit à l'aide d'un câble électrique conducteur permettant de transmettre l'information en temps réel en surface, soit à l'aide d'un câble standard permettant de mettre en place des capteurs à mémoire, l'information étant récupérée lorsque le capteur est remonté en surface.

Le choix du type de capteurs et du type de transmission aura des conséquences sur le choix des éléments constitutifs de la complétion du puits.

Le choix du type de capteurs à mettre en place ne fait pas l'objet de cette étude et sera étudié dans le cadre d'une autre étude.

4.2 CONTRAINTES LIEES AUX PRELEVEMENTS DE FOND

Des prélèvements de fond peuvent être réalisés dans tout puits à l'aide d'un préleveur de fond descendu au câble à la profondeur voulue à condition que la géométrie de l'ouvrage et les équipements de la tête de puits permettent la mise en œuvre de cet outil dont le diamètre est généralement de 1"11/16 (43 mm),

La chambre de prélèvement est mise sous vide avant la descente, l'ouverture et la fermeture de celle-ci est commandée électriquement au travers du câble.

Le volume de l'échantillon ainsi prélevé est de l'ordre de 0.5 à 0.6 litre.

Certaines sociétés de services proposent de descendre plusieurs éléments en tandem de manière à augmenter le volume prélevé en une seule descente.

Pour descendre le préleveur, tous les éléments de production (tube de traitement inhibiteur, groupe de pompage, capteurs pression / température...) doivent être remontés en surface.

4.3 CONTRAINTES LIEES A LA PROTECTION DES AQUIFERES D'EAU POTABLE

Le puits producteur GCO-1 est soumis à une inspection réglementaire de ses tubages tous les cinq ans, consistant à évaluer l'épaisseur résiduelle des tubages et à détecter le cas échéant des indices de percement.

Cette inspection a pour objectif principal de vérifier l'isolation des aquifères d'eau potable que traverse l'ouvrage, notamment l'aquifère stratégique de l'Albien qui dans le cas précis du puits de Coulommiers n'est recouvert que par un seul tubage.

Cette fréquence d'inspection devra être poursuivie jusqu'à l'abandon définitif du puits, ce qui implique de libérer le puits de tout équipement au moins une fois tous les cinq ans.

Toutes identification de percement devra faire l'objet de travaux de réparation afin de garantir l'isolation des aquifères traversés par l'ouvrage et assurer l'intégrité des tubages.

5 SOLUTIONS TECHNIQUES PROPOSEES ET CHIFFRAGE

Plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées pour maintenir le puits GCO-1 comme puits d'observation :

- utilisation du puits en l'état actuel
- rechemisage "définitif" du puits
- rechemisage "provisoire" du puits

Quelle que soit la solution technique retenue, le programme d'abandon définitif du puits devra faire partie intégrante du programme et faire l'objet d'un chiffrage.

5.1 SOLUTION 1 : UTILISATION DU Puits GCO-1 EN L'ETAT

L'utilisation du puits GCO-1 comme puits d'observation dans son état actuel semble être la solution la plus économique.

L'inspection des tubages en 2009 a montré qu'ils étaient en bon état et que les phénomènes d'incrustation / corrosion étaient maîtrisés par le traitement inhibiteur de corrosion.

Dans cette configuration, n'importe quel type de capteur peut être mis en place dans le puits avec un minimum d'aménagement de la tête de puits (sas et presse étoupe seront nécessaires).

Les prélèvements seront également faciles à réaliser.

Toutefois, le puits GCO-1 étant utilisé comme puits d'observation, sans production ni traitement du fluide géothermal, la cinétique de corrosion-dépôt aura un effet néfaste sur les tubages au contact du fluide.

L'espérance de vie du puits dans ces conditions devra être volontairement limitée pour ne pas risquer un percement et les difficultés d'abandon dans ces conditions.

La fréquence des contrôles de diamètre intérieur devra être rapprochée (tous les 3 ans semble un bon compromis).

5.2 SOLUTION 2 : RECHEMISAGE DEFINITIF DU Puits GCO-1

Le bon état apparent des tubages du puits GCO-1 ne présage en rien de l'épaisseur résiduelle de l'acier des tubages et encore moins de l'état extérieur des tubages.

Le rechemisage complet du puits par un tubage 5" neuf assurerait une certaine pérennité de l'ouvrage, environ 20 ans sur la base d'une vitesse de corrosion d'environ 0.5 mm/an et d'une épaisseur originelle d'acier de 10 mm.

Les conditions pour la mesure et l'accès au réservoir pour un prélèvement de fond seraient identiques à l'utilisation du puits en l'état comme décrit ci-dessus.

Dans l'intervalle de 20 ans, il faut prévoir au minimum une opération de curage du puits de manière à :

- éliminer les dépôts qui pourraient compromettre l'utilisation des capteurs et du préleveur de fond.
- avoir un accès à l'état réel interne du tubage 5".

Le contrôle périodique par diagraphies restera une obligation réglementaire.

5.3 SOLUTION 3 : RECHEMISAGE PROVISOIRE DU Puits GCO-1

Afin de s'affranchir de l'état des tubages et de leur évolution dans le temps, une solution serait de mettre en place dans le puits une complétion amovible.

Celle-ci serait constituée :

- d'un packer permanent ancré dans le tubage 7" au-dessus du sabot,

- d'une colonne de complétion composée de tubing 3''1/2 serait ensuite ancrée dans le packer permanent et reliée à la tête de puits, isolant ainsi les tubages actuels du puits du fluide géothermal.

L'espace annulaire entre les tubages du puits et les tubings 3''1/2 serait rempli d'un fluide inhibé comprenant de l'inhibiteur de corrosion, de l'anti oxygène et du bactéricide.

Une description de la complétion est visible sur la figure 2 ci-dessous :

L'avantage de la complétion est de pouvoir extraire et remplacer comme du consommable le tubing 3''1/2 chaque fois que son état de corrosion le nécessite, cette opération pouvant même être programmée de manière systématique à titre préventif à intervalle de temps régulier.

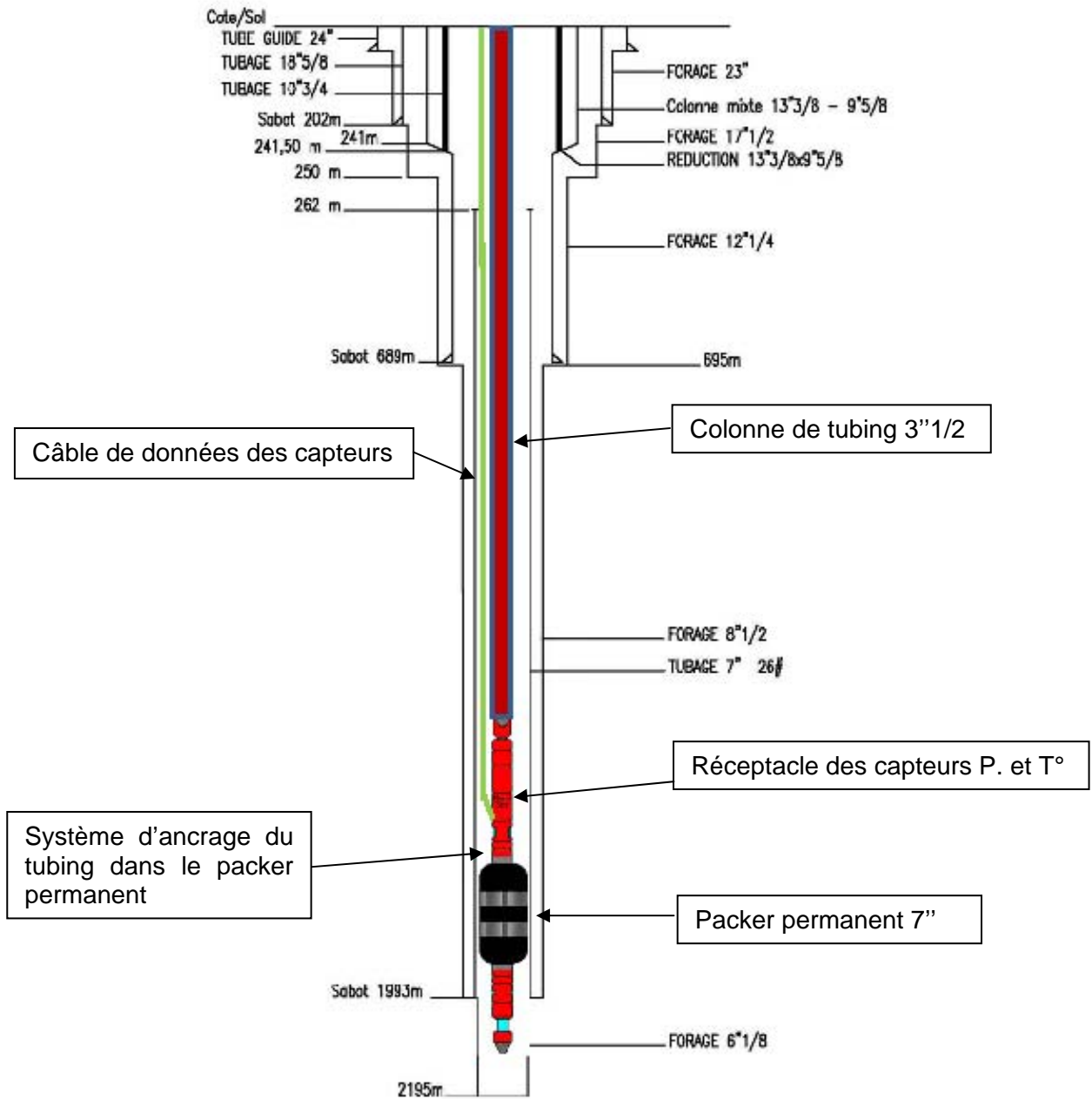
Remarque : l'utilisation d'une complétion en matériau chimiquement inerte au contact du fluide géothermal (fibre de verre) permettrait de s'affranchir de ce remplacement systématique. Cette option n'est pas traitée dans la présente étude.

Comme il n'y a jamais de contact entre les tubages permanents du puits et le fluide géothermal cette solution garantit une durée de vie très longue à l'installation.

Des capteurs permanents de température et de pression peuvent être mis en place dans la colonne de tubings et la mesure transmise en surface par un câble électrique, lui-même connecté à un boîtier permettant la lecture et l'enregistrement des données.

La descente d'un préleveur de fond se ferait à l'intérieur des tubings sans avoir à remonter les capteurs en surface.

Figure 2 : Schéma du puits GCO-1 équipé d'une complétion amovible



5.4 COMPARAISON SYNTHETIQUE DES SOLUTIONS TECHNIQUES

Solution	Mise en œuvre	Niveau de complexité de la mise en œuvre**	Pérennité	Investissement (transformation du puits)	Entretien (contrôles périodiques tous les 5 ans)	Abandon final
Puits en l'état	Immédiate	1	5 ans maximum	380 K€*	23 K€ / 5 ans	250 K€
Rechemisage permanent	4 mois (délai de livraison du tubage)	2	15 à 20 ans	430 / 480 K€	20 K€ / 5 ans	200 K€
Complétion amovible acier	6 mois (délai de livraison du packer tubage)	2	Infinie remplacement périodique du tubing (tous les 10 ans) si	380 / 430 K€	225 K€ / 5 ans	350 K€
Complétion amovible fibre	6 mois (délai d'étude + de livraison du tubage)	3	Infinie remplacement périodique du tubing (tous les 20 ans) si	590 / 640 K€	250 K€ / 5 ans	350 K€

*Ce prix comprend la remontée des équipements de production et le curage des tubages du puits.

**Niveau de complexité : 1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : élevé.

6 PROGRAMME D'ABANDON FUTUR ET CHIFFRAGE

Le programme détaillé de l'abandon futur du puits quelle que soit la solution retenue est décrit au paragraphe 3.

Seul le diamètre des tubages et donc les volumes de ciment à mettre en place changent entre la solution 1 et la solution 2.

Pour la solution 3, la manœuvre montante de la complétion est à prendre en compte ainsi que la destruction par reforage du packer permanent.

La comparaison des coûts d'abandon entre les différentes solutions est synthétisée dans le tableau ci-dessus.

7 CONCLUSION

La conservation de l'ancien puits du doublet de Coulommiers GCO-1 est une opportunité exceptionnelle d'observation en vraie grandeur du comportement thermique et chimique du réservoir.

Depuis la mise en place des systèmes de traitement de la boucle géothermale par injection d'inhibiteurs, l'espérance de vie d'un doublet neuf est largement supérieure à 30 ans.

Pour tirer le meilleur profit scientifique d'une observation à long terme du comportement du doublet, les solutions techniques utilisant une complétion amovible (acier ou fibre de verre) doivent être privilégiées par rapport aux autres solutions (puits en l'état ou rechemisage permanent) dont l'espérance de vie est inférieure à celle d'un doublet neuf.

