

Mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France

Rapport final de la phase 2

BRGM/RP-53782-FR
mars 2005



ADEME



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France

Rapport final de la phase 2

BRGM/RP-53782-FR

mars 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003 CDG 57

**O. Goyénèche, A. Desplan, V. Bretteville, H. Fabris, A. Menjoz,
M. Azaroual, A. Sbai, P. Ungemach, M. Antics, G. Scalisi**



Vérificateur :

Original signé par : A. DESPLAN

Approbateur :

Original signé par : D. VASLET

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

A D E M E



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

*Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur : **ADEME**, en 2 exemplaires conformément aux termes de la convention.*

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

* * * * *

Mots clés : Géothermie, Ressources géothermiques, Réservoir géothermique, Ile-de-France, Bassin parisien, Dogger, Doublet de forages, Bases de données.

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

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 Ile-de-France. Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-53782-FR, 104 p., 35 fig., 5 ann.

Synthèse

Actuellement en Ile-de-France, 34 doublets géothermiques fonctionnent depuis environ 20 ans en prélevant les calories du réservoir géothermique du Dogger du bassin de Paris. Ces exploitations peuvent être isolées mais, dans la plupart des cas, elles sont voisines les unes des autres, créant de véritables champs géothermiques.

L'exploitation ayant lieu au moyen de doublets de forage, l'eau refroidie, réinjectée dans le réservoir, va donc, à un moment donné, être recyclée par les puits producteurs du doublet considéré ou des doublets les plus proches.

Ensuite, la date de percée thermique influera directement sur le potentiel géothermique de chaque opération en amorçant le déclin de la température de production du ou des puits.

Il est donc essentiel de détecter l'amorce de ce refroidissement et, si possible, de l'anticiper puis de calculer l'évolution de la température, afin de prendre les mesures susceptibles de gérer cette décroissance thermique.

Différentes études de modélisation du réservoir du Dogger ont été réalisées à l'échelle du doublet ou d'un secteur géographique pour plusieurs opérations.

Ces modélisations ont été menées dans la première moitié de la décennie 90 et aucune nouvelle simulation générale sur l'ensemble du bassin du Dogger n'a été réalisée depuis 1996.

Ces études mettaient alors en évidence la nécessité de disposer d'informations les plus précises possibles sur le réservoir et sur l'exploitation géothermique des doublets voisins.

Il était alors admis que l'analyse des paramètres d'exploitation enregistrés ou notés en routine par les exploitants pourrait permettre la mise en évidence des variations du comportement du réservoir de façon à prévoir, au mieux, la date de percée thermique, sinon de développer les modèles pour y parvenir.

Or, il n'existe pas actuellement d'acquisition continue et concertée des paramètres d'exploitation nécessaires au calcul exact de l'impact des opérations sur le potentiel géothermique du Dogger.

L'ADEME et le BRGM ont la volonté de mettre en place un outil de gestion de l'aquifère géothermique du Dogger permettant, d'une part, une intervention efficace lors de l'apparition d'un évènement lié au comportement du réservoir et, d'autre part, de prendre des décisions appropriées dans le cas de modifications de l'exploitation de ce réservoir.

La **première phase** du projet, qui s'est achevée par la publication du rapport final de phase 1 en février 2004, a permis de réaliser la base de données Dogger et d'y intégrer la plus grande partie des données historiques de 33 exploitations géothermiques de l'Île-de-France, depuis la réalisation des forages du doublet et la mise en service des installations.

Le présent rapport achève la **seconde phase** de ce dispositif, conclue dans le cadre d'une convention signée le 5 décembre 2002 entre l'ADEME et le BRGM (convention n° 02 05 051 et son avenant du 2/08/2004).

La séquence 3 de la phase 2 a permis d'analyser les signatures géochimiques d'un premier échantillon de quatre sites, pour identifier une méthode d'interprétation des données périodiques et intégrer celles-ci dans le processus de modélisation (modèle conceptuel simplifié associant le réservoir et la rétroaction de la boucle des forages).

Comme prévu dès l'origine du projet, l'étude fera l'objet d'une **troisième phase** qui, outre la pérennisation de l'acquisition des données quotidiennes et de la gestion de la base Dogger, aura pour mission principale la modélisation de la réponse du réservoir et l'interprétation des données de la base.

L'objectif de la phase 3 est d'appliquer et de vérifier la méthodologie identifiée en phase 2 sur deux groupes de doublets. Il s'agira notamment d'examiner :

- le traitement des processus de génération nette de sulfures au sein de la boucle géothermique, pour identifier les teneurs dissoutes injectées dans le réservoir, à partir des données de suivi ;
- la fonction de transfert du réservoir du Dogger avec l'éventuelle réactivité du traceur induit par le fonctionnement du système global ;
- l'incidence des interférences chimiques entre doublets proches, à comparer à celles des interférences thermiques intégrées dans le dimensionnement initial des doublets.

À partir de l'analyse du comportement de groupes de doublets, cette phase 3 du projet doit également fournir les tendances ou signatures typiques pour contribuer à la maîtrise du futur déclin énergétique des doublets. Dans le contexte des mesures accessibles en pratique, l'exploitation de l'évolution des précurseurs chimiques constitue en effet la principale source d'information pour anticiper l'apparition du recyclage des eaux froides d'injection.

L'étude réalisée en phase 2 a consisté à :

- Achever l'intégration dans la base Dogger des données historiques des 33 sites sélectionnés, après un recensement et une intégration partielle réalisés au cours de la phase 1 du projet.

Au vu des tableaux statistiques d'intégration des données présentés au chapitre 2.1, les éléments relatifs aux **données historiques des opérations** sont désormais intégrés, hormis quelques fiches non encore totalement complétées.

L'achèvement d'intégration des derniers éléments sera réalisé au cours de la phase 3 du projet.

- Mettre en place et organiser, en concertation avec les maîtres d'ouvrage et leurs exploitants, l'acquisition pérenne des données quotidiennes d'exploitation.

En ce qui concerne l'intégration des **données quotidiennes d'exploitation**, un accord de principe a été conclu avec les sociétés DALKIA, ELYO, SEMHACH et SOCCRAM qui détiennent contractuellement les missions d'exploitation de 24 des 33 sites géothermiques concernés par l'étude, ainsi qu'indiqué au chapitre 2.2 et à l'annexe 3.

La mise en œuvre de la méthodologie de transfert des données a été confiée à CFG Services et GPC comme en témoignent les éléments transcrits en annexes 4 et 5. Elle sera opérationnelle à la fin du premier semestre de 2005.

- Adapter la base de données Dogger pour la rendre conviviale et facile d'emploi pour les utilisateurs opérationnels.

Le présent rapport, ainsi que le CD-ROM (version mars 2005) de la base joint, permettent d'affirmer que cette tâche est désormais achevée.

- Concevoir le modèle d'interprétation des données et de modélisation du réservoir du Dogger.

L'interprétation des données d'exploitation s'appuie principalement sur les études antérieures réalisées jusqu'au début des années 1990 et sur le contenu de la base de données. Aucune information factuelle n'étant disponible sur le déclin énergétique des doublets, l'interprétation est centrée sur les signaux chimiques restitués au puits de production et sur le rôle de précurseur du refroidissement attribuable à certaines espèces dissoutes, telles que les sulfures, ou minérales. L'analyse détaille successivement l'évolution de la géochimie du fluide dans les différents compartiments de la boucle géothermale, puis l'impact des transferts de ces espèces sur les caractéristiques de la réponse observable en tête de puits de production.

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des fluides géothermaux du Dogger du Bassin parisien est analysée en terme de tendances sur la durée d'exploitation et de variabilité spatiale sur la base de quatre échantillons géographiques (Meaux, Ris-Orangis, Créteil et Clichy-sous-Bois). Ce premier diagnostic géochimique permet de constater que les évolutions identifiées lors du démarrage de la production (1982-1985) pour les différents paramètres (potentiel redox, Fer (+II) et soufre (-II)) se sont poursuivies jusqu'en 2001-2003. Le déséquilibre vis-à-vis de l'état redox apparaît systématique et la décroissance continue du potentiel suggère l'interaction de plusieurs couples du soufre, nécessitant des données spécifiques pour étendre l'analyse. L'état d'équilibre vis-à-vis des minéraux, selon les zones géographiques, est caractérisé par l'indice de saturation qui renseigne sur la nature des dépôts observés à la paroi des forages (*i.e.*, calcite, sidérite et mackinawite) et sur les éventuels candidats pouvant être associés à l'apparition du futur refroidissement.

Un modèle conceptuel du fonctionnement de la boucle géothermale est utilisé pour intégrer les composantes du système et assurer le lien entre l'évolution de la

géochimie des eaux et le comportement du réservoir. La réponse du réservoir à l'injection est évaluée par modélisation en considérant le cas de deux doublets (Créteil et Coulommiers) et en s'appuyant sur les données d'exploitation disponibles depuis une vingtaine d'années après la mise en service. Vis-à-vis de la réponse observable en surface, l'analyse comprend l'examen des contraintes associées à la schématisation pour la modélisation (problématique générale), les corrélations existantes entre transferts thermiques et chimiques, ainsi que l'identification d'une méthodologie pour le traitement des données d'exploitation. Cette méthode, destinée à être appliquée à des groupes de doublets, met en évidence l'importance des données détaillées durant les premières années d'exploitation et le rôle croissant du recyclage des eaux injectées. Cette fonction de recyclage, inhérente à l'exploitation par doublet, recouvre deux aspects très liés : la réponse du réservoir restituant sur la durée la mémoire de l'injection, et l'interaction instantanée des processus géochimiques affectant la concentration en sulfures dissous au sein des forages (caractéristiques du fluide réinjecté).

Sommaire

1. Introduction	11
2. Intégration des données d'exploitation dans la base	15
2.1. ACQUISITION DES DONNÉES HISTORIQUES.....	15
2.2. ACQUISITION DES DONNÉES QUOTIDIENNES D'EXPLOITATION	19
3. Adaptation de la base et chargement des données	21
4. Interprétation des données et modélisation	25
4.1. ANALYSE DE LA GÉOCHIMIE DES FLUIDES DU DOGGER.....	26
4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux du Dogger.....	26
4.1.2. État d'équilibre des minéraux	27
4.1.3. Concept du doublet et impact de la boucle	28
4.2. DIAGNOSTIC THERMODYNAMIQUE ET CHIMIQUE DU SYSTÈME	30
4.2.1. Site de Coulommiers (zone est)	31
4.2.2. Site de Créteil (zone du Val de Marne)	35
4.2.3. Site de Ris-Orangis (zone sud)	38
4.2.4. Site de Clichy-sous-Bois (zone Seine-Saint-Denis)	40
4.3. DYNAMIQUE DES TRACEURS CHIMIQUES POTENTIELS	43
4.4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GÉOCHIMIQUE.....	49
4.5. MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DU RÉSERVOIR À L'INJECTION	50
4.5.1. Problématique générale	51
4.5.2. Modèle phénoménologique global.....	53
4.6. ANALYSE ANTÉRIEURE DU COMPORTEMENT DU SITE DE CRÉTEIL.....	55
4.7. COMPORTEMENT D'UN DOUBLET-TYPE (SITE DE COULOMMIERS)	59
4.7.1. Données et approche du doublet-type	59
4.7.2. Corrélation entre traçages chimique et thermique.....	62
4.7.3. Résultats des simulations	64
4.8. IDENTIFICATION D'UNE MÉTHODOLOGIE POUR LA MODÉLISATION	70
4.9. APPROCHE DU COMPORTEMENT DE GROUPES DE DOUBLETS	72

5. Conclusion	75
6. Bibliographie	77

Liste des figures

Figure 1 - Schéma conceptuel du fonctionnement d'un doublet géothermique de type Dogger du Bassin parisien.....	29
Figure 2 - Schéma représentant les différentes composantes de H ₂ S total mesurée en tête de puits d'un forage géothermique.....	30
Figure 3 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits au niveau du forage de Coulommiers.....	32
Figure 4 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Coulommiers entre 1986 et 2002. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO ₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO ₄	33
Figure 5 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath-K, Mackinawite et Sidérite en conditions de réservoir et de puits de production. Les valeurs de l'IS sont calculées en se basant sur les concentrations des éléments chimiques dans les eaux produites par le forage de Coulommiers.....	34
Figure 6 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en conditions de réservoir (forage de Coulommiers).....	35
Figure 7 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits dans le forage de Créteil.....	35
Figure 8 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Créteil entre 1985 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO ₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO ₄	36
Figure 9 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées en se basant sur les concentrations en éléments chimiques des eaux produites par le forage de Créteil.....	37
Figure 10 - Évolution de l'indice de saturation (IS) calculées de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition du puits et du réservoir (forage de Créteil).	37
Figure 11 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits par le forage de Ris-Orangis.....	38
Figure 12 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Ris-Orangis entre 1985 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO ₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO ₄	39

Figure 13 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Ris-Orangis.....	39
Figure 14 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Ris-Orangis.....	40
Figure 15 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits au niveau du forage de Clichy-sous-Bois.....	41
Figure 16 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Clichy-sous-Bois entre 1986 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO ₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO ₄	42
Figure 17 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Clichy-sous-Bois.....	42
Figure 18 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Clichy-sous-Bois.....	43
Figure 19 - Comparaison des évolutions de pH, pe et pe(HS/SO ₄) dans les quatre secteurs d'étude.....	44
Figure 20 - Comparaison des évolutions des concentrations du F(+II), S(-II), Ca et HCO ₃ (Carbone Inorganique Total) dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.....	45
Figure 21 - Comparaison des évolutions du pe et les concentrations du F(+II) ; du pe et des concentrations en S(-II) dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.....	46
Figure 22 - Comparaison des évolutions des concentrations du Sr, Cl et F ainsi que celles de SO ₄ , Na, Si, K et Mg dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.....	47
Figure 23 - Évolution des valeurs des indices de saturation de différents minéraux (Anhydrite, barytine, sidérite et mackinawite) dans les quatre zones d'étude.....	48
Figure 24 - Modèle phénoménologique global pour l'analyse de données et la modélisation.....	54
Figure 25 - Hypothèse d'évolution de la concentration en sulfures en fond de puits d'injection pour la fonction d'entrée de la simulation du doublet de Créteil (étude 1994).....	56
Figure 26 - Doublet de Créteil : simulation de la réponse du réservoir en fond de puits et comparaison avec les données expérimentales de surface ou interprétées en fond de puits (*).	57
Figure 27 - Principales variables d'exploitation du doublet de Coulommiers depuis sa mise en service, extraites de la base de données.....	59
Figure 28 - Vue partielle de la discrétisation du domaine d'étude (8 km x 8 km) retenu pour la modélisation des transferts chimiques et thermiques.....	60

Figure 29 - Détail de la discrétisation du domaine au voisinage des forages et des contraintes géométriques introduites pour assurer la progressivité du maillage.....	61
Figure 30 - Réponse thermique et chimique au producteur et comparaison avec la solution théorique de référence, exprimées en variables adimensionnelles (structure du réservoir assimilée à un monocouche équivalent).....	63
Figure 31 - Comparaison des réponses chimiques et thermiques au producteur au cours du temps traduisant l'impact des recyclages.	66
Figure 32 - Doublet de Coulommiers : impacts chimique et thermique induits dans le réservoir après 40 ans d'exploitation (réservoir monocouche et épontes adiabatiques).	67
Figure 33 - Historiques de la concentration injectée en fond de puits (C_BHI_Input) et de la réponse simulée, restituée en fond (C_BHP_Mod) et en tête (C_WHP_Mod) du puits de production (schématisation du site de Coulommiers). La variable (C_WHP_Mes) correspond aux mesures de surface.	69
Figure 34 - Zone sud-est de Paris : groupe de doublets identifié pour l'évaluation de l'impact des interférences sur la réponse chimique.....	73
Figure 35 - Évolution de la concentration en sulfures dissous en tête de puits au cours du temps. Restitution des informations de la base de données pour les producteurs du champ de Meaux.	74

Liste des annexes

Annexe 1 - Compte rendu de la réunion du Comité de pilotage du projet du 7 décembre 2004	79
Annexe 2 - Projet de courrier circulaire de l'ADEME Ile-de-France à l'attention des maîtres d'ouvrage détenteurs du permis d'exploiter les sites géothermiques du Bassin parisien.....	87
Annexe 3 - Situation des négociations avec la société ELYO pour l'acquisition des données quotidiennes d'exploitation sur six sites géothermiques du Bassin de Paris	91
Annexe 4 - Situation des négociations avec la société DALKIA pour l'acquisition des données quotidiennes d'exploitation sur quinze sites géothermiques du Bassin de Paris	97

1. Introduction

Ce rapport achève la phase 2 du projet « Gestion du Dogger de l'Ile de France » régi par la convention n° 02 05 051 du 5 décembre 2002 et son avenant n° 1 du 5 août 2004 entre l'ADEME et le BRGM.

L'ensemble du projet de gestion du Dogger, initié en octobre 2001, s'articule en trois phases successives. Son objectif final est de mettre à disposition des professionnels et de la communauté scientifique, une base de donnée active, dite base Dogger, qui permettra, d'une part, d'interpréter le comportement du réservoir par le biais de modèles hydrogéologique, thermique, géochimique et, d'autre part, de faciliter la gestion industrielle de ce réservoir grâce à la modélisation qui doit permettre de prévoir et donc d'anticiper les conséquences de son évolution (percée thermique par exemple).

La première phase du projet, qui s'est achevée par la publication du rapport final de phase 1 en février 2004, a permis de réaliser la base de données Dogger et d'y intégrer la plus grande partie des données historiques de 33 exploitations géothermiques de l'Ile-de-France, depuis la réalisation des forages du doublet et la mise en service des installations.

Cette seconde phase du projet prévoyait trois séquences de réalisation détaillée comme suit :

- **séquence 1** : acquisition des données, répartie en deux sous-séquences :
 - **données historiques** : recueil, traitement et validation du stock de données historiques non encore saisies au cours de la phase 1,
 - **données quotidienne en cours d'acquisition** : organisation et transfert des données.
- **séquence 2** : base de données :
 - réorganisation et adaptation de la base de données réalisée au cours de la phase 1 du projet,
 - chargement de la base de données,
- **séquence 3** : conception de l'interprétation et mise au point de la modélisation.

Les séquences 1 et 2 ont consisté essentiellement, au cours de cette phase du projet à, d'une part, obtenir des sociétés de service sous-traitantes de rassembler les données historiques des sites qui leur étaient confiés soit en leur sein même, soit auprès de la DRIRE Ile-de-France ou des maîtres d'ouvrages, afin d'achever le renseignement de la base en données historiques. Dans le cadre de la séquence 1, le projet a permis également d'informer les maîtres d'ouvrages détenteurs du permis minier des opérations géothermiques de leur intérêt à participer à la mise à disposition des données quotidiennes d'exploitation des sites dont ils assurent la responsabilité et

de sensibiliser les exploitants de 24 des 33 sites inscrits au projet à transférer ces données quotidiennes d'exploitation, sur la base d'un protocole simple d'emploi.

Dans le cadre de la séquence 2, l'opérateur BRGM de gestion de la base Dogger a travaillé à la validation des données transférées par les sociétés sous-traitantes entre avril 2004 et janvier 2005, en assurant les nécessaires adaptations de la base au fur et à mesure de l'identification de difficultés techniques d'enregistrement en terme, notamment, de lexiques.

En ce qui concerne la séquence 3, qui amorce l'objectif final de ce projet lequel sera traité au cours de la phase 3, force est de constater que la gestion des exploitations géothermiques par doublet et plus généralement la maîtrise de la filière actuellement en service dans le bassin parisien, repose sur une capitalisation progressive de l'expérience qui s'accroît avec la durée de fonctionnement. Cette expérience se concrétise par l'enregistrement des mesures ou événements factuels et par l'interprétation des données pour répondre aux divers besoins. Ces besoins très variés au cours de la durée de vie des systèmes comprennent le diagnostic des anomalies de fonctionnement, la compréhension du comportement observé en cours d'exploitation vis-à-vis des prévisions et l'estimation des futures tendances.

En terme de futures tendances et de besoins associés, le contexte du déclin énergétique des doublets se positionne progressivement au centre des préoccupations. Le contexte du déclin énergétique, inhérent au fonctionnement par doublet, est lié au refroidissement du fluide de production induit par l'arrivée retardée des eaux froides injectées. Ces dernières se réchauffent partiellement lors de leur migration vers le producteur, par échange thermique avec les épontes imperméables. La chute de température de production est lente en raison de la distribution des temps de transfert entre les puits et du taux de recyclage des eaux injectées, très progressif au cours du temps. En considérant les seuls phénomènes hydrodynamiques et thermiques, la prévision de cette amorce du refroidissement ne peut être très précise. En effet, en terme de détection en surface, la faible variation de température est masquée par l'impact des fluctuations du débit production. En terme de prévision par le calcul, il subsiste de nombreuses incertitudes sur les propriétés (paramètres thermiques, dispersion, porosité) et sur la schématisation du réservoir réel (stratification et hétérogénéités). On se pose alors naturellement la question de l'existence d'éventuels phénomènes précurseurs permettant de détecter ou d'anticiper le déclin énergétique.

L'exploitation en boucle fermée et la mise en mouvement du fluide s'accompagnent de fortes variations des variables d'état (dépressurisation, pressurisation et refroidissement) et d'interactions entre la composition des eaux et les solides rencontrés (matrice minérale du réservoir, acier des tubages, etc.). Ces processus induisent des déséquilibres physico-chimiques vis-à-vis du fluide, qui se traduisent par une modification de sa composition, des dissolutions et des dépôts. L'analyse détaillée de ces processus générés par l'exploitation et la mesure périodique des signaux chimiques en surface sont susceptibles de fournir deux types d'informations :

- l'identification d'espèces dissoutes, à concentration variable, (telles que le fer ou les sulfures d'hydrogène) assimilables à un traceur chimique. L'intérêt de ces signaux

chimiques repose principalement, comme pour les signaux thermiques, sur la dynamique de transfert des traceurs. Cette dernière est en effet globalement trois à cinq fois plus rapide que celle des traceurs thermiques, d'où un signal précurseur potentiel ;

- les déséquilibres physico-chimiques associés au refroidissement et aux interactions avec les phases solides s'accompagnent de dépôt-dissolution et d'une évolution de la composition du fluide. Le refroidissement du réservoir étant associé à un front thermique mobile, ces manifestations sont alors évolutives. L'analyse de ces processus au cours du temps présente ainsi un second intérêt pour la détection éventuelle de l'arrivée du « front froid » : l'apparition de nouvelles phases minérales et/ou l'évolution d'espèces dissoutes précédemment stables.

L'interprétation de ces nombreuses données d'exploitation repose essentiellement sur la modélisation (géochimique, hydrodynamique, transferts thermiques et chimiques) pour évaluer les processus et leurs interactions. Les principales contraintes de l'approche découlent de la complexité du système, du fonctionnement en boucle fermée et du faible nombre de point de mesure :

- le réservoir profond n'est pratiquement pas accessible à la mesure en continu, par contre son comportement est prépondérant vis-à-vis de la réponse observée en surface. Le temps de séjour correspondant du fluide est très important et il restitue de manière déphasée et amortie la mémoire de l'exploitation. De par le fonctionnement en boucle, sa réponse est également modulée par les caractéristiques de l'injection (débit, température et concentration) ;
- les forages, éléments de liaison perturbateurs entre le réservoir et la surface, sont caractérisés par des temps de transferts très courts (de l'ordre de la demi-heure ou moins) avec une inertie très faible. Vis-à-vis des déséquilibres physico-chimiques, ils se distinguent essentiellement par leur température moyenne et les potentialités de dégazage au producteur ;
- enfin, les deux principaux points de contrôle du système, accessibles à la mesure en continue sont les têtes de forages. L'observation est alors nécessairement une intégration de tous les processus souterrains.

Ainsi, dans la démarche pour l'analyse des processus majeurs et la compréhension du système, il apparaît utile de segmenter la boucle géothermale en compartiments principaux (producteur, échangeur, injecteur, réservoir) et d'examiner en parallèle la géochimie du fluide et la réponse propre du réservoir. La boucle géothermale, associant ces compartiments en série, permet l'intégration et l'identification des points de contrôle caractéristiques.

Le chapitre 2 du rapport présente l'état des lieux de l'acquisition des données, tant du point de vue historique jusqu'au 31 décembre 2004, que du point de vue des données quotidiennes.

Le chapitre 3 présente l'état de construction de la base de données dédiée. Ce chapitre, très court, s'appuie essentiellement sur le CD-ROM joint au rapport lequel,

mieux qu'un texte, présente l'intérêt de la base pour l'avenir de la gestion du réservoir géothermique du Dogger.

Le chapitre 4 décrit l'approche utilisée pour l'interprétation des données par modélisation. Il comprend deux parties principales. Une première partie concerne l'analyse de la géochimie des fluides dans les différents compartiments et le diagnostic géochimique sur la base de quatre échantillons géographiques. La seconde partie est focalisée sur la formalisation d'un premier modèle conceptuel du fonctionnement de la boucle et sur la simulation de la réponse chimique et thermique de deux doublets-type, pour l'identification d'une méthodologie, applicable ensuite à des groupes de doublets.

2. Intégration des données d'exploitation dans la base

Ce chapitre, attaché à la séquence 1 de la phase 2 du projet, concerne d'une part, l'achèvement de l'acquisition des **données historiques** à laquelle étaient largement consacrés le chapitre 5 et l'annexe 2 du rapport n° BRGM/RP-52927-FR, publié en février 2004 comme rapport final de la phase 1 du projet.

La synthèse de l'enregistrement des données historiques à l'issue de cette phase 1, avait montré que *les éléments relatifs aux historiques des opérations (fiche 2) ainsi qu'aux données de forage (fiche 4) et de réservoir (fiche 5) avaient globalement été renseignés à plus de 70 %*. Il en était beaucoup moins vrai pour la localisation et l'inventaire des données (fiche 9) dont le taux d'intégration était très inférieur à 5 % pour les sites confiés à GPC et de l'ordre de 15 % pour les sites confiés à CFG Services.

Ce chapitre s'attache, d'autre part, à présenter l'état des lieux de l'intégration des **données quotidiennes d'exploitation** disponibles dans les 33 installations¹ opérations géothermiques concernées par le projet. Ce point avait été abordé succinctement en conclusion du rapport précédemment cité, ainsi que dans son annexe 3 où était présenté le modèle de protocole entre les partenaires du projet, ADEME, ARENE Ile-de-France et BRGM, et chacun des maîtres d'ouvrage ou des exploitants des 33 opérations géothermiques.

2.1. ACQUISITION DES DONNÉES HISTORIQUES

Au cours de la phase 1 du projet, l'acquisition des données historiques avait été confiée par contrat, à deux sous-traitants, les bureaux d'études d'ingénierie du sous-sol, CFG Services et GPC.

L'annexe 2 du rapport final précité de la phase 1 précitée, présentait une analyse statistique des données historiques intégrées à la base par les deux sous-traitants en détaillant, dans les tableaux correspondants, le nombre de données intégrées par site et par fiche dans chacun des trois champs de la base.

En conclusion de ce premier rapport, avait été évoquée la disparité d'intégration des données historiques, en fonction des fiches et des résultats acquis par chacun des deux sous-traitants.

¹ 34 installations fonctionnent aujourd'hui à parti de l'aquifère du Dogger en région Ile-de-France. Le site de Melun l'Almont n'a pas été inclus dans le projet.

Les deux contrats de sous-traitance signés dans le cadre de cette phase 2 prévoyaient, en première partie de mission, l'achèvement de l'acquisition des données historiques. Ces deux contrats ont été établis comme suit :

- contrat de sous-traitance n° 2 signé entre GPC INSTRUMENTATION PROCESS (GPC I&P) et le BRGM le 4 juin 2004 ;
- contrat de sous-traitance n° 2 signé entre CFG Services et le BRGM le 8 juillet 2004.

Cette opération est désormais achevée à plus de 90 % avec l'intégration quasi complète des valeurs jusqu'à la date du 31 décembre 2004, même s'il convient de noter que cette sous-séquence du projet a nécessité un jalonnement délicat, parfois même, très contraignant.

Une réunion du Comité de Pilotage en vue du cadrage du projet s'est tenue le 7 décembre 2004 à l'ADEME Paris (voir CR de réunion en annexe 1).

Les tableaux qui suivent, analogues à ceux présentés en annexe 2 du rapport final de la phase 1, détaillent l'état statistique des données historiques intégrées à la base au 31/01/2005, ainsi que les améliorations (en % du nombre d'enregistrements enregistrés) par rapport au 16 mars 2004.

On notera que les informations relatives au site de Tremblay-en-France apparaissent dans chacun de deux tableaux construits par CFG Services et GPC. En effet, ce site a bénéficié de contrats confiés simultanément à ces deux sociétés pour des missions différentes.

Il importe cependant de remarquer que certaines fiches n'ont pas été renseignées. C'est le cas en particulier de la **fiche 11** (rubrique Exploitation) pour 7 sites sous responsabilité de **CFG Services** et des **fiches 4** (2 sites), **5** (2 sites) en rubrique Ouvrage et **10** (10 sites) en rubrique Exploitation, pour **GPC**.

Ces manques seront comblés au cours de la phase 3 du projet.