Annexe 3

Étude de pré faisabilité de mise en place de capteurs de pression et température en fond de forage géothermique de Coulommiers comme puits d'observation

Département Géothermie
3 avenue Claude Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2

Etude de pré faisabilité de mise en place de capteurs de pression et température en fond du forage géothermique GCO-1 de Coulommiers (77) considéré en tant que puits d'observation du Dogger

Rapport d'étude
Affaire n° PGC 11 095

Janvier 2012
Rapport n° 11 CFG 70

QUALITE

N° affaire : PGC 11 095

N° rapport : 11 CFG 70

Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Evrard Mathilde 	Giovanni Scalisi 	Eric Lasne 

REVISION

Indice	Date	Chapitre	Modification
A	27/01/2012	-	Première version
B			

CLIENT

Virginie HAM / Olivier GOYENECHÉ
BRGM - Département Géothermie
3 avenue Claude Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans cedex 2

Diffusion

Virginie HAM (BRGM)

Olivier GOYENECHÉ (BRGM)

Sommaire

1	RAPPEL DU CONTEXTE	4
2	CONTRAINTES APPLIQUEES AU DISPOSITIF DE MESURE DE PRESSION ET DE TEMPERATURE	5
3	CARACTERISTIQUES ATTENDUES DES CAPTEURS DE PRESSION ET TEMPERATURE	6
4	TECHNOLOGIES DE CAPTEURS DE PRESSION ET DE TEMPERATURE PROPOSEES	6
4.1	Capteur de température	6
4.2	Capteur de pression	7
5	RESULTATS DES CONSULTATIONS D'ENTREPRISES	8
5.1	Bilan des consultations	8
5.2	Proposition de Solexperts	9
5.3	Proposition de Weatherford	10
6	CONCLUSION	10
7	ANNEXES	11

Liste des Annexes

Annexe 1 : Coupe technique et géologique du puits de production de Coulommiers (GCO1)	11
Annexe 2 : Coupe technique du puits de production de Coulommiers (GCO1) en cas de rechemisage en 5"	12
Annexe 3 : Offre de Solexperts.....	13
Annexe 4 : Offre de Weatherford.....	15

1 RAPPEL DU CONTEXTE

Le département Géothermie du BRGM a sollicité CFG Services dans le cadre de l'offre technique et financière n° PGC 11 095 pour réaliser une étude de préféabilité pour équiper le fonds de puits GCO-1 de Coulommiers en capteurs de pression et de température.

En effet, le département Géothermie du BRGM souhaite utiliser ce puits géothermique comme puits d'observation permettant sur un site en exploitation :

- l'accès à des mesures de pression et température au niveau du réservoir,
- la réalisation de prélèvement de fluide géothermique en fond de puits pour le suivi géochimique des eaux du Dogger,
- l'étude des impacts environnementaux des produits inhibiteurs de corrosion.

Cette étude concerne uniquement la recherche d'un dispositif de mesure de pression et température en fond de puits géothermiques. Les données enregistrées en continu à partir de ce dispositif devront permettre de contribuer à une meilleure modélisation du réservoir du Dogger. L'objectif est de mettre en œuvre un dispositif d'une durabilité suffisante (3 à 5 ans) au regard des contraintes thermiques, physiques et chimiques qui caractérisent les fonds de puits géothermiques exploitant le Dogger.

L'étude est découpée en quatre phases :

1. Définition des contraintes liées à la mise en place d'un dispositif de mesure en fond de puits dans les puits géothermiques profonds du Dogger et notamment celui de Coulommiers GCO-1.
2. Recensement des différentes technologies et fournisseurs de dispositifs de mesure de pression et température en fond de puits.
3. Elaboration d'un cahier des charges, consultations d'entreprises et analyse des offres.
4. Description du dispositif retenu et possibilité de mise en œuvre en association avec un tube d'injection d'inhibiteur de corrosion et de dépôt en fond de puits. Chiffrage du coût de mise en œuvre sur le forage GCO-2 de Coulommiers et sur les puits producteurs équipés de pompes immergées.

2 CONTRAINTES APPLIQUEES AU DISPOSITIF DE MESURE DE PRESSION ET DE TEMPERATURE

Le dispositif de mesure de pression et de température est destiné à être immergé en fond de puits géothermiques profonds au Dogger pendant une durée minimale de 3 à 5 ans. Les conditions observées en fond de puits dans la boucle géothermale exploitée à Coulommiers au Dogger sont :

- Pression en tête de puits : 1,0 bar \pm 0,3 bars en fonction de l'influence des doublets voisins
- Pression au sabot du puits de Coulommiers : 197 – 200 bar
- Température en fond de puits de Coulommiers : 85°C
- Profondeur du sabot du puits : 1 993 m
- Nature du fluide géothermal : Les eaux de l'aquifère du Dogger, exploitées par les doublets géothermiques de la région parisienne, présentent une minéralisation élevée et contiennent des gaz dissous, parmi lesquels l'hydrogène sulfuré (H₂S) et le gaz carbonique (CO₂). La température de l'eau géothermale et ses caractéristiques chimiques et microbiologiques font que cette eau induit des risques élevées de corrosion de l'acier au carbone.

Les observations faites en tête de puits de Coulommiers sont :

- pH de 5,9 à 6,6
- Eh de – 390 à – 210 mV
- Teneur en H₂S ; HS⁻ de 0,10 à 18,00 mg/l
- Teneur en CO₂ ou HCO₃⁻ de 120 à 290 mg/l
- Absence d'oxygène en fonctionnement normal
- Présence de bactéries sulfurogènes (BSR et BTR)

La coupe géologique et technique du puits de production de Coulommiers est donnée en Annexe 1.

Le puits GCO-1 est destiné à être converti en un puits d'observation donc le débit géothermal débité sera nul. Probablement avant la pose des capteurs, ce puits sera soit intégralement rechemisé en 5'' (Cf. coupe technique prévisionnelle en Annexe 2) soit équipé d'un packer d'étanchéité en fond de puits.

3 CARACTERISTIQUES ATTENDUES DES CAPTEURS DE PRESSION ET TEMPERATURE

Les spécifications suivantes ont été demandées aux fournisseurs de capteurs :

- Les capteurs restent à demeure au sabot du puits à une profondeur de 1 993 m
- Diamètre externe des capteurs : < 100 mm (en cas de rechemisage en 5", le diamètre interne du puits est de 10,86 cm)
- Précision sur la mesure de température: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- Plage de mesure de température : 0-100°C
- Précision sur la mesure de débit : ± 0.2 bar
- Plage de mesure de pression : 0-250 bar
- Durée de vie des équipements: 3 à 5 ans minimum

4 TECHNOLOGIES DE CAPTEURS DE PRESSION ET DE TEMPERATURE PROPOSEES

Différents types de capteurs existent pour enregistrer la température et la pression d'un gisement géothermique.

Les capteurs peuvent être mis en place :

- de manière permanente avec transmission de l'enregistrement en surface à l'aide d'un câble spécifique ou d'une fibre optique,
- de manière provisoire soit à l'aide d'un câble électrique conducteur permettant de transmettre l'information en temps réel en surface, soit à l'aide d'un câble standard permettant de mettre en place des capteurs à mémoire, l'information étant récupérée lorsque le capteur est remonté en surface.

4.1 CAPTEUR DE TEMPERATURE

Pour les applications en géothermie, la technologie de thermométrie par résistance de platine est privilégiée pour la mesure de température car elle offre une plus grande précision et stabilité que les thermocouples.

La mesure de la température par sonde à résistance est basée sur le fait qu'un conducteur électrique traversé par un courant électrique présente une résistance. Cette résistance est fonction de sa température. La résistance du conducteur croît avec la température ; cette variation est parfaitement réversible. La relation décrivant la sortie d'une sonde à résistance de platine en fonction de la température s'établit en fonction de la loi suivante pour des températures comprises entre 0°C et 850°C:

$$R_T = R_0 \left[1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} t - 5,775 \cdot 10^{-7} t^2 \right] \text{ où } R_0 \text{ est la résistance à } 0^{\circ}\text{C}.$$

L'échelle internationale de température (EIT) donne directement des tables de correspondance température/résistance établies à partir des relations citées ci-dessus.

Compte-tenu de la longueur de câble électrique nécessaire pour descendre au sabot du puits, Solexperts recommande l'utilisation d'une sonde PT 1000. Les lettres PT signifient platine et les chiffres 1000 correspondent à la valeur de la résistance à 0°C.

4.2 CAPTEUR DE PRESSION

Un capteur de pression hydrostatique immergé permettrait de suivre l'évolution de pression au sein du réservoir géothermique. La pression appliquée sur le capteur provoque la déformation de la membrane dont le déplacement est transmis à l'élément sensible du capteur par un bras de transmission (Cf. Figure 1).

Sur l'élément sensible métallique, sont pulvérisées des jauges de contrainte qui, montées en pont de Wheatstone¹ délivrent un signal électrique proportionnel à la pression appliquée sur la membrane.

Pour les applications aux fluides géothermaux, la membrane métallique, organe clé du capteur, est constituée de métaux nobles (HASTELLOY, MONEL, INCONEL 625).

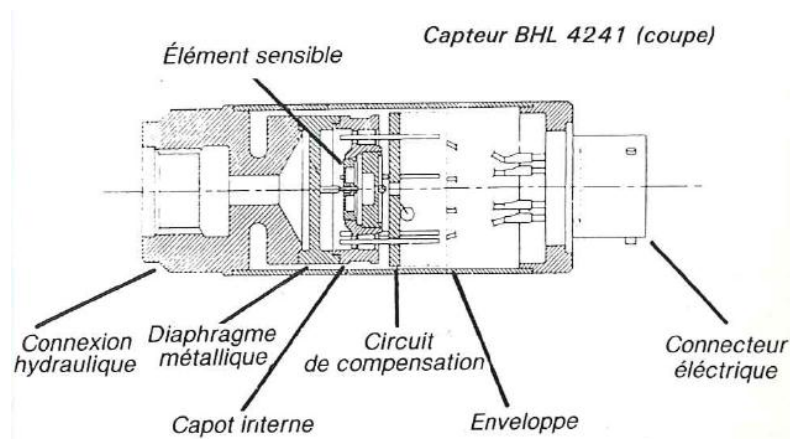


Figure 1 : Capteur de pression (TransInstruments)

¹ Le pont de Wheatstone est constitué de quatre résistances (jauge de contraintes) disposées en quadrilatère. Le pont est un moyen très précis pour mesurer des résistances.

5 RESULTATS DES CONSULTATIONS D'ENTREPRISES

5.1 BILAN DES CONSULTATIONS

Entre Novembre 2011 et Janvier 2012, CFG Services a consulté 11 sociétés sur la base du cahier des charges fonctionnel décrit ci-dessus, à savoir :

- Geoservices
- Groupe C.M.R.
- GTC Kappelmeyer GmbH
- Halliburton – Pinnacle
- Iris Instruments
- Merinox
- Pyro-systèmes
- Schlumberger
- Solexperts
- Weatherford
- Wimesures

Au 20 Janvier 2012, seules les sociétés Solexperts et Weatherford ont fait une offre de prix. Solexperts recommande la mise en place d'un capteur de pression hydrostatique et un capteur de température montés directement sur la tête d'injection de traitement inhibiteur de corrosion et de dépôt. Weatherford propose d'embarquer l'électronique dans une complétion munie d'un packer mise dans place dans le puits de Coulommiers avec des tubes 3-1/2".

Malgré leur faible taux de réactivité, Pinnacle et Schlumberger auraient des équipements intéressants qui sont respectivement la fibre optique et WellWatcher Quartz.

Le faible taux de réponse des sociétés est dû aux raisons suivantes :

- la société ne propose pas de solution économiquement avantageuse (GTC Kappelmeyer GmbH),
- la société ne possède pas les compétences ni les moyens techniques pour répondre au cahier des charges (Iris Instruments, Pyro-systèmes, Wimesures,
- la société ne semble pas être intéressée par le projet et ne répond pas aux relances (Geoservices, Groupe C.M.R., Merinox),
- la société a un délai de réponse extrêmement long (Halliburton-Pinnacle et Schlumberger) mais CFG Services espère quand même avoir un retour.

5.2 PROPOSITION DE SOLEXPERTS

Solexperts propose de concevoir une nouvelle ligne d'injection de produit inhibiteur de corrosion qui intégrerait directement l'instrumentation. Le capteur de pression et le capteur de température seraient montés dans la tête d'injection tandis que les câbles électriques seraient protégés dans l'enrobage du nouveau TCTFP (Cf. Figure 2).

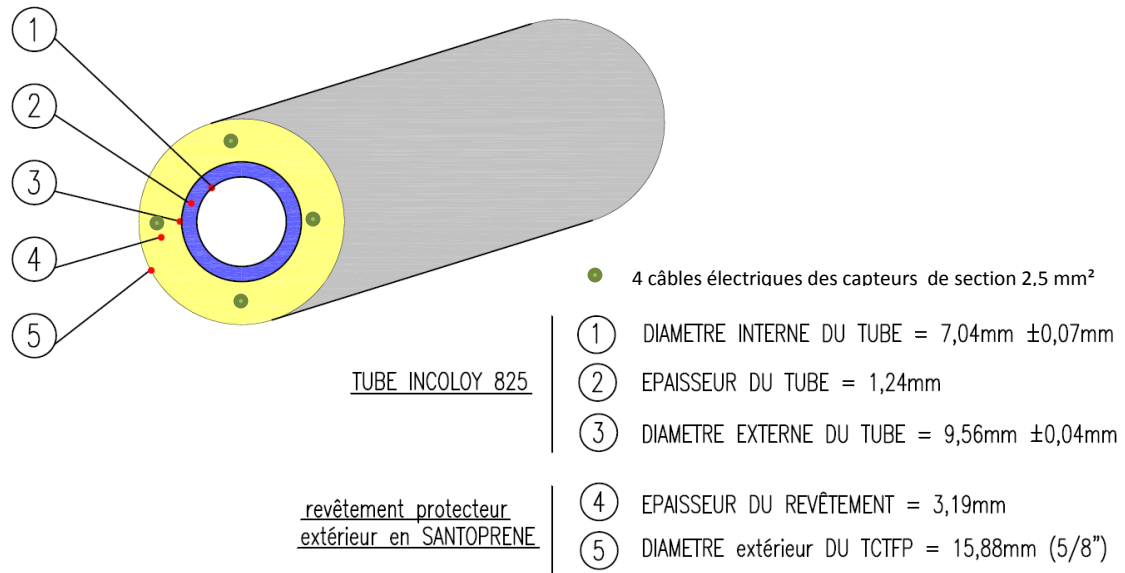


Figure 2 : Schéma de principe de l'enrobage des câbles électriques des capteurs dans le santoprène du TCTFP

Le capteur de pression de type hydrostatique aurait une gamme de mesure 0-300 bar avec une précision de 0,01% sur toute l'échelle (FS=Full Scale). Le capteur de température serait une sonde PT 1000.

Les données enregistrées dans un logger en surface seraient transmises par système GPRS à un ordinateur équipé du logiciel Data Transfer WebDavis.

L'offre de Solexperts fournie en Annexe 3 s'élève à 48 k€ sans la fourniture du TCTFP par une société américaine qui pourrait être estimée entre 30 et 40 k€.

Afin de garantir l'intégrité des puits GCO-1 qui resterait en eau, cette solution nécessiterait au préalable de mettre en œuvre une diagraphie, un nettoyage-curage et rechemisage du tube 7" en 5" (Cf. Annexe 2) dont le coût s'élèverait à 500 k€.

5.3 PROPOSITION DE WEATHERFORD

Weatherford propose d'intégrer les capteurs de pression et température dans une complétion. La complétion serait équipée d'un packer d'étanchéité au sabot du tubage 7". Le Dogger serait isolé du reste du puits. La complétion serait descendue par des tubes 3-1/2" et laissée à demeure dans le puits.

Les mesures de pression et de température sont réalisées au cœur du réservoir, et les informations seraient relayées en surface par un câblage. Le reste du puits isolé du Dogger par la complétion devra être protégé de la corrosion et conditionné par une solution de saumure dans laquelle un réducteur d'oxygène O₂ tel que le bisulfite de sodium (produit commercial MEXEL LS14), un inhibiteur de corrosion (SOLAMINE 129 ou NORUST 491) et un bactéricide (BACTIREP 3902) seraient ajoutés.

Avant la mise en place de l'équipement avec le packer, il serait nécessaire de vérifier l'intégrité du tubage 7" par une diagraphie précédée d'un curage-nettoyage. Le coût est estimé à environ 150 k€.

L'offre de Weatherford fournie en Annexe 4 s'élève à 91 k€.

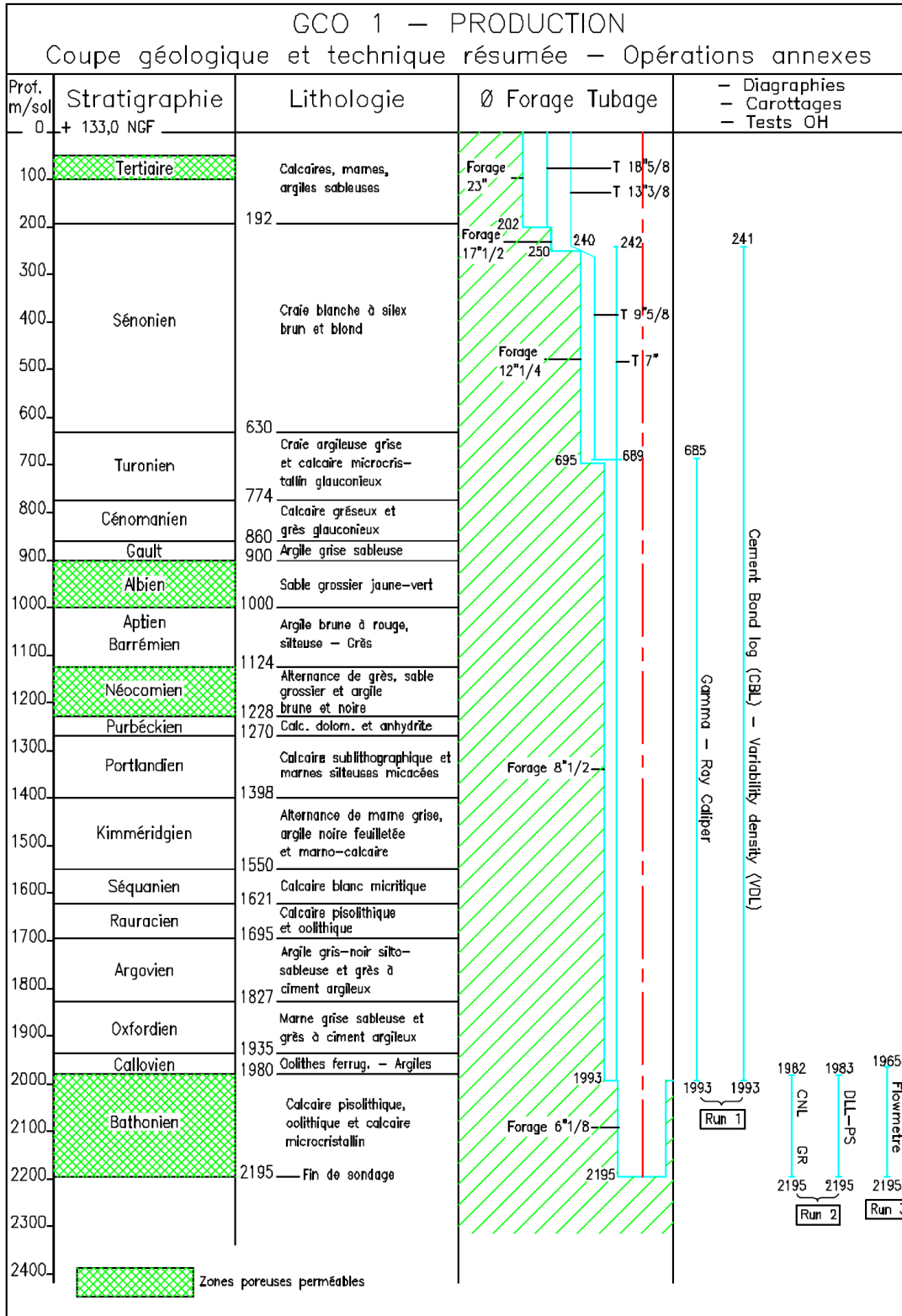
6 CONCLUSION

D'après cette première étude de faisabilité, le puits de Coulommiers GCO1 peut être converti en puits d'observation et être équipé de capteurs de pression et de température en fond de puits. Les solutions envisageables sont les suivantes :

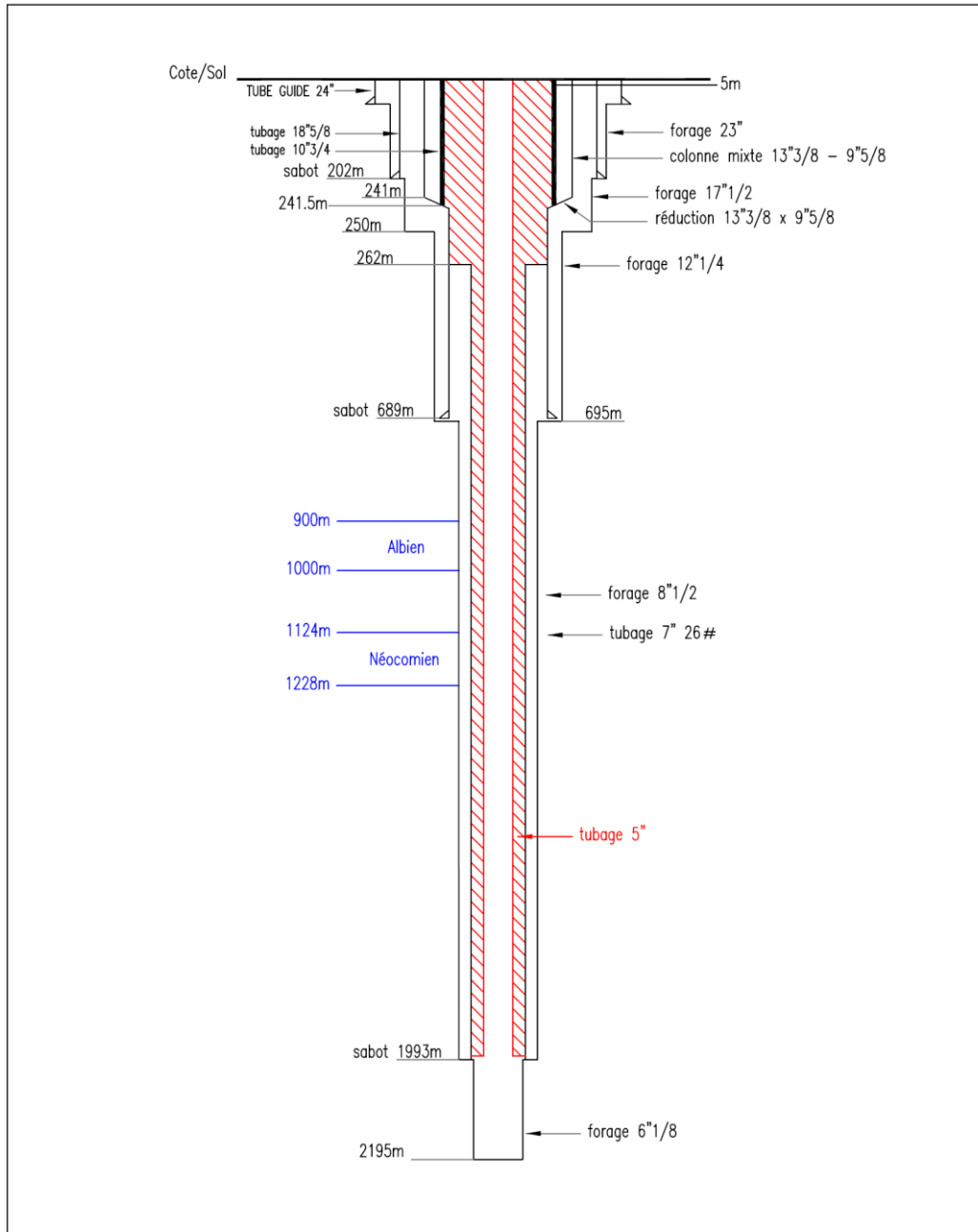
1. Modifier un TCTFP et sa barre de charge et encapsuler le capteur de pression hydrostatique et une sonde de température PT 1000. Le puits resterait en eau donc il serait nécessaire au préalable de faire un curage hydraulico-mécanique, une diagraphie et un rechemisage en 5" – 18 lbs. Le coût de l'installation et des capteurs s'élève à environ 68-78 k€ selon l'offre de Solexperts et la réhabilitation du puits à environ 500 k€. L'avantage de cette méthode, est qu'elle serait applicable à d'autres puits.
2. Une complétion 3-1/2" munie des capteurs de pression et de température ainsi que d'un packer d'étanchéité est descendue en fond de puits. La colonne du puits est isolée du Dogger et protégée par un mélange spécifique saumure/bactéricide/ produit anticorrosion/ agent réducteur. Avant de descendre l'équipe, un curage hydraulico-mécanique et une diagraphie seraient nécessaires pour vérifier, entre autre, l'intégrité du tubage 7" au niveau de l'emplacement du packer. Le coût de l'installation et de la complétion s'élève à environ 91 k€ selon l'offre de Weatherford tandis que la préparation du puits s'élève à 150 k€. Cette méthode ne serait pas applicable à d'autres puits en production mais, si le tubage 7" est intègre et permet de fixer le packer de manière étanche, elle ne nécessiterait pas de rechemisage.



7 ANNEXES

Annexe 1 : Coupe technique et géologique du puits de production de Coulommiers (GCO1)



Annexe 2 : Coupe technique du puits de production de Coulommiers (GCO1) en cas de rechemisage en 5''



	site : COULOMMIERS (GCO1)				F	Le :	
	puits de production : option rechemisage 5"				E	Le :	
siège social : Avenue Claude Guillemin 45064 ORLEANS Tél : 02 38 64 31 22 - Fax : 02 38 64 32 83	16/01/12	MC.Brel	B.Herbrich		D	Le :	
	Date création	Auteur	Vérification		echelle	format	C
	N° PGC 10 047 - rechemisage				A	Le : 16/01/12	
ce document est la propriété de cfg services ; reproduction interdite sans autorisation écrite					Mises à jour		

Annexe 3 : Offre de Solexperts



Solexperts France SARL
Immeuble Escorial, 17, av. de la Forêt de Haye
54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France
Tél. +33 (0) 9 75 60 96 79, Fax +33 (0) 3 83 94 03 58
info@solexperts.fr, www.solexperts.com

CFG
Attention Mme Evrard
Av. Claude Guillemin
45064 Orleans

Nancy, le 17 janvier 2011
mp

OFFRE NO. 09409

Fourniture et pose d'un TCTFP équipé d'un capteur pression/température sur le forage GCO-1 de Coulommiers

1. Equipement				Euro	Euro
1.1	Design, préparation et test équipement	u	1	10 727,00	10 727,00
1.2	Fourniture équipement comprenant :				
1.2.1	Control line composée d'un tube d'injection de fluide inhibiteur de corrosion et d'un câble pour capteur pression/température encapsulés dans une gaine de protection	u	1	Demande de prix en cours	Demande de prix en cours
1.2.2	Tête d'injection de fluide inhibiteur de corrosion	u	1	7 800,00	7 800,00
1.2.3	Capteur de pression hydrostatique 0-300 bar, précision : 0,01%FS monté sur tête d'injection de fluide inhibiteur de corrosion	u	1	2 400,00	2 400,00
1.2.4	Treuil de manutention des équipements	u	1	7 100,00	7 100,00
1.2.5	Logger type GPRS avec transfert de données automatique	u	1	2 580,00	2 580,00
1.3	Data transtert WebDavis	an	3	1 440,00	4 320,00
2. Mise en place					
2.1	Réunion de préparation avec CFG	u	1	1 000,00	1 000,00
2.2	Mobilisation sur site installation, 2 opérateurs	u	1	7 460,00	7 460,00
2.3	Installation en forage à 2000 m de profondeur	u	1	4 600,00	4 600,00
TOTAL Hors taxes					47 987,00

Conditions générales

1. Sans autre condition, l'offre est valable 90 jours.
2. Les prix nets en Euro sont payables dans les 30 jours à dater de la facture. Matériel 40% à la commande, reste à la livraison
3. Délais de livraison: de l'ordre de 16 semaines, à préciser lors de la commande, selon disponibilité
4. Aucune retenue de garantie n'est prévue.
5. Solexperts décline toute responsabilité en cas de dégâts induits par les instruments utilisés.
6. L'assurance des équipements est à la charge du client à partir de la livraison, durant la location
7. Un contrôle du bon état du matériel doit être réalisé à la réception. Les dégâts éventuels sont à



Solexperts France SARL
Immeuble Escurial, 17, av. de la Forêt de Haye
54500 Vandœuvre-lès-Nancy, France
Tél. +33 (0) 9 75 60 96 79, Fax +33 (0) 3 83 94 03 58
info@solexperts.fr, www.solexperts.com

signaler par écrit sous 5 jours ouvrés. Le cas échéant, toute réclamation sera refusée.