CFG Services - SITUATION DES DONNEES HISTORIQUES INCLUSES DANS LA BASE "DOGGER" au 31 janvier 2005

Sites	valeur et augmentation en % par rapport à mars 2004		11318 : nombre total d'enregistrements intégrés à la base														
	0	x	Fiche 1 Intervenants	Fiche 2 Evénements	Fiche 9 Inventaires Données	Fiche 3 Données de Base	Fiche 4 Tubages	Fiche 5 Réservoir	Fiche 7 Analyses Chimiques	Fiche 8 Corrosion - Traitement	Fiche 6 Données Exploitation		Fiche 10 Contrôle Tubages	Fiche 11 Capteurs	Fiche 12 Equipements		
	Y	X								Corrosion	Traitement	Centrale	Production	Injection			
	Rubrique "Exploitation"																
	Rubrique "Ouvrage"																
Alfortville Satales à fin 2004	5 (0%)		113 (+96%)	8 (0%)	1 (0%)	1 (0%)	9 (+29%)	1 (0%)	93	92	89	38	156 (+105%)	121 (+59%)	18 (+800%)	14 (0%)	3 (+0%)
Bonneuil Satales à fin 2004	6 (0%)		79 (+162%)	1 (0%)	1 (0%)	6 (+100%)	1 (0%)	83	79	48	11	39 (+39%)	39 (+39%)	18 (+800%)	0	3	
Champigny/Marne Satales à fin 2004	3 (0%)		139 (+231%)	8	1 (0%)	6 (+100%)	1	76	84	93	87	111 (+192%)	458 (+1105%)	21 (+600%)	10	3	
Chevilly-Larue Satales à fin 2004	2 (0%)		66 (+144%)	10 (0%)	1	6	1	77	80	96	8	78 (0%)	79 (0%)	17	12 (+0%)	2 (+100%)	
Clichy/Bois Satales à fin 2004	3 (0%)		60 (+500%)	8	1 (0%)	9 (+80%)	1 (0%)	122	122	98	104	166 (+110%)	165 (+109%)	20 (+900%)	5	3	
Coulommiers Satales à fin 2004	5 (0%)		149 (+80%)	8 (+700%)	1	8 (+700%)	1 (0%)	98	95	90	91 (+9000%)	84 (+17%)	84 (+17%)	21	14 (+0%)	3 (+200%)	
l'Hay les Roses Satales à fin 2004	2 (0%)		82	8	1	4	1	68	64	66	8	145 (+99%)	145 (+99%)	17	0	3	
Meaux B1 Satales à fin 2004	3 (0%)		129 (+486%)	8	1	6 (+200%)	1	114	109	107	133	105 (+54%)	106 (+56%)	13	12	3	
Meaux B2 Satales à fin 2004	3 (0%)		96 (+5%)	8	1	6	1	103	102	85	117	85	85	13	0	3	
Meaux Collinet Satales à fin 2004	3 (0%)		119 (+29%)	8	1	8	1	109	109	81	137	103 (+98%)	103 (+98%)	25	0	3 (+0%)	
Meaux Hospital Satales à fin 2004	3 (0%)		144 (+66%)	8	1	8	1	112	108	75	141	108 (+80%)	108 (+80%)	23	8	3	
Montgeron Satales à fin 2004	5 (0%)		51	8	1	9	1	0	10	36	58	56	156 (+15500%)	11	6	3 (+200%)	
Ris Orangis Satales → fin 2004	3 (0%)		66	8	1 (0%)	6	1	89	83	84	108	109	109	11	0	2	
Sucy en Brie Satales à fin 2004	3 (0%)		62 (+63%)	8	1 (0%)	6 (+500%)	1 (0%)	85	89	138	94	108 (+54%)	105 (+50%)	15 (+400%)	0	3	
Thiais Satales à fin 2004	2 (0%)		67 (+509%)	8	1 (0%)	5 (0%)	1 (0%)	47	47	64	103	88 (+96%)	88 (+96%)	11 (+175%)	12 (+500%)	1	
Tremblay-France Satales à fin 2004	5 (0%)		71 (+344%)	8	1 (0%)	8 (0%)	1 (0%)	145	0	0	94	217	216	13	0	2	

Légende :

:fiche renseignée ou complète

:fiche à renseigner

:fiche où aucune valeur n'était renseignée en mars 2004

:fiche où les valeurs de référence ne sont pas identiques à mars 2004 et ne peuvent donc être comparées

:fiche où les valeurs de référence ne sont pas identiques à mars 2004 et ne peuvent donc être comparées

GPC - SITUATION DES DONNEES HISTORIQUES INCLUSES DANS LA BASE « DOGGER » au 31 janvier 2005

Légende :	valeur et (augmentation en % par rapport à mars 2004)	28557 : nombre total de valeurs intégrées à la base	
	0		: fiche renseignée ou complète
	x ou nbre		: fiche à renseigner
	Y		: fiche où aucune valeur n'était renseignée en mars 2004
		: fiche où les valeurs de référence ne sont pas identiques à mars 2004 et ne peuvent donc être comparées	

Sites	Rubrique "Opération"			Rubrique "Ouvrage"				Rubrique "Exploitation"				
	Fiche 1 Intervenants	Fiche 2 Evènements	Fiche 9 Inventaire Données	Fiche 3 Données de Base	Fiche 4 Tubages	Fiche 5 Réservoir	Fiche 7 Analyses Chimiques	Fiche 8 Corrosion - Traitement	Fiche 6 Données Exploitation	Fiche 10 Contrôle Tubages	Fiche 11 Capteurs	Fiche 12 Equipements
Blanc Mesnil N	x (0%)											
Puits producteur	-	26 (+63 %)	7 (0%)	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	819 (+11,3%)	1	148	1	x	x (0%)
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	21	-	x	x (0%)
Puits injecteur	-	16 (+7%)	11 (0%)	x (0%)	4 (0%)	x (0%)	397 (+4%)	1	140	2	x	x (0%)
Cachan 1	x (0%)											
Puits producteur	-	44 (+22%)	29	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	813 (+13%)	1	127	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	9 (0 %)	9	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	287 (+19%)	1	127	0	x	x
Cachan 2	x (0%)											
Puits producteur	-	31 (+3%)	29	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	692 (+16 %)	1	108	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	10 (+11%)	9	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	247 (+23%)	1	108	0	x	x
Chelles	x (0%)											
Puits producteur	-	21 (0%)	16	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	551 (+28%)	1	103	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	20 (0%)	20	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	495 (+33%)	1	103	0	x	x
Créteil	x (0%)											
Puits producteur	-	34 (+6%)	28	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	1431 (+11%)	1	82	2	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	x	x
Puits injecteur	-	11 (+1%)	9	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	430 (+20%)	1	82	1	x	x
Epinay/Senart	x (0%)											
Puits producteur	-	28 (+8%)	19	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	786 (+22%)	1	118	1	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	x	x
Puits injecteur	-	10 (+11 %)	6	x (0%)	4 (0%)	x (0%)	536 (+22%)	1	118	1	x	x
Fresnes	x (0%)											
Puits producteur	-	32 (0%)	28	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	779 (+15%)	1	106	1	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	x	x
Puits injecteur	-	15 (+7%)	13	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	259 (+16%)	1	106	1	x	x
La Courneuve N	x (0%)											
Puits producteur	-	4 (0%)	4	x (0%)	0	0	626 (+31%)	1	76	3	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	21	-	x	x
Puits injecteur	-	3 (0%)	3	x (0%)	0	0	592 (+24%)	1	76	1	x	x
La Courneuve S	x (0%)											
Puits producteur	-	37 (+48%)	24	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	1469 (+10%)	1	122	4	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	21	-	x	x
Puits injecteur	-	7 (0%)	6	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	413 (+32%)	1	122	1	x	x
Le Mée/Seine	x (0%)											
Puits producteur	-	8 (0%)	8	x (0%)	10 (0%)	x (0%)	595 (+30%)	1	61	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	15	-	x	x
Puits injecteur	-	6 (0%)	6	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	593 (+29%)	1	58	0	x	x
Maison Alfort 1	x (0%)											
Puits producteur	-	18 (+38%)	6	x (0%)	4 (0%)	x (0%)	1007 (+23%)	1	126	2	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	x	x
Puits injecteur	-	6 (+20%)	4	x (0%)	4 (0%)	x (0%)	250 (+14%)	1	125	2	x	x
Maison Alfort 2	x (0%)											
Puits producteur	-	26 (+37%)	8	x (0%)	9 (0%)	x (0%)	960 (+14%)	1	108	2	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	x	x
Puits injecteur	-	8 (+14%)	5	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	239 (+10%)	1	111	2	x	x
Orly 1 Gazier	x (0%)											
Puits producteur	-	8 (+14%)	6	x (0%)	0	0	1524 (+9%)	1	78	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	3 (+50%)	2	x (0%)	0	0	237 (+52%)	1	77	0	x	x
Orly 2 Le Nouvelet	x (0%)											
Puits producteur	-	28 (+4%)	6	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	603 (+28%)	1	108	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	17 (0%)	9	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	418 (+22%)	1	108	0	x	x
Tremblay/France	x (0%)											
Puits producteur	-	15 (+7%)	12	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	1066 (+17%)	1	115	0	x	x
Centrale	-	1 (0%)	-	-	-	-	-	-	20	-	x	x
Puits injecteur	-	3 (+200%)	1	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	493 (+15%)	1	115	0	x	x
Vigneux	x (0%)											
Puits producteur	-	37 (0%)	36	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	1388 (+14%)	1	103	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	x	x
Puits injecteur	-	10 (+11%)	8	x (0%)	4 (0%)	x (0%)	337 (+33%)	1	102	0	x	x
Villiers le Bel	x (0%)											
Puits producteur	-	20	16	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	706 (+26%)	1	104	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	x	x
Puits injecteur	-	15	12	x (0%)	4 (0%)	0	118 (+20%)	1	104	0	x	x
Villeneuve St Georges	x (0%)											
Puits producteur	-	20 (0%)	41	x (0%)	6 (0%)	x (0%)	740 (+20%)	1	104	0	x	x
Centrale	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	x	x
Puits injecteur	-	15 (0%)	12	x (0%)	8 (0%)	x (0%)	205 (+15%)	1	106	0	x	x

2.2. ACQUISITION DES DONNÉES QUOTIDIENNES D'EXPLOITATION

En conclusion du rapport final de la phase 1 précité, avait été mentionnée l'ébauche de la méthode retenue pour l'intégration pérenne des données quotidiennes d'exploitation dans la base.

Cette conclusion indiquait qu'un protocole juridique pour l'accès aux données quotidiennes du suivi d'exploitation des opérations avait été élaboré et validé à titre expérimental avec l'aide de trois maîtres d'ouvrages ou exploitants représentants plus de la moitié des opérations de géothermie au Dogger. Ces professionnels avaient été sélectionnés en fonction du mode d'acquisition des données sur les opérations dont ils ont la charge, à savoir : simple main courante, acquisition informatisée sur site ou télégestion centralisée.

Ce protocole est à ratifier entre, d'une part, l'ADEME, l'ARENE I-d-F. et le BRGM et d'autre part, les maîtres d'ouvrages ou leurs exploitants, pour chacun des 33 sites concernés par le projet.

Ce protocole, dont un exemplaire type est présenté en annexe 2, précise la méthode retenue pour un transfert efficace des données quotidiennes d'exploitation (au nombre maximum de 17), par le biais de fichiers Excel et au moyen de liaisons mensuelles par message électronique aux deux sociétés de service, CFG Services et GPC, chargées de vérifier les données et de les transférer dans la base. Du point de vue de l'équipe de projet, cette méthode, qui nécessite l'intervention programmée des personnels d'exploitation sur site, en charge des relevés quotidiens des mains courantes, doit recevoir l'aval des directions des sociétés d'exploitation attachées aux sites concernés.

Pour ce faire et au cours de la phase 2 du projet, les démarches suivantes ont été menées afin de mettre en place le plus rapidement possible ces relevés quotidiens et, en tout état de cause, à partir du 1^{er} janvier 2005 :

- Envoi, par le Délégué régional de l'ADEME Ile-de-France, d'une lettre à tous les maîtres d'ouvrage détenteurs du permis d'exploiter les informant de la démarche présentée ci-avant, leur annonçant les contacts à venir avec l'équipe de projet du BRGM ainsi qu'avec les deux sociétés de service sous contrat pour le suivi des équipements du sous-sol et enfin leur demandant leur assistance pour la mise en place de cette opération sur le long terme.

Cette décision d'action a été prise lors de la réunion du comité de pilotage qui s'est tenue le 7 décembre 2004 à l'ADEME Ile-de-France (voir CR en annexe 1 – Action 3.3 en page 5).

On trouvera en annexe 3, le projet de lettre rédigé par le BRGM, à la signature du délégué régional de l'ADEME Ile-de-France.

- Réunion de travail le 23 novembre 2004 avec Monsieur J. TAILLARDAS, Directeur de l'Agence géothermie à la société ELYO Ile-de-France, afin de présenter la base et de mettre en route cette procédure d'acquisition des données quotidiennes

d'exploitation auprès d'une société d'exploitation qui oeuvre sur plus de 18 % des sites concernés par l'étude.

Le BRGM a demandé aux deux sociétés de service de se rapprocher de M. Taillardas pour appliquer concrètement la procédure sur le terrain. On pourra voir à ce titre, en annexe 4, le courrier adressé le 19 janvier 2005, par CFG à ELYO, Ile-de-France.

À l'heure où le présent rapport est rédigé, nous n'avons pas encore obtenu de résultats concertés pour les six sites concernés.

- Réunion de travail le 14 février 2005 avec messieurs B. GRAVIÈRE, Directeur des exploitations et B. SARREY, Responsable de l'Ingénierie grands projets à la société DALKIA qui représente 15 des sites concernés par l'étude. Comme dans le cas précédent, la réunion a consisté à présenter la base Dogger et l'intérêt pour les exploitants de collaborer à la gestion continue des données dans le but de disposer de façon régulière de la modélisation de l'évolution thermique du réservoir du Dogger en vue d'optimiser les caractéristiques d'exploitation de la « chaudière géothermique ».

Cette rencontre n'a pas donné lieu à compte-rendu mais à l'envoi à DALKIA d'un courrier, daté du 9 mars 2005, lequel est présenté en annexe 5.1. et deux courriers complémentaires (annexes 5.2. et 5.3.) en direction de CFG Services et de GPC, pour la mise en oeuvre sur le terrain de cette action.

En ce qui concerne les 12 sites restant, ils se partagent entre les sociétés CORIANCE (7 sites dont 4 à Meaux), SEMHACH et IDEX (2 sites chacune) et SOCCRAM (1 site). Nous avons demandé aux deux sociétés de service sous-traitantes de se rapprocher des exploitants concernés pour mettre en oeuvre la procédure sans réunion préalable.

En conclusion, à propos de cette phase d'acquisition des données quotidiennes, il convient de constater que, malgré une bonne volonté générale, l'application de la procédure tarde à se mettre en place.

Nous préconisons de poursuivre l'action au cours de la phase 3 de projet et au besoin en organisant une réunion plénière des maîtres d'ouvrage, et des exploitants pour tenter de lever les freins, et pesanteurs qui risquent de perturber l'acquisition des données quotidiennes. D'autant plus que ce retard alourdira la tâche pour l'application rétroactive au 1^{er} janvier 2005.

3. Adaptation de la base et chargement des données

Ce document complète la description de la base de données du Dogger faite dans le rapport BRGM/RP-52927-FR.

Ce rapport d'achèvement de la phase 1 du projet, décrivait la base de données « Dogger », conçue comme un logiciel informatique paramétré pour enregistrer et retrouver des données de façon cohérente en fonction de sa finalité qui est de disposer des éléments nécessaires à l'interprétation du comportement actuel et futur du réservoir aquifère du Dogger en région Ile-de-France.

Le **protocole** de recueil des données est la démarche par laquelle les partenaires du projet ont défini la méthode de récupération de ces données par le biais de bordereaux de saisie des mesures selon de modalités précises.

Il a ensuite été nécessaire de créer des **Tables** dans la base, c'est-à-dire des éléments de structure des données destinés à leur enregistrement à partir des fiches transmises

Parmi ces tables, celle contenant la liste des mots-clés ou **Lexique** est particulièrement importante.

Le **Modèle conceptuel** de la base est le schéma d'ensemble représentatif de l'organisation des tables de recueil des données du Dogger.

Le protocole de recueil des données est finalisé sous forme de bordereaux dont la structure a été déterminée par le groupe de travail constitué du BRGM, de CFG Services et de GPC. La juxtaposition des données récupérées sur l'ensemble de ces bordereaux, est réputée donner une vision synthétique et historique d'une *opération géothermique*.

Afin d'homogénéiser le contenu des données recueillies, **l'opération géothermique** a été définie comme un site d'exploitation, généralement constitué de deux forages atteignant le réservoir du Dogger. L'eau du réservoir est prélevée dans le premier puits (producteur), elle passe ensuite dans un échangeur où elle cède sa chaleur. La chaleur récupérée est utilisée en surface. L'eau refroidie est réinjectée dans le réservoir par l'intermédiaire du deuxième forage (injecteur).

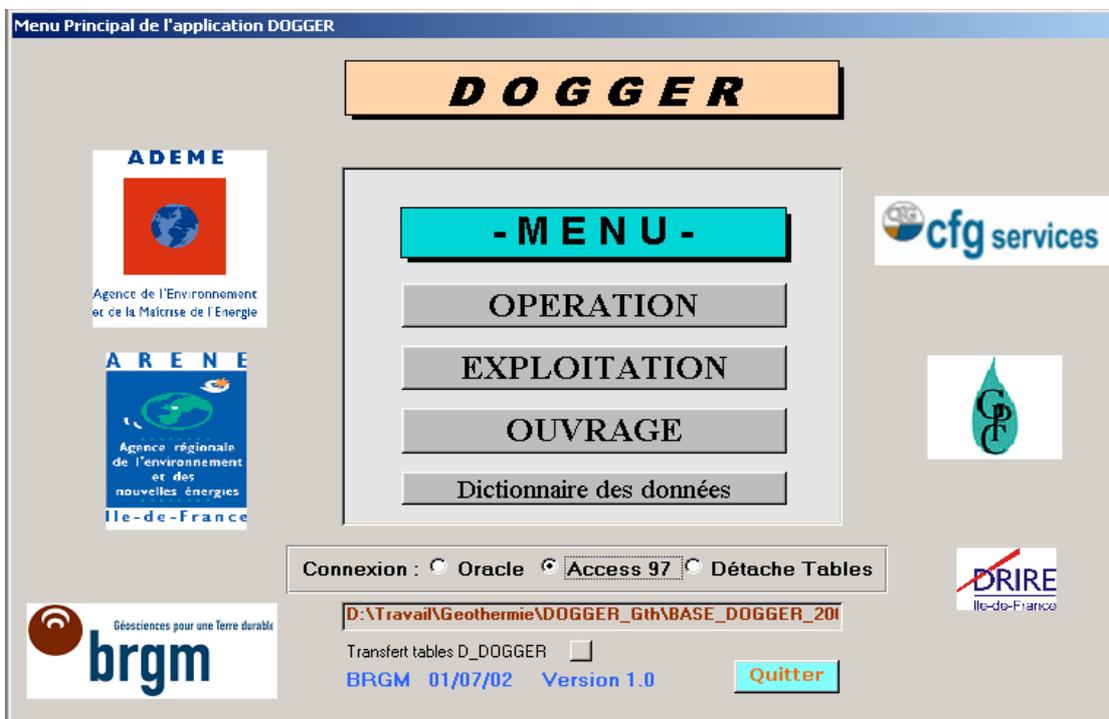
Les bordereaux utilisés permettent d'avoir une démarche de recueil des données organisée et cohérente. Les bordereaux sont identifiés sous le terme de « Fiche » dans la base de données. Ces fiches sont des alias des bordereaux transmis sous forme de fichier Excel par les utilisateurs.

Cependant aucun système n'étant figé, la récupération des données a montré que des ajustements devaient être faits ici ou là, la structure d'ensemble de la base de données n'ayant, en aucun cas, été modifiée.

Les fiches ont été regroupées en trois rubriques ou champs spécifiques dans la base de données. Ces champs, calés sur la conception et l'exploitation d'une opération de géothermie, sont :

- champ « OPERATION » qui regroupe les fiches n° 1, 2 et 9 ;
- champ « OUVRAGE » qui regroupe les fiches n° 3, 4, 5, 7, 8 et 10 ;
- champ « EXPLOITATION » qui regroupe les fiches n° 6, 11 et 12.

La page d'accueil de la base de données se présente comme suit :



Le rapport final de la phase 1 était complété par un CD-ROM qui contenait une copie de la base Oracle de référence (module Access), une copie de l'application de saisie et de consultation (module Access) et un relevé statistique du contenu des tables, en date du 16/03/2004.

Le présent rapport, qui finalise l'état de la base conformément aux dispositions de la séquence 2 de la phase 2, **est également complété par un CD-ROM.**

Il est rappelé qu'à la fin de la phase 2, toutes les données historiques concernant les opérations géothermiques du bassin de Paris devaient être chargées dans la base

Dogger. C'est ce qui a été fait à partir des données sélectionnées et fournies par les soins de GPC et CFG Services.

Dans le cadre de cette seconde phase du projet, GPC et CFG Services ont repris les envois de données à partir de novembre 2004.

La procédure de chargement a évolué en fonction de l'expérience acquise :

- lors des premiers envois des tests exhaustifs ont consisté à s'assurer de la convergence entre les données reçues et celles de la base Oracle (aux divergences de lexiques près) ;
- les chargements ultérieurs ont été simplifiés grâce au travail cohérent de fournisseurs de données qui transmettaient régulièrement leur base de référence enrichie des nouvelles valeurs. Il a alors été possible de procéder par différence entre deux envois successifs d'un même fournisseur. Ceci a permis d'alléger le travail de chargement sans nuire à la qualité.

Dans tous les cas un effort particulier a été fait pour prendre en compte l'intégralité des données fournies.

4. Interprétation des données et modélisation

L'objectif de la séquence 3 de la phase 2 du projet de gestion du Dogger est la mise au point du modèle conceptuel de l'interprétation des données en vue de l'actualisation de la modélisation du réservoir.

Le cahier des charges propose deux actions parallèles :

- compléter la compréhension des processus géochimiques majeurs qui sont à l'origine du concept de précurseurs chimiques ;
- quantifier la réponse du réservoir en terme de signaux mesurables traduisant les caractéristiques du transfert entre les puits.

L'interprétation des données d'exploitation s'appuie principalement sur les résultats des études antérieures réalisées jusqu'au début des années 1990 et sur le contenu de la base de données en cours de chargement. Les données essentielles proviennent des mesures périodiques en tête de puits de production, enregistrées dans les diverses tables (exploitation, évènements, analyse, corrosion) de la base « Dogger ».

Dans la mesure où l'on ne dispose pas encore de données factuelles sur le refroidissement ou le déclin énergétique des doublets, l'objectif de l'interprétation est d'extraire le maximum d'informations utiles des signaux chimiques restitués au puits de production, afin de préciser le diagnostic du comportement et ses tendances évolutives. L'intérêt des signaux chimiques (mise à profit du traçage induit par l'exploitation), desquels on peut estimer déduire des précurseurs de la percée thermique, repose principalement sur la dynamique de transfert des traceurs. Cette dernière est en effet globalement trois à cinq fois plus rapide que celle des transferts thermiques en raison des échanges énergétiques entre le fluide, la matrice et les épontes du réservoir.

L'approche utilisée pour l'interprétation et le diagnostic est décomposée en deux parties très interdépendantes :

- l'analyse et l'incidence de l'évolution de la chimie du fluide dans la boucle constituée par le réservoir, les forages et l'échangeur. Il s'agit notamment d'examiner : les données historiques d'exploitation, les caractéristiques chimiques dans les différents compartiments du système, les processus conditionnant les concentrations injectées en fond de puits d'injection et l'éventualité d'apparition d'autres précurseurs (éléments chimiques) annonçant le refroidissement ;
- l'évaluation par la modélisation de la réponse du réservoir à l'exploitation et en particulier les réponses chimiques et thermiques induites par la réinjection du fluide associée au fonctionnement en doublet. Cette quantification, appliquée à quelques doublets ou groupe de doublets, vise à préciser les relations entre les réponses thermiques et chimiques pour valoriser le diagnostic chimique et contribuer à la gestion du futur déclin énergétique.

4.1. ANALYSE DE LA GÉOCHIMIE DES FLUIDES DU DOGGER

Plusieurs études physico-chimiques des fluides du Dogger de bassin de Paris ont été réalisées dès le début des années 1980 à l'issue des premières opérations géothermiques (Criaud *et al.*, 1989). La réalisation des forages géothermiques a permis l'accès à l'eau du réservoir avec les détails physico-chimiques nécessaires pour une meilleure caractérisation en vue de comprendre le fonctionnement de l'échangeur géothermique. Ainsi, l'état thermodynamique initial est relativement bien connu (Michard et Bastide, 1988 ; Coudrain-Ribstein et Gouz, 1992). En revanche, des perturbations significatives sont introduites par l'exploitation du champ, induites notamment par les écoulements (modification de la répartition de la pression) et la température (voisinage des puits d'injection d'eau refroidie). Les modifications des variables extensives influent directement sur l'état d'équilibre thermodynamique entre les phases (minéraux-eau-gaz) du système.

Le but de l'analyse est de poursuivre cette caractérisation des fluides géothermaux en cherchant à mettre en évidence d'éventuelles évolutions physico-chimiques, induites par les vingt années d'exploitation du réservoir géothermique. L'examen comprend un diagnostic de l'état d'équilibre thermodynamique et l'appréciation des conséquences géochimiques des évolutions induites par l'exploitation. Ces évolutions ou déséquilibres devraient permettre d'évaluer les signaux annonciateurs du comportement futur de l'échangeur. En d'autres termes, il s'agit d'identifier le(s) traceur(s) chimique(s) réactif(s) ou non, susceptible(s) d'annoncer l'arrivée du front froid, ou plus généralement le refroidissement progressif du forage de production, qui pourrait éventuellement être associé à l'apparition de dépôts de nouveaux minéraux (notamment ceux à comportement prograde vis-à-vis de la température).

4.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux du Dogger

L'eau de l'aquifère du Dogger du bassin de Paris est de type NaCl avec une salinité comprise entre 6,5 et 35 g/l. La température est comprise entre 47 et 85 °C. L'état d'équilibre thermodynamique de ces eaux, vis-à-vis des minéraux des réservoirs sédimentaires, a été principalement étudié pour la période antérieure à 1990 (Bastide, 1985 ; Michard et Bastide, 1988 ; Criaud *et al.*, 1989 ; Coudrain-Ribstein et Gouz, 1993).

Criaud *et al.* (1989) avaient analysé les équilibres rédox montrant qu'un déséquilibre entre les différents couples (CO_2/CH_4 , N_2/NH_4^+ , $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$ et H^+/H_2) est quasi-général. Ce déséquilibre est assez caractéristique des champs géothermiques de basse enthalpie.

Les modélisations préliminaires réalisées étaient basées sur les données thermodynamiques et les outils de modélisation disponibles (Criaud *et al.*, 1989). En l'absence de données de prélèvement de fond de puits, les propriétés physico-chimiques des fluides du réservoir étaient recalculées à partir des résultats de mesures en surface et de laboratoire en « corrigeant » notamment les effets de la température.

Les effets de la pression et du dégazage n'ont pas été pris en compte car les études précédentes (Criaud *et al.*, 1989) ont montré que ces effets sont négligeables pour des pressions inférieures à 200 bar. C'est effectivement le cas pour les conditions du Dogger du bassin de Paris. De la même manière, ces auteurs ont montré que la correction des effets du dégazage introduit des variations de pH inférieures à 0,2 unité. Ces ordres de grandeur restent néanmoins inférieurs aux erreurs sur les constantes thermodynamiques, peu connues, mais admises comme étant comprises entre 0,1 et 0,5 unité log.

Le paramètre Eh diminue avec la température. Comme le système est assez réactif, l'équilibre $\text{HS}^-/\text{SO}_4^{2-}$ n'est certainement pas atteint. La concentration en H_2 dissous est relativement élevée (0,01 à 40 $\mu\text{mol/l}$), probablement en raison de la corrosion du tubage des forages.

Globalement, les différents couples chimiques sensibles aux propriétés redox montrent que le fluide du Dogger est plutôt en conditions réductrices, mais il est difficile d'identifier le(s) couple(s) majeur(s) imposant ces conditions. Boulègue (1978) et Criaud *et al.* (1989) ont abouti à la même conclusion stipulant un contrôle par des espèces métastables du soufre (S_2O_3^- , SO_3^- , HS^- , etc.). Cette conclusion semble défendable car effectivement le soufre est le composant majeur sensible aux conditions redox et par conséquent le système n'est pas à l'équilibre redox global. Cette situation complique en fait la mise en oeuvre de modélisations géochimiques directes ou inverses, compte tenu du manque de données sur la cinétique des réactions redox et de la contribution effective des espèces métastables. Une analyse plus détaillée de l'état du système en exploitation apparaît nécessaire pour essayer de lever ces difficultés en adoptant d'autres hypothèses, cohérentes avec ce qui est considéré comme connaissances acquises sur la physico-chimie du système.

4.1.2. État d'équilibre des minéraux

Le système géothermique du Dogger du bassin de Paris n'est certainement pas à l'équilibre global comme l'a montré l'état d'équilibre des couples redox. Néanmoins, il est tout à fait possible et réaliste d'envisager des équilibres partiels avec des assemblages minéralogiques variables d'une zone à l'autre.

L'exploitation de l'énergie géothermique à l'aide de la technique de doublets (puits d'injection - puits de production) induit des déséquilibres thermodynamiques dans les environnements du proche puits, où sont associées des variations de pression et de température significative. Les phénomènes de corrosion - dépôts localisés dans les forages peuvent amplifier ce déséquilibre du fluide vis-à-vis des minéraux du réservoir poreux.

Michard et Bastide (1988) ont montré que les concentrations de la plupart des éléments chimiques sont contrôlées par des phases minérales. Ainsi la calcite, la dolomite désordonnée, la calcédoine, la fluorite, la gibbsite (ou kaolinite), l'albite et l'adulaire contrôlèrent les concentrations de HCO_3^- , Mg, SiO_2 , F, Al, Na et K. Par conséquent, les teneurs de ces éléments dans les fluides du réservoir ne dépendent que de la température et des concentrations des ions mobiles (*i.e.*, Cl^- et parfois SO_4^{2-}).

Ces auteurs avaient également montré que cet équilibre n'était atteint qu'à Evry et à Ris-Orangis.

Coudrain-Ribstein et Gouze (1993) ont abouti à des conclusions similaires et de façon plus tranchée pour l'anhydrite qui contrôlerait les sulfates. Selon ces auteurs, les fluides du Dogger sont à l'équilibre thermodynamique avec neuf minéraux : albite, calcédoine, calcite, dolomite, anhydrite, fluorite, kaolinite, feldspath-K et illite ou chlorite. Finalement, les teneurs en ces différents éléments chimiques (Na, Si, Ca, Mg, SO₄, F, Al, K et Fe), y compris la pression partielle de CO₂, seraient fonction de seulement la température et la concentration en Cl⁻. Criaud *et al.* (1989) supposent que la pyrite devraient être à l'équilibre dans plusieurs cas.