Conditions particulières

8. Les éventuelles autorisations d'accès au site seront fournies à Solexperts France par CFG
9. Le forage doit être accessible à un véhicule lourd. L'eau et l'électricité seront disponibles gratuitement sur la plateforme de forage/le site.
10. Notre offre considère que la control line équipée de sa tête d'injection passe à travers le tube de retenue du TCTFP en tête de puits, elle n'intègre pas le démontage de la tête de puits et la fourniture de moyens de levage
11. Les caractéristiques techniques du forage (coupe technique du forage, de la tête de puits, diamètre interne minimum des équipements de tête de puits, plan de la tête d'injection, ...) seront fournies à Solexperts France au moment de la commande
12. Notre offre considère que le forage n'est pas artésien au moment de la mise en place des équipements
13. Notre offre n'intègre pas le raccordement du tube injecteur de fluide inhibiteur de corrosion en surface, ni la fourniture et la pose de la plaque d'ancrage du TCTFP (charge CFG)

Solexperts France sarl

Médéric Piedevache

Annexe 4 : Offre de Weatherford

		Completion & Production Systems			
		<table border="1"> <tr> <td>COUNTRY</td> </tr> <tr> <td>France</td> </tr> </table>			COUNTRY
COUNTRY					
France					
Attn: Mr. Arnaud Fisseau CFG Services		Date: 28-10-2011			
Budgetary Proposal		Quote Number GmbH4609			
Item No.	Qty.	Product Number	Description	Unit Price Euro	Total Price Euro
			<u>Downhole Monitoring Equipment</u>		
			Conformed of:		
			Sales Equipment	68.000,00	68.000,00
			Gauge Mandrel 3-1/2" EUE Inside 7" 26# Casing mPod2+ gauge: Pressure and Temperature Measurement Downhole Cable 1980 meters Downhole Cable Drum and Junction Box Inc 825 Tubing Hanger Fittings & Cable Bend Protection Well Head Outlet & Flange 3-1/2" Cross Couplings Protectors Armoured Surface Cable Surface Instrumentation		
			Rental Equipment		
			Installation Running Package for Monitoring Sytem	Operational 850,00 Standby 520,00	
			Pneumatic Optical Spooling Unit	Operational 350,00 Standby 200,00	
			Monitoring Run in Hole Box	Operational 300,00 Standby 175,00	
			Personnel		
			Specialist Lead Engineer	Operational 1.350,00 Standby 1.000,00	
			Installation Engineer	Operational 1.250,00 Standby 950,00	
			Data Acquisition Engineer	Operational 1.350,00 Standby 1.000,00	
			Project Management Fee	Per Well 5.450,00	
			Level 2 Certification	2.850,00	

Item No.	Qty.	Product Number	Description	Unit Price Euro	Total Price Euro
<u>Completion Equipment</u>					
	1	173861-TW	Weatherford Locator Seal Assembly Size 3-1/2" Tubing x 4.00" w/ 5.2" Max OD, 3.00" min. ID w/ 1 x HNBR Bonded Seal Unit w/ material L80 w/ 3-1/2" 9.3# EUE Box up x half mule shoe down	5.400,00	5.400,00
	1	762924-TW	Weatherford UltraPak Permanent Sealbore Packer Size 7" 23-32# x 4.00" w/ 5.875" max.OD, 4.00" Min ID w/ material L-80 w/ 80hd HNBR Element w/ 7000 PSI pressure rated w/ 3-1/2 9.3# Box down x LH Square Box up	11.000,00	11.000,00
	1	1724586	Weatherford WX Selective Landing Nipple Size 3-1/2" x 2.813" X-profile w/ max. OD: 4.50", min ID: 2.813" w/ material L-80 w/ 3-1/2" 9.3# EUE Box x Pin	2.500,00	2.500,00
	1	1724582	Weatherford WXN Nogo Landing Nipple Size 3-1/2" x 2.813" XN-profile w/ max. OD: 4.50", min ID: 2.66" w/ material L-80 w/ 3-1/2" 9.3# EUE Box x Pin	2.800,00	2.800,00
	1	817821	Wireline Entry Guide Size 3-1/2" w/ max. OD: 4.50", min ID: 2.99" w/ material L-80 w/ 3-1/2" 9.3# EUE Box x Pin	980,00	980,00
Completion Equipment Setting Tools Rental					
Weatherford AH Setting Tool Size 2-7/8" w/ 3-1/2 IF Box Up				Job Charge Daily Rental	725,00 75,00
Weatherford Bumper Sub Size 3-1/2" w/ 3-1/2" IF Box x Pin				Job Charge Daily Rental	625,00 65,00
Completion Fiel Engineer				Daily Charge	1.050,00
Total ex-works for sales items, manufacturing plants US and UK					90.680,00
All transportation Cost at price + 10%					
Total Amount ex works Langenhagen					TBA

WEATHERFORD OIL TOOL GMBH **GENERAL TERMS AND CONDITIONS**

1. PRICES

All list prices stated are subject to change without notice. Prices stated in quotations are firm only for sixty days. After acceptance of an order price changes are only possible to the extent that WEATHERFORD generally increases the prices for the respective product.

2. TAXES – FEES

Any taxes based on or measured by the charges of collections for products sold or rented or services performed as well as any fees for legalization of documents required, will be added to the stated prices.

3. PAYMENT

WEATHERFORD maintains ownership of material and services delivered until payment has been received. The agreed remuneration shall be due as soon as WEATHERFORD confirms the order and shall be payable without deductions within 30 days after placing the invoice. The customer defaults at latest 30 days after receipt of the invoice. In case of customer's default of payment, WEATHERFORD is entitled to invoice interest of 8% above the base rate of the European Central Bank. The customer may only clear his payments with claims, which are undisputed and which have been stated in a legally valid way.

4. ACCEPTANCE

All orders are subject to acceptance by WEATHERFORD.

5. CANCELLATION

Cancellation of any orders require the prior consent by WEATHERFORD. WEATHERFORD reserves the right to agree to a cancellation only if the customer reimburses WEATHERFORD for certain costs already incurred for the particular order, like e.g. packing, export preparation, etc. Non-standard items, especially manufactured on order, cannot be cancelled after manufacturing has been started. For return shipment, i.e. any shipment that has already left the point of delivery, WEATHERFORD will credit 75% of net material value per applicable price list or quotation at the time of purchase, provided the material is found to be in salable condition upon WEATHERFORD's inspection after return free of any charges to the initial point of delivery or a point agreed to by WEATHERFORD.

6. DELIVERY

Delivery will be made at prices indicated only as per conditions stated on the respective price list or quotation.

7. DELIVERY TIME

In the absence of any other written agreements, the performance deadlines indicated by WEATHERFORD are not binding. WEATHERFORD cannot be held responsible for delays caused by circumstances beyond its control and/or that WEATHERFORD is not responsible for. WEATHERFORD stocks sizes and types of equipment as deems necessary. Listing of any type or size of equipment in price lists does not obligate WEATHERFORD to keep these in stock.

8. RISKS

WEATHERFORD is relieved of all risks that occur from the time the delivery of material or equipment is made as per conditions of the applicable price list or quotation.

9. WARRANTY

WEATHERFORD warrants for defects of its deliveries or services by way of free rectifying or, in the choice of WEATHERFORD, by way of free subsequent delivery. In case there is an unreasonable delay in the subsequent rectifying or subsequent delivery or if several trials have remained unsuccessful, the customer has the right to reduce the remuneration or to rescind the contract. Any claims of the customer due to defects of deliveries or services of WEATHERFORD become timebarred within one year.

10. LIABILITY

Contractual or non-contractual compensation claims of the customer that are no cases of damage to life, body and health are excluded, if the damage has not been caused by intent or gross negligence or if an integral part of the contract has been violated at least in a negligent way. In case of a liability of WEATHERFORD, the compensation is limited to the predictable damage usually arising in connection with such orders.

11. CHANGE OF DESIGN

WEATHERFORD reserves the right to change the design of any piece of equipment without prior notice and without obligation to furnish these changes on equipment sold previously.

12. CHANGE OF TERMS

No change of the terms and conditions set forth herein shall be binding on WEATHERFORD OIL TOOL GMBH unless made in writing and signed by an officer of WEATHERFORD OIL TOOL GMBH.

13. GOVERNING LAW AND JURISDICTION

German law is applicable exclusively. The application of the UN Sales Act is excluded. Place of jurisdiction is Hannover, Germany.

TERMS AND CONDITIONS

Products of Other Manufacture

We make NO warranty with regard to Products which are not manufactured by any division of Weatherford. The only warranty which attaches to such Products is that warranty, if any, of the manufacturer of such Products. Please contact our Customer Service Department if you have questions as to whether particular Products are covered by our warranty or are separately warranted by their manufacturers.

This Quotation is not valid for shipments made to destinations such as Iran, Sudan, North Korea and Cuba or other countries which require export licenses from the U.S. Department of Treasury and/or the U.S. Department of Commerce unless verification of valid export licenses can be provided. Terms of all sales by Weatherford-Completions & Oilfield Services shall comply fully with and shall not result in loss of benefits under applicable U.S. laws. Any quotation or tender terms to the contrary are hereby rejected.

PRODUCT TRACEABILITY

**UNLESS OTHERWISE NOTIFIED LEVEL 2 PRODUCT TRACEABILITY WILL BE SUPPLIED.
PLEASE SEE BELOW PRODUCT TRACEABILITY OPTIONS.**

LEVEL 1

No traceability verification will be performed on components at this level. It must clearly understand that, for this level, the intent is to provide conforming product promptly without additional research and cost. Careful attention must be given to Level I product when transferring to locations other than the original destination.

COST FOR LEVEL 1: NO CHARGE IF SPECIFIED AT TIME OF RECEIVING ORDER.

LEVEL 2

Level II requires that the components be marked according to defined marking procedures which allow for the raw material of the component to be identified by the marked numbers. The information (traceability records) that facilitated tracing these components to their raw materials is maintained (in-house). Work Order numbers and part numbers are recorded prior to assembly and for future reference. A Certificate of Compliance is issued with this level, and no trace documents will be issued to applicable order.

COST FOR LEVEL 2: NO CHARGE IF SPECIFIED AT TIME OF RECEIVING ORDER.

LEVEL 3

Level III trace consists of a Traceability Data Matrix (TDM) that lists traceable components. The matrix and a Certificate of Compliance (COC) are generated and become a document package that is sent with the order. Work Order numbers and part numbers are also recorded on the assembly work order prior to assembly and for future reference. No Material Test Reports (MTRs) are sent with this trace level.

COST FOR LEVEL 3: 1% OF ORDER VALUE

LEVEL 4

Level IV trace meets Level III requirements and consists of a traceability package (TDM) containing a Quality Matrix, applicable test reports, COC and associated MTRs. Where no traceability is required for some components, N/A will be indicated on the matrix.

COST FOR LEVEL 4: 2% OF ORDER VALUE

LEVEL 5

Level V trace meets Level IV requirements as a minimum along with specified special requirements detailed in the Special Requirements Checklist. Any special requirements are noted in the original quotation/tender and understood prior to order entry. (Special requirements such as NDT, 3rd Party Inspection).

COST FOR LEVEL 5: 3% OF ORDER VALUE

Delivery time : 22 weeks ex works manufacturing plants US, Uk - after receipt of written order

Delivery terms : Ex works Langenhagen Germany - all delivery charges will be re-charged to you at costs + 10%

Validity : Prices quoted are based on quantities specified and are firm for 30 days from the date shown

Payment Terms : 30 Days Net

Currency : Euro


For and on behalf of Weatherford Completion & Production Systems

Santiago Aldaz


Weatherford Oil Tool GmbH
Completion & Production Systems
Münchner Straße 54
30855 Langenhagen
Phone: +49 - 511 - 7702-376
Fax: +49 - 511 - 7702-344
E-Mail: santiago.aldaz@eu.weatherford.com

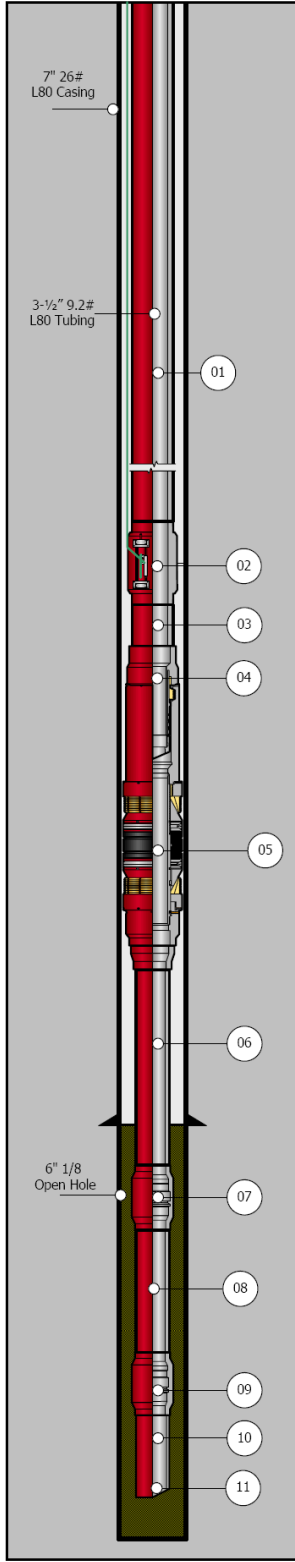
All orders should be addressed to the District Office:

Weatherford Oil Tool GmbH
Completion & Production Systems
Münchner Straße 54
30855 Langenhagen
Germany
Tel: +49-511-7702-374
Fax: +49-511-7702-344



Downhole Monitoring Completion GCO-1





7" 26# L80 Casing

3-1/2" 9.2# L80 Tubing

6" 1/8 Open Hole

WFT REPRESENTATIVE	CUSTOMER REPRESENTATIVE	COMPANY
Santiago Aldaz	Arnaud Fisseau	GCO-1
REFERENCE	WELL	DATE
-	GCO-1	27October11

ITEM	DESCRIPTION
01	Tubing 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
02	Weatherford Electronic Gauge Mandrel and Gauge
03	Pup Joint 4 Ft 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
04	Locator Seal Assembly 4" Seal bore 3-1/2" 9.3# L80 EUE Box Up
05	Ultrapak Permanent Seal bore Packer Size 7" 23-32# x 4.00"
06	Tubing 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
07	WX Landing Nipple X Profile: 2.813" 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
08	Pup Joint 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
09	WXN Landing Nipple XN Profile: 2.66" 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
10	Pup Joint 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80
09	Half Mule Shoe Wireline Entry Guide 3-1/2" 9.3 PPF EUE L80 Box Up x Half Mule Shoe Down

Recommendations:
The Drawing is not scaled.
Used only as a reference.

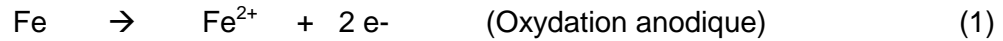
Contact Details:
Santiago.aldaz@eu.weatherford.com

THIS DOCUMENT IS COPYRIGHTED AND, WHETHER CONTAINING PATENTABLE OR NON-PATENTABLE SUBJECT MATTER, EMBODIES THE PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION OF WEATHERFORD. THE RECIPIENT AND THE RECIPIENTS COMPANY AGREE THAT IT IS LOANED IN CONFIDENCE WITH THE UNDERSTANDING THAT NEITHER IT NOR THE INFORMATION IN IT WILL BE REPRODUCED, USED OR DISCLOSED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE. © 2011 WEATHERFORD. ALL RIGHTS RESERVED.

Annexe 4

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

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



La demi-réaction (1) explique la production de Fe^{2+} par la corrosion des tubages, alors que la seconde réaction montre la consommation à la fois du Fe^{2+} et du sulfure par la précipitation des sulfures de fer. On pourrait imaginer que cette dernière réaction (2), sous certaines conditions (diminution de pH), s'inverse, c'est-à-dire, que l'on dissolvent les sulfures de fer présents sur les tubages (passage du sulfure et du Fe^{2+} en solution).

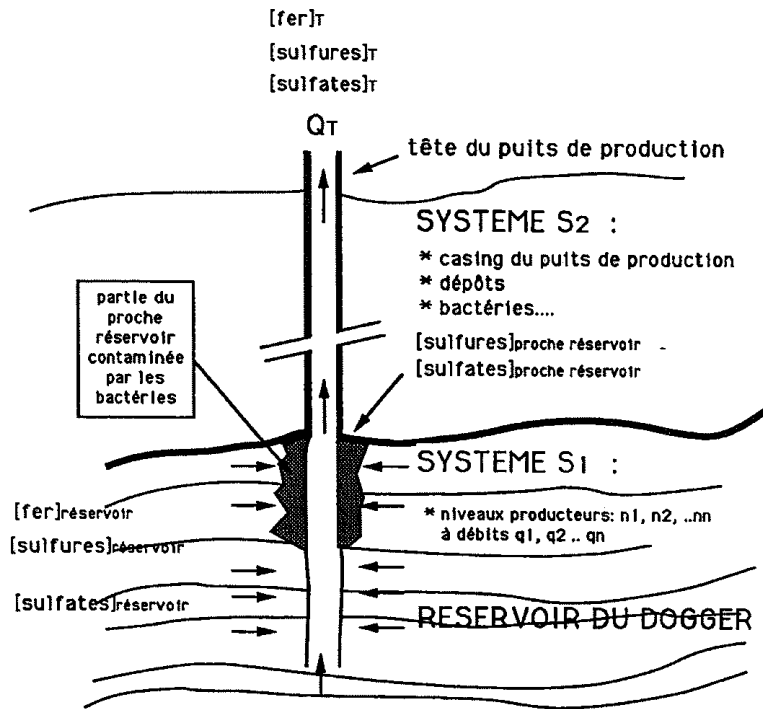
À ces possibilités de production/consommation des espèces Fe^{2+} et sulfure, il est raisonnable d'ajouter la production de sulfure par la réduction bactérienne des sulfates, schématisée simplement par $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^-$. En effet, des bactéries sulfato-réductrices (BSR), connues pour avoir la possibilité de produire du sulfure en réduisant les sulfates dans les eaux anaérobies, sont présentes dans le fluide circulant, mais également sur ou sous les dépôts de sulfures. Ainsi, au niveau de la boucle géothermale, il est nécessaire de définir deux systèmes : S_1 le réservoir et S_2 le puits de production (Figure 1).

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

S_2 constitue le puits à proprement dit, c'est-à-dire les tubages et les dépôts qui y sont accrochés. On pourrait étendre le système S_2 au proche réservoir, c'est-à-dire à la partie du réservoir toute proche du puits de production et susceptible d'être perturbée par une opération lourde sur le puits de production (curage).

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

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



Dans tous les cas, les mesures et analyses sont effectuées en surface, en tête de puits de production où la composition du fluide est la conséquence de la contribution de deux systèmes S1 et S2.

Figure 1 : Origine du sulfure et du fer dissous dosés en tête de puits de production géothermique : schéma conceptuel.

Pour comprendre les évolutions possibles à débit d'exploitation variable, il est nécessaire d'effectuer un paramétrage des concentrations (en considérant les systèmes S₁ et S₂) et d'introduire la notion du flux d'ion (Ignatiadis *et al.*, 1991 ; 1995 ; 1998a ; 1998b). Les flux totaux en sulfure et en fer en tête de puits de production à chaque instant s'écrivent respectivement :

$$Q_T [S^{2-}]_T = \sum q_i \cdot [S^{2-}]_i + \Phi_{\text{sulf. bact.}} - \Phi_{\text{sulf. dépôts}} \quad (3)$$

$$Q_T [Fe^{2+}]_T = \sum q_i \cdot [Fe^{2+}]_i + \Phi_{\text{fer corr.}} - \Phi_{\text{fer dépôts}} \quad (4)$$

Q_T est le débit total mesuré en tête de puits (en m³/h). $[S^{2-}]_T$ et $[Fe^{2+}]_T$ sont respectivement les teneurs en sulfure et en fer dissous dosées en tête du puits de production. $[S^{2-}]_i$ et $[Fe^{2+}]_i$ sont respectivement les teneurs en sulfure et en fer dissous produits par chaque niveau i du réservoir profond. $\sum q_i \cdot [S^{2-}]_i$ et $\sum q_i \cdot [Fe^{2+}]_i$ sont respectivement les flux de sulfure et de fer produits par le réservoir profond composé de différents niveaux producteurs produisant avec des débits respectifs q_i (avec $1 < i < n$). Si la concentration est exprimée en mg/l et le débit en m³/h, le flux est en g/h. $\Phi_{\text{sulf. bact.}}$ est le flux du sulfure produit au temps t par les bactéries dans le casing et le proche réservoir. $\Phi_{\text{fer corr.}}$ est le flux de fer produit au temps t par la corrosion dans le casing. $\Phi_{\text{sulf. dépôts}}$ et $\Phi_{\text{fer dépôts}}$ sont respectivement les flux de sulfure et de fer déposés sous forme de Fe_xS_y sur les parois du casing (en g/h).

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

$$[S^{2-}]_T = [S^{2-}]_{\text{réservoir}} + \Phi_{\text{sulf bact.}}/Q_T - \Phi_{\text{sulf dépôts}}/Q_T \quad (5)$$

$$[Fe^{2+}]_T = [Fe^{2+}]_{\text{réservoir}} + \Phi_{\text{fer corr.}}/Q_T - \Phi_{\text{fer dépôts}}/Q_T \quad (6)$$

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

En conséquence, lorsque l'on trace $[S^{2-}]_T$ en fonction de l'inverse du débit d'exploitation ($1/Q_T$), on obtient une droite d'ordonnée à l'origine $[S^{2-}]_{\text{réservoir}}$ et de pente $\Phi_{\text{sulf bact.}} - \Phi_{\text{sulf dépôts}}$ (figure 2). De manière analogue, lorsque l'on trace $[Fe^{2+}]_T$ en fonction de $1/Q_T$, on obtient une droite d'ordonnée à l'origine $[Fe^{2+}]_{\text{réservoir}}$ et de pente $\Phi_{\text{fer corr.}} - \Phi_{\text{fer dépôts}}$.

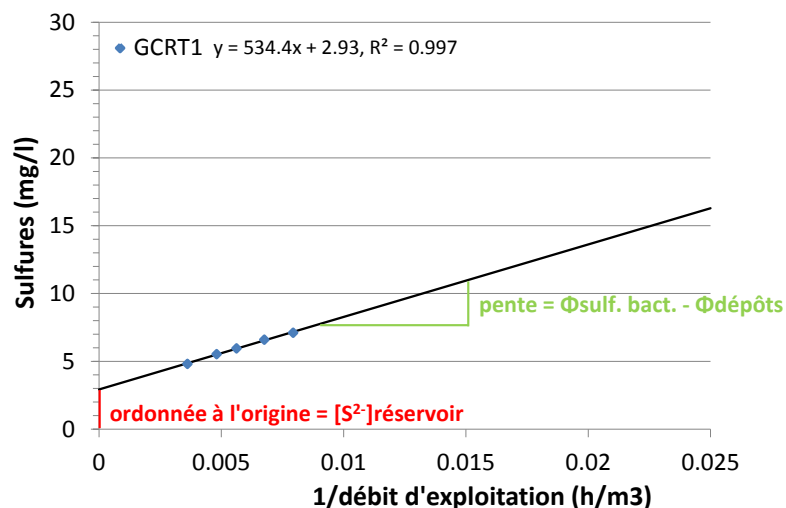


Figure 2 : Teneur en sulfures dosées en tête de puits et débit d'exploitation.

L'élément soufre possède deux isotopes stables le ^{34}S et le ^{32}S . Comme il est difficile de doser précisément les abondances absolues, on compare alors les isotopes entre eux. Le rapport isotopique du soufre dans un échantillon est le rapport de l'isotope lourd et rare sur l'isotope léger et abondant : $R_{\text{échan}} = (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{échan}}$. Comme ces variations de composition sont extrêmement faibles, on les exprime en une unité particulière, l'unité δ . On compare généralement les abondances relatives dans les échantillons à celles dosées dans un standard international qui est le Canion Diablo Troilite (CDT) pour le soufre. Les concentrations en isotopes lourds peuvent alors être exprimées sous forme de $\delta \text{‰}$:

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{échan}} \text{‰} = \{(R_{\text{échan}}/R_{\text{réf}}) - 1\} \cdot 1000 \text{ par rapport à CDT.}$$

L'unité δ est donc l'écart relatif par rapport au standard (ce dernier est choisi de manière à ce que les variations se produisent de part et d'autre de la valeur $\delta = 0$ qui, par définition, est celle du standard).

Dans les eaux anaérobies, telles que celles du Dogger du Bassin parisien, la réduction des sulfates en sulfures par les BSR, schématisée par $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^-$, induit une augmentation du ^{34}S dans les sulfates résiduels (donc leur $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ augmente) et une diminution du ^{34}S dans les sulfures produits (donc leur $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ diminue). En effet, les sulfates résiduels sont d'autant plus enrichis en ^{34}S que le fluide a été réduit (Harisson et Thode, 1958 ; Kaplan et Rittenberg, 1964 ; Kemp et Thode, 1968 ; Kaplan, 1975 ; Krouse, 1980 ; Fouillac *et al.*, 1990).

Reprenons le schéma simplifié d'un puits de production dont le casing et le proche réservoir sont envahis par les BSR (Figure 1).

Le système S_1 peut produire un fluide à différents débits mesurés en surface. Si l'on considère que le réservoir produit un fluide de même composition chimique à tous les débits, alors le fluide du réservoir profond sera caractérisé par des teneurs en sulfates et en sulfures et des $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ et $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ constants. Le système S_2 est composé du casing, des dépôts qui y sont accrochés et du proche réservoir. Des BSR sont présentes sur ou sous les dépôts dans le casing et dans le proche réservoir. Ces bactéries produisent des sulfures par réduction des sulfates. La quantité du sulfure produit est constante dans un intervalle de temps court (le flux de production est constant).