4.1.3. Concept du doublet et impact de la boucle

La figure 1 représente un schéma simplifié d'un doublet géothermique avec ses trois composantes majeures : forage de production d'eau chaude, forage d'injection d'eau froide et échangeur de chaleur. Des changements rapides et importants de température, de pression et de composition chimique (*i.e.*, de concentrations) interviennent dans ces trois composantes du système. Ensuite, en fonction de la dynamique du réservoir, *i.e.*, vitesse d'écoulement, distance entre puits/doublets, réaction avec l'encaissant, etc. Ces changements peuvent se propager à l'échelle du doublet, y compris dans le réservoir. Le réservoir qui constitue la quatrième composante du système et de la boucle globale est plutôt le siège de variations lentes de ses variables de comportement mais avec par contre un très fort effet de mémoire et une plus grande hétérogénéité spatiale.

Parmi les mécanismes induisant ces changements physico-chimiques, les réactions de corrosion - dépôts au niveau des forages ont été clairement mises en évidence dans les forages. Dans cette phase, l'étude s'est focalisée sur l'analyse de l'historique de fonctionnement des doublets en vue d'identifier des tendances globales d'évolution des propriétés physico-chimiques pouvant annoncer l'arrivée du front froid dans le puits de production lié à l'injection.

La figure 2 présente schématiquement l'impact des sources potentielles des sulfures sur la concentration mesurée en tête de puits de production. C'est le seul point de mesure où l'échantillonnage des fluides de réservoir « modifiés » par des réactions au niveau du puits de production est possible. Ainsi, les concentrations en sulfures mesurées peuvent avoir trois composantes :

- l'apport en fond de forage par la production du réservoir avec tout d'abord une concentration initiale (traduisant les caractéristiques du gisement local et parfois en équilibre avec la pyrite), puis après un certain temps, une évolution de la concentration induite par le recyclage des eaux injectées compte tenu du schéma hydrodynamique spécifique du doublet ;
- la contribution générée au sein du forage, et distribuée selon sa longueur, par la réduction bactérienne des sulfates dissous ;

- enfin, la partie de la composition globale consommée dans les processus de dépôts de sulfures métalliques.

En fait, la concentration en sulfure mesurée en tête de puits est héritée de ces trois origines sous la forme de contributions additives. Vis-à-vis du comportement du compartiment « forage de production », la concentration résultante issue de composante de recyclage et augmentée de la contribution bactérienne et diminuée par la partie prise dans les dépôts solides de sulfures de métaux (essentiellement de fer : FeS).

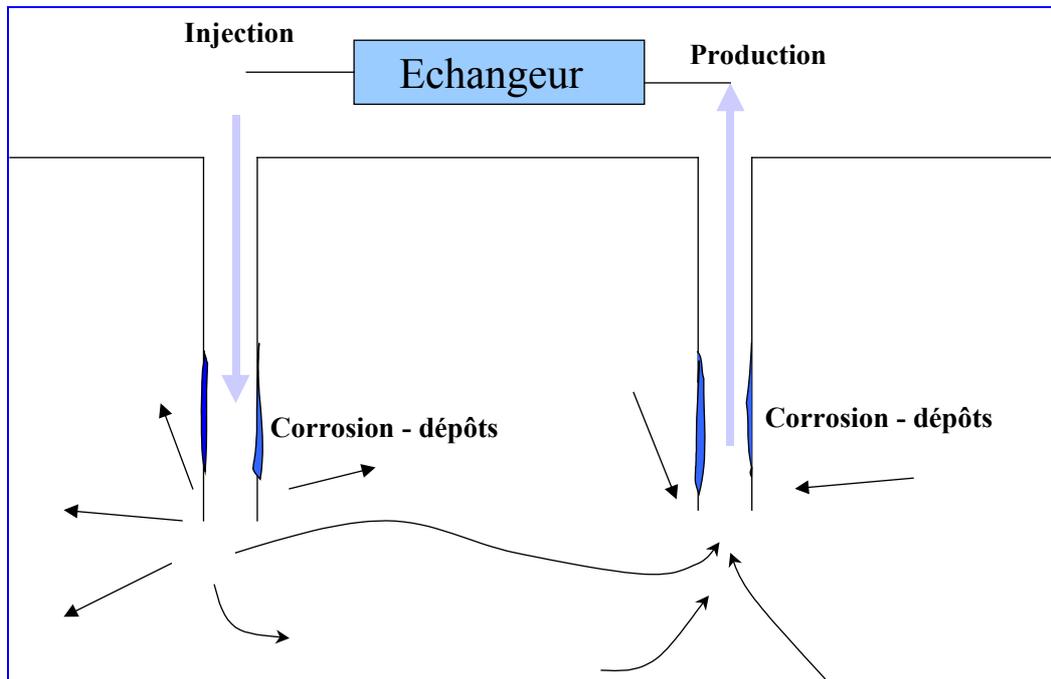


Figure 1 - Schéma conceptuel du fonctionnement d'un doublet géothermique de type Dogger du Bassin parisien.

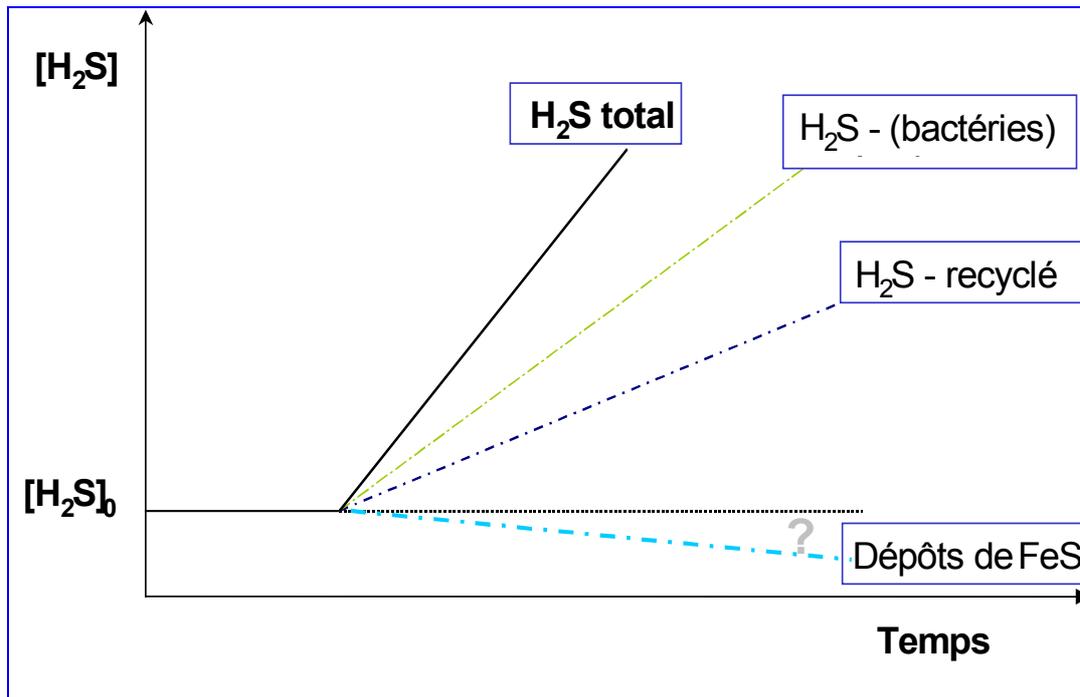


Figure 2 - Schéma représentant les différentes composantes de H_2S total mesurée en tête de puits d'un forage géothermique.

L'analyse des dépôts ne permet pas des essais de répartition des sulfures en ces trois composantes. Cette approche très simplifiée de la phénoménologie, utilisée ici pour l'analyse des données, sera reprise ensuite sous la forme « d'un modèle conceptuel global » dans la modélisation des réponses du réservoir incluant l'impact de la boucle forages-échangeur.

4.2. DIAGNOSTIC THERMODYNAMIQUE ET CHIMIQUE DU SYSTÈME

Les analyses de la thermodynamique et des propriétés physico-chimiques des eaux géothermales réalisées au cours de cette étude s'inscrivent dans la continuité des précédentes études réalisées par le BRGM (Criaud *et al.*, 1989 ; Honegger *et al.*, 1989) accompagnant le début du développement de la géothermie basse enthalpie du bassin de Paris.

Pour analyser la variabilité du comportement observé, quatre sites correspondant à quatre domaines géographiques ont été sélectionnées :

- zone est de Paris (site de Coulommiers) où la température de production est comprise entre 81 et 84 °C avec une chlorinité de l'ordre de 0,55 m² ;

² m = mole/l

- zone du Val de Marne (site de Créteil) avec une température de production comprise entre 75 et 78 °C présentant la chlorinité la plus faible (0,052 m et 0,38) ;
- zone sud de Paris (site de Ris-Orangis) avec une température de production comprise entre 68 et 71 °C et une chlorinité de 0,13 m ;
- zone de la Seine-Saint-Denis (site de Clichy-sous-Bois) avec une température de 69 à 72 °C et une chlorinité de 0,31 m.

Comme on peut le constater, la température des eaux produites est relativement stable puisqu'elle ne varie que d'environ 3 °C (fonction du débit) pour chacun des quatre groupes analysés. La chlorinité est également très stable pour chaque groupe mais elle varie de façon importante d'un groupe à l'autre.

On peut noter que les résultats détaillés dans ce rapport ne sont pas exhaustifs, mais le choix a été de se focaliser sur les éléments et les minéraux qui présentent un intérêt au niveau « traçage » du fonctionnement du réservoir. Les minéraux suivants : calcite, celestite, feldspath-K, kaolinite, laumontite et illite, sont saturés vis-à-vis des fluides produits dans les quatre zones d'étude. De la même manière, la pyrite présente des valeurs d'indice de saturation supérieures à quatre et dépassant parfois dix. Le comportement de ces minéraux ne sera pas présenté dans cette étude.

Pour intégrer la mackinawite dans cette analyse, il a été nécessaire d'introduire des données thermodynamiques nouvelles (Benning *et al.*, 2000) car dans les bases de données des logiciels couramment utilisés (PHREEQC, EQ3/6, etc.). Ce minéral n'était pas renseigné ou ne l'était qu'à 25 °C.

Il est à noter que la forme précise du sulfure de fer qui précipite dans ce type de système est difficilement accessible. Généralement, la mackinawite précipite au contact avec le fluide générateur. Avec le temps et le mûrissement cristallin, ce sulfure de fer ($\text{Fe}_x \text{S}_{(1-x)}$) se transforme en phase plus stable de type pyrite (FeS_2).

4.2.1. Site de Coulommiers (zone est)

L'eau produite dans le forage Coulommiers présente des températures comprises entre 81 et 84 °C. L'analyse réalisée au cours de cette étude concerne des échantillons de fluides prélevés entre février 1985 et août 2001.

Le fluide géothermal de Coulommiers montre des évolutions nettes en certains éléments réactifs notamment le fer et le sulfure (fig. 3). Cette évolution est continue depuis les observations faites dans plusieurs études précédentes (Criaud *et al.*, 1989 ; Matray et Menjoz, 1996). Ainsi, la **concentration en sulfure poursuit son accroissement alors que celle du Fe(+II) poursuit sa décroissance (fig. 3).**

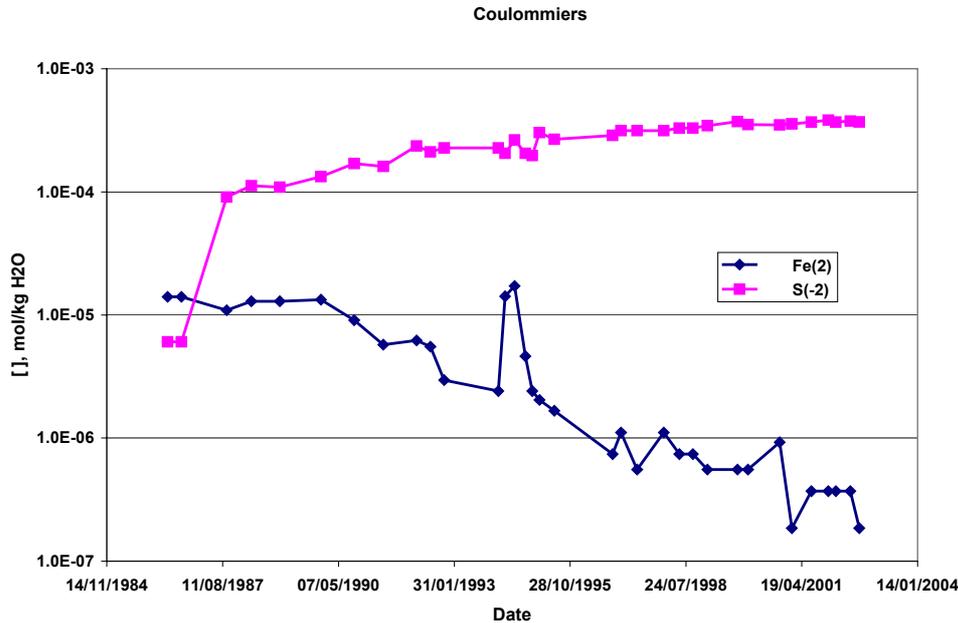


Figure 3 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits au niveau du forage de Coulommiers.

Ce comportement a été attribué aux phénomènes de corrosion - dépôts soutenus par une activité bactérienne intense. Le schéma global à l'origine de ces évolutions « antagonistes » serait représenté par une activité bactérienne croissante (réduction des sulfates en sulfure) ; d'où l'accroissement des concentrations de ce dernier et à la corrosion du métal de tubage qui pourrait prendre de l'ampleur aussi, mais comme les dépôts de sulfures de fer *i.e.*, mackinawite (FeS), prennent d'importantes quantités de fer, la concentration de ce dernier est en constante décroissance. On peut rappeler que la concentration en fer dans les fluides du Dogger du bassin de Paris est faible (0,3 à 0,5 mg/l ; Ouzounian *et al.* 1987). En effet, le Fe(+II) a diminué entre 1985 et 2003 d'environ 100 fois et le S(+II) a augmenté à peu près de la même ampleur.

La figure 4 montre l'évolution du pH, pe^3 (mesuré) et pe (HS/SO₄) recalculé à l'aide du couple sulfure/sulfate. Le pH est très stable depuis le début de l'exploitation en 1986. À son tour le pe recalculé à l'aide du couple de soufre est très stable. En revanche, le pe mesuré montre une diminution d'environ une unité pe depuis le début de l'exploitation du forage géothermique de Coulommiers. Cette tendance suppose que le potentiel redox soit contrôlé par d'autres couples à l'intérieur du forage et que le soufre n'est pas en équilibre redox interne.

³ pe = potentiel redox

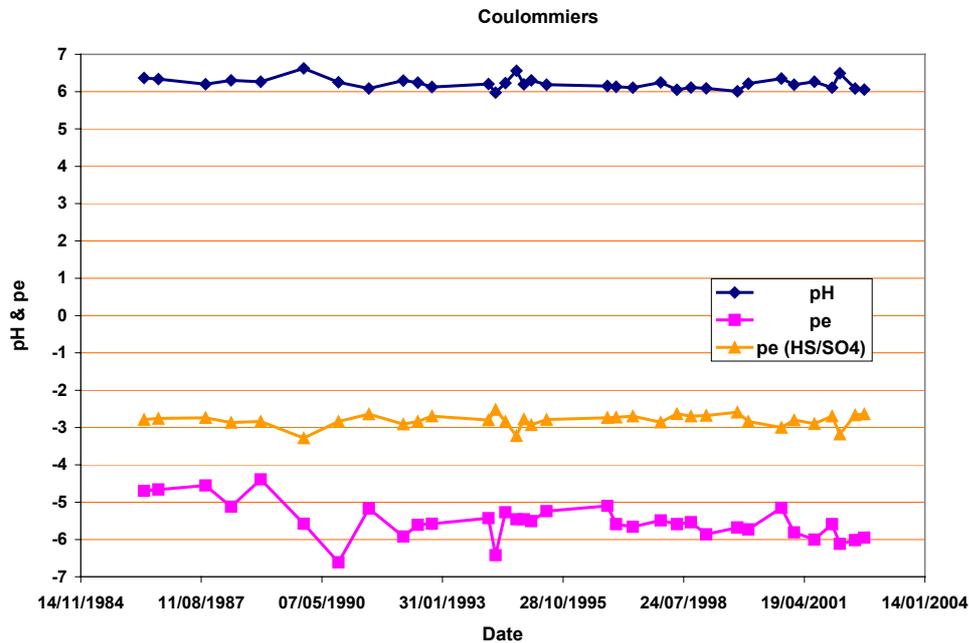


Figure 4 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Coulommiers entre 1986 et 2002. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de $pe(HS/SO_4)$ sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO_4 .

La figure 5 montre l'évolution de l'indice de saturation (IS) de certains minéraux potentiellement existants dans le réservoir ou qui pourraient précipiter dans l'échangeur géothermique de Coulommiers. La gibbsite, le feldspath et la mackinawite sont globalement saturés ($IS \sim 0$) voire sursaturés ($IS > 0$). Ce comportement est stabilisé depuis 1987. L'analyse du comportement de la mackinawite est particulièrement intéressante car ce minéral peut faire partie des minéraux indésirables (scaling) se déposant le long des forages de production et d'injection. Il semblerait que ce pourrait le cas à Coulommiers. Le fait d'avoir des valeurs de IS de ce minéral stabilisées alors que les concentrations en éléments chimiques le composant (Fe(+II) et S(-II)) ont un comportement antagoniste suppose aussi que ce minéral se dépose à l'équilibre thermodynamique. Finalement, le comportement antagoniste de Fe(+II) et S(-II) s'expliquerait tout simplement par un contrôle par la solubilité de FeS. Autrement dit, la précipitation de la mackinawite devrait se faire à l'équilibre thermodynamique.

D'autre part, la sidérite ne présente pas de risque de dépôts puisque l'évolution des valeurs de son IS, systématiquement négatives, épouse exactement celle du Fer(+II) (fig. 3). On note aussi que ce comportement est cohérent avec un contrôle du Fer par la solubilité de FeS, le bicarbonate par la solubilité de la calcite et la sidérite ne fait pas partie des minéraux stables dans le système.

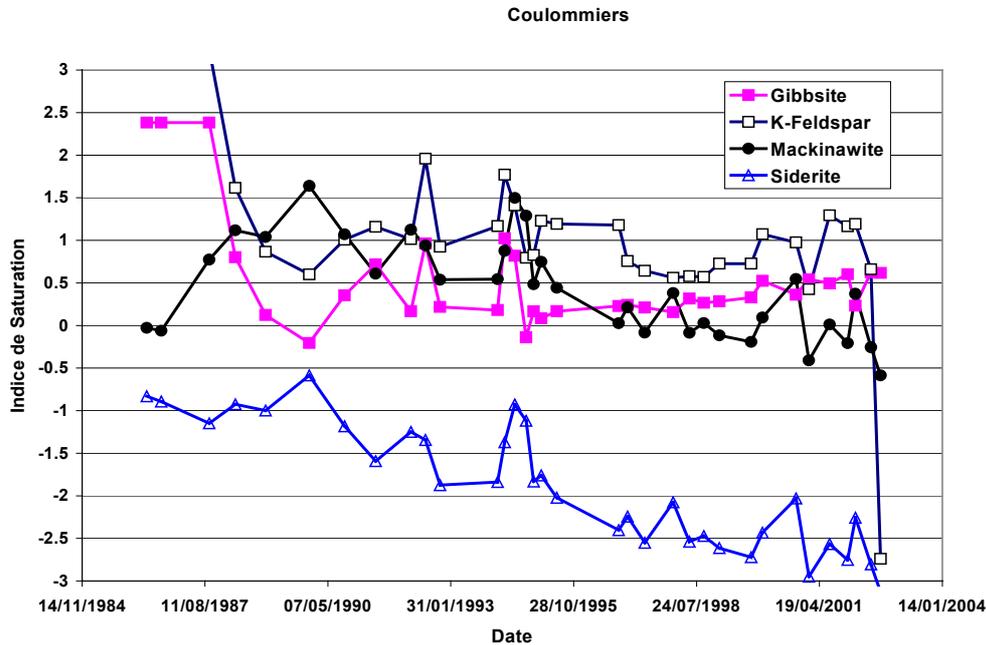


Figure 5 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath-K, Mackinawite et Siderite en conditions de réservoir et de puits de production. Les valeurs de l'IS sont calculées en se basant sur les concentrations des éléments chimiques dans les eaux produites par le forage de Coulommiers.

La figure 6 montre que l'anhydrite, la calcite et la fluorite sont tous saturés vis-à-vis des eaux produites par le forage de production à Coulommiers. Le comportement de la calcite est relativement instable vraisemblablement à cause des problèmes de dégazage assez fréquents dans ce genre de système. Néanmoins, on peut supposer que la calcite est à l'équilibre thermodynamique et présente un risque de dépôts dans le forage de production en cas de dégazage (Desplan *et al.*, 1979). La calcédoine (la silice) est très proche de l'équilibre sans pour autant supposer sa précipitation. Le comportement de la silice dans le Dogger du bassin de Paris a été largement étudié (Azaroual *et al.*, 1997). Cette étude avait montré que la silice dissoute est contrôlée par un polymorphe de silice dont la solubilité est comprise entre celle du quartz et celle de la calcédoine.

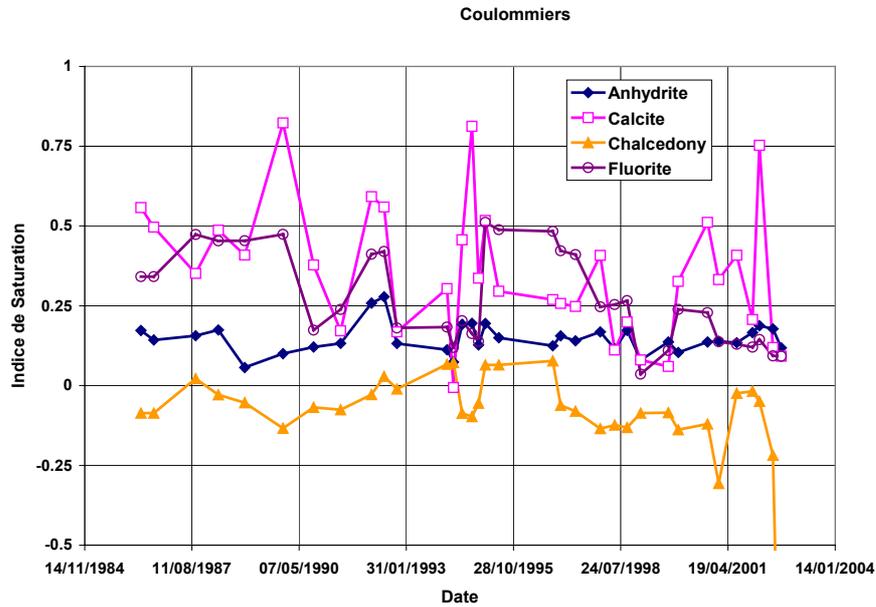


Figure 6 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en conditions de réservoir (forage de Coulommiers).

4.2.2. Site de Créteil (zone du Val de Marne)

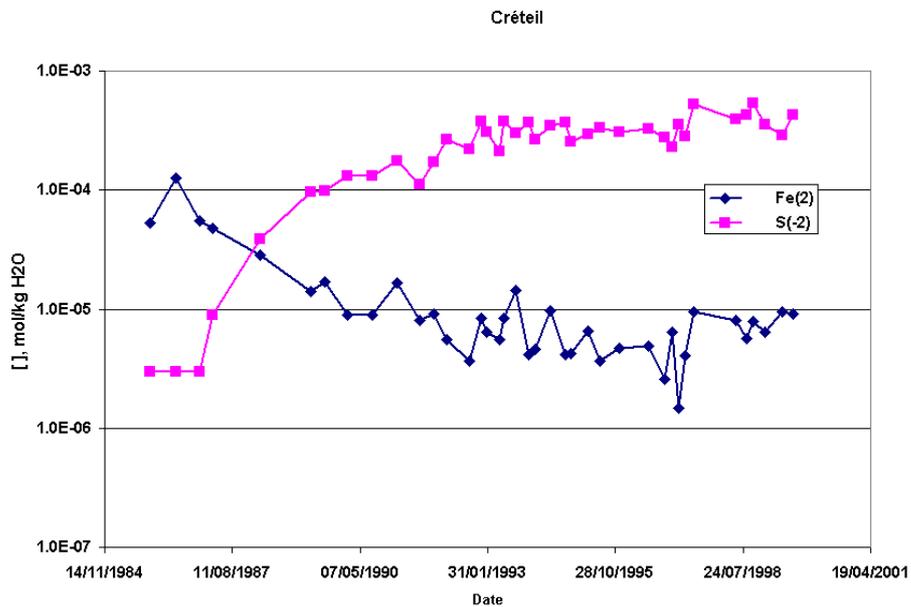


Figure 7 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits dans le forage de Créteil.

L'eau produite dans les forages de ce doublet du Val-de-Marne présente des températures comprises entre 75 et 78 °C. L'analyse réalisée au cours de cette étude concerne des échantillons de fluides prélevés entre février 1985 et août 2001. La figure 7 montre que les évolutions des concentrations du Fe(+II) et de S(-II) dans les eaux du forage de Créteil sont opposées et plus ou moins similaires à celles observées dans le cas de Coulommiers (fig. 3). En revanche, les amplitudes de ces variations sont nettement différentes puisque **la concentration en Fe(+II) a diminué d'un ordre de grandeur alors que celle de S(-II) a augmenté de deux ordres.**

La figure 8 montre l'évolution du pH, pe (mesuré) et pe(HS/SO₄) recalculé à l'aide du couple sulfure/sulfate. Le pH est très stable depuis le début de l'exploitation (en 1985). À son tour le pe recalculé est très stable. En revanche, le pe mesuré montre une diminution d'environ une unité pe depuis le début de l'exploitation du forage géothermique de Créteil. Cette tendance suppose que le potentiel rédox soit contrôlé par d'autres couples à l'intérieur du forage et que le soufre n'est pas en équilibre rédox interne. Globalement les comportements du pH et de pe sont très similaires pour les deux groupes (zone est de Paris et Val-de-Marne).

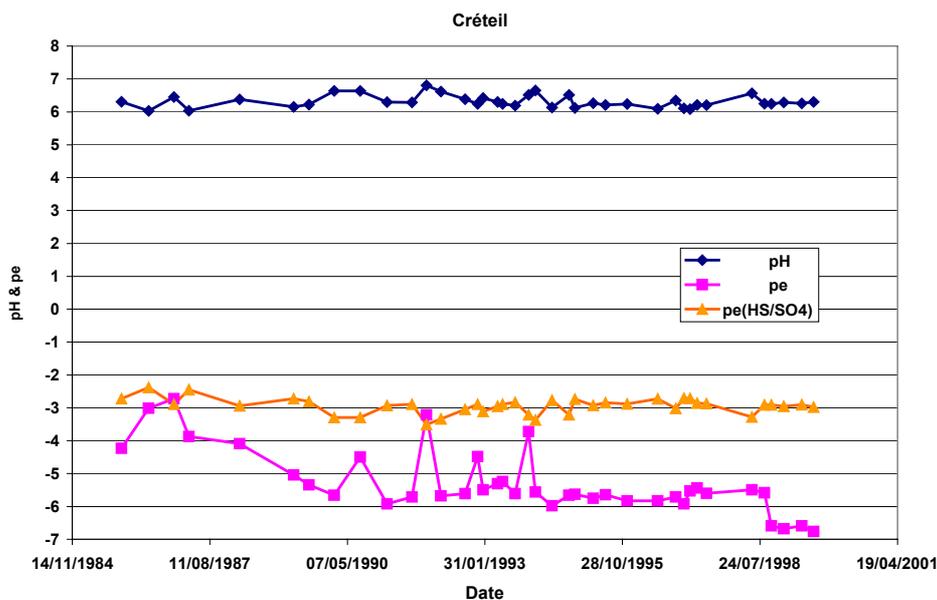


Figure 8 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Créteil entre 1985 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO₄.

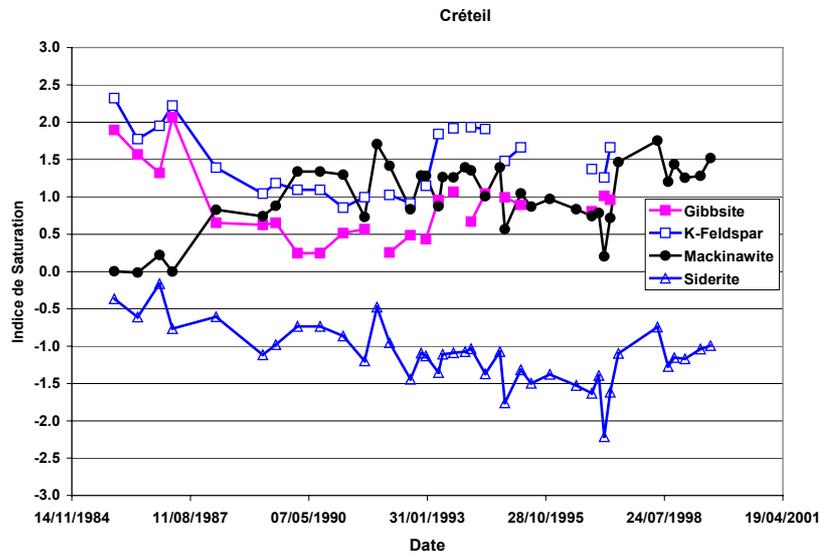


Figure 9 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées en se basant sur les concentrations en éléments chimiques des eaux produites par le forage de Créteil.

De même, la mackinawite (fig. 9) présente une sursaturation quasi-générale ce qui suggère fortement sa précipitation dans le forage de production. La gibbsite et le feldspath sont également saturés. En revanche, l'indice de saturation de la sidérite systématiquement négatif évolue de façon similaire à l'évolution du Fe(+II).