Les analyses sont effectuées en surface (en tête du puits de production) où la composition du fluide est la conséquence des actions des deux systèmes S_1 et S_2 . Lorsque le fluide géothermal passe à travers la zone polluée du proche réservoir et par la suite dans les tubages, il s'enrichit en sulfures produits par les bactéries. Les sulfures produits par les bactéries sont pauvres en ^{34}S et leur $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ est plus faible que celui du fluide natif du réservoir profond. Ainsi à cause du mélange des deux types de sulfure : sulfure du réservoir et sulfure bactérien, le $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ du sulfure mesuré en tête, soit $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)_T$, est d'autant plus faible que le débit d'exploitation est faible. En considérant que les sulfures qui arrivent en surface proviennent de deux pôles de mélange, les deux systèmes S_1 et S_2 , on peut écrire :

$$\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)_T = x.\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)_{\text{réservoir}} + (1-x).\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)_{\text{bactéries}} \quad (7)$$

où x est un nombre adimensionnel montrant la proportion de mélange. En d'autres termes, le $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ mesurée en tête du puits de production est une fonction croissante du débit d'exploitation, alors que la teneur en sulfures est une fonction décroissante. L'effet du débit sur $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})_T$ est inverse et beaucoup moins important que celui de $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)_T$ à cause de la très forte teneur initiale en sulfates dans le réservoir profond.

Annexe 5

**Note technique relative à l'analyse de fluide
prélevé en fond du nouveau puits injecteur
de Coulommiers afin de détecter la présence
éventuelle de produit inhibiteur**

1. CONTEXTE ET PROBLÈME POSÉ

La géothermie française de type « basse enthalpie » est essentiellement représentée par l'exploitation des fluides de l'aquifère du Dogger du Bassin parisien (Jurassique moyen), dont la température est inférieure à 100 °C. L'utilisation de la géothermie est principalement axée sur le chauffage des habitations et la production d'eau chaude sanitaire. Les doublets géothermiques sont constitués de puits de production et de puits d'injection d'environ 1 800 m de profondeur et d'installations de surface. Le principe de l'exploitation consiste à pomper l'eau géothermale par le puits de production, à récupérer son énergie à travers des échangeurs thermiques puis, à l'injecter dans le même réservoir quelques centaines de mètres plus loin par le puits d'injection. Les tubages des puits sont en majorité constitués d'acier au carbone du type API K55 (équivalent au XC38 ou encore en nomenclature AFNOR au 20M5).

Les eaux de l'aquifère du Dogger dans la région parisienne constituent un milieu anaérobie et témoignent d'un environnement réducteur caractérisé par une minéralisation élevée et la présence de gaz dissous, parmi lesquels le sulfure d'hydrogène (H₂S) et le gaz carbonique (CO₂). Les principales caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont les suivantes : température de 47 à 85 °C selon la localisation, pH de 6,1 à 6,5, Eh de l'ordre de -100 à 0 mV par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH), teneur en sels totaux dissous de 6 à 35 g/l dont une grande partie en Cl⁻, [CO₂/HCO₃⁻] de 250 à 600 mg/l, [SO₄²⁻] de 300 à 1 200 mg/l, [H₂S/HS⁻] de 0 à 100 mg/l. On notera également la présence de mercaptans (sulfures organiques) RSH/RS⁻ (entre 0 et 10 mg/l) et l'absence d'oxygène dissous en fonctionnement normal. Ces caractéristiques font que ces eaux géothermales sont l'un des fluides naturels les plus corrosifs pour les aciers au carbone (Amalhay et Ignatiadis, 1992 ; Amalhay *et al.*, 1994a, 1994b, 1995). Au niveau des boucles géothermales, les risques liés à cette corrosivité sont les suivants :

- le percement des tubages en acier des puits avec contamination possible d'aquifères intermédiaires constituant, pour la plupart, des réserves d'eau potable ;
- la formation de dépôts (constitués en majorité de sulfure de fer) sur les parois internes des tubages susceptibles de colmater les puits de production et/ou de réinjection, ce qui entraîne des pertes de charges significatives.

Pour pallier ces problèmes, dès 1989, **des traitements anti-corrosion** (essentiellement à base d'agents tensio-actifs cationiques) ont été mis en œuvre sur les installations géothermiques exploitant l'aquifère carbonaté du Dogger du Bassin parisien (BP). Ces produits, constitués en majorité de dérivés azotés du type sels d'ammonium quaternaires, sont injectés (au fond du puits de production ou au niveau de la pompe d'exhaure) à des teneurs allant de 2 à 10 mg/l. Cependant, ils sont très toxiques même à faible concentration pour les milieux aquatiques, bactériostatiques ou bactéricides à plus forte dose et susceptibles de persister et de s'accumuler dans l'environnement. **Il paraît donc nécessaire de connaître leur devenir dans le réservoir du Dogger du Bassin parisien. C'est le principal objectif de la présente étude.**

Le forage du nouveau puits d'injection de Coulommiers, nommé GCO4, a permis au BRGM de récupérer deux échantillons de fond de puits du fluide du Dogger. Les prélèvements ont été réalisés par la société Schlumberger, le 18 novembre 2011, à l'aide de deux préleveurs de type Single-phase Sample Bottles (SSB), résistants aux fortes teneurs en sulfures et chlorures dissous et permettant de conserver l'échantillon prélevé dans les conditions de pression du réservoir. Ils ont, ensuite, été récupérés et analysés par le BRGM.

Cette note présente les résultats des analyses effectuées par le BRGM sur les deux échantillons identiques prélevés dans le forage GCO4.

2. INTÉRÊT PRÉSENTÉ PAR LE SITE DE COULOMMIERS

Le forage du nouveau puits d'injection GCO4 se trouve dans l'emprise de la bulle froide du puits GCO2 (ancien injecteur mis à l'arrêt en août 2011). De plus, il se situe à l'est de Paris, secteur du Bassin parisien pour lequel une évolution sensible du fluide géothermal a été constatée depuis les années 80 (date de mise en service de la plupart des sites géothermaux d'Île-de-France). La figure 1 présente le positionnement géographique (au toit du Dogger) des trois puits, l'ancien producteur GCO1, l'ancien injecteur GCO2 et le nouveau injecteur GCO4.

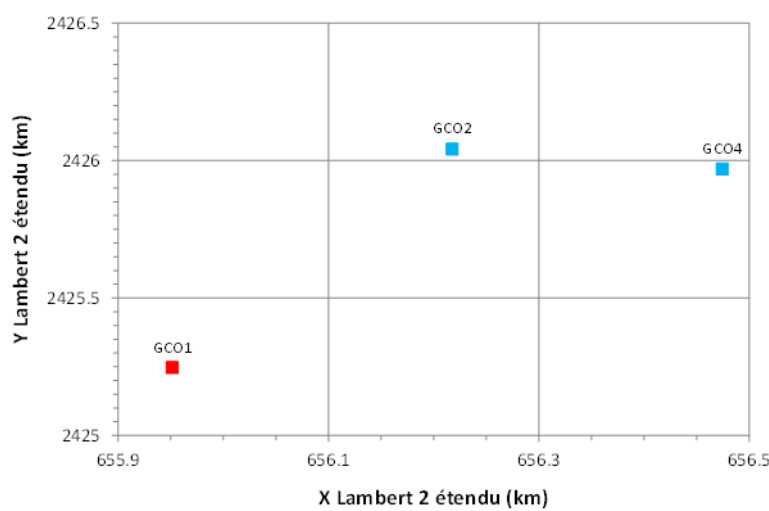


Figure 1 : Positionnement géographique/géométrique (au toit du Dogger) des puits géothermiques GCO1, GCO2 et GCO4 du site de Coulommiers.

Les échantillons prélevés grâce aux préleveurs SSB de Schlumberger en novembre 2011 présentent donc un intérêt scientifique et technique à plus d'un titre :

- étude de la progression de la bulle froide (du GCO2 vers le GCO4),
- étude des phénomènes de corrosion/dépôt. Les échantillons issus de GCO4 sont représentatifs du fluide du réservoir après recyclage(s). Ils ont été au moins par deux fois au contact d'une surface métallique (tubages des puits GCO1 et GCO2).

L'analyse des paramètres caractéristiques des processus de corrosion/dépôt de ce puits (comme la teneur en sulfure par ex.), comparée avec ceux du puits GCO1, devrait donc nous apporter des informations sur la boucle géothermale dans son ensemble ;

- étude du devenir des inhibiteurs de corrosion.

3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les tableaux en fin de note regroupent tous les résultats analytiques obtenus à partir des prélèvements réalisés dans le puits GCO4 et une partie des données analytiques disponibles sur le puits GCO1 utilisées pour interpréter ces résultats.

3.1. Physico-chimie générale du fluide prélevé au puits GCO4

La température du fluide mesurée au fond du puits GCO4 lors du prélèvement est de 61,3 °C, soit 20 °C plus basse que la température du fluide produit par le puits GCO1 (égale à 81,5 °C en moyenne). Rappelons que le puits GCO4 se situe dans l'emprise de la bulle froide du puits GCO2 (ancien injecteur du site de Coulommiers). Sachant que le fluide injecté pendant de décennies dans le puits GCO2 a été d'une température proche de 30-35 °C, la température mesurée au puits GCO4, enseigne sur un impact thermique certain du puits GCO2 sur GCO4. Ces données peuvent d'ores et déjà être utilisées pour caler les modèles de propagation des bulles froides.

Le pH du fluide au droit du puits GCO4 mesuré à la sortie du fluide de deux préleveurs est de 6,1 à 20,3 °C pour le premier et 6,12 à 20,6 °C pour le second ; soit environ 6,0 au fond pour 61,3 °C. Nous remarquons qu'il est équivalent aux valeurs de pH mesurées en tête du puits GCO1 depuis quelques années. Le pH du fluide produit par GCO1 est actuellement de l'ordre de 6,1 alors qu'il était compris entre 6,3 et 6,4 dans les années 80 (Figure 2). Rappelons que le pH des fluides produits à l'est et au sud de Paris a diminué depuis la mise en service des sites géothermiques, laissant penser à une acidification généralisée du réservoir du Dogger dans ces secteurs du Bassin Parisien, consécutive à la production de sulfures par sulfato-réduction bactérienne sur les tubages des deux puits (cf. chapitre 4.3.). La valeur du pH mesurée au droit de GCO4 semble confirmer cela.

Le potentiel redox au droit du puits GCO4 mesuré à la sortie du fluide de deux préleveurs est de -215,0 mV à 20,3 °C pour le premier et -182,5 mV à 20,4 °C pour le second ; soit environ -200 mV au fond pour 61,3 °C. Nous remarquons qu'il est équivalent aux valeurs de redox mesurées en tête du puits GCO1 depuis quelques années. Le redox du fluide produit par GCO1 est actuellement de l'ordre de -180 mV/ENH alors qu'il était compris entre -90 et -140 mV/ENH dans les années 1980. Rappelons que le redox des fluides produits à l'est et au sud de Paris a diminué depuis la mise en service des sites géothermiques, consécutive notamment à l'enrichissement des fluides en sulfures dissous (par sulfato-réduction bactérienne) sur les tubages des deux puits. La valeur du potentiel redox mesurée au droit de GCO4 semble confirmer cela.

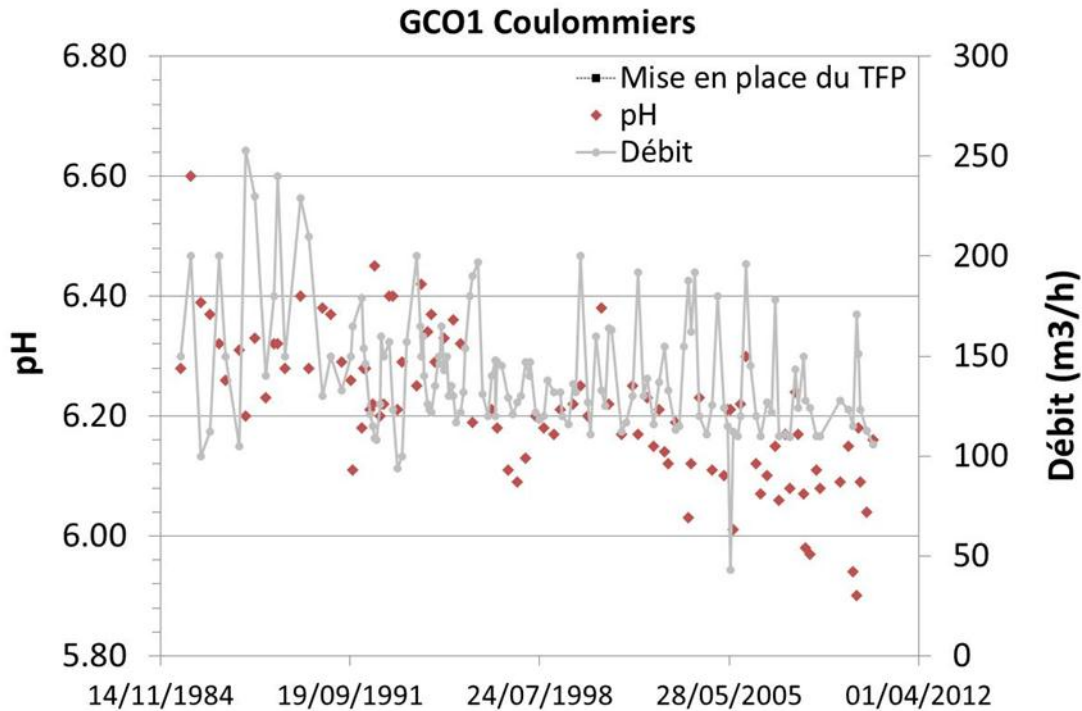


Figure 2 : Évolution du pH mesuré en tête du puits de production GCO1 de Coulommiers avec le temps.