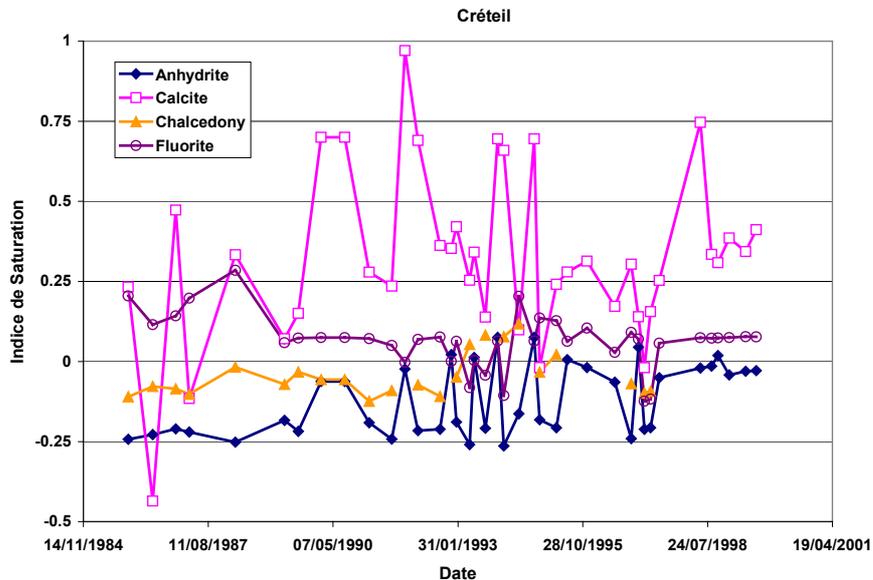


Figure 10 - Évolution de l'indice de saturation (IS) calculées de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition du puits et du réservoir (forage de Créteil).

La figure 10 montre l'évolution de l'indice de saturation de plusieurs minéraux (anhydrite, calcite, calcédoine et fluorite) calculé pour les conditions de température régnant dans le puits et le réservoir. On constate que la calcite et la fluorite toujours sursaturées. En revanche, l'anhydrite est légèrement sous-saturée et par moment saturée. La silice (calcédoine) est pratiquement à l'équilibre thermodynamique.

4.2.3. Site de Ris-Orangis (zone sud)

L'eau produite dans les forages du doublet de la zone sud présente des températures comprises entre 69 et 72 °C. L'analyse réalisée au cours de cette étude concerne des échantillons de fluides prélevés entre février 1985 et août 2001.

La figure 11 montre que les concentrations du Fe(+II) et de S(-II) dans les eaux produites au niveau du forage de Ris-Orangis ont évolué depuis 1986 jusqu'en 1992 de façon différente par rapport aux évolutions observées à Coulommiers et Créteil. Cette fois ci, **la concentration en S(-II) a diminué et celle de Fe(+II) est restée plus ou moins stable**. Ensuite, les concentrations de ces deux éléments chimiques deviennent similaires et n'évoluent plus depuis 1993.

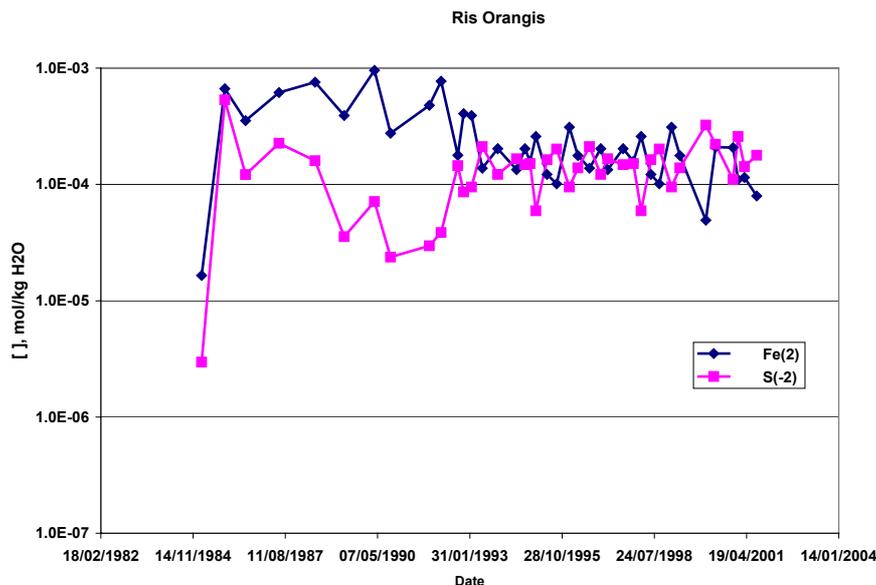


Figure 11 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits par le forage de Ris-Orangis.

La figure 12 montre l'évolution du pH, pe (mesuré) et pe(HS/SO4) recalculé à l'aide du couple sulfure/sulfate. Le pH est très stable depuis le début de l'exploitation (en 1985). À son tour le pe recalculé est très stable. En revanche, le pe mesuré montre une diminution d'environ une unité pe depuis le début de l'exploitation du forage géothermique de Ris-Orangis. Il convient de noter que l'évolution du pe mesuré n'est pas directement corrélée au comportement du Fe(+II) et encore moins corrélée à celui de S(-II). Ceci souligne tout simplement que le système redox des fluides

géothermique du Dogger est très complexe probablement à cause d'intenses réactions de corrosion et d'activité bactérienne.

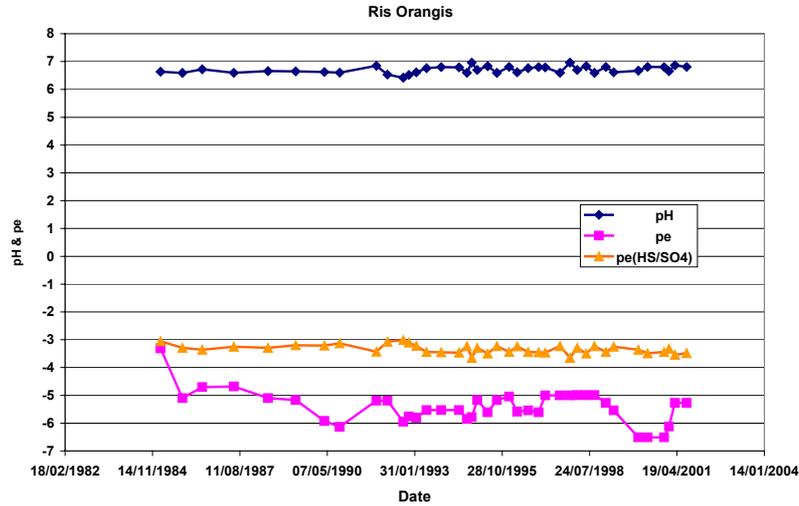


Figure 12 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Ris-Orangis entre 1985 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de pe(HS/SO₄) sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO₄.

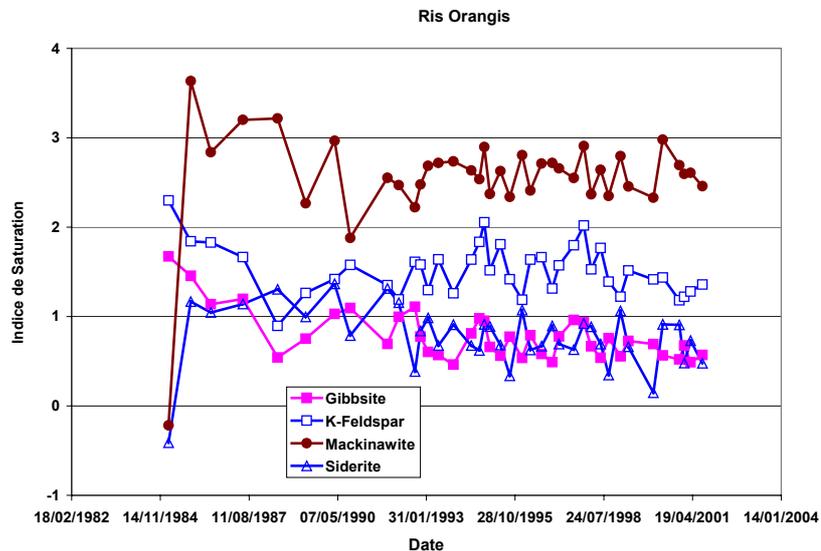


Figure 13 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Ris-Orangis.

La figure 13 met en évidence une nette sursaturation de la mackinawite dont les valeurs de IS sont systématiquement supérieures à 2,0. La gibbsite et le feldspath sont également sursaturés vis-à-vis des fluides produits à Ris-Orangis. Il faut également noter que le risque de dépôt de la sidérite (FeCO_3) est réel car les valeurs de IS sont systématiquement supérieures à 0,0. Cette différence de comportement du fer pourrait s'expliquer par le fait que la silice précipite.

La figure 14 montre que la calcite est également saturée, voire sursaturée, depuis la mise en production du puits de Ris-Orangis. En revanche, l'anhydrite et la fluorite présentent des valeurs de IS nettement négatives (entre -0,6 et 0).

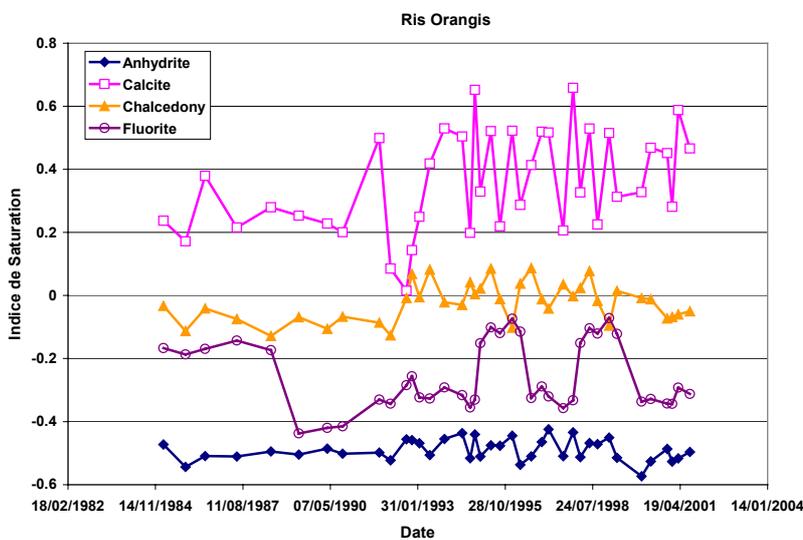


Figure 14 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Ris-Orangis.

Finalement, en zone sud, les dépôts de carbonates (sidérite et calcite) et de sulfure de fer (FeS) présentent un risque important.

4.2.4. Site de Clichy-sous-Bois (zone Seine-Saint-Denis)

L'eau produite dans les forages du doublet de Seine-Saint-Denis présente des températures comprises entre 68 et 71 °C. L'analyse réalisée au cours de cette étude concerne des échantillons de fluides prélevés entre novembre 1986 et septembre 2002.

La figure 15 montre que les concentrations du $\text{Fe}(+II)$ et de $\text{S}(-II)$ dans les eaux produites au niveau du forage de Clichy-sous-Bois ont évolué de façon différente. **La concentration en $\text{S}(-II)$ augmente lentement, de façon monotone depuis 1986, et celle de $\text{Fe}(+II)$ a diminué en présence d'oscillations.**

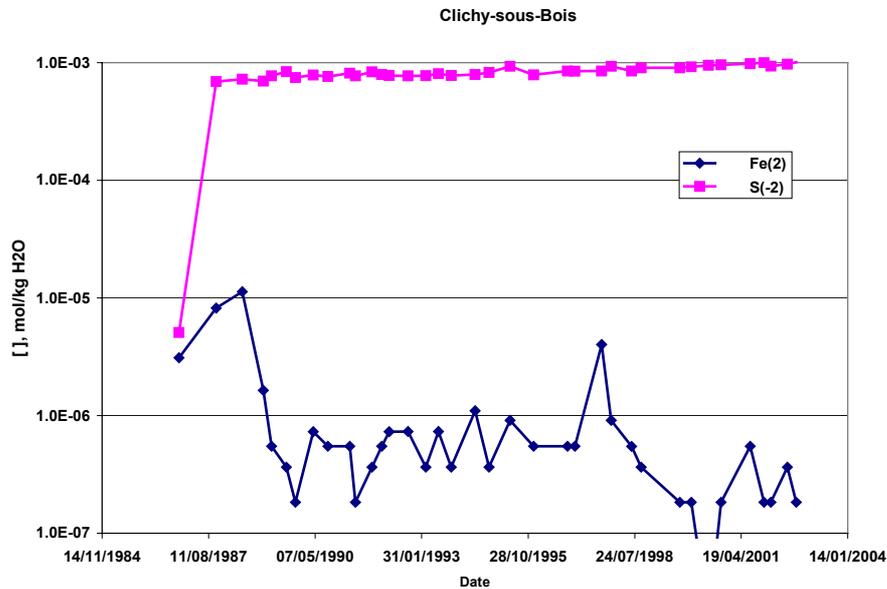


Figure 15 - Évolution des concentrations en Fe(+II) et S(-II) dans les fluides produits au niveau du forage de Clichy-sous-Bois.

La figure 16 montre l'évolution du pH, pe (mesuré) et pe(HS/SO4) recalculé à l'aide du couple sulfure/sulfate. Le pH est très stable depuis le début de l'exploitation (en 1986). À son tour le pe recalculé est très stable. En revanche, le pe mesuré montre une diminution d'environ deux unités pe depuis le début de l'exploitation du forage géothermique de Clichy-sous-Bois. Il convient de noter que l'évolution du pe mesuré est globalement corrélée au comportement du Fe(+II). Par rapport aux quatre zones étudiées Clichy-sous-Bois présentent les concentrations en sulfure les plus élevées et les plus stables.

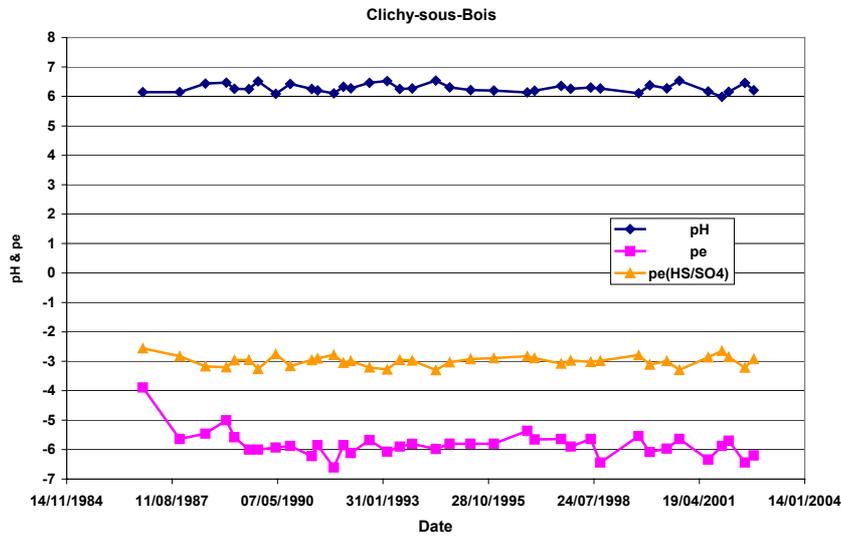


Figure 16 - Évolution de pH et pe des fluides produits par le forage de Clichy-sous-Bois entre 1986 et 2001. Les valeurs de pH sont celles recalculées pour les conditions de fond de puits à partir des mesures en surface. Les valeurs de pe correspondent à celles mesurées en surface et celles de $pe(HS/SO_4)$ sont recalculées en condition de fond à partir du couple HS/SO_4 .

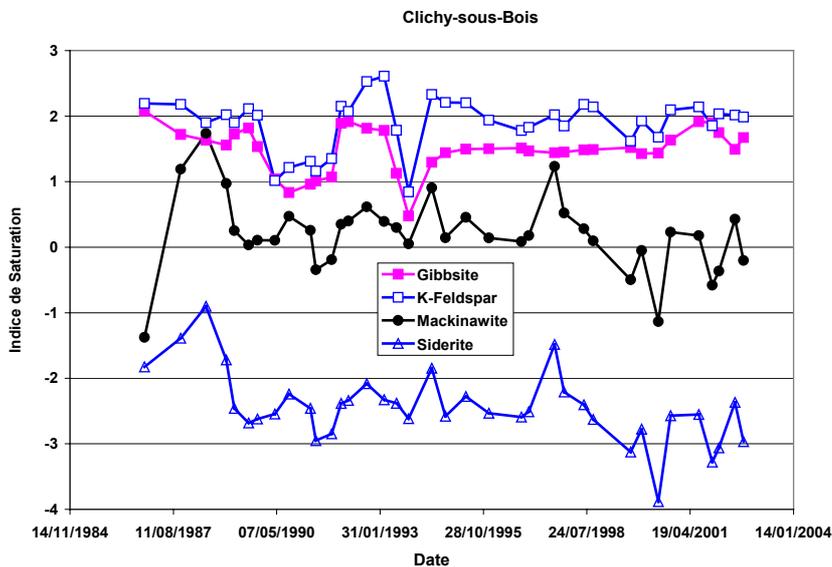


Figure 17 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de Gibbsite, Feldspath, Mackinawite et Sidérite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Clichy-sous-Bois.

La figure 17 montre que la gibbsite et le feldspath-K sont sursaturés, la mackinawite est pratiquement à l'équilibre alors que la sidérite est nettement sous-saturée.

D'après la figure 18, seule la calcite est sursaturée. L'anhydrite et la fluorite sont dans la plupart du temps sous-saturées.

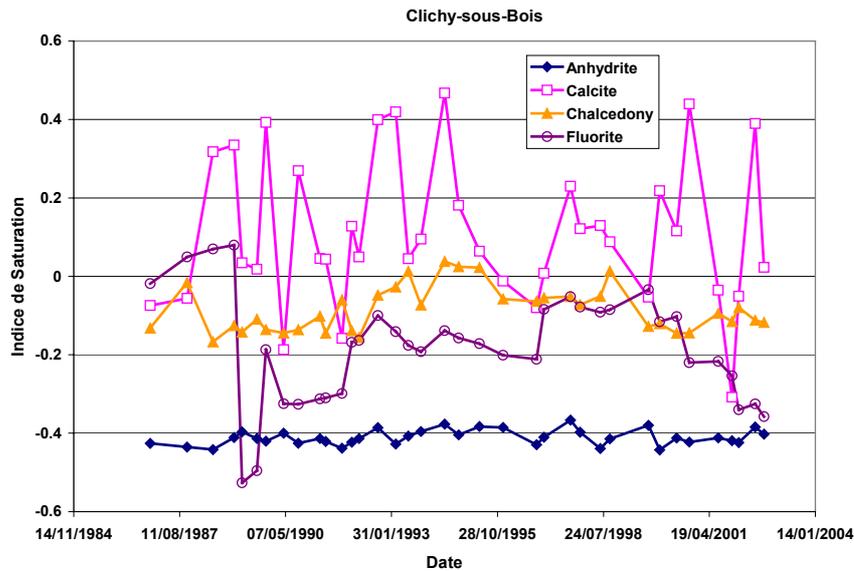


Figure 18 - Évolution de l'indice de saturation (IS) de l'Anhydrite, Calcite, Calcédoine et Fluorite en condition de réservoir. Les valeurs de l'IS sont calculées à l'aide des eaux produites par le forage de Clichy-sous-Bois.

4.3. DYNAMIQUE DES TRACEURS CHIMIQUES POTENTIELS

Le but de ce paragraphe est de faire une analyse comparative de différents paramètres pour les quatre zones étudiées. La figure 19 montre que **le pH est très stable** et proche de la neutralité (entre 6 et 7). **Le pe mesuré est plus variable** puisque l'on mesure des valeurs comprise entre -3 et -6,5. **Le potentiel redox (pe) présente une tendance globale et systématique de décroissance** depuis le début de l'exploitation du réservoir. **Autrement dit, le système devient de plus en plus réducteur. La question qui reste toujours en suspens est le déchiffrement de la part revenant au puits de production de celle du réservoir liée aux effets du recyclage des fluides.** Le pe recalculé à l'aide du couple du soufre n'est pas aisé à exploiter car l'équilibre n'est probablement pas atteint pour le couple choisi et l'on ne dispose pas de données pour étendre cette analyse à d'autres couples.

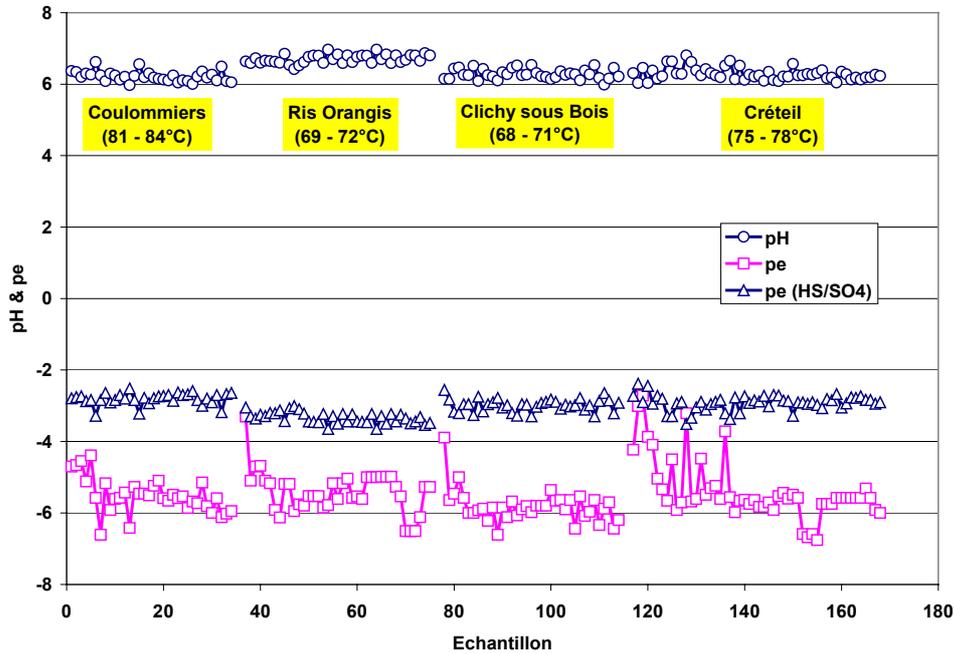


Figure 19 - Comparaison des évolutions de pH, pe et pe(HS/SO₄) dans les quatre secteurs d'étude.

La figure 20 présente les différentes évolutions des deux éléments clés de la réactivité des fluides produits par les forages géothermiques du Dogger du bassin de Paris. Les concentrations en fer les plus basses ont été mesurées pour les fluides de Coulommiers et Clichy-sous-Bois. Des concentrations intermédiaires ont été mesurées pour les fluides de Créteil. À Ris-Orangis, les concentrations en fer sont les plus élevées.

La figure 20 montre aussi que les concentrations en Ca et en carbone inorganique dissous n'évoluent plus dans le temps.

La figure 21 présente de façon comparative les évolutions de $pe - \log [Fe(+2)]$ et celles de $pe - \log [S(-2)]$ pour les quatre secteurs étudiés. Globalement, le potentiel redox (pe) est corrélé avec la concentration en Fe(+) et anti-corrélé avec la concentration en S(-2). À Ris-Orangis la situation est plus complexe, car il n'est pas possible de dégager une tendance claire. Ce secteur montre les concentrations les plus élevées en Fe(+2) et parmi les plus basses aussi en S(-2).

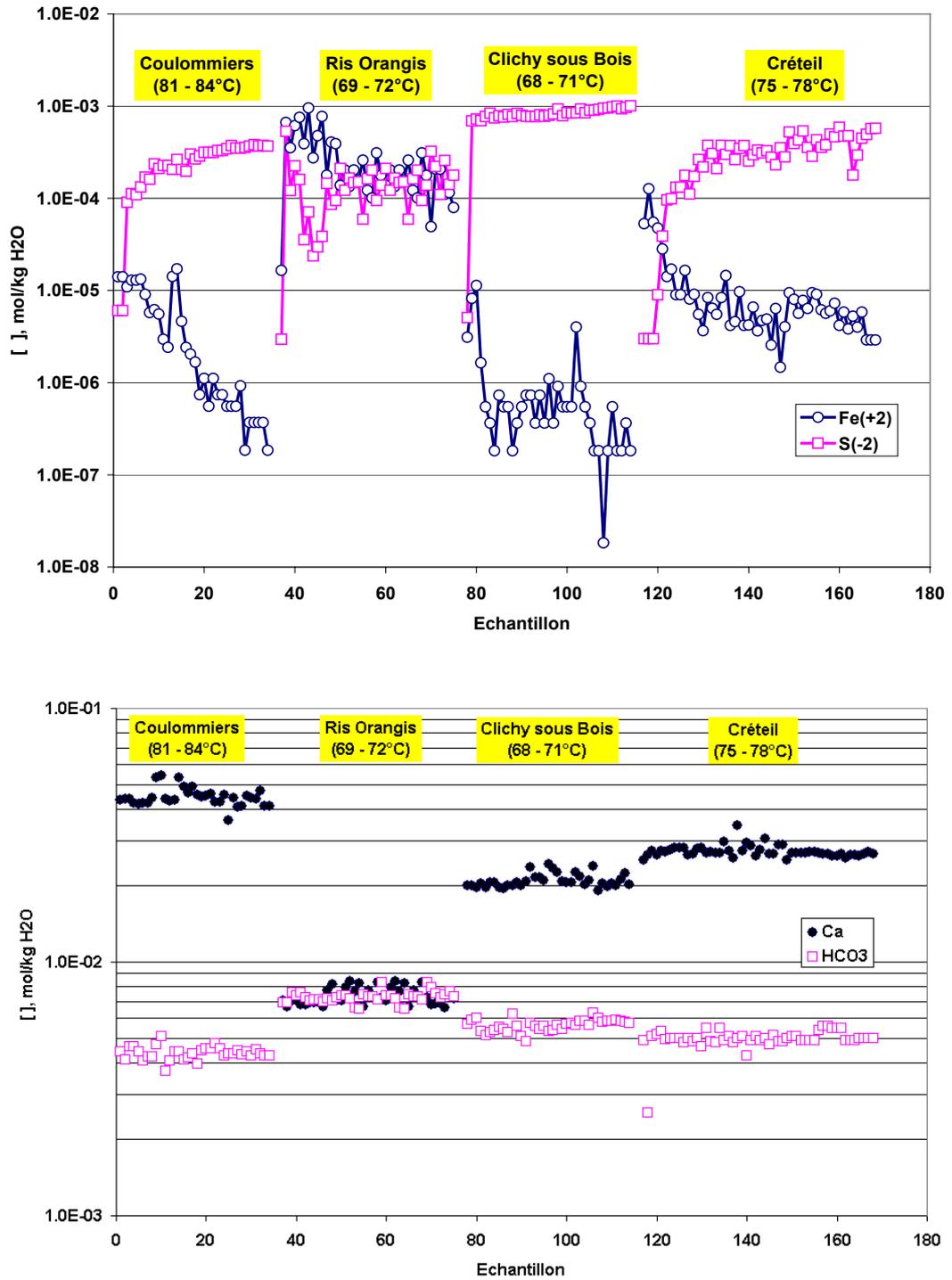


Figure 20 - Comparaison des évolutions des concentrations du F(+II), S(-II), Ca et HCO₃ (Carbone Inorganique Total) dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.

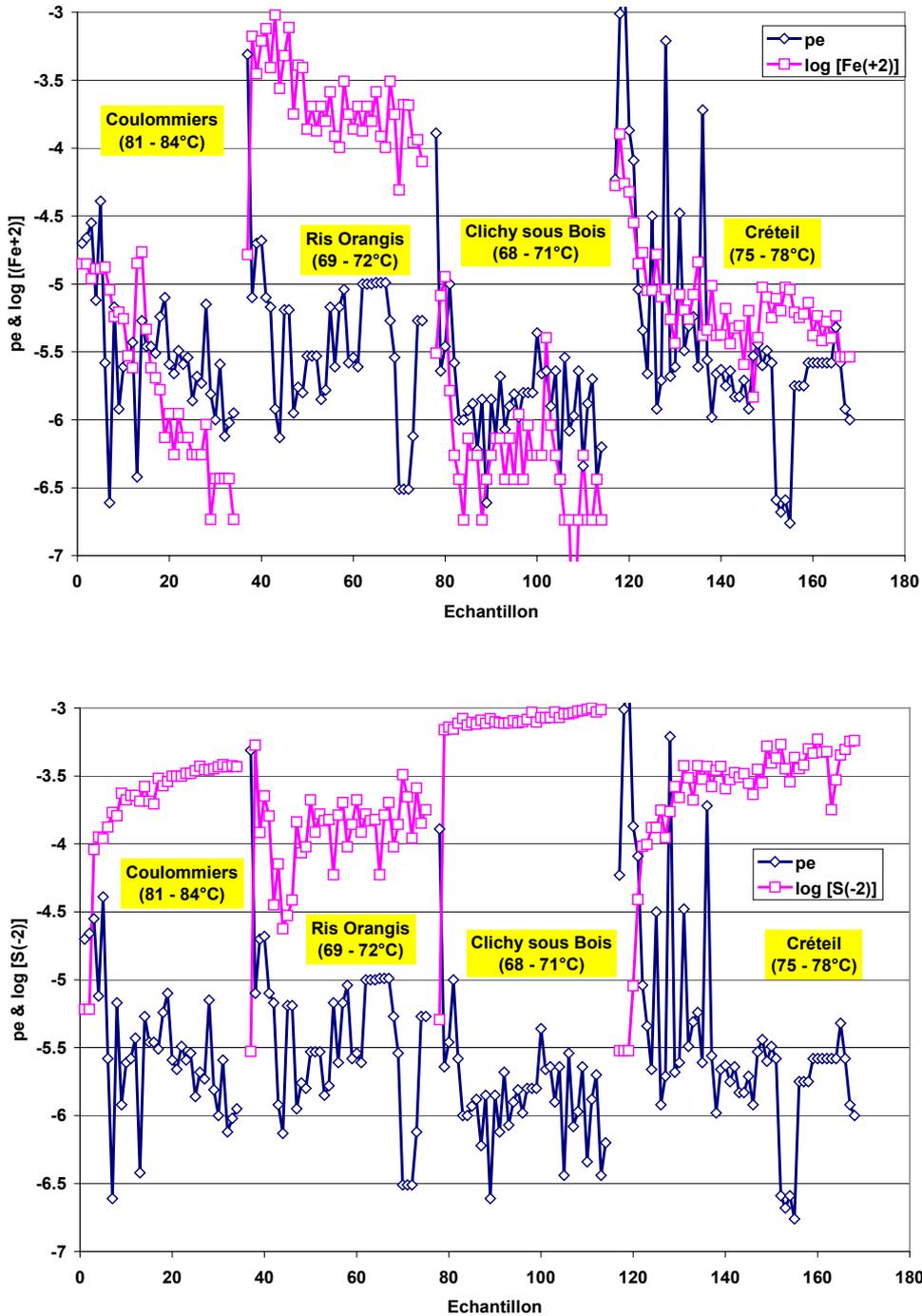


Figure 21 - Comparaison des évolutions du pe et les concentrations du F(+II) ; du pe et des concentrations en S(-II) dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.

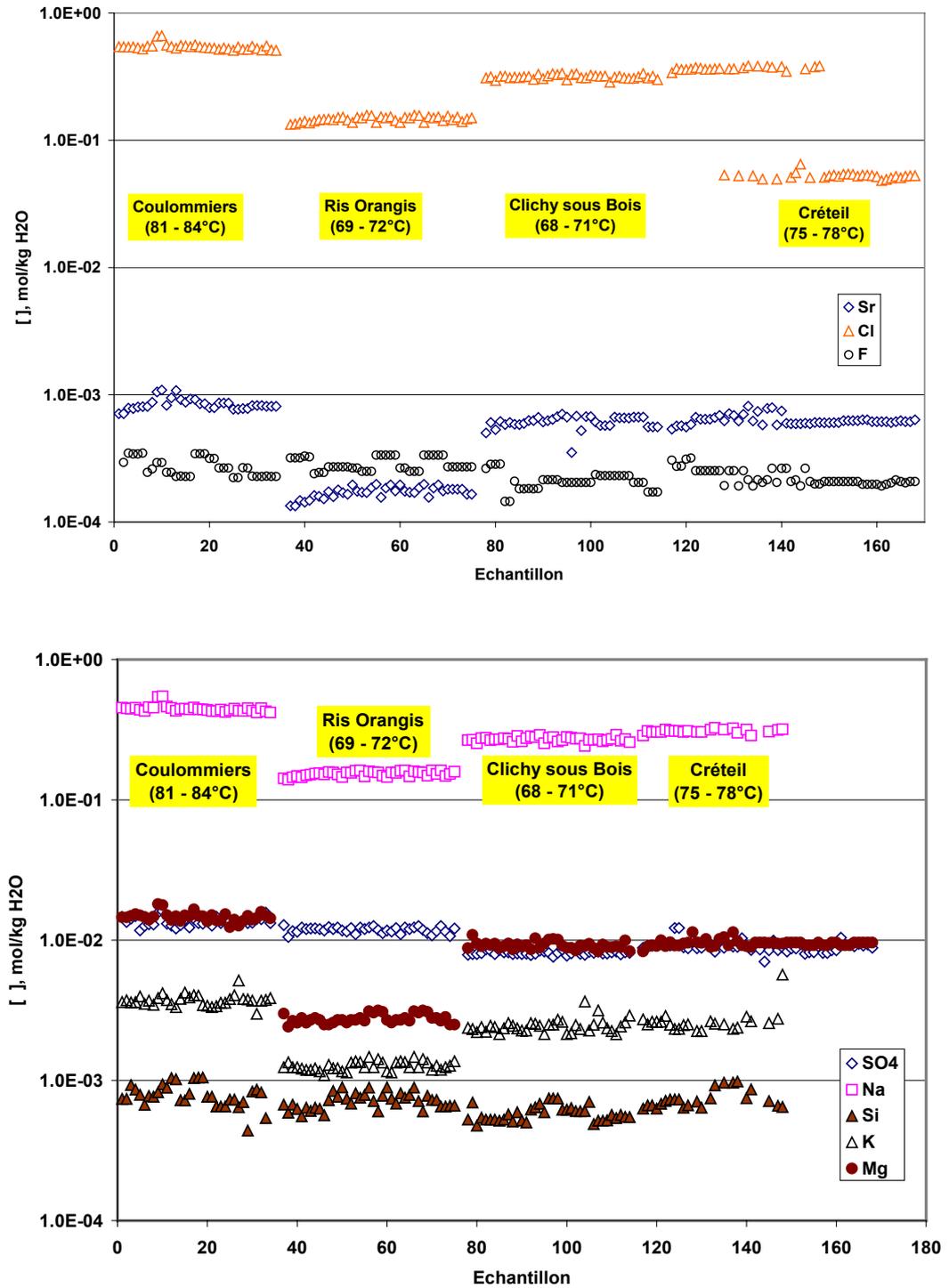


Figure 22 - Comparaison des évolutions des concentrations du Sr, Cl et F ainsi que celles de SO₄, Na, Si, K et Mg dans les eaux produites au niveau des quatre zones d'étude.

La figure 22 présente les variations des concentrations en chlorure, fluor et d'autres éléments (Sr, SO₄, Na, Sr, K et Mg). À part les concentrations en SO₄, F et SiO₂ qui sont à peine sensibles à la température, les autres éléments chimiques sont assez sensibles aux teneurs en ions mobiles (au moins les chlorures) dans le système. Ce comportement n'est pas en contradiction avec des possibilités de contrôle par des équilibres thermodynamiques avec des phases minérales du réservoir comme l'ont suggérées de précédentes études (Michard et bastide, 1988 ; Criaud *et al.*, 1989).

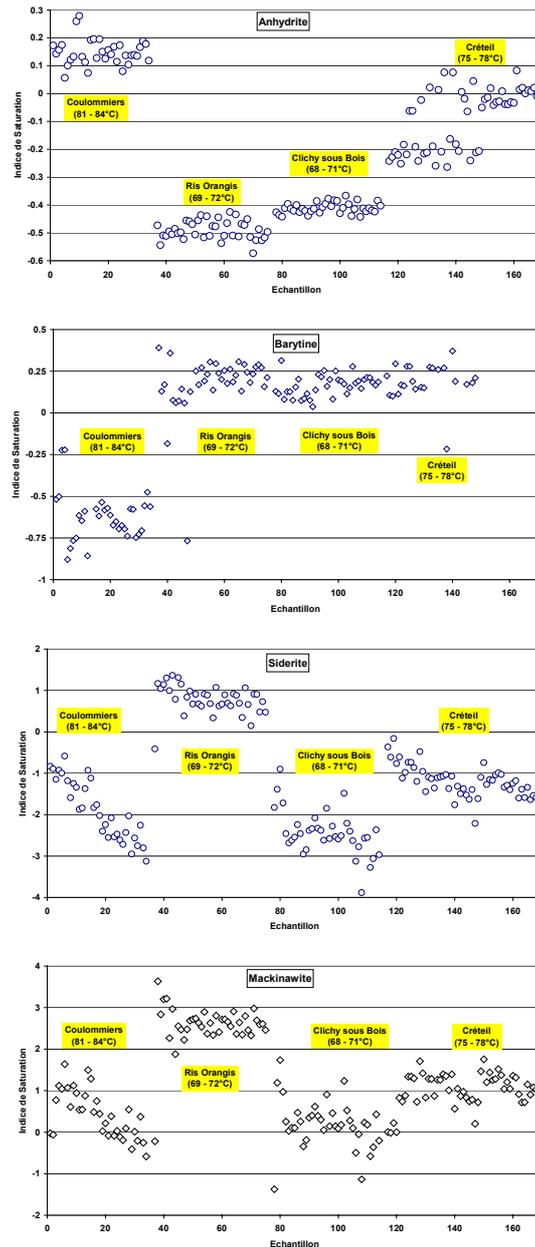


Figure 23 - Évolution des valeurs des indices de saturation de différents minéraux (Anhydrite, barytine, sidérite et mackinawite) dans les quatre zones d'étude.

La figure 23 récapitule l'état de saturation de l'anhydrite, barytine, sidérite et mackinawite vis-à-vis des fluides géothermiques des zones d'étude. L'anhydrite n'est clairement saturée vis-à-vis des fluides produits que dans les zones de Coulommiers et Créteil. La barytine est saturée dans tous les secteurs sauf à Coulommiers. La sidérite n'est clairement saturée qu'à Ris-Orangis. Le risque de dépôt de sulfures de fer (i.e., mackinawite) est général avec un fort potentiel pour Ris-Orangis.

Le Ca est contrôlé par un minéral à comportement prograde puisque sa concentration augmente avec la température. À l'inverse, le bicarbonate (HCO_3) est contrôlé par un minéral rétrograde. La silice a montré aussi une sensibilité vis-à-vis de la température (sa concentration augmente avec l'augmentation de la température). Toutefois, il n'est pas possible de dégager des évolutions temporelles au sein du même forage qui « annonceraient » l'approche du front froid.

Puisque le bicarbonate et peut être aussi le calcium sont contrôlés par des équilibres thermodynamiques vis-à-vis des minéraux à cinétique rapide (carbonates et sulfates), il n'est pas envisageable d'identifier des évolutions à des temps bien avant l'arrivée du front froid. En effet, ces équilibres quasi-instantanés ne laisseraient pas un flux de masse supportant une sursaturation vis-à-vis des minéraux pour de longue période. **En revanche, la silice qui est contrôlée par la solubilité des minéraux silicatés et aluminosilicatés pourrait jouer ce rôle puisque ces minéraux sont caractérisés par des cinétiques très lentes.**

4.4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE GÉOCHIMIQUE

Cette étude avait pour but de d'analyser les caractéristiques physico-chimiques des fluides géothermaux du Dogger du Bassin parisien en vue **d'identifier des annonciateurs ou précurseurs de l'évolution du comportement thermique du réservoir.** Matray et Menjoz (1996) avaient avancé l'idée d'un traceur réactif (HS^-), qui généré dans les forages par la rencontre du fluide, du métal et des processus bactériens, puis réinjecté ensuite en fond de forage d'injection, se comporterait comme un traceur quasi parfait. Des calculs préliminaires hydrodynamiques et de transfert thermique avaient été réalisés en se basant sur cette hypothèse.

L'analyse effectuée sur quatre échantillons géographiques de la région parisienne (Meaux, Ris-Orangis, Val-de-Marne et Seine-Saint-Denis) constitue une première étape pour préciser le diagnostic thermodynamique et physico-chimique des fluides du Dogger. La plupart des données s'étendent sur une période de 15 à 18 ans (1985/86 - 2001/03). L'analyse s'est focalisée sur l'estimation des états d'équilibre des minéraux des réservoirs sédimentaires mais aussi sur ceux pouvant se former sous forme de « scaling » dans les forages de production et d'injection (i.e., calcite, sidérite et mackinawite). De nouvelles données thermodynamiques de la mackinawite ont été introduites dans la base de données code de calcul PHREEQC avant d'effectuer ces modélisations.

De manière synthétique, ce premier diagnostic fournit les résultats suivants :

- vis-à-vis de l'état redox, le déséquilibre est systématique. Le p_e mesuré est différent du p_e calculé à partir du couple (HS^-/SO_4).

Vis-à-vis de l'indice de saturation ($\text{IS} > 0$ ou nul associé au risques de dépôts, et $\text{IS} < 0$ associé à l'absence de dépôts) :

- mackinawite (FeS) saturée pour tous les forages ($-0,5 < \text{IS} < 3,6$),
- calcite (CaCO_3) saturée pour tous les forages ($-0,3 < \text{IS} < 0,9$),
- sidérite (FeCO_3) sous-saturée pour tous les forages ($-4,0 < \text{IS} < 0,0$) sauf pour Ris-Orangis ($-0,3 < \text{IS} < 1,3$),
- calcédoine (SiO_2) proche de la saturation ($\text{IS} \sim 0,0$) et « potentiellement indicatrice du refroidissement »,
- aluminosilicates (K-Feldspath-K, etc.) et $\text{Al}(\text{OH})_3$ (*i.e.*, Gibbsite) saturés pour tous les forages,
- anhydrite (CaSO_4) sub-saturée à saturée ($-0,25 < \text{IS} < 0,25$) pour Coulommiers et Créteil et sous-saturée ($\text{IS} < -4,0$) pour Ris-Orangis et Clichy,
- fluorite (CaF_2) analogue à l'anhydrite.

D'après cette analyse thermodynamique et physico-chimiques des fluides produits par les différents puits géothermiques du Dogger du bassin de Paris des quatre zones étudiées (Coulommiers, Ris-Orangis, Clichy-sous-Bois et Créteil) on constate que les évolutions suivies au moment du démarrage de la production (1985-1986) par les différents paramètres (p_e , $\text{Fe}(+II)$ et $\text{S}(-II)$) se sont poursuivies jusqu'en 2001-2003. La seule exception est présentée par le comportement des sulfures ($\text{S}(-II)$), dont la concentration est plus faible que celle de $\text{Fe}(+II)$ jusqu'en 1993, période durant laquelle ces concentrations diminuent. Ensuite ces dernières se stabilisent mais par contre, bien que le fer présente les concentrations les plus élevées dans cette zone, le comportement du $\text{Fe}(+II)$ diminue de la même façon que dans les trois autres secteurs.

4.5. MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DU RÉSERVOIR À L'INJECTION

Durant cette seconde phase de l'étude, pour la modélisation de la réponse du réservoir à l'injection, la démarche retenue comprend une série d'étapes progressives destinées à préciser une méthodologie d'interprétation des données acquises périodiquement. Cette méthode, évaluée sur le cas du doublet individuel, doit ainsi permettre d'aborder par la suite plus efficacement le comportement plus complexe des groupes de doublets durant la troisième phase de l'étude. Ces étapes successives comprennent :

- le recensement des contraintes pratiques de la modélisation des sites et de l'interprétation des données (problématique générale) ;
- la prise en compte d'un modèle conceptuel global, incluant schématiquement le réservoir et la boucle géothermale ;
- l'examen de la réponse de deux doublets-types pour évaluer la méthode proposée ;
- la collecte des données nécessaires pour l'application de la méthode à deux groupes de doublets, en parallèle avec le chargement de la base de données.

4.5.1. Problématique générale

L'examen du comportement d'un doublet vis-à-vis de son état passé, actuel et futur, repose sur la prise en compte d'une série de processus en interaction (hydrodynamique, thermique, chimique) qui se traduisent par des signaux ou variables mesurables en un nombre de points limité du système. Un des intérêts de la modélisation est de permettre la quantification de ces signaux en un plus grand nombre de points du système, dont les points de mesures.

D'autre part, tous les processus ne sont pas décrits et formulés de manière précise. Les processus chimiques notamment sont, pour une part d'entre eux, approchés sur la base d'hypothèses à évaluer. Les lois de comportement correspondantes intègrent également des paramètres dont la détermination n'est pas toujours aisément accessible, d'où le choix d'estimations et par conséquent des hypothèses. Dans ce contexte, un autre intérêt de la modélisation est de permettre l'évaluation de ces diverses hypothèses, rassemblées sous la forme de scénarios d'interprétation, en examinant la cohérence des résultats avec les diverses autres informations indirectes sur l'état du système.

Un autre aspect de la complexité du problème concerne la connaissance détaillée de la structure du réservoir, qui a un impact direct sur l'évaluation des tendances du comportement futur, ou plus généralement sur la prévision au sens large. En terme de prévision des tendances futures, ce besoin de connaissances détaillées ou d'hypothèses, qui n'était pas *a priori* nécessaire au moment du dimensionnement initial des systèmes, s'accroît en fait avec l'accroissement de la durée d'exploitation. Pour améliorer l'approche du comportement du réservoir, par rapport aux estimations initiales, trois points apparaissent alors importants :

- l'évolution du régime (débits, cycles périodiques) et de la nature de l'exploitation (production artésienne, par pompage ou avec co-génération) au cours du temps. La capitalisation de cette information évolutive est l'objectif de la base de données. Elle peut ainsi fournir les données requises pour le diagnostic des anomalies, ainsi que l'excitation et les signaux de contrôle pour l'approche par modélisation ;
- la description de la stratification et de la continuité hydraulique locales du réservoir capté par les deux forages du doublet. Pour le doublet de Coulommiers par exemple, le nombre de couches productives identifiées à l'issue des essais est de 6 couches pour le producteur et de 9 couches pour l'injecteur. Dans ce cas, les épaisseurs productives cumulées et les transmissivités sont analogues sur les deux puits. Par contre, les trois derniers niveaux de l'injecteur captent un faciès (série des alternances, 40 % du débit) qui n'est pas retrouvé dans le découvert du producteur. Ces caractéristiques, qui n'ont pratiquement pas d'effet sur le comportement hydrodynamique, peuvent avoir une incidence significative sur la dynamique des transferts thermiques et chimiques restituée au puits de production. Ces deux types de transferts répondent en fait à des caractéristiques différentes. Le transfert chimique entre les puits, limités aux couches perméables, est fonction principalement de leur épaisseur cumulée et de leur continuité latérale. Le transfert thermique est lié aux mêmes paramètres, mais surtout aux surfaces d'échange

thermique avec les épontes imperméables (incidence forte du nombre de couches et de leur extension) ;

- enfin, par rapport aux remarques précédentes, l'approche conjointe des processus thermiques et chimiques, induits par une même injection, apparaît souhaitable à la fois pour la valorisation des informations chimiques (corrélations) et pour préciser la structure du réservoir équivalent.

En terme d'interprétation des données d'exploitation, essentiellement acquises en têtes de puits, il est pratiquement nécessaire d'intégrer les diverses composantes de la boucle géothermale afin de relier les informations de surface et la réponse du réservoir profond. Pour établir ces relations entre le réservoir et la surface, le problème hydraulique ou thermique est mieux connu ; il existe des formulations analytiques rendant compte de la « dégradation » des potentiels pression-température dans les tubages. En chimie par contre l'approche est plus complexe (cas de la concentration en sulfures dissous par exemple) car les forages génèrent une amplification des signaux liée aux interactions fluide-dépôts-métal. Le besoin principal pour la modélisation de la réponse du système est l'estimation de la concentration injectée dans le réservoir en fond de puits d'injection. Les perturbations générées par la boucle hors réservoir peuvent être approchées par un modèle conceptuel global déduit des connaissances de la phénoménologie. On peut ainsi inclure dans la démarche la rétroaction (ou bouclage) de la sortie sur l'entrée, vis-à-vis du réservoir, traduisant le fonctionnement caractéristique du doublet.

Au cours du temps et parmi les composantes de la réponse thermique et chimique au processus d'injection, la contribution du réservoir est progressivement la plus importante. Cette dernière est surtout une fonction mémoire, liée au temps de transfert du fluide, très nettement supérieur à la durée de séjour dans les forages. Les signaux restitués à un instant donné intègrent l'exploitation passée, sur une période plus ou moins longue, selon le processus thermique ou chimique considéré. Pour une excitation donnée au puits d'injection, la réponse parviendra au puits de production après un temps théorique minimum : le temps de percée thermique ou chimique. La période la plus longue correspond aux processus thermiques car ils sollicitent le fluide, la matrice du réservoir et les épontes imperméables. La percée chimique (aspect traçage) est environ trois à cinq fois plus courte ; d'où l'intérêt pratique de cette information comme précurseur potentiel du refroidissement.

Enfin un dernier complément relatif à l'approche par modélisation peut être apporté par rapport au point précédent, il concerne les limites du système souterrain et la notion de système fermé. L'exploitation par doublet est souvent présentée comme un système en boucle fermée. Cette présentation concerne surtout les connexions hors réservoir et l'équilibre des débits d'exploitation. Pour le réservoir, les limites d'impact sont en fait variables avec le temps :

- l'emprise du volume injecté dans le réservoir est progressivement croissante avec le temps autour du puits d'injection ;
- l'impact spatial des signaux injectés (température ou traceur) dans le réservoir peut s'étendre sur des distances plus importantes si le champ de vitesses local est perturbé par d'autres exploitation voisines du même type. Il y a donc dans ce cas

l'apparition potentielle d'interférences mutuelles, thermiques et chimiques. L'impact des interférences thermiques et en pression est intégré lors de l'implantation et du dimensionnement initial des doublets voisins. Par contre, en raison du temps de percée nettement plus court d'un traceur, la réponse chimique d'un puits de production pourra être plus complexe à analyser avec l'incidence des puits d'injection voisins.

Ces deux dernières remarques ont une incidence directe sur la modélisation conjointe, thermique et chimique, vis-à-vis de l'extension du domaine à considérer pour l'approche du comportement d'un doublet. Dans le cas d'un doublet isolé, le domaine nécessaire et sa discrétisation seront plus étendus que pour le seul calcul thermique. En présence d'exploitations proches, le périmètre d'investigation peut inclure un plus grand nombre de puits d'injection, d'où un besoin de données d'exploitation plus important pour l'analyse d'un doublet donné.

4.5.2. Modèle phénoménologique global

La notion de modèle phénoménologique global a été introduite en début de chapitre, pour l'analyse de l'évolution géochimique des fluides durant l'exploitation. Il s'agissait alors de relier les observations au comportement des différentes composantes du système, sous la forme de réacteurs en série selon une boucle fermée.

Dans le cas de la modélisation du réservoir, l'idée est d'exploiter ce même schéma pour relier la sortie (production du système) à l'entrée (injection), en identifiant le point de contrôle intermédiaire constitué par la tête de puits de production.

Le modèle phénoménologique global (fig. 24) comprend schématiquement quatre compartiments en série : le forage de production, l'échangeur, le forage d'injection et le réservoir. Chaque compartiment se caractérise par une fonction de transfert, plus ou moins détaillée, reliant le signal de sortie au signal d'entrée. Le signal suivi est dans ce cas la concentration en sulfures dissous $[HS^-]$. Le seul point de mesure est la tête de puits de production avec la concentration C_{WHP} . La fonction de transfert du réservoir, issue de la modélisation, restitue la concentration en fond de puits de production C_{BHP} à partir de la concentration en fond de puits d'injection C_{BHI} . Cette dernière variable est l'inconnue principale à évaluer pour piloter la modélisation.

Le bilan en terme de flux de sulfures ou de concentration $[HS^-]$, en tête de production ou en fond d'injecteur, s'exprime schématiquement par la contribution additive de trois termes ou trois processus globaux :

$$R + B - D \Rightarrow [HS^-]$$

Avec les définitions suivantes :

- **R** est la contribution due au processus de recyclage du réservoir, parvenant en fond de puits de production. Il s'agit d'une contribution évolutive, traduisant la proportion du fluide et de la masse injectée atteignant le producteur après un temps donné et intégrant à la fois l'historique de l'injection et les processus de transfert dans le réservoir. Cette réponse issue de la modélisation du réservoir correspond à la

fonction de transfert la plus détaillée en raison du fort effet de mémoire de l'exploitation ;

- **B** est la contribution correspondant à la génération de sulfures dissous associée au processus bactériens et à la réduction des sulfates. Elle concerne chacun des forages. Elle est dépendante notamment, de la longueur des tubages, du temps de séjour du fluide (débit et cinétique des réactions géochimiques), de la température et de la schématisation des processus géochimiques ;
- **D** est la contribution correspondant à la consommation de sulfures dissous pour la production de dépôts, associée aux processus de corrosion et de précipitation. Sa dépendance est analogue à celle du terme B.

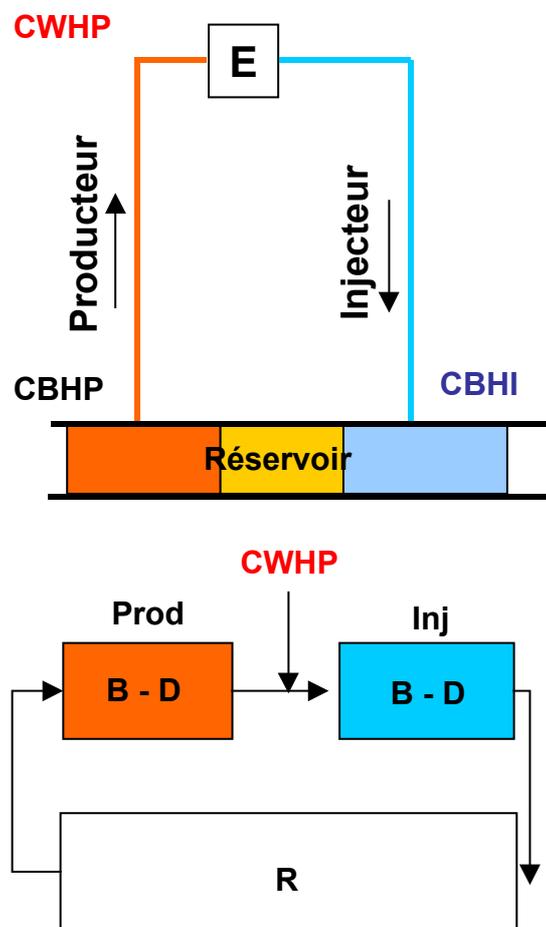


Figure 24 - Modèle phénoménologique global pour l'analyse de données et la modélisation.

En première approche, et compte tenu de la complexité des termes B et D, on considère globalement la contribution nette (B - D), c'est-à-dire la fonction de transfert du compartiment considéré. Elle est évaluée expérimentalement à partir des mesures de la base de données et des résultats des études antérieures (*i.e.*, analyses des processus de corrosion-dépôts sur les matériaux des tubages). En pratique,

l'information essentielle peut être déduite de l'analyse des premières années d'exploitation, lorsque le terme R est encore nul ou très faible.

Pour la modélisation du comportement du réservoir, le schéma d'intégration est reproduit dans la partie inférieure de la figure 24. Le problème à analyser est alors assimilable à un scénario de traçage avec rebouclage de la sortie sur l'entrée ; mais dans ce cas, le « feedback » est actif avec une perturbation de la sortie.

4.6. ANALYSE ANTÉRIEURE DU COMPORTEMENT DU SITE DE CRÉTEIL

Dans une première étape, pour préciser l'approche par modélisation, et par la suite identifier une méthodologie, on reprend ici les résultats de l'analyse du doublet de Créteil abordée au début des années 1990. L'étude correspond aux premières investigations entreprises pour évaluer l'apport potentiel du suivi des sulfures dissous (Matray et Menjot, 1996 ; Ignatiadis *et al.*, 1991).

Ces études, concernant deux doublets (Créteil et Meaux Beauval 2), s'appuyaient sur les seules données disponibles de la période 1985-1994, comprenant notamment les mesures de suivi en tête et des essais très détaillés par paliers de débit permettant d'extrapoler la concentration en sulfures fournie par le réservoir en fond de puits de production (terme R(t) du bilan global précédent). La modélisation du comportement du réservoir permettait d'une part l'ajustement des hypothèses et résultats sur les données de production jusqu'en 1994 et, d'autre part, l'extrapolation de la tendance évolutive simulée sur une période de dix ans. La période couverte par cette estimation de tendance correspond précisément aux nouvelles mesures disponibles dans le cadre de la présente étude, d'où la possibilité d'un examen rétrospectif.

Dans cette approche pour l'estimation de la réponse du producteur, l'évolution de l'excitation en fond de puits d'injection est traduite (fig. 25) par une rampe seuillée à une valeur moyenne de 30 ppm après une durée de six ans, et modulée par le débit moyen saisonnier (cycles été-hiver). Compte tenu des variations des débits moyens durant les cycles saisonniers, les fluctuations de la concentration injectée sont en opposition, avec une amplitude de ± 10 ppm autour de la moyenne.

L'allure générale du chronogramme d'injection retenu pour la modélisation s'appuie sur les données acquises durant les cinq à six premières années, présentant d'une part une évolution croissante de la concentration mesurée, et d'autre part un délai de réponse inférieur au temps de percée chimique, permettant l'accès au terme [B - D].

L'échantillon de mesures analysé, dans l'intervalle (1987-1990), est postérieur à la mise en service (1985) et n'est pas encore influencé par le recyclage de l'injection (temps de percée chimique évalué à 2,7 ans). L'évolution de la concentration en tête est alors liée au comportement du seul forage.

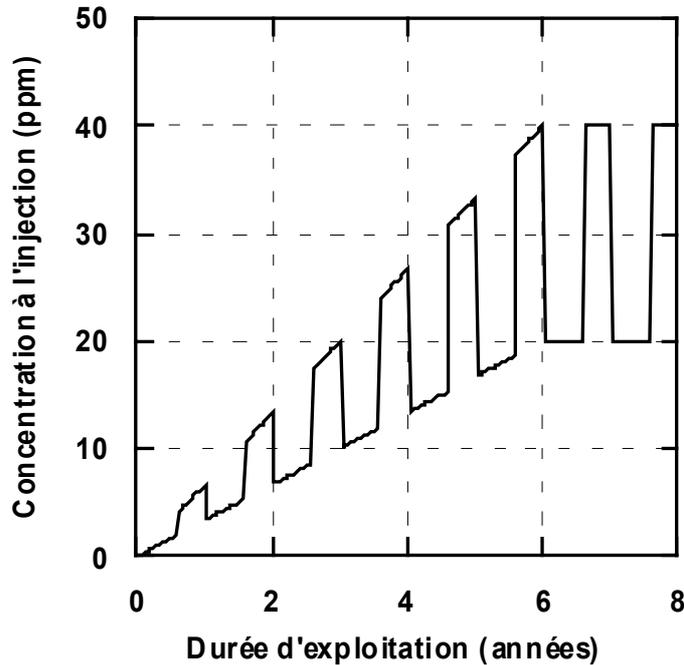


Figure 25 - Hypothèse d'évolution de la concentration en sulfures en fond de puits d'injection pour la fonction d'entrée de la simulation du doublet de Créteil (étude 1994).

À partir des données disponibles en 1994, on pouvait estimer que la production nette de sulfures (terme [B – D] du bilan) conduisait à une concentration de 3 à 6 ppm en tête, selon le débit, avant les premières influences du recyclage de l'injection. Le chronogramme de la figure 25 est ainsi déduit des mesures détaillées des premières années d'exploitation. Il considère qu'au sein de la boucle (tubages), le taux de production de sulfures dissous est progressivement croissant avec le temps, jusqu'à la date de mise en place du traitement par inhibiteurs (6 ans après la mise en service environ). À partir de cette date, il était admis, avec les données disponibles, que le taux de production et par conséquent la concentration injectée sont stationnaires. La modulation par le débit conduit enfin à des valeurs minimales et maximales de la concentration injectée prises dans le rapport des débits d'été et d'hiver, soit 2 environ.