La salinité totale (TDS) du fluide prélevé à partir de GCO4 est d'environ 32 g/L, soit équivalente à celle du fluide produit par GCO1. En effet, la composition chimique du fluide prélevé au puits GCO4 est, dans l'ensemble, presque identique à celle du fluide produit par GCO1.

Dans le détail, il apparaît néanmoins que la teneur en HCO_3^- du fluide de GCO4 est nettement supérieure à celle du fluide produit par GCO1.

Le dosage à l'ouverture des deux préleveurs a donné : $6,79 \cdot 10^{-3}$ mol/L soit 414,43 mg/L de HCO_3^- pour le premier et $6,87 \cdot 10^{-3}$ mol/L soit 419,31 mg/L de HCO_3^- , pour le second, alors que la valeur moyenne de HCO_3^- sur les 5 dernières années est de l'ordre de 245 mg/L.

Cette enrichissement en HCO_3^- peut s'expliquer par deux hypothèses possibles :

- le fait que le puits GCO4 se trouve dans la bulle froide de GCO2. Les bicarbonates (HCO_3^-) sont contrôlés par des minéraux à comportement prograde ; leur teneur tend ainsi à augmenter lorsque la température du fluide diminue ;
- la possibilité de la dégradation de l'inhibiteur de corrosion injecté, depuis presque deux décennies. La dégradation ultime est une production de CO_2 , lequel dissous dans l'eau fait augmenter l'alcalinité.

Il apparaît également que la teneur en fer dissous dans le fluide du puits GCO4 est 10 fois supérieure aux teneurs jamais rencontrées en tête de GCO1. Ceci est détaillé dans le paragraphe suivant.

La conductivité du fluide mesurée dans le premier préleveur est de 53,1 mS/cm à 25 °C (t °C de mesure 19,6 °C), alors que celle du fluide du second préleveur est de 53,5 mS/cm à 25 °C (t °C de mesure 19,9 °C). Toutes les deux valeurs sont supérieures d'environ 9 mS/cm aux valeurs moyennes du fluide produit par GCO1 de cinq dernières années (44,15 mS/cm).

3.2. Teneur en fer et en sulfure du fluide prélevé au puits GCO4 et composition isotopique du soufre

La teneur en fer dissous dans le fluide du puits GCO4 est 10 fois supérieure aux teneurs jamais rencontrées en tête de GCO1. En effet, initialement de l'ordre de 0,8 mg/L, la teneur en fer dissous en tête du puits de production GCO1 a chuté, suite à la mise en place du traitement anti-corrosion par inhibiteur de corrosion, jusqu'à atteindre une dizaine de µg/L (Figure 3).

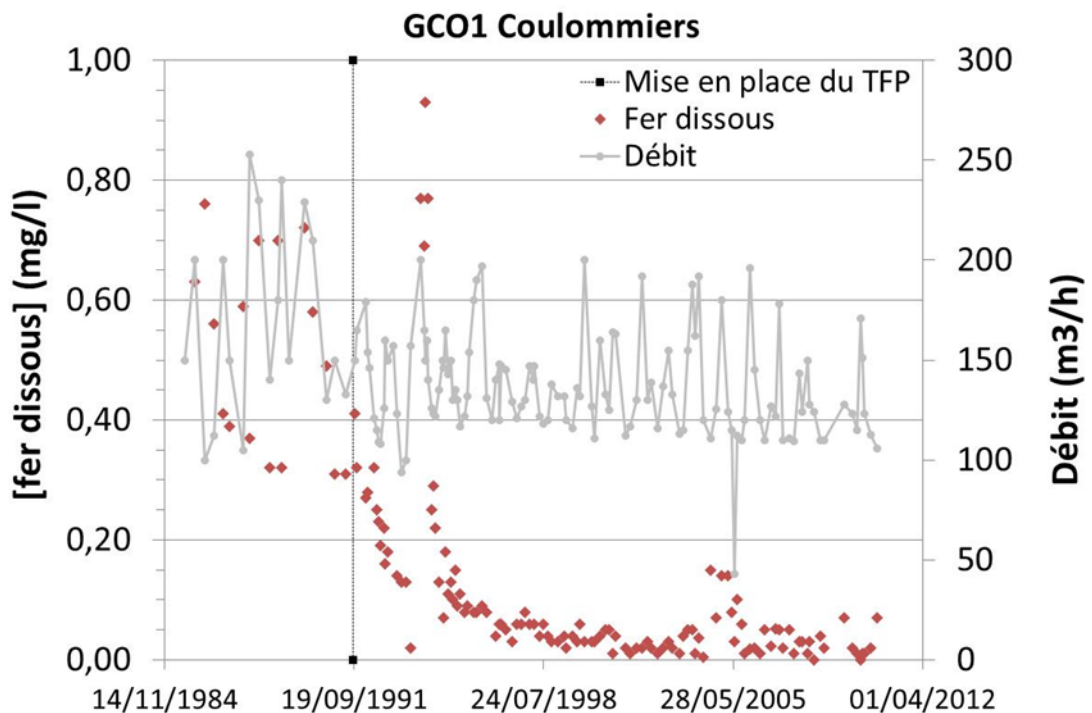


Figure 3 : Evolution de la teneur en fer dissous prélevée en tête du puits de production GCO1 de Coulommiers avec le temps.

Plus généralement, la teneur en fer dissous dans le fluide du puits GCO4 est nettement supérieure aux teneurs jamais dosées en tête de tous les puits exploitant la nappe du Dogger du Bassin parisien (de l'ordre de 3-4 mg/L, tout au plus).

Le forage GCO4 se situe à l'intérieur de la bulle froide du puits GCO2. Le fer dissous dans le fluide prélevé peut donc avoir plusieurs origines : une partie peut provenir du réservoir, une partie peut provenir de la corrosion du tubage du puits GCO2 et une autre de la corrosion du tubage du puits GCO1. Compte tenu des teneurs dosées en tête de GCO1 depuis 1995 ($\leq 0,1$ mg/L), la part de fer provenant du puits de production est *a priori* négligeable. Au contraire, la part provenant du puits GCO2 est potentiellement grande, voire, quasi-exclusive ; les eaux géothermales du Dogger étant naturellement pauvres en fer (inférieur à 1 mg/L). En effet, l'activité des BSR sur les parois des tubages des puits de réinjection est supposée plus importante que celle présente sur les parois des puits de production ; la température du fluide y étant plus faible. Toutefois, il est également possible que la teneur « réservoir » ne soit pas aussi faible que prévue. Les informations dont on dispose proviennent, sur le puits de Coulommiers, exclusivement des prélèvements de la tête de puits où la teneur en fer est affectée par la corrosion-dépôt.

Une explication solide pour la valeur en fer supérieur dans le GCO4 peut être la suivante : la teneur en fer provenant du réservoir est potentiellement contrôlée par un minéral à comportement prograde : la sidérite FeCO_3 . Ce minéral a donc pu se dissoudre suite au refroidissement progressif de l'eau du Dogger, notamment à l'aplomb du GCO4, puisqu'il est impacté thermiquement par la température et la chimie de l'eau injectée par le GCO2.

La teneur en sulfure dissous dans le fluide du puits GCO4 est de 15,82 mg/L ; soit, elle est supérieure de 3,5 mg/L à la teneur moyenne prélevée en tête du puits GCO1 depuis 2008. Comme le fer, le sulfure prélevé au droit de GCO4 peut avoir plusieurs origines : une partie peut provenir du réservoir et deux autres parties peuvent provenir de l'activité des BSR sur les tubages (et le proche réservoir) des puits GCO1 et GCO2. Or, dans ce cas, il apparaît clairement que les BSR présentes sur les tubages et le proche réservoir du puits GCO2 ont enrichi le fluide en sulfure.

La composition isotopique du soufre présent dans le fluide prélevé au droit du puits GCO4 montre que les sulfures présents sont plus pauvres en S^{34} que ceux dosés dans le fluide produit par GCO1 en 1996 (leur $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ est plus faible de 3,7 ‰). Il montre également que les sulfates présents sont plus riches en S^{34} que ceux du fluide prélevé sur GCO1 en 1996 (leur $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ est plus important de 1,5 ‰).

Dans les eaux anaérobies telles que celles du Dogger du BP, la réduction des sulfates en sulfures par les BSR, schématisée par $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HS}^-$, induit une augmentation du ^{34}S dans les sulfates résiduels et une diminution du ^{34}S dans les sulfures produits. Ainsi, un fluide est d'autant plus réduit que ses sulfates sont enrichis en S^{34} (que leur $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ est grand) et que ses sulfures sont appauvris en S^{34} (que leur $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ est petit). Le fluide présent au droit du puits GCO4 est donc plus réduit que le fluide produit en 1996 par GCO1, lui-même plus réduit que dans les années 80. Ceci illustre le fait que l'activité bactérienne s'est poursuivie entre 1996 et 2011 sur les tubages et le proche réservoir des puits GCO1 et GCO2. Le $\delta^{34}\text{S}(\text{HS}^-)$ du soufre produit actuellement par le puits GCO1 est sûrement inférieure à 4,9 ‰, et le $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ des sulfates supérieur à 24,6 ‰.

SITE	Date du prélèvement	Débit (m ³ /h)	Teneur en sulfure (mg/l) [S ²⁻] _T	Sulfure δ ³⁴ (HS ⁻) (‰)vs CDT (± 0,3 ‰)	Sulfate δ ³⁴ (SO ₄ ²⁻) (‰)vs CDT (± 0,3 ‰)	CITD δ ¹³ C ‰ vs PDB(± 0,1 ‰)	EAU δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW (± 0,1 ‰)	Sulfate δ ¹⁸ O ‰ vs SMOW (± 0,3 ‰)
(GCO1)	83/87	-----	1,60	9,6	24,0			15,9
	Fév-1995	143	10,00	5,3	24,3			
	Juil-1996	185	9,96	4,9	24,6	2,2	-4,0	14,9
	Juil-2011	104	12,04	-	-			
(GCO4)	18 Nov-2011	-----	15,82	1,2	26,1	6,2	-3.8	13,5

Tableau 1 : Valeurs de δ³⁴(HS⁻) et teneurs en sulfures correspondantes (ainsi que d'autres rapports isotopiques importants) en fonction du temps, pour les puits GCO1 et GCO4.

3.3. Détection de la présence d'inhibiteur dans le fluide prélevé au puits GCO4

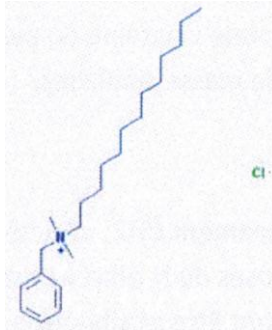
3.3.1. Préambule

Il existe plusieurs produits inhibiteurs sur le marché : Aquaprox 7300, Aquaprox 3000, Norust 491, Solamine 129 etc. Or, d'un produit à l'autre, les composants peuvent varier, et ainsi, leur toxicité et leur persistance/dégradabilité différer.

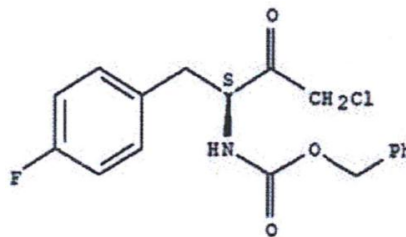
Le site de Coulommiers est traité avec du Norust 491 depuis 1994. La recherche d'inhibiteur de corrosion dans le fluide prélevé au puits GCO4 s'est donc concentrée uniquement sur ce produit.

Selon la fiche de données de sécurité (FDS) de la société CECA, le Norust 491 se compose principalement de :

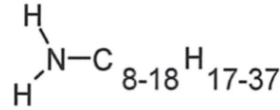
- chlorure de N-alkyl « coco » diméthyl-benzyl ammonium



- b-alanine dérivés N-alkyl « coco »



- N-alkyl « coco » amine (mélange d'amines primaires aliphatiques de 8 à 18 atomes de carbones de teneur variable).



Ces produits ensemble confèrent à la formulation, lorsqu'elle est employée aux doses prescrites pour le Dogger des propriétés anti-corrosion (produits filmogènes), anti-dépôts (dispersants) et, à plus forte dose, des propriétés bactériostatiques et bactéricides.

Ces composés sont donc très toxiques pour les organismes aquatiques (dont les poissons, les daphnies, les algues et les bactéries) d'après la directive 1999/45/CE du 31/5/1999. D'ailleurs, une étude réalisée par la société CECA en 1992-1993 a établi que 50 % des *Acartia tonsa* (petits crustacés) exposés à 1-10 mg/l de Norust 491 pendant 48 h sont morts et que 50 % des *Skeletonema costatum* (diatomées) exposés à 0,1-1 mg/l de Norust 491 pendant 72 h sont intoxiqués (d'après la FDS CECA).

Néanmoins, d'après la CECA, le Norust 491 doit être considéré comme facilement dégradable. La demande biochimique en oxygène (DBO) de ce produit dans l'eau a été établie à 58 % après 28 jours, et le rapport DBO5/DCO à 40 (± 5) %. À titre de comparaison, le rapport DBO5/DCO des eaux résiduaires urbaines, considérées comme facilement biodégradables, est compris entre 50 et 67 %.