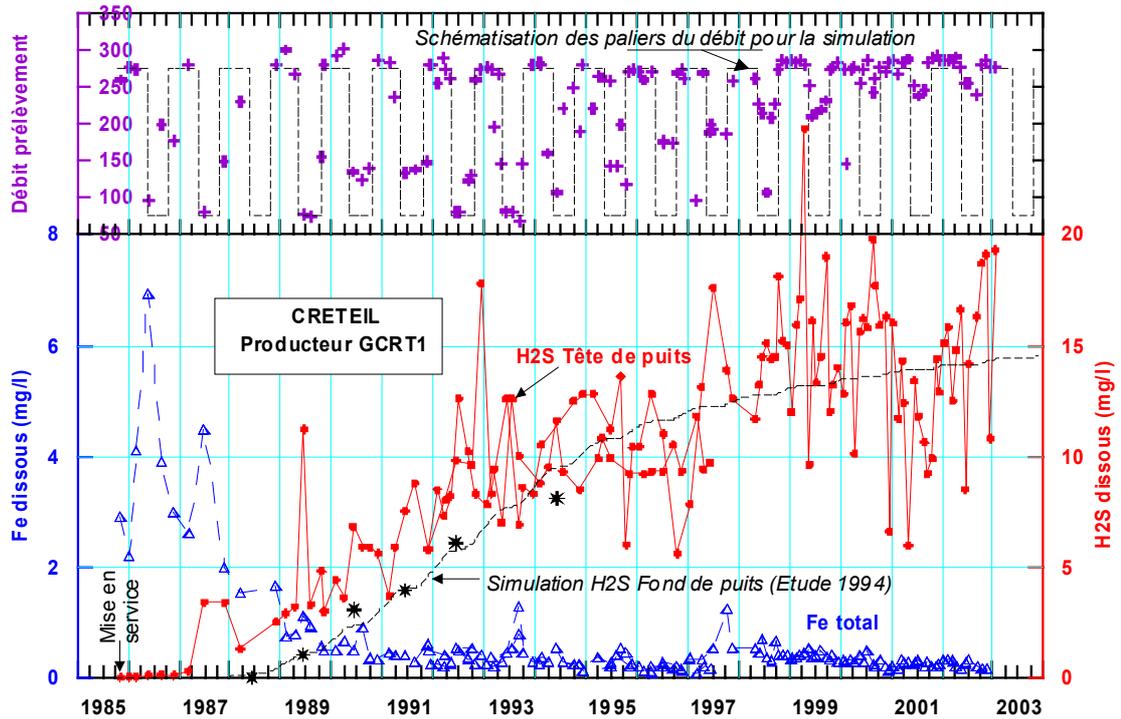


Figure 26 - Doublet de Créteil : simulation de la réponse du réservoir en fond de puits et comparaison avec les données expérimentales de surface ou interprétées en fond de puits (*).

À l'issue des variantes de calcul pour l'ajustement sur la période de 1985 à 1994 (mesures interprétées en fond de puits), l'examen des résultats simulés permet de noter plusieurs caractéristiques de la réponse propre du réservoir :

- la forme de la courbe de réponse expérimentale n'est *a priori* pas cohérente avec une excitation en échelon (évolution initiale rapide). Le chronogramme d'injection initial est plus vraisemblablement caractérisé par une croissance progressive de la concentration en sulfures, du type de celle de la figure 25. La valeur du seuil du chronogramme est plus difficile à préciser avec un échantillon de sept à huit ans seulement. La valeur de 30 ppm, est parmi les valeurs testées, celle qui fournit le meilleur ajustement ;
- les fluctuations de la concentration de production, induites par la modulation du débit, sont particulièrement atténuées (bien que le coefficient de dispersion utilisé soit faible, $\alpha_L = 10$ m). Cette tendance est liée au schéma hydrodynamique particulier et au caractère très dispersif du système par doublet ;
- la comparaison des mesures de concentration en sulfures en tête et les valeurs simulées en fond de puits sur la période 1985-1994 montre un écart relativement constant de l'ordre de 3 ppm, qui correspond à la contribution nette du puits de production. Cet écart de 3 ppm est aussi la valeur qui peut être identifiée d'après les mesures, en considérant le début d'apparition de la dérive de la concentration, le point moyen distant d'une durée égale au temps de percée et la date de mise en place du traitement de fond de puits ;

- l'interprétation des données d'évolution de la concentration en tête durant les premières années d'exploitation est ainsi particulièrement utile pour préciser l'impact du comportement du forage. L'influence de la valeur du temps de percée chimique, spécifique à cette période, nécessite par contre de bien maîtriser le débit d'exploitation durant cette phase initiale, car ses évolutions ultérieures sont fréquentes et souvent importantes.

L'examen rétrospectif de la période extrapolée par simulation sur les dix ans à partir de 1994 permet d'évaluer les hypothèses initiales par rapport aux données expérimentales nouvelles acquises :

- lorsque l'on compare la courbe de fond de puits simulée, à partir des seules données antérieures à 1994 avec les mesures disponibles depuis cette date, on peut tout d'abord remarquer que la prévision reste globalement acceptable en moyenne. L'écart de concentration entre les valeurs simulées de fond de puits et la tendance des mesures de surface conserve le même ordre de grandeur de 3 ppm environ (estimation de la production nette de sulfures dissous par le producteur) ;
- en terme de tendance moyenne, au-delà de la période précédemment analysée jusqu'en 1994, on note cependant un infléchissement de la courbe expérimentale (rupture de la pente d'évolution) après cette date. Trois phénomènes perturbateurs peuvent *a priori* être relevés : l'évolution du débit moyen d'exploitation (fig. 26), la restitution de l'impact du traitement de fond de puits mis en place en 1991 (et différé du temps de percée chimique) et enfin l'incidence probable du recyclage des eaux des injecteurs voisins. En effet, le doublet étant considéré isolé, l'impact potentiel des interférences chimiques s'accroît avec la durée d'exploitation ;
- dans le détail, l'évolution mesurée est affectée de fluctuations ou d'anomalies nombreuses qui peuvent être dues à plusieurs causes : les incertitudes de mesures ou d'analyse du fluide, les variations du débit et notamment l'impact des interventions sur le forage, telles que les nettoyages par acidification douce, les rechemisages, les changements de type d'inhibiteur ou de dosage. Ces différentes informations, pour préciser l'analyse, sont progressivement consignées dans la base de données sous la rubrique « événements » ;
- enfin, avec la durée d'exploitation, l'interprétation en terme de poids relatif de chaque processus devient plus complexe car le comportement du réservoir restitué, de manière amortie et différée, la mémoire des fluctuations de l'injection au cours du temps.

Cette première analyse du comportement d'un doublet, suivi de manière continue durant 20 ans, permet d'envisager une méthodologie pratique pour l'interprétation des informations rassemblées dans la base de données. Elle confirme l'intérêt de l'enregistrement et de l'examen des premières années d'exploitation. Cependant, pour l'exemple de Créteil, et avec la durée d'observation, l'impact croissant des interférences chimiques reste à quantifier dans le cadre d'une approche spatiale plus étendue (comportement d'un groupe de doublets). L'examen d'un doublet-type, dont le comportement s'avère plus proche de celui d'un doublet isolé, apparaît nécessaire pour préciser et évaluer la méthodologie d'interprétation.

4.7. COMPORTEMENT D'UN DOUBLET-TYPE (SITE DE COULOMMIERS)

4.7.1. Données et approche du doublet-type

Le cas du doublet de Coulommiers répond au besoin identifié précédemment. Situé à une vingtaine de kilomètres au sud-est des doublets les plus proches (groupe du champ de Meaux), il n'apparaît pas perturbé par les interférences thermiques ou chimiques des exploitations voisines captant le même réservoir. D'autre part, en terme de données d'exploitation, il est suivi de manière continue depuis sa mise en service en 1982. Il constitue également l'un des quatre cas étudié en début de chapitre vis-à-vis de l'évolution géochimique du fluide de production. La figure 27 restitue les principales variables d'exploitation issues de la base de données, sur une durée de 20 ans depuis sa mise en service (1982). On remarquera la croissance relativement monotone de la concentration en sulfures dissous mesurée en tête de production. La concentration initiale du réservoir avant exploitation est de 0,1 mg/l.

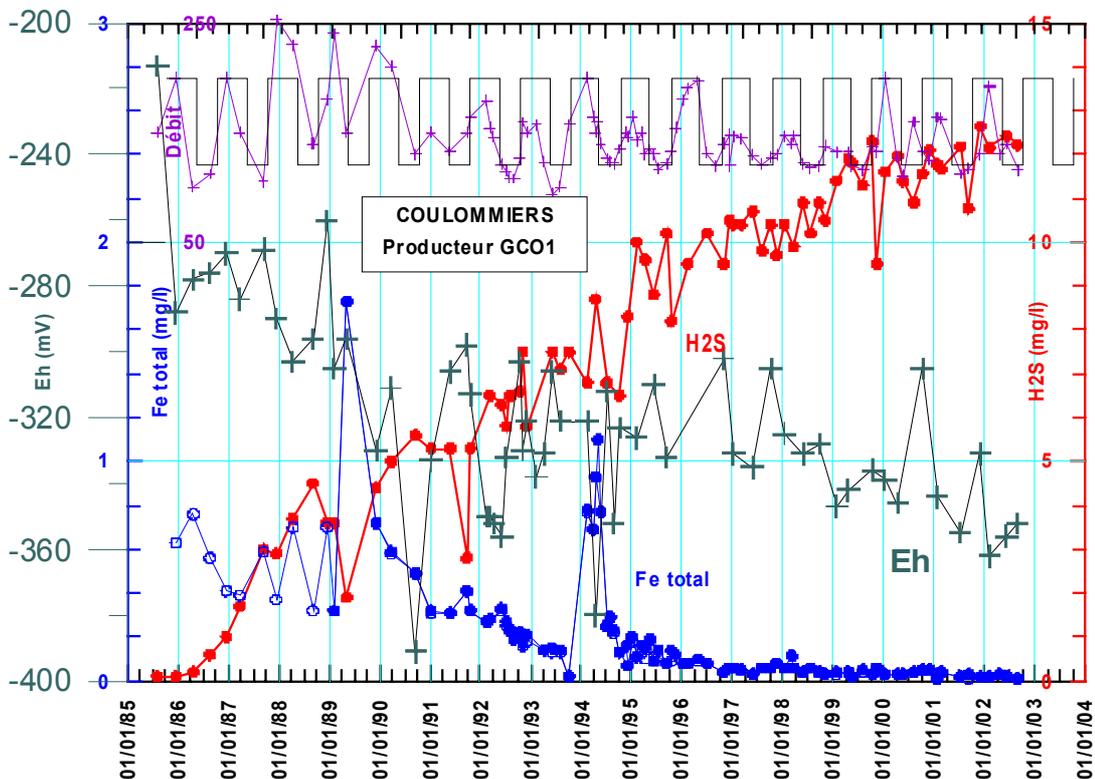


Figure 27 - Principales variables d'exploitation du doublet de Coulommiers depuis sa mise en service, extraites de la base de données.

Pour l'évaluation de la méthodologie d'interprétation sur le cas d'un doublet isolé, on considère ici la simulation du comportement du réservoir et la réponse au producteur induits par les conditions d'exploitation moyennes sur la période écoulée d'environ 20 ans depuis sa mise en service.

Le domaine d'étude retenu pour la simulation des aspects hydrauliques, chimiques et thermiques est représenté par un rectangle, centré sur le doublet avec une extension de 8 km selon les coordonnées x et y. Cette extension plus large que celle nécessaire au seul calcul thermique permet d'inclure l'emprise de l'impact chimique pour la durée de simulation envisagée (40 à 60 ans). On notera ainsi qu'à une date donnée, le rayon de la zone envahie par un traceur est deux fois supérieure au rayon de l'envahissement thermique correspondant. La distance entre puits correspond à l'écartement au niveau de la profondeur moyenne de production dans le réservoir. Une vue partielle de la discrétisation du domaine est reportée à la figure 28. Le voisinage des puits est détaillé à la figure 29.

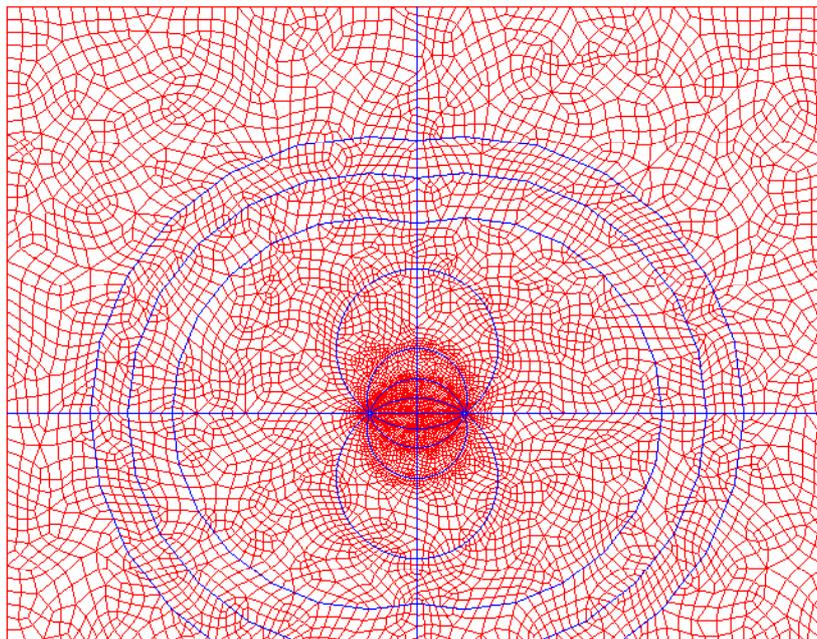


Figure 28 - Vue partielle de la discrétisation du domaine d'étude (8 km x 8 km) retenu pour la modélisation des transferts chimiques et thermiques.

La discrétisation (éléments finis) est contrainte géométriquement par quelques lignes de courant entre les puits et par quelques isochrones chimiques de type puits unique, afin de contrôler l'homogénéité et la progressivité du maillage (taille et rapport de forme des éléments). Au voisinage du segment joignant les puits, la qualité du maillage et la taille de éléments sont importantes, car il s'agit du lieu où les transferts chimiques sont les plus rapides, avec un temps de percée théorique inférieur à deux ans dans ce cas. Il en est de même au voisinage des puits où les vitesses sont les plus élevées avec la plus forte variation spatiale. Le maillage plan de base comprend 9 400 éléments, soit 19 000 variables (méthode des éléments finis mixtes-hybrides) pour le problème chimique de type monocouche et 180 000 variables environ pour le problème thermique incluant nécessairement les échanges avec les épontes (discrétisation selon z).

Dans cette approche, le milieu est considéré homogène et isotrope avec une épaisseur et des paramètres constants.

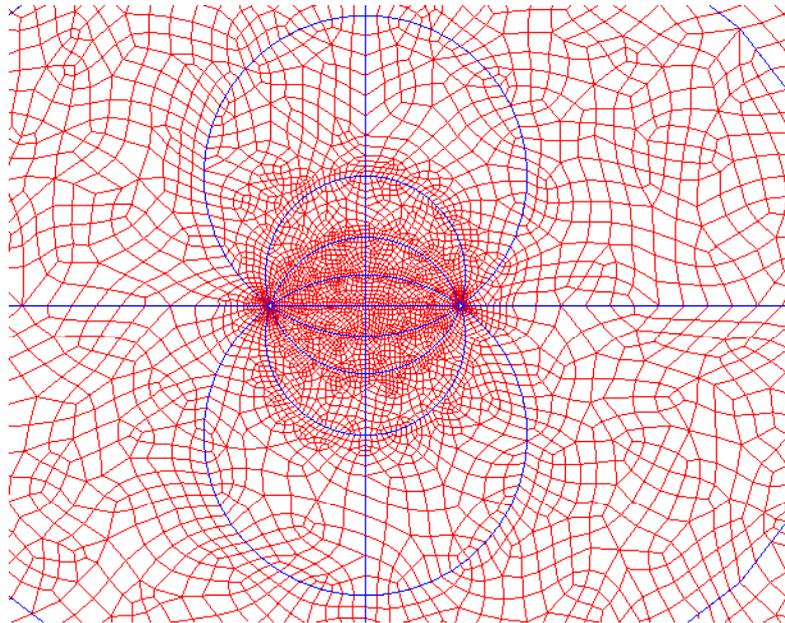


Figure 29 - Détail de la discrétisation du domaine au voisinage des forages et des contraintes géométriques introduites pour assurer la progressivité du maillage.

Le comportement hydraulique est contraint par les conditions imposées aux limites et aux puits. Une condition de pression est fixée à la périphérie du domaine (solution analytique du doublet, fonction de la distance aux puits, et peu influencée par l'impact de la zone envahie). Les débits d'exploitation sont fixés à la surface latérale des puits, représentés par un cylindre, avec un rayon efficace de quelques mètres (soit un facteur de skin de l'ordre de - 4). Le comportement chimique ou thermique est contraint par la concentration ou la température imposée à la paroi du puits d'injection et par les potentiels nécessaires à la périphérie du domaine.

Les principaux paramètres du réservoir et de l'exploitation sont résumés ci-dessous :

Épaisseur productive h	15	m
Distance entre puits D	928	m
Porosité ω	15	%
Débit d'exploitation Q	135	m ³ /h
Capacité calor. du réservoir Ca	2,5	MJ/m ³ /°C
Perméabilité relative du réservoir	$9,6 \cdot 10^{-5}$	m/s
Conductivité thermique du réservoir	2,5	W/m/°C
Dispersion $\alpha L / \alpha T$	50 / 20	m

On en déduit notamment les valeurs caractéristiques des temps de percée théoriques :

- temps de percée chimique (années) : $tpc = \frac{\pi}{3} \omega \frac{D^2 h}{Q} = 1,8$
- temps de percée thermique (années) : $tpth = \frac{\pi}{3} \frac{Ca}{Cf} \frac{D^2 h}{Q} = 6,9$

Un premier calcul a été effectué en considérant le réservoir schématisé par un aquifère monocouche-équivalent (cumul des différentes couches productives), en excluant la contribution des épontes, et avec des conditions d'excitation constantes au puits d'injection (température et concentration en sulfures). Les calculs de simulation restituent la réponse chimique et la réponse thermique induites par les transferts dans le réservoir (convection-diffusion-dispersion) dans ce seul cas où l'on peut identifier une corrélation entre les réponses, c'est-à-dire hors échanges thermiques avec les épontes. Les principaux objectifs de la simulation concernent la vérification des résultats et la comparaison des réponses chimiques et thermiques ; il s'agit notamment des aspects suivants :

- le contrôle de l'adéquation des discrétisations vis-à-vis de la précision des résultats ;
- l'examen des corrélations entre réponses chimiques et thermiques dans ce cas particulier ;
- la comparaison des courbes de production avec l'incidence de la dispersion et le décalage entre les périodes de post-percée.

4.7.2. Corrélation entre traçages chimique et thermique

On peut introduire une corrélation entre les réponses aux transferts chimiques et thermiques lorsque plusieurs hypothèses simplificatrices sont retenues, soit en première analyse, soit pour la démarche progressive de calcul :

- les processus de diffusion-dispersion au sein des niveaux producteurs sont considérés du second ordre ;
- les processus d'échange thermique entre le fluide refroidi en mouvement et les épontes à température plus élevée sont également négligés. Cette schématisation permet de comparer le traceur chimique et le traceur thermique.

À l'aide de ces hypothèses, toutefois relativement fortes pour le cas des doublets considérés, on peut établir une corrélation traduisant le fait que la migration du front thermique est retardée par rapport à celle du traceur (vitesse réelle du fluide). La valeur de ce retard est liée aux capacités calorifiques volumiques de la matrice (Ca) et du fluide (Cf) ainsi qu'à la porosité ω :

$$\frac{tpth}{tpc} = \frac{1}{\omega} \frac{Ca}{Cf} = 1 + Rt$$

En terme de processus essentiellement convectifs, on identifie ainsi un facteur de retard thermique Rt :

$$Rt = \frac{Ca - \omega \cdot Cf}{\omega \cdot Cf}$$

Ainsi, pour un point donné distant de l'injecteur, tel que le puits de production, la percée du front thermique est décalée par rapport à la percée du traceur selon la relation simplifiée :

$$t_{pth} = t_{pc} \cdot (1 + Rt)$$

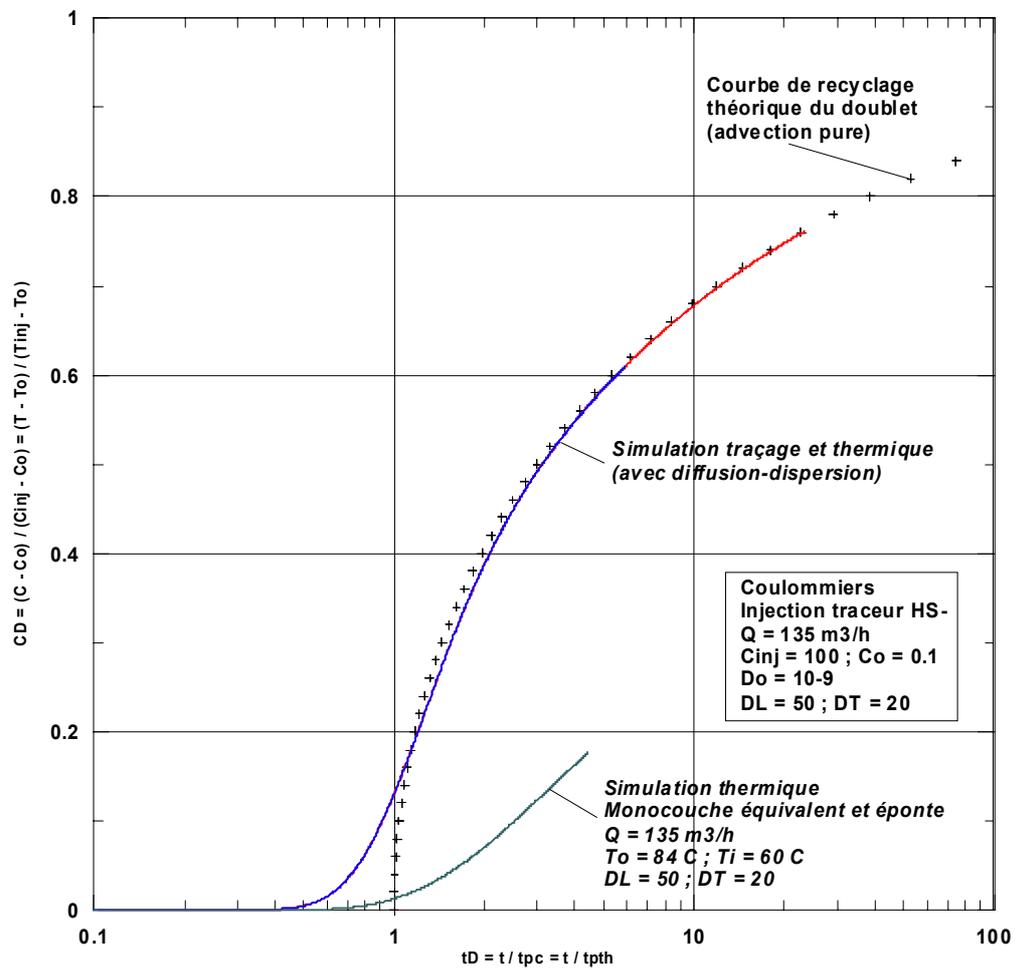


Figure 30 - Réponse thermique et chimique au producteur et comparaison avec la solution théorique de référence, exprimées en variables adimensionnelles (structure du réservoir assimilée à un monocouche équivalent).

Cette relation reste valide en présence d'hétérogénéités du milieu, ou de fluctuations du débit d'exploitation, qui affectent à la fois les transferts chimiques et thermiques. Sur le principe et avec l'hypothèse des épontes adiabatiques, l'analyse de la réponse chimique permet d'évaluer ces dernières caractéristiques et fournit une estimation de la réponse thermique attendue avec une anticipation ou une contraction sur la variable temps.

Dans le cas de l'injection du doublet, avec introduction d'un fluide refroidi et d'un traceur, les deux réponses déphasées évoluent en sens inverse : la concentration de production augmente, tandis que la température de production diminue. L'introduction de variables adimensionnelles sur le temps (TD) et sur la variable transportée (concentration CD ou température TD, variant entre 0 et 1) permet de comparer plus aisément les réponses :

$$tD = \frac{t}{tpc} = \frac{t}{tpth}$$

$$CD = \frac{C - Co}{Cinj - Co} \Leftrightarrow TD = \frac{T - To}{Tinj - To}$$

les variables Cinj et Co étant respectivement les concentrations injectées et initiales.

4.7.3. Résultats des simulations

La figure 30 représente les résultats de la simulation des transferts thermiques et chimiques à l'aide de la discrétisation décrite précédemment (fig. 28 et 29) dans le cas d'un réservoir équivalent-monocouche à épontes adiabatiques. Ces réponses (courbes supérieures) sont représentées en variables adimensionnelles et superposées à la courbe de recyclage théorique (+) du doublet isolé. La courbe inférieure traduit la réponse thermique lorsque les échanges thermiques aux épontes sont intégrés. La comparaison des résultats permet de noter les principales remarques suivantes :

- la courbe de recyclage théorique du doublet ou solution de référence (symbole +) correspond au transfert par advection pure (diffusion-dispersion nulle). Il s'agit d'une courbe caractéristique du schéma hydrodynamique du doublet en milieu homogène, fournissant directement le taux de recyclage, c'est-à-dire la proportion du débit de production provenant du puits d'injection au cours du temps. Ainsi, à une date égale à 4 fois le temps de percée, 55 % environ du débit produit provient de l'injecteur. Considérant par exemple une injection à température et concentration constantes, on remarque alors qu'à la percée thermique (apparition des premières molécules refroidies), la concentration produite atteint déjà 55 % de la valeur injectée ;
- les réponses thermiques (courbe bleue) et chimiques (courbe rouge) simulées sont superposées à la solution analytique de référence. Ces réponses simulées prennent en compte les processus de diffusion et de dispersion. En raison de l'incidence de ces processus, le début d'apparition de la percée est en avance sur la courbe théorique, tandis que la réponse postérieure à la percée théorique est en retard (avec un retard décroissant). On remarque en particulier que la dispersion est

significative jusqu'à une date de l'ordre de trois fois le temps de percée tpc. La superposition des réponses thermique et chimique est conforme aux hypothèses dans la mesure où les coefficients de dispersion respectifs retenus sont généralement les mêmes, et les échanges thermiques aux épontes négligés. Par contre, ce résultat permet de s'assurer que la discrétisation utilisée (spatiale et temporelle) est cohérente avec les contraintes numériques associées au calcul de chacun des transferts. Cette bonne superposition en variables adimensionnelles rappelle aussi que dans le cas de l'hypothèse adoptée (épontes adiabatiques), il existe une corrélation entre les réponses thermique et chimique : la connaissance de la réponse du traceur permet d'estimer la réponse thermique ;

- la courbe inférieure représente la réponse thermique incluant également les échanges aux épontes, c'est-à-dire l'ensemble des processus. Ce processus d'échange contribue fortement au réchauffement des eaux froides injectées au cours de leur migration vers le producteur. L'échange thermique aux épontes n'ayant pas d'équivalent en matière de transferts de traceur, la corrélation entre réponses chimiques et thermique ne peut ainsi intégrer tous les processus. Cette corrélation, utile pour l'évaluation de la durée de vie thermique, reste limitée aux phénomènes d'advection et de diffusion-dispersion.

La figure 31 traduit la même corrélation, mais exprimée en variables courantes, avec une évolution inverse de la température et du traceur. Pour la température, le fluide est injecté à une température constante de 60 °C dans le réservoir initialement à 84 °C. Pour le traceur, les concentrations injectées et initiales sont respectivement de 100 et 0,1 mg/l. On peut remarquer le décalage entre les temps de percée, et par conséquent l'intérêt du traçage chimique comme précurseur du déclin thermique. On notera également qu'à la date de percée thermique théorique, le débit de production comporte une fraction de 55 % en provenance de l'injecteur

Au plan thermique, ce premier calcul montre que si le réservoir pouvait être effectivement considéré comme un aquifère monocouche, la durée de vie théorique serait pratiquement atteinte. On peut rappeler que la durée de vie théorique est un repère déduit de la modélisation qui caractérise la date à partir de laquelle l'amorce du refroidissement serait théoriquement mesurable en fond de puits. En fait compte tenu des échanges thermiques variables le long du forage, ce signal (quelques dixièmes de degré) est très faible devant les fluctuations de la température en tête liées aux variations du débit. La durée de vie pratique, quant à elle, correspond à une date ultérieure, à partir de laquelle le refroidissement dépasse une valeur admissible de l'ordre de 3 à 5 °C, déduite de l'analyse technico-économique initiale.

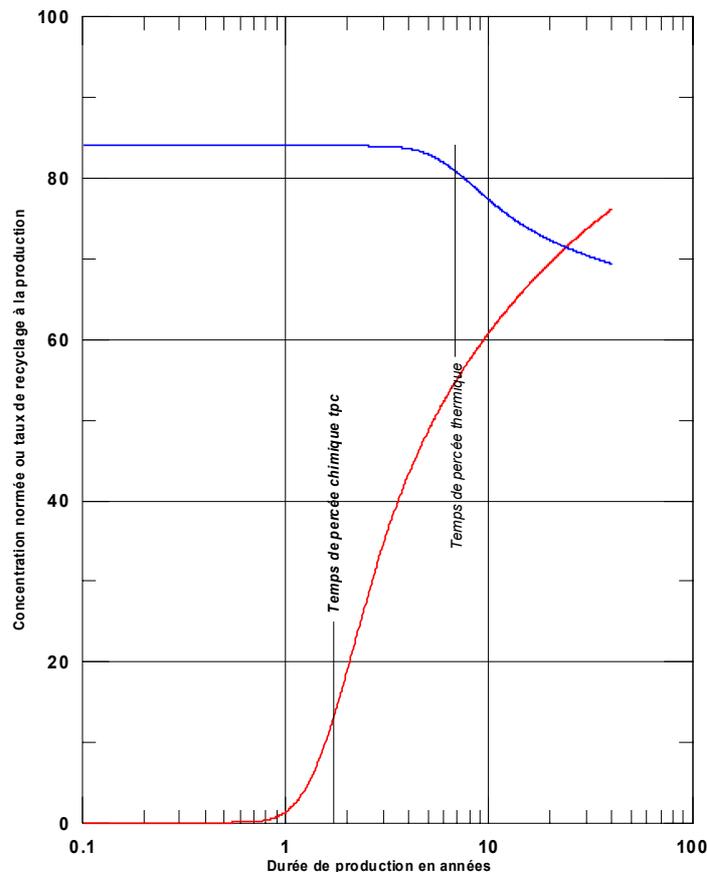


Figure 31 - Comparaison des réponses chimiques et thermiques au producteur au cours du temps traduisant l'impact des recyclages.

La durée de vie théorique est en fait dépendante de quelques paramètres mal connus tels que les conductivités thermiques du milieu et la dispersion, mais surtout de la schématisation retenue pour décrire la stratification réelle des niveaux producteurs. On peut remarquer sur la figure 30, que les échanges thermiques, contribuant au réchauffement des eaux injectées lors de leur migration vers le puits d'exhaure, sont particulièrement importants. Ces échanges sont directement liés à la surface d'échange et au nombre de couches, d'où un retard très significatif selon le schéma monocouche ou multicouches retenu.

Compte tenu de la structure systématiquement stratifiée du réservoir du Dogger, le schéma monocouche (adopté notamment pour le dimensionnement initial) correspond à une estimation pessimiste associée aux critères de sécurité nécessaires à ce stade.

Le rappel de la corrélation existante entre les deux types de transfert, bien que limitée au cas des épontes adiabatiques, montre l'intérêt à pouvoir disposer d'informations sur la réponse à l'injection d'un traceur. L'analyse de cette réponse permet d'apprécier l'impact des hétérogénéités du réservoir et de l'exploitation, restitué sur une période nettement plus courte que celle nécessaire à l'examen des phénomènes thermiques. La simulation numérique permet ensuite d'intégrer ces caractéristiques propres au

doublet considéré pour estimer le futur comportement thermique. Globalement, les tendances identifiées sur la réponse chimique trouveront une réplique sur la réponse thermique avec une dilatation du temps et un fort amortissement lié à l'inertie des processus thermiques et aux échanges avec les épontes.

La figure 32, scindée en deux parties, permet de comparer l'impact de l'injection chimique et thermique dans les mêmes hypothèses (réservoir monocouche, en l'absence d'échanges aux épontes). Elle traduit, vis-à-vis de l'emprise de la zone perturbée, la même information que celle associée à la réponse dans le temps au producteur (fig. 31), c'est-à-dire l'effet du rapport des vitesses thermiques et chimiques.

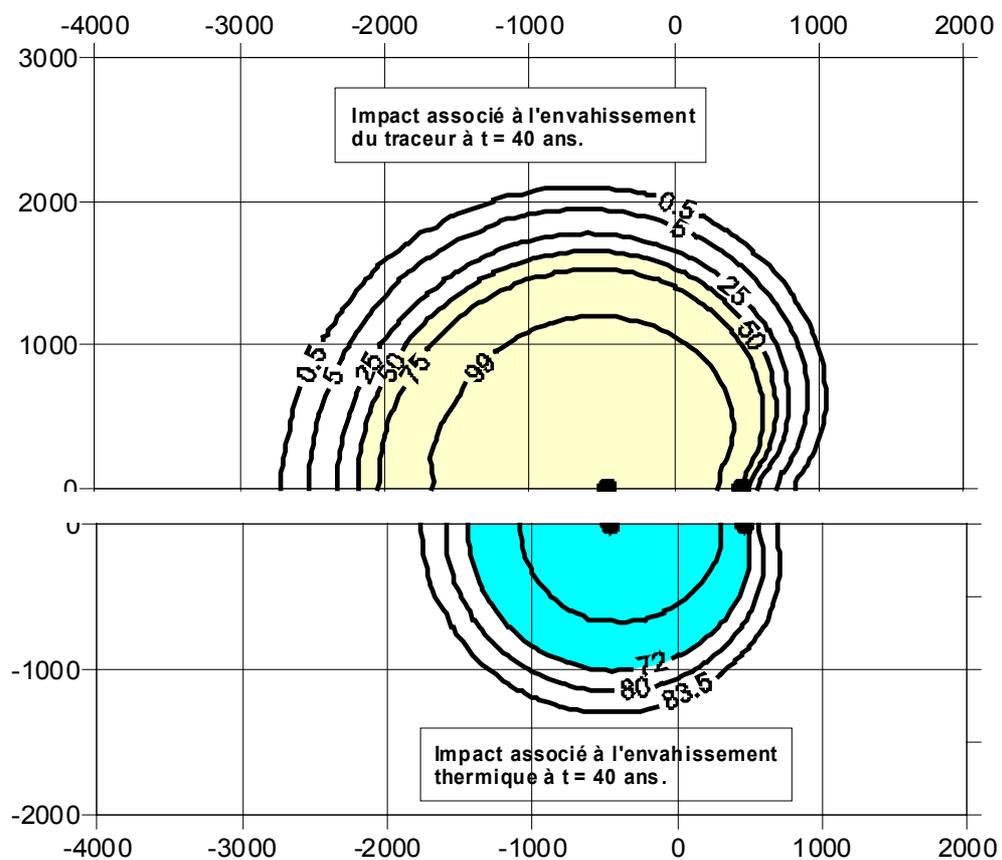


Figure 32 - Doublet de Coulommiers : impacts chimique et thermique induits dans le réservoir après 40 ans d'exploitation (réservoir monocouche et épontes adiabatiques).

Dans la réalité, l'emprise de la zone refroidie par l'injection est plus faible que celle représentée sur la figure, en raison des échanges thermiques avec les épontes et de la stratification des niveaux producteurs (épontes et surfaces d'échange multiples). En examinant les emprises respectives on peut en déduire que les producteurs de doublets voisins seront davantage influencés par les interférences chimiques.

Ayant établi un premier modèle conceptuel du réservoir pour le site de Coulommiers et vérifié la validité de la réponse dans le cas théorique d'une injection à concentration constante, on peut ensuite exploiter cette fonction de transfert pour évaluer la réponse à une injection modulée selon les observations (concentration en sulfures dissous) en tête de puits. L'objectif est également d'identifier une méthode de traitement des données et de simulation, susceptible d'être appliquée aux autres doublets.

Il a été rappelé précédemment, lors de l'analyse d'un schéma conceptuel de la boucle géothermale, que la réponse chimique du producteur est très fortement dépendante de la concentration introduite, et non mesurable, en fond de puits d'injection. Cette concentration peut être évaluée si l'on peut estimer le taux net de génération de sulfures dans la boucle des tubages, comme composante additive à la concentration produite par le recyclage du réservoir. La méthode évaluée comprend les étapes suivantes :

- on examine tout d'abord l'évolution moyenne de la concentration mesurée en tête de production durant les 5 à 6 premières années (fig. 33, variable C_WHP_Mes). Le taux de variation sur la durée inférieure au temps de percée chimique renseigne sur la génération nette du forage, ce qui conduit par extrapolation sur la durée d'exploitation sans traitement à un écart de concentration généré par le forage de l'ordre de 3 ppm. On admet alors en première analyse que cette augmentation de la concentration dCp, précédemment croissante, est ensuite stabilisée dès la mise en place du traitement en fond de puits ;
- l'évolution de la concentration introduite en fond de puits d'injection (variable C_BHI_input) est évaluée à partir des mesures en tête de production (schématisation par tronçons linéaires) auxquelles on rajoute la contribution dCi du forage d'injection, analogue à celle du puits de production dCp. Cette composante additive est tout d'abord croissante, puis constante (3 ppm) à partir du début du traitement par inhibiteurs ;
- l'exploitation du modèle de réservoir fournit alors la réponse chimique en fond de producteur (C_BHP_Mod), induite par l'historique d'injection (C_BHI_input). Cette réponse à l'excitation se traduit d'une part par un déphasage lié au temps de transfert dans le réservoir et d'autre part par un amortissement fonction du taux de recyclage variable du débit injecté ;
- à partir de la restitution du réservoir on peut ensuite ajouter la contribution dCp du producteur pour comparer la réponse simulée en tête (C_BHP_Mod) avec les mesures périodiques et vérifier ou ajuster les différentes hypothèses retenues.

Les résultats traduits sur la figure 33 permettent de reproduire les principales tendances identifiées sur la réponse expérimentale. Cette première approche pour intégrer le comportement du réservoir et l'impact de la boucle extérieure comporte cependant un certain nombre d'hypothèses et de schématisations, à évaluer de manière plus détaillée. Il s'agit notamment des principaux points suivants :

- le débit d'exploitation considéré est une moyenne constante qui n'intègre pas les fluctuations annuelles et les variations de régime au cours du temps. Ces fluctuations ont une incidence sur l'évolution du temps de transfert entre les puits.

La diminution du débit moyen sur la dernière période par exemple apparaîtrait cohérente avec la relative stabilisation de la concentration observée ;

- la schématisation des différentes couches productives (6 à 9 selon le puits considéré), en une seule couche équivalente, intègre fortement l'impact des vitesses de transfert individuelles. Toutefois, en raison de la variabilité de la stratification réelle et en l'absence d'information permettant une corrélation sur des distances inférieures au kilomètre, une description spatiale précise reste très difficile à identifier ;
- la formalisation de la fonction de transfert de la boucle hors réservoir demeure à ce stade très schématique. L'hypothèse d'un écart constant dC_p , évalué entre 3 et 5 mg/l, est déduite de l'analyse de quelques sites pour lesquels on dispose de l'information et d'investigations spécifiques sur le début de l'exploitation. Il apparaît très utile de poursuivre cette analyse pour dégager des tendances ou des signatures, à partir du chargement progressif des données historiques dans la base de données ;

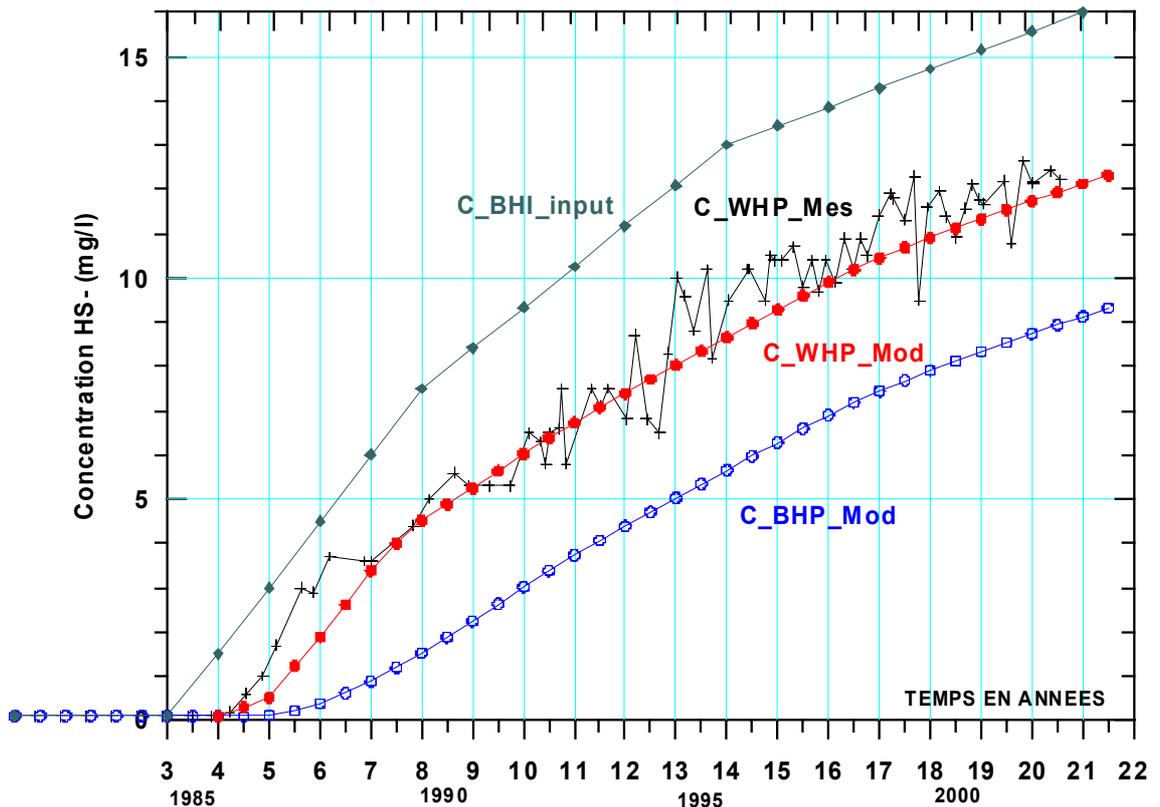


Figure 33 - Historiques de la concentration injectée en fond de puits (C_{BHI_Input}) et de la réponse simulée, restituée en fond (C_{BHP_Mod}) et en tête (C_{WHP_Mod}) du puits de production (schématisation du site de Coulommiers). La variable (C_{WHP_Mes}) correspond aux mesures de surface.

- enfin, vis-à-vis de la réponse du réservoir, il est considéré que le transfert des sulfures est conservatif et très peu réactif. Les calculs de simulation basés sur cette hypothèse, et évalués indirectement par les mesures en tête, ne mettent pas en évidence d'écart significatifs. Il apparaît toutefois utile de poursuivre l'analyse par la modélisation géochimique au sein du réservoir et l'évaluation des dérives susceptibles de se traduire sur les mesures chimiques périodiques en tête, au cours de l'exploitation.

4.8. IDENTIFICATION D'UNE MÉTHODOLOGIE POUR LA MODÉLISATION

La principale variable d'exploitation nécessaire pour le pilotage de la simulation des transferts chimiques est la concentration en sulfures imposée en fond de puits d'injection. Cette variable n'étant pas mesurable *in situ*, est évaluée à partir de l'historique des mesures en tête de production, de la réponse simulée en fond de puits de production et du modèle conceptuel global de fonctionnement de la boucle.

Lorsque le suivi de la concentration est disponible dès la mise en service, cette évolution initiale peut être interprétée pour une première estimation de la production nette en sulfures (terme [B – D]) du forage. On considère le taux de variation de la concentration sur une durée égale au temps de percée chimique, à partir du début d'évolution, c'est-à-dire avant l'apparition des effets du recyclage par le réservoir (terme R). Ce gain en concentration peut être extrapolé à la durée de production, sans traitement en fond de puits.

L'évaluation préalable du temps de percée moyen initial suppose la connaissance du débit d'exploitation durant cette période. En pratique, un échantillon de 5 à 6 ans apparaît nécessaire pour s'affranchir des incertitudes liées à la différence entre débit d'été et d'hiver, que ce soit pour l'évaluation de la concentration ou du temps de percée.

La connaissance de l'écart de concentration généré par le forage de production, dC_p , permet de piloter la simulation de la réponse du réservoir. La concentration imposée au puits d'injection est à tout instant égale à celle calculée au producteur, augmentée de deux fois l'écart précédent (ou si nécessaire pondérée par la longueur des forages). À l'issue de la simulation, la concentration calculée en fond de producteur, augmentée de l'écart dC_p , c'est-à-dire la variable simulée en tête peut être comparée aux observations. Des ajustements des paramètres sont nécessaires si le taux de génération par les forages n'apparaît pas constant. L'examen de l'écart (amplitude et tendances) entre concentrations simulées et mesurées permet alors de juger de la validité des hypothèses retenues (réactivité du réservoir ?, sulfures considérés comme traceur parfait ?).

La simulation peut être conduite en plusieurs étapes successives pour évaluer les effets des diverses causes et hypothèses introduites. On dispose ainsi d'un moyen de mieux contrôler l'impact de chaque hypothèse vis-à-vis de la réponse du réservoir :

- un premier calcul à débit moyen constant et à concentration constante (valeur 100 par exemple) fournit directement la réponse du réservoir à un échelon unitaire,

c'est-à-dire la fonction de transfert R. On estime alors, par comparaison avec les solutions analytiques ou de référence, la validité des discrétisations utilisées pour la géométrie et le temps ainsi que les paramètres de dispersion ;

- disposant de la fonction de transfert, on peut ensuite déterminer de manière externe la réponse induite par la modulation du signal d'entrée, à l'aide d'une convolution sur le signal d'entrée (historique de la concentration injectée) et évaluer la cohérence de la tendance évolutive simulée (ajustement des paramètres de la boucle de rétroaction des forages) ;
- la simulation détaillée peut alors être reprise en introduisant les variations du débit pour le comportement chimique et les variations de la température pour le comportement thermique, afin d'évaluer l'impact de ces fluctuations vis-à-vis des observations consignées dans la base de données.

Compte tenu du poids des calculs, il apparaît plus efficace de scinder les calculs chimiques et thermiques, avec une discrétisation verticale du réservoir différente, pour une même discrétisation en plan. La simulation des transferts chimiques est alors limitée aux seules couches productives (structure monocouche ou multicouche si les perméabilités sont très différenciées). La simulation thermique, pour sa part, doit nécessairement intégrer les forts échanges avec les épontes imperméables, d'où un maillage géométrique nettement plus important, notamment si les divers niveaux producteurs et les épontes intermédiaires doivent être inclus.

La méthodologie d'approche proposée a été déduite de l'examen des données d'exploitation disponibles, en l'état de chargement de la base de données. Elle s'appuie également sur l'analyse des données géochimiques de quatre sites-type constituant un échantillon de la variabilité géographique. La méthode d'interprétation des données a été appliquée à deux exploitations, considérées comme des doublets isolés, afin d'évaluer les résultats de la simulation :

- le doublet de Créteil, qui avait fait l'objet d'une analyse antérieure et ne peut pas en fait être considéré comme un doublet isolé en raison de son implantation. Dans ce cas par contre, la concentration restituée par le réservoir en fond de producteur a fait l'objet d'investigations détaillées, par paliers de débit, permettant d'évaluer la contribution spécifique du forage ;
- le doublet de Coulommiers qui peut effectivement être considéré comme un doublet isolé, compte tenu de sa distance aux doublets voisins. Dans ce cas, la contribution des forages vis-à-vis de la génération de sulfures a été estimée à partir de la connaissance de la réponse chimique, incluant les mesures nécessaires en début d'exploitation.

La simulation des transferts chimiques et thermiques sur ce dernier cas d'application a également mis évidence l'extension de l'emprise du traceur injecté dans le réservoir par rapport à l'impact thermique associé. Ainsi, dans le contexte fréquent d'implantation de doublets voisins, l'interférence chimique entre forages est susceptible d'apparaître plus tôt, avec une incidence sur les concentrations à l'exhaure.

4.9. APPROCHE DU COMPORTEMENT DE GROUPES DE DOUBLETS

Dans le prolongement de l'approche d'une exploitation isolée, appliquée à la simulation du comportement d'un groupe de doublets, le volume de données à intégrer est nettement plus important. Les contraintes spécifiques concernent principalement :

- l'extension du sous-domaine à considérer, qui impose la connaissance ou le choix des contraintes à sa périphérie. Ces dernières traduisent l'impact des autres exploitations non incluses, ou la continuité du réservoir dans le cas général ;
- le modèle conceptuel du réservoir, ou sa schématisation pour le calcul de son comportement, prenant en compte l'hétérogénéité des paramètres et de la structure (épaisseur productive, transmissivité ou perméabilité, stratification des niveaux producteurs) ;
- la discrétisation géométrique, nécessairement variable compte tenu de l'hétérogénéité des vitesses et des contraintes numériques ;
- les données d'exploitation des différents doublets retenus, incluant notamment les données relatives à la réponse du traceur et au débit, depuis la mise en service des sites.

L'analyse a consisté à examiner les données disponibles dans la base données et à identifier *a priori* deux groupes de doublets pour un traitement par simulation au cours de la phase suivante. Il s'agit d'une part d'un groupe de sept doublets au sud-est de Paris et d'autre part du champ de Meaux.

Le groupe de doublets identifié au sud-est de Paris est représenté sur la figure 34. La définition de la limite du domaine à l'ouest et au sud-ouest est toutefois fortement contrainte par la proximité des autres exploitations. En première analyse, et à confirmer par la suite, cette limite peut être tracée en joignant les points à mi-distance des forages de même type (injecteur ou producteur). Si les débits d'exploitation ne sont pas trop différents en moyenne, cette ligne à ajuster pourrait correspondre à une limite à flux nul. En terme de paramètres d'exploitation, et en l'état de chargement de la base de données, les périodes renseignées ne sont pas toutes homogènes. Les données en cours d'acquisition concernent surtout les débits, les températures d'injection et les concentrations en sulfures pour la période antérieure aux années 1992-1995.

Afin d'appliquer la méthode décrite précédemment, la première étape de simulation consiste à évaluer les temps de percée chimique entre chaque injecteur et les producteurs des doublets voisins, puis de quantifier l'évolution des taux de recyclage mutuels. En présence des interférences, les lignes de courant les plus rapides associées aux temps de percée ne sont plus confondues avec le segment joignant les puits, comme dans le cas du doublet isolé.

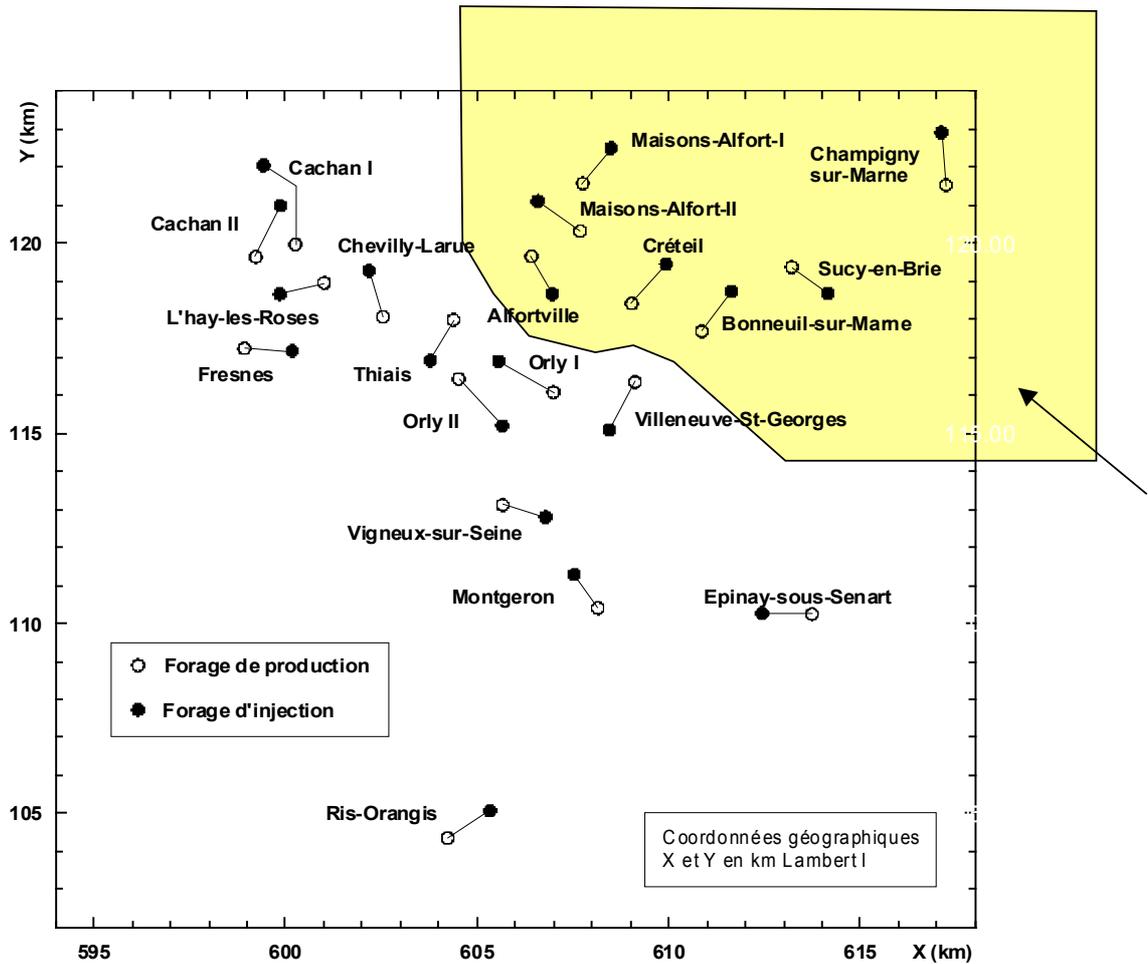


Figure 34 - Zone sud-est de Paris : groupe de doublets identifié pour l'évaluation de l'impact des interférences sur la réponse chimique.

Le second groupe de doublets identifié correspond au champ de Meaux. Ce groupe de quatre doublets voisins est relativement éloigné des autres exploitations (Seine-Saint-Denis et Coulommiers). En l'absence d'interactions avec celles-ci, l'analyse peut être focalisée sur les interférences chimiques mutuelles et sur l'impact du régime d'exploitation ; les quatre opérations étant actuellement exploitées avec cogénération.

En terme de données, l'exploitation est renseignée dans la base depuis la mise en service. La figure 35, restituant ces informations, montre notamment que la concentration en sulfures dissous est disponible pour les quatre producteurs. On peut remarquer que les tendances d'évolution sont relativement différenciées, intégrant vraisemblablement les variations du régime d'exploitation et les interférences mutuelles. On note également que les corrélations entre les maxima de concentration et les minima de débit sont très nettes durant les quinze premières années d'exploitation, puis s'amortissent ou se désynchronisent avec l'augmentation de la concentration moyenne produite.

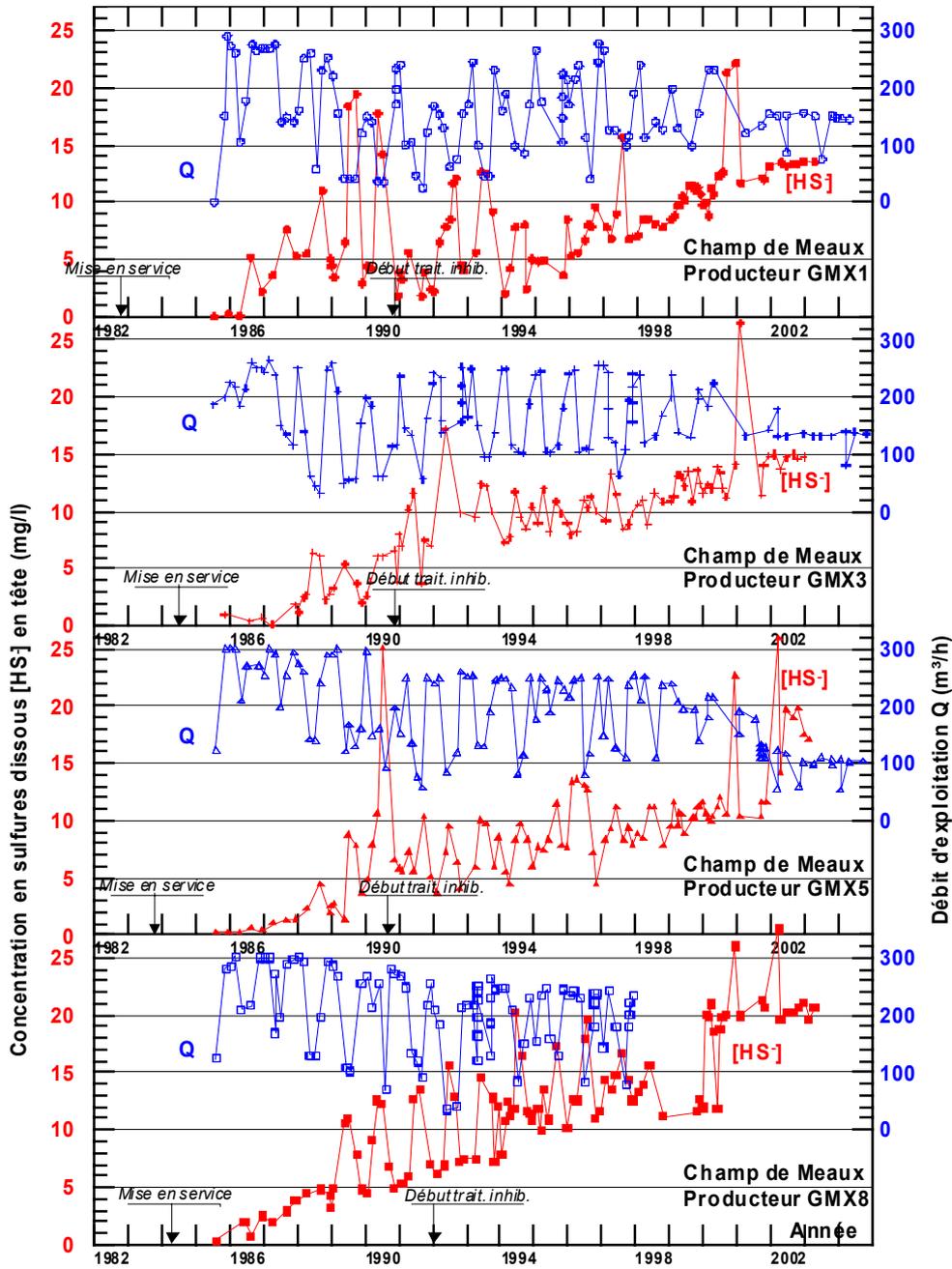


Figure 35 - Évolution de la concentration en sulfures dissous en tête de puits au cours du temps. Restitution des informations de la base de données pour les producteurs du champ de Meaux.

5. Conclusion

Comme indiqué en introduction, cette seconde phase du projet de gestion du Dogger avait pour objectif de :

- traiter et valider le stock de données historiques non encore saisies au cours de la phase 1 ;
- organiser le transfert continu et pérenne des données quotidiennes en cours d'acquisition ;
- réorganiser et adapter la base de données Dogger réalisée en phase 1 ;
- mettre au point la modélisation du Dogger, à partir des données de la base.

À l'issue de cette phase, il est possible de conclure que :

- la première mission ci-dessus est remplie à plus de 90 %, comme mentionné en conclusion du chapitre 2. L'achèvement de cette séquence sera opéré dans le cours de la phase 3 du projet ;
- pour la seconde mission, la structure du transfert continu des données quotidiennes est à présent en place et acceptée à la fois de près de 65% des exploitants de sites géothermiques du Bassin de Paris et des deux sociétés de service chargées de l'appliquer et de la faire vivre. Le transfert devrait être opérationnel avant le mois de juin 2005 ;
- la troisième des missions est accomplie à 100 %, la base Dogger étant aujourd'hui totalement opérationnelle et conviviale ;
- en ce qui concerne la dernière mission, qui trouve tout son intérêt pour préparer la phase 3 du projet dédiée à la modélisation du réservoir du Dogger dix ans après les derniers travaux du même type, il est possible de conclure comme suit.