3.3.2. Paramètres généraux permettant de caractériser la pollution d'une eau

- **Demande biochimique et chimique en oxygène**

La demande biochimique en oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau par les micro-organismes du milieu. Ce paramètre est utilisé, notamment, pour quantifier la charge polluante organique d'une eau et évaluer l'impact d'un rejet sur le milieu naturel (toute matière organique biodégradable rejetée va entraîner une consommation d'oxygène au cours des procédés d'autoépuration). La DBO de l'échantillon GCO4 n'a pas été analysée.

La demande chimique en oxygène (DCO) représente tout ce qui est susceptible de demander de l'oxygène, en particulier les sels minéraux oxydables (sulfures, thiosulfates, soufre, fer, sels de métaux...) et la majeure partie des composés organiques, biodégradables ou non. Elle nous renseigne de cette manière en partie sur la charge organique totale des eaux.

La DCO du fluide issu de GCO4 est de 318 mg/l, ce qui représente seulement 1 % de la matière présente dans le fluide. Une telle quantité ne peut imputer à la matière organique, puisque dans le fluide il y a effectivement des espèces soufrées réduites (sulfures, mercaptans, thiosulfates, soufre, fer et autres sels de métaux réduits).

• Carbone organique total

Le carbone organique total (COT) présent dans l'eau du Dogger peut être composé en majeure partie de substances humiques, de matériaux végétaux et animaux partiellement dégradés et de substances organiques issues des traitements inhibiteurs. Pour un effluent donné, une corrélation peut être établie entre le COT et la DBO ou DCO. La mesure du COT permet donc de détecter et de suivre, le cas échéant, une pollution organique du milieu aquatique.

Le COT présent dans le fluide issu de GCO4 est de 7 mg/L. Cela veut dire que la somme de toute trace organique présente dans l'eau de GCO4 ne dépasse 7 mg/L de C, valeur qui est extrêmement faible. Dans l'hypothèse où tout ce carbone organique provenait de l'inhibiteur (entier ou partiellement dégradé) cela fait une valeur extrêmement faible sachant que nous avons injecté pendant deux décennies une formulation contenant plusieurs des produits multi-carbonés et à une dose avoisinant 10 mg/L en masse de produit brut pour un litre d'eau traitée à la production).

Cette valeur montre déjà qu'il y a une dégradation quasi-totale du produit inhibiteur.

Par ailleurs, les valeurs de $\text{CITD}^2 \delta^{13}\text{C} \text{ ‰ vs PDB} (\pm 0.1\text{‰})$ analysé dans le GCO 4 est de 6,2. Jusqu'à l'heure actuelle une telle valeur n'a jamais été analysée dans le Dogger. Notons que celle du GCO1 en 1996 était égale à 2,2. Cette différence montre que le CITD du GCO4 provient d'une biodégradation plus prononcée que celle du GCO1, mais qui peut être une biodégradation du Carbone organique directe ou accompagnant la sulfato-réduction. Cette dernière mobilise également le C inorganique et organique (lorsque ce dernier existe).

Ainsi, même l'isotope ^{13}C du CITD témoigne d'une biodégradation du carbone organique dans l'eau collectée dans le GCO4.

3.3.3. Analyse chromatographique du fluide prélevé

Les composés constituant le Norust 491 ne sont pas présents dans les bibliothèques des spectres de masse, à l'exception des amines primaires. De plus, le laboratoire du BRGM ne dispose pas de standards purs de ces composés. Il n'est 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 standard du Norust 491.

Le profil chromatographique du fluide prélevé au droit du puits GCO4 présente une vingtaine de pics en commun avec l'empreinte chromatographique du Norust 491. Le Norust 491 est donc bien présent dans l'échantillon du puits GCO4 (Figure 4).

² Carbone Inorganique Total Dissous

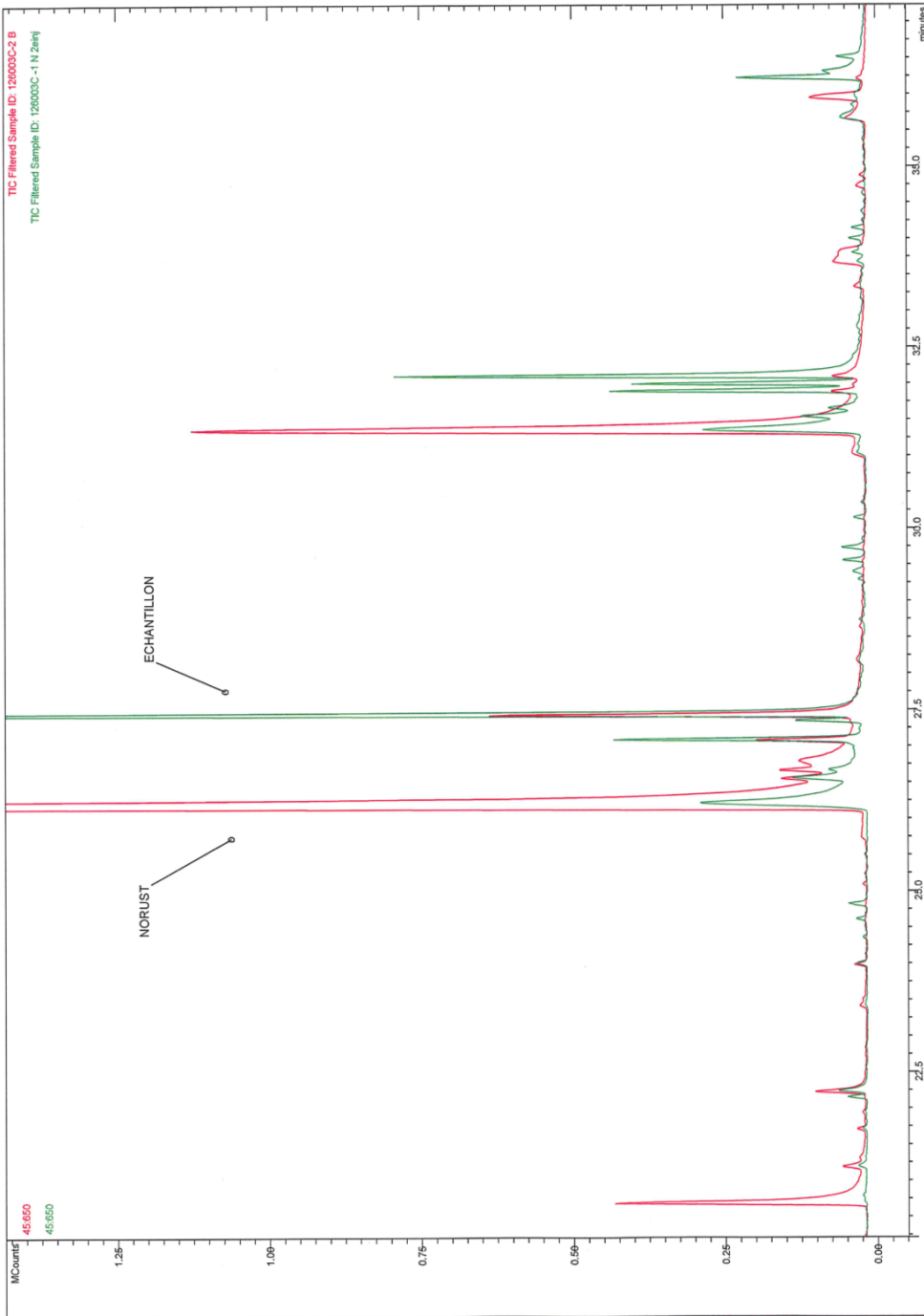


Figure 4 : Comparaison du profil chromatographique du fluide issu de GC04 avec celui du Norust 491.

L'examen des pics chromatographiques montre que :

- de nombreux pics, pouvant correspondre aux composés du N-alkyl « coco » amine, présentent des pertes successives du groupement CH₂ (caractéristique des chaînes aliphatiques) ;
- un pic présente un spectre de masse dont les masses pourraient être attribuées à la fragmentation du N-alkyl « coco » diméthyl-benzyl ammonium.

Ces identifications doivent être confirmées par l'injection des standards purs des composés qui constituent le Norust 491 (ceux-ci étant absents de la bibliothèque des spectres de masses du BRGM). Néanmoins, il semblerait bien que le Norust 491 soit biodégradable, du moins en grande partie.

La teneur en Norust 491 dans le fluide prélevé sur GCO4 n'a pas pu être déterminée par chromatographie. Ainsi, à l'heure actuelle, il nous est impossible de savoir exactement comment et en combien de temps le Norust 491 se dégrade dans l'environnement du Dogger.

4. CONCLUSIONS

Le prélèvement d'eau à Coulommiers (77) dans un puits géothermique nouveau destiné à l'injection d'eau géothermale refroidie par son passage préalable dans des échangeurs de chaleur, a été effectué et ses caractéristiques physicochimiques et sa composition chimique ont été analysées.

Ce puits est situé dans la zone d'interférence présumée de l'ancien injecteur de Coulommiers (GCO2).

Cette proximité de deux puits ont été l'occasion pour prélever au fond du GCO4 et analyser cette eau et de comparer ses caractéristiques à celles du producteur GCO1 et de conclure totalement ou partiellement sur les points 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 à celles du producteur GCO1, sauf pour les paramètres suivants :
 - la teneur en sulfure dissous 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 tous 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 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 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$,
- le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}(\text{CITD})$ du GCO4, comparé à celui du GCO1, témoigne d'un enrichissement en ^{13}C dans le CITD, et donc d'un processus de biodégradation du carbone organique dans l'eau du GCO4 ;
- la teneur en résidu d'inhibiteur est ***a priori*** faible. La chromatographie en phase gazeuse de la matière organique extraite de cette eau montre que des fragments d'inhibiteurs sont encore présents, mais à une teneur ***a priori*** 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 permet pas à l'heure actuelle de conclure sur la teneur en Norust 491 (produit inhibiteur utilisé). En effet le BRGM ne dispose pas des standards purs de ces composés. Il n'est 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 standard du Norust 491. Ces identifications doivent être confirmées par l'injection des standards purs des composés qui constituent le Norust 491 (ceux-ci étant absents de la bibliothèque des spectres de masses du BRGM). Néanmoins, il semblerait bien que le Norust 491 soit biodégradable, du moins en grande partie.

SITE	Date du prélèvement	Temp. °C	pH	Eh mV	Cond. mS/cm	Sulfure mg/l
COULOMMIERS (GCO1)	06-août-85	80.2	6.28	-213	88	0.1
	26-mars-90	82.6	6.28	-311	91.7	5
	06-févr.-95	82.6	6.33	-326	----	10
	11-janv.-00	81.7	6.25	-339	38.9	11.6
	09-mai-05	81.00	6.21	-327	43.10	12.73
	19-juil.-11	80.6	6.19	-348	48.1	12.04
COULOMMIERS (GCO4) Préleveur n° 1	18-nov.-11	61.3	6.11	-215	53.1.	15.92
COULOMMIERS (GCO4) Préleveur n° 2	18-nov.-11	61.3	6.12	-183.5	53.5	15.72

Résultats des mesures physico-chimiques.

SITE	Date du prélèvement	$\delta^{34}\text{S}(\text{S}^{2-})$ ‰	$\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ ‰	CITD $\delta^{13}\text{C}$ ‰ vs PDB ($\pm 0,1$ ‰)	EAU $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs SMOW ($\pm 0,1$ ‰)	Sulfate $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs SMOW ($\pm 0,3$ ‰)
COULOMMIERS (GCO1)	83/87	9,6	24,0			15,9
	fév.-95	5,3	24,3			
	juil.-96	4,9	24,6	2,2	-4,0	14,9
	juil.-11	-	-			
COULOMMIERS (GCO4) Préleveur n° 1	18-nov.-11	1,2	26,1	6.2	-3.8	13,5

Résultats des analyses isotopiques du soufre (^{34}S , ^{32}S) des sulfures et des sulfates et de l'oxygène (^{18}O) de l'eau et des sulfates et du carbone (^{13}C) du Carbone Inorganique Total Dissous (CITD).

SITE	Date du prélèvement	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Br-	CO3	COT	Ca	Cd	Cl	Co	Cr	Cu	DCO (Demande chimique oxygène)	F	Fe	HCO3	K	Li	Mg
COULOMMIERS (GCO1)	06-août-85										1657								n.d.	256			336
	26-mars-90										1660								0.58	244			360
	06-févr.-95										1907								0.11	391			256
	11-janv.-00										1584								0.03	299			263
	09-mai-05										1514								0.08	314			265
COULOMMIERS (GCO4) Préleveur n° 1	19-juil.-11										1650								n.d.	318			124
	18-nov.-11	0.1	92.4	0.27	16100	155	0.23	98.8	<LQ	7	1865.4	0.01	18200	0.96	287	0.33	318	4.3	8.247	400	138.9	3278	328

SITE	Date du prélèvement	Mn	NH4 (Ammonium exp. en NH4)	NKJ (Azote Kjeldhal exp. en N)	NO2 (Nitrites exp. en NO2)	NO3 (Nitrates exp. en NO3)	Na	Ni	PO4 (OrthoPhosphates exp. en PO4)	PTOT (Phosphore Total exp. en P)	Pb	SO4	Se	SiO2	Sr	Zn
COULOMMIERS (GCO1)	06-août-85											1210		40		
	26-mars-90											1250		44		
	06-févr.-95											1319		60.5		
	11-janv.-00											1210		37.5		
	09-mai-05											1240		48		
COULOMMIERS (GCO4) Préleveur n° 1	19-juil.-11											1313		39.9		
	18-nov.-11	186	29	21.2	<LQ	1.3	9388.8	37.1	<LQ	<LQ	0.14	1375	0.24	46	68978	3.47

Résultats des analyses réalisées au laboratoire : éléments majeurs et traces.



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