L'interprétation des données d'exploitation s'appuie principalement sur les études antérieures réalisées jusqu'au début des années 1990 et sur le contenu de la base de données. Aucune information factuelle n'étant disponible sur le déclin énergétique des doublets, l'interprétation est centrée sur les signaux chimiques restitués au puits de production et sur le rôle de précurseur du refroidissement attribuable à certaines espèces dissoutes, telles que les sulfures, ou minérales. L'analyse est focalisée d'une part sur l'évolution de la géochimie du fluide dans les différents compartiments de la boucle géothermale, et d'autre part sur l'impact des transferts de ces espèces affectant les caractéristiques de la réponse observable en tête de puits de production.

L'analyse de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des fluides géothermaux du Dogger du Bassin parisien rend compte des tendances sur la durée d'exploitation et de la variabilité spatiale, sur la base de quatre échantillons géographiques (Meaux, Ris-Orangis, Créteil et Clichy-sous-Bois). Ce premier diagnostic géochimique permet de constater que les évolutions identifiées lors du démarrage de la production (1982-1985) pour les différents paramètres (potentiel

redox, Fer (+II) et soufre (-II)) se sont poursuivies jusqu'en 2001-2003. Le déséquilibre vis-à-vis de l'état redox apparaît systématique et la décroissance continue du potentiel suggère l'interaction de plusieurs couples du soufre, nécessitant des données spécifiques pour étendre l'analyse. L'état d'équilibre vis-à-vis des minéraux est caractérisé par l'indice de saturation qui, selon les zones géographiques, renseigne sur la nature des dépôts observés à la paroi des forages (*i.e.*, calcite, sidérite et mackinawite) et sur les éventuels candidats pouvant être associés à l'apparition du futur refroidissement. L'extension du diagnostic géochimique à un échantillonnage géographique plus large devrait permettre de préciser les tendances générales associées à la notion de filière d'exploitation ainsi que les signatures propres aux caractéristiques locales de la ressource.

Un modèle conceptuel simplifié traduisant le fonctionnement de la boucle géothermale est utilisé pour intégrer les composantes du système et assurer le lien entre l'évolution de la géochimie des eaux et le comportement du réservoir. La réponse du réservoir à l'injection est évaluée par modélisation, en considérant le cas de deux doublets (Créteil et Coulommiers) et en s'appuyant sur les données d'exploitation disponibles depuis une vingtaine d'années consécutive après la mise en service. Vis-à-vis de la réponse observable en surface, l'analyse comprend l'examen des contraintes associées à la schématisation pour la modélisation (problématique générale), les corrélations existantes entre transferts thermiques et chimiques, ainsi que l'identification d'une méthodologie pour le traitement des données d'exploitation. Le principal objectif de la méthode de traitement est l'identification de la concentration en fond de puits d'injection, variable majeure de modulation des transferts au sein du réservoir dont la mesure directe *in situ* n'est pas envisageable. Cette méthode, destinée à être appliquée à des groupes de doublets, met en évidence l'importance des données détaillées durant les premières années d'exploitation et le rôle croissant du recyclage des eaux injectées. Cette fonction de recyclage, inhérente à l'exploitation par doublet, recouvre deux aspects très liés : la réponse du réservoir restituant sur la durée la mémoire de l'injection, et l'interaction instantanée des processus géochimiques affectant la concentration en sulfures dissous au sein des forages (caractéristiques du fluide réinjecté). Les premières investigations numériques, appliquées à deux doublets spécifiques, permettent de restituer l'évolution globale de la concentration des sulfures observée en surface. Les principales incertitudes et hypothèses qu'il conviendrait de s'attacher à réduire concernent notamment la génération nette des sulfures au sein de la boucle géothermale, la fonction de transfert du réservoir (réactivité du traceur, interférences chimiques entre doublets), ainsi que la schématisation de la stratification du réservoir.

Outre la modélisation de secteurs du réservoir du Dogger exploités par des groupes de doublets, objectif final du projet à partir des éléments de conception et de structuration qui viennent d'être décrits, la phase 3, qui doit suivre dans les prochaines semaines, s'attachera, sur une durée pluriannuelle qui pourrait être triennale, à :

- gérer l'acquisition des données quotidiennes afin que la continuité du service soit assurée ;
- gérer le fonctionnement de la base Dogger afin de corriger régulièrement les anomalies qui pourraient survenir.

6. Bibliographie

- Azaroual M., Fouillac C., Matray J.-M.** (1997) – Solubility of silica polymorphs in electrolyte solutions, II. Activity of aqueous silica and solid silica polymorphs in deep solutions from the sedimentary Paris Basin. *Chem. Geol.*, Vol. 140, pp. 167-179.
- Bastide J.P.** (1985) – Étude géochimique de la nappe du Dogger du Bassin parisien. Thèse de l'Université de Paris VII.
- Benning L.G., Wilkin R.T., Barnes H.L.** (2001) – Reaction pathways in the Fe–S system below 100°C. *Chem. Geol.* Vol. 167, pp. 25-51.
- Boulègue J.** (1978) – Metastable sulfur species and trace metals (Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb) in hot brines from the French Dogger. *Am. J. Sci.*, Vol. 278, pp. 1394-1411.
- Coudrain-Ribstein A., Gouze Ph.** (1993) – Quantitative study of geochemical processes in the Dogger aquifer, Paris Basin, France. *Applied Geochemistry*, Vol. 8, pp. 495-506.
- Criaud A., Fouillac C., Marty B.** (1989) – Low Enthalpy geothermal fluids from the Paris basin. 2—Oxidation-Reduction state and consequences for the prediction of corrosion and sulfide scaling. *Geothermics*, Vol. 18, pp. 711-727.
- Goyénèche O., Desplan A., Bretteville B., Fabris H., Menjoz A., Azaroual M., Sbai A., Ungemach P., Antics M., Scalisi G.** (2004) – Mise en oeuvre d'un système de gestion la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France : Conception et réalisation de la base de données, collecte de l'ensemble des données historiques. Rapport BRGM/RP-52927-FR, 92 p.
- Ignatiadis I., Chéradame J.-M., Lafforgue M., Castagné S.** (1991) – Évolution des concentrations en sulfures dissous dans les fluides géothermaux du Dogger du Bassin parisien. IMRG, R33 518. pp. 134.
- Matray J.-M., Menjoz A.** (1996) – Recherche de traceurs chimiques pour l'identification de la percée thermique des doublets géothermiques Dogger du bassin parisien (France). Rapport final (Convention Ademe – BRGM 4.05.0040). Rap. BRGM R39 096, 123 p.
- Michard G., Bastide J.-P.** (1988) – Étude géochimique de la nappe du Dogger du Bassin parisien. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 35, pp. 151-163.
- Ouzounian G., Castagné S., Fouillac C., Criaud A.** (1987) – L'origine du fer dans les eaux géothermales exploitées au Dogger (Bassin parisien). *Géothermie Actualités*, Vol. 4, pp. 31-34.

Annexe 1

Compte rendu de la réunion du Comité de pilotage du projet du 7 décembre 2004

Réf. : CDG/ENE 116/04

Orléans, le 14 décembre 2004

COMPTE RENDU DE RÉUNION	
Rédacteur : O. GOYENECHÉ	
Projet : Gestion du Dogger - Phase 2	Numéro : PSP03CDG57
Objet : Réunion du Comité de Pilotage du Projet	
Date : 7 décembre 2004	Lieu : ADEME -Paris
Participants : ADEME : G. OUZOUNIAN (Délégué régional) et S. DECOTTEGNIÉ ; CFG Services : Ph. DESMIS et G. SCALISI ; GPC : P. UNGEMACH et M. ANTICS ; BRGM : O.GOYENECHÉ et A. MENJOZ	
Absents :	
Diffusion : Tous participants, Ph. LAPLAIGE (ADEME), Th. GARNIER (DRIRE Idf), A. DESPLAN, H. FABRIS, M. AZAROUAL (BRGM)	

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS
<p>1. Introduction.</p> <p>La réunion a pour objectif de faire un point complet sur le déroulement de la Phase 2 du projet de gestion du Dogger, de préciser le planning jusqu'à l'achèvement de cette phase et d'envisager la mise en place de la Phase 3 du projet, telle que prévue dans le cahier des charges à l'origine du projet.</p> <p>En préambule, O. GOYENECHÉ, chef de projet, rappelle le cadre général de cette phase du projet :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La Convention portant le n° 02 05 051, signée entre l'ADEME et le BRGM, a pris effet le 5/12/2002 (date de notification). • Dans les faits, cette phase 2, qui était censée débiter à la fin de la phase 1, a été officiellement lancée le 2/06/2003, à l'issue de la dernière réunion plénière du projet. <p>Le rapport final de la phase 1 a été produit en février 2004, date à laquelle la phase 2, qui comportait notamment l'achèvement de l'intégration (confiée, en sous-traitance, à CFG Services et GPC) des données historiques relatives aux 33 sites à la base de données dédiée au Dogger, a réellement débuté.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aux termes de son article 2.2, la Convention devait prendre fin au 05/08/2004.

- Par lettre RAR du 27/07/2004 et suite à l'impossibilité pour le BRGM de respecter les délais contractuels, ce dernier demandait à l'ADEME un report de délai de 7 mois supplémentaires, soit jusqu'au 05/03/2005.

Par lettre d'avenant en date du 2/08/2004, le BRGM et l'ADEME décidaient la prolongation de la Convention de 7 mois supplémentaires.

- Dans l'intervalle, le BRGM, bénéficiaire et maître d'œuvre de la Convention, signait avec GPC (4/06/2004) et CFG Services (8/07/2004) un contrat de sous-traitance n° 2, par lequel il demandait expressément à ces deux sociétés œuvrant dans le suivi d'exploitation des installations du sous-sol des opérations de géothermie du Bassin parisien :
 - D'achever l'acquisition dans la Base de données du Dogger des données historiques des sites confiés ;
 - De procéder à la mise en place du recueil en routine des données d'exploitation aussi bien à partir des données « papier » que numériques.
- Malgré plusieurs relances, dont une par courrier RAR du 23 juillet 2004 (GPC) et 26 juillet 2004 (CFG Services), le BRGM demandait instamment aux deux sous-traitants de respecter leurs engagements dans les meilleurs délais et fixait un nouveau calendrier d'achèvement des travaux au 3/01/2005 pour GPC et au 7/02/2005 pour CFG Services.
- Enfin, une réunion de travail a été organisée le 29/11/2004, en présence des deux sous-traitants, afin de faire le point sur l'avancement des travaux et de préparer la présente réunion du Comité de Pilotage.

L'ordre du jour de la réunion est fixé comme suit :

- Présentation de la Base de données et point de l'intégration des données historiques ;
- Situation de la méthodologie d'acquisition des données quotidiennes d'exploitation pour les 33 opérations en activité sélectionnées dans le projet ;
- Présentation de l'état des lieux des travaux de modélisation du réservoir du Dogger à partir des données intégrées à la Base au cours de la phase 2.

2. Présentation de la base et discussion sur l'état d'acquisitions des données historiques

La base est présentée dans sa forme définitive intégrant les corrections réalisées au cours des phases 1 et 2 du projet.

En ce qui concerne son contenu, outre les données historiques intégrées en date du 16 mars 2004 et présentes sur le CD ROM remis avec le rapport BRGM/RP-52927-FR relatif à la phase 1, la base présentée contient un envoi de CFG Services en date du 23 novembre 2004.

Par contre, la base ne contient pas deux envois de CFG Services et de GPC en date du 7/12/2004, lesquels seront intégrés dans les jours prochains.

En résumé :

- En ce qui concerne CFG Services, les fiches 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 10 des **15** sites confiés contractuellement à CFG Services sont intégralement renseignées jusqu'au 31/12/2003.
- En ce qui concerne GPC, les fiches 1, 2, 3, 4 et 5, des **18** sites confiés contractuellement à GPC sont intégralement renseignées jusqu'au 31/12/2003.

À noter que GPC a réalisé un gros travail de compilation des données disponibles dans les locaux de la DRIRE IdF à partir du début 1995. Ces données, confrontées aux relevés obtenus en centrale à partir de l'instrumentation du site ainsi qu'aux relevés trimestriels réalisés par paliers de débits dans le cadre des contrats de suivi du sous-sol, permettront de disposer des historiques de production, sur la base d'une moyenne annuelle. Ces résultats très utiles seront rassemblés au BRGM et utilisés pour les travaux de modélisation du réservoir (notamment en phase 3).

Les **annexes 1.1 et 1.2** jointes au présent compte-rendu, indiquent pour chacun des sous-traitants l'état des données intégrées à la Base sous la forme du nombre de valeurs par site et par fiche (1 à 12) de la Base.

Pour une visualisation de la base et de son contenu dans sa version du 16 mars 2004, nous recommandons d'utiliser le CD ROM remis avec le rapport de la phase 1 précité.

Afin d'utiliser correctement les fichiers contenus dans le CD ROM, voici la démarche à suivre :

Les fichiers ne pourront être ouverts que si l'ordinateur dispose du logiciel ACCESS au minimum dans sa version 97.

Dès ouverture du CD, procéder à une copie sur votre disque dur des deux fichiers intitulés : « f_dogger_ref97.mdb » et « d_dogger_copie_oracle_16032004.mdb »,

Puis effectuer, **pour chacun d'entre eux**, le **décochage de l'attribut « lecture seule »** que l'on trouvera en procédant à un clic droit de souris sur chaque fichier avant ouverture, puis en ouvrant la rubrique « Propriétés » de la fenêtre qui apparaît, enfin, l'onglet « Général » de la nouvelle fenêtre. Après cette opération, cliquer sur « Appliquer » puis « OK », en bas de la fenêtre ainsi ouverte.

Ouvrir ensuite le fichier « f_dogger_ref97.mdb ». Cliquer OK, lorsque apparaît la fenêtre indiquant « La connexion à la base Acces ne s'est pas effectuée. Pour connecter l'application à la base de données vous devez sélectionner le fichier D_DOGGER.md ».

Dans la fenêtre qui s'ouvre alors, sélectionner à la rubrique « Rechercher dans », l'endroit où vous avez copié les deux fichiers en début d'opération. Puis sélectionner dans « Nom du fichier », le fichier « d_dogger_copie_oracle_16032004.mdb »

La base est alors utilisable à partir du menu contenant les chapitres : « Opération »; « Exploitation » et « Ouvrage ».

Pour l'avenir, le rapport final de la phase 2 contiendra un nouveau CD ROM du même type qui permettra, dans les mêmes conditions, d'interroger la Base de données Dogger dans laquelle sera intégrée la quasi-totalité des données historiques de 33 installations d'Ile-de-France, sous réserve des actions décrites ci-dessous et décidées en réunion.

Par ailleurs, il est précisé que le site Internet dédié à la géothermie, réalisé par l'ADEME et le BRGM et actuellement en voie d'achèvement, disposera d'une rubrique « Professionnels » qui contiendra la base actualisée mensuellement. Chaque Maître d'ouvrage disposera alors d'un mot de passe personnalisé qui permettra d'accéder aux données du site considéré.

3. Situation de la méthodologie d'acquisition des données quotidiennes d'exploitation pour les 33 opérations en activité sélectionnées dans le projet

Pour mettre en application le second élément de l'action « Acquisition des données » prévue au cahier des charges de la Phase 2 du projet, à savoir : « Organisation du transfert des données en cours d'acquisition », O. Goyénèche a rencontré J. Taillardas, directeur de l'Agence Ile-de-France de la société ELYO, pour la mise en place des protocoles de récupération des données quotidiennes sur les 6 sites exploités par ELYO.

Rappelons qu'un projet de protocole à signer pour chaque site géothermique avait été élaboré et avalisé par l'ADEME et l'ARENE en phase finale de la Phase 1 (cf. Conclusions et annexe 3 du rapport final de la Phase 1 n° BRGM/RP-52927 -FR)

Du point de vue méthodologique, le BRGM propose, au moins dans un premier temps, de gérer l'acquisition des données quotidiennes selon le protocole suivant qui reçoit l'approbation de ELYO :

- Utilisation ou mise en place sur chaque site d'un ordinateur disposant d'un fichier EXCEL dédié ou d'une feuille automatique à partir d'un fichier EXCEL destiné à l'acquisition des données quotidiennes d'exploitation (relevés du lundi au vendredi hors jours fériés) issue de la main courante de l'opérateur sur le site ;
- Acquisition des données disponibles sur le site en fonction des capteurs existants (au maximum 16 valeurs par jours (cf. Fiche en annexe du protocole approuvé par ELYO, ci-joint en **annexe 2**) ;
- Envoi, en début de chaque mois, vers une adresse E-mail dédiée chez chacun des maîtres d'œuvre titulaires de contrats de suivi des installations de sous-sol, d'un fichier contenant les données relevées dans le mois précédent ;
- Contrôle et validation simplifiés par le maître d'œuvre sous-sol concerné et envoi vers la Base de données Dogger.
- Sur proposition de CFG Services, la messagerie dédiée fera parvenir, le 1^{er} de chaque mois, un message automatique de relance en direction des messageries des sites.

La Base recevrait donc ainsi environ 4 000 données par an et par site au maximum.

Il importe alors de considérer que le projet de gestion du Dogger doit faire l'objet d'avenants annuels à la Convention destinés à rémunérer les maîtres d'œuvre sous-sol pour leur participation à la bonne acquisition des données en provenance des sites ainsi que le BRGM pour la gestion annuelle de la Base.

Il est également demandé par les exploitants qu'un courrier explicitant cette démarche soit adressé par l'ADEME à chacun des maîtres d'ouvrage détenteurs du permis d'exploitation d'un site.

En ce qui concerne, la future étape d'acquisition automatique des données, le débat porte, en réunion, sur la méthode à retenir.

Il ressort que :

- D'une façon générale, les données transmises par les exploitants ne sont pas fiables et qu'il est sans doute préférable d'utiliser les mesures réalisées en moyenne 4 fois par an avec du matériel étalonné par les maîtres d'œuvre sous-sol.
- Une des solutions consiste à utiliser les températures de réinjection relevées, au besoin en passant par les informations des compteurs d'énergie et de calculer les débits géothermaux saisonniers de l'installation à partir de la loi d'eau du réseau.
- La mise en place de boîtiers d'acquisition des données quotidiennes instantanées de 8 ou 16 voies selon le nombre de paramètres à collecter ainsi que de capteurs dédiés doit être étudiée en détail. En première approximation, le coût global de ces équipements pour les 33 opérations retenues s'élèverait à environ 150 000 € HT.
- Ces propositions, à confirmer par les maîtres d'œuvre, correspondant à un investissement par site de 4 000 à 5 000 € HT devront être confrontées aux possibilités d'investissement des maîtres d'ouvrages et leurs exploitants.

4. Présentation de l'état des lieux des travaux de modélisation du réservoir du Dogger à partir de données intégrées à la Base au cours de la phase 2.

André Menjot présente l'état des travaux de modélisation du réservoir du Dogger réalisé dans le cadre de la phase 2 du projet.

Pour plus de clarté, on se reportera au diaporama présenté par A. Menjot, joint en **annexe 3** au présent compte-rendu.

Action	Responsable	Délai	Soldé
<p>Chapitre 2 ci-dessus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Action 2.1</u> : CFG Services s'engage à finaliser l'ensemble des fiches 8, 11, 12 et 9, ainsi que les autres fiches pour l'année 2004. Elles seront ensuite adressées à H. Fabris qui les intégrera dans la Base. • <u>Action 2.2</u> : GPC s'engage à finaliser l'ensemble des fiches 6, 7 (renseignées jusqu'au 31/03/2003), 8, 9, 10, 11 et 12, ainsi que les autres fiches jusqu'au 31/12/2004, selon le calendrier ci-contre. Comme pour CFG, H. Fabris intégrera ces données dans la Base 	<p>Ph. Desmis G. Scalisi H. Fabris H. Fabris</p>	<p>23/12/04 Un envoi le 7/12/04 ; 2^{ème} envoi le 7/01/05</p>	
<p>Chapitre 3 ci-dessus :</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Action 3.1</u> : CFG Services (pour les sites de Champigny sur Marne, Thiais, Fresnes, et Sucy en Brie) et GPC (pour les sites de Tremblay en France et Villiers le Bel) se rapprocheront d'Elyo afin que la mise en route de la procédure d'acquisition mensuelle des données, sous la forme de tableaux Excel adressés par les opérateurs sur sites à des adresses email prédéfinies par CFG Services et GPC, puisse être effective au 3 janvier 2005. • <u>Action 3.2</u> : O. Goyeneche rencontrera les autres exploitants (Dalkia, Coriance, Semhach) pour formaliser la même démarche pour les 28 autres sites de la région parisienne. • <u>Action 3.3</u> : Préparer un projet de lettre à la signature de G. Ouzounian, destiné à informer les détenteurs de permis d'exploitation de la démarche entreprise avec les exploitants pour la collecte des données quotidiennes. 	<p>CFG Services : Ph. Desmis ; G. Scalisi GPC : P. Ungemach O. Goyeneche O. Goyeneche</p>	<p>Avant fin 2004 Janvier 2005 Fin 2004</p>	

Annexe 2

Projet de courrier circulaire de l'ADEME Ile-de-France à l'attention des maîtres d'ouvrage détenteurs du permis d'exploiter les sites géothermiques du Bassin parisien

**Lettre de l'ADEME Idf aux Maîtres
d'ouvrage de centrales
géothermiques en Ile-de-France**

Paris, le 11 janvier 2004

N/Réf.

Objet : Gestion du réservoir géothermique du Dogger

Monsieur,

Comme vous le savez sans doute déjà, l'ADEME se préoccupe de l'évolution du réservoir géothermique du Dogger en région Ile-de-France depuis sa mise en production au début des années 1980. Cette ressource est exploitée depuis cette date par une cinquantaine d'opérations de géothermie dont il subsiste aujourd'hui 34 exemplaires sur le territoire régional.

Pour poursuivre dans cette voie et pour mieux appréhender les échéances, l'ADEME a confié au BRGM la charge de l'élaboration d'un outil de gestion du réservoir du Dogger de la région parisienne pour son exploitation géothermique durable. Les objectifs de la mise en œuvre de cet outil, qui s'appuie sur la constitution d'une base de données spécifique et évolutive, sont de permettre aux maîtres d'ouvrages, d'une part d'entreprendre des interventions efficaces lors de l'apparition d'un événement ponctuel lié au fonctionnement du réservoir, d'autre part de prendre des décisions appropriées dans le cas d'une modification durable du comportement de cette ressource.

Ces possibilités d'intervention sont, en particulier, importantes dans les zones où le réservoir du Dogger est exploité de façon intense, comme dans le Val-de-Marne ou le nord de l'Essonne, par des doublets très proches les uns des autres.

Il convient donc d'être en mesure de gérer le réservoir et de prévoir l'évolution de sa productivité et de sa température de production.

Dans les travaux initiaux de modélisation (qui se sont achevés en 1996), les dates calculées de percée thermique étaient de l'ordre de vingt ans à partir de la première mise en exploitation du doublet de puits géothermaux. Pour les opérations ayant atteint cette durée de vie, aucune diminution de température n'a, pour l'heure, été constatée.

Des modélisations globales avaient alors été faites qui, en utilisant de nouvelles hypothèses sur la structure de l'aquifère, ont permis d'expliquer le retard constaté de la percée thermique et ont mis en évidence **la nécessité de disposer d'informations les plus précises possibles** sur le réservoir et sur l'exploitation de l'ensemble des installations géothermiques.

C'est l'objet du programme confié au BRGM au début de l'année 2002 et qui a été découpé en trois phases : l'acquisition et la transmission des données, leur exploitation, puis la modélisation et l'interprétation.

La **phase 1**, qui s'est achevée, au premier trimestre 2004, a consisté en la conception et la réalisation de la Base de données, ainsi qu'au recensement et au chargement d'une première partie des données historiques disponibles sur chaque site.

La **phase 2**, intermédiaire, s'achèvera au mois de mars prochain et consiste, outre l'intégration du reste des données historiques jusqu'au 31 décembre 2004, à procéder au chargement de la Base en **données quotidiennes d'exploitation** des installations géothermiques.

Pour le bon achèvement de cette phase du projet, nous avons besoin de votre contribution.

En effet, le BRGM et les deux sous-traitants (CFG Services et GPC I&P) dont il s'est associé les services du fait de leurs compétences dans le domaine de la gestion des données du sous-sol, vont, au cours des prochaines semaines, entrer en contact avec les sociétés chargées de l'exploitation des centrales géothermiques.

Ils proposeront, à travers un protocole d'accord pour la mise à disposition et le traitement des données d'exploitation de chaque site, la mise en place d'un dispositif d'adressage mensuel de 17 paramètres issus des données quotidiennes d'exploitation recueillies par le personnel du site concerné, au moyen soit d'une « main courante », soit d'enregistrements sur fichiers informatiques.

Les données ainsi recueillies quotidiennement au cours d'un mois seront adressées par courrier électronique, au début du mois suivant respectivement à CFG Services ou GPC I&P (en fonction des engagements contractuels en vigueur) qui les contrôleront et les chargeront dans la Base de données dédiée.

L'ensemble de ces informations sera utilisé confidentiellement par le BRGM pour la modélisation à moyen et long terme du comportement du réservoir du Dogger (Phase 3 du projet) dont les résultats serviront, notamment, à informer les maîtres d'ouvrages et leurs exploitants.

Ces données seront également mises en ligne sur le site Internet dédié à la Géothermie qui sera disponible dans les prochaines semaines. Elles seront accessibles pour chaque site, via un code confidentiel confié au détenteur du permis d'exploitation du site.

Nous vous demandons par la présente de leur réserver le meilleur accueil et de faciliter, en concertation avec l'exploitant de la Centrale, la mise en place de ce dispositif qui devra prendre en compte les données disponibles depuis le 1^{er} janvier 2005.

Conscient que vous partagez notre objectif de placer la Géothermie Basse Température de la région parisienne dans une perspective où l'utilisateur comme les professionnels ou scientifiques trouveront matière à démontrer que cette énergie renouvelable dispose d'un potentiel important dans le débat sur le développement énergétique durable, je vous prie de croire, Monsieur, en l'expression de mes sentiments distingués. Le Délégué Régional de l'ADEME Ile-de-France

Annexe 3

Situation des négociations avec la société ELYO pour l'acquisition des données quotidiennes d'exploitation sur six sites géothermiques du bassin de Paris

Courrier de CFG Services à ELYO Ile-de- France

N/Réf. L/09/05/PGC/GS/VD

ELYO ILE DE FRANCE

5 rue Saarinen

Silic 150

94533 RUNGIS CEDEX

A l'attention de Monsieur TAILLARDAS

Orléans, le 19 janvier 2005

Objet : Gestion du DOGGER

Recueil des données d'exploitation des doublets exploités par ELYO

Monsieur,

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un système de gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France, et suite à votre dernière réunion avec M. Olivier Goyénèche, Responsable de ce projet, nous vous demandons de bien vouloir mettre en œuvre auprès de votre personnel, les procédures de recueil des données d'exploitation des doublets.

Ces procédures pourront être mises en place avec l'assistance de CFG Services.

Les sites concernés par cette démarche sont les suivants :

- CHAMPIGNY-sur-MARNE
- THIAIS

- SUCY-en-BRIE
- TREMBLAY-en-FRANCE

En fonction du personnel ELYO en place et des moyens informatiques et de communication sur chacun de ces sites, nous vous proposons le choix entre les deux procédures suivantes :

Procédure 1 :Création d'un fichier EXCEL à partir des données de votre main-courante et transmission de ce fichier à l'adresse Internet suivante : gestion.dogger@cfg.brgm.fr

Le nom du fichier devra comporter le nom du site et de l'année.

Pour les 4 sites ci-dessus, je propose donc comme nom de fichier :

- champigny_dogger_2005.xls
- thiais_dogger_2005.xls
- sucy_dogger_2005.xls
- tremblay_dogger_2005.xls

Ces fichiers seront uniques pour chaque année et devront être communiqués à l'adresse Internet ci-dessus en début de chaque mois.

Afin de pouvoir intégrer ces données à la base de la gestion du Dogger, il est indispensable de respecter l'ordre des lignes de chacune des données.

Nous vous communiquons par E-mail, à votre attention, ces fichiers.

Procédure 2 :Création d'une fiche spécifique par ELYO, à partir des données de votre main-courante et transmission de ces fiches par fax au n° suivant : 02.38.64.32.83.

Ces fiches devront comporter au minimum 5 relevés par semaine.

52 fiches seront donc communiquées à CFG Services chaque année, à une fréquence mensuelle si possible.

Nous vous joignons un modèle de fiche.

Afin de mettre en œuvre le plus rapidement ces procédures, vous trouverez également ci-jointe une liste des données que nous vous demandons de communiquer.

Nous attirons votre attention sur la nécessité de renseigner, au moins sur chaque fiche, le débit géothermal, la température d'exhaure, la température d'injection, la pression d'exhaure, la pression d'injection, le comptage électrique d'exhaure et d'injection, le comptage d'énergie thermique primaire ou secondaire, ces données d'exploitation étant cruciales pour la modélisation du réservoir.

En comptant sur votre diligence pour la mise en service effective de ces procédures, nous restons à votre entière disposition pour faciliter votre démarche, et vous prions de croire, Monsieur, en l'assurance de notre considération distinguée.

Giovanni SCALISI

P.J. Modèle de fiche relative au site de Champigny-sur-Marne présentée à titre d'exemple.

Modèle de fiche de relevé des données quotidiennes d'exploitation réalisée pour le site de Champigny sur Marne

Position lignes	Données	Format des données		JANVIER SEMAINE 1							JANVIER SEMAINE 2						
		ij/mm/aaaa	hh:mm	03/01/2005 09:00:00	04/01/2005 09:00:00	05/01/2005 09:00:00	06/01/2005 09:00:00	07/01/2005 09:00:00	10/01/2005 09:00:00	11/01/2005 09:00:00	12/01/2005 09:00:00	13/01/2005 09:00:00	14/01/2005 09:00:00				
4	Date																
	Heure																
6	Débit		m3/h (entier)														
7	Température Production		°C (1 décimale)														
8	Température injection		°C (1 décimale)														
10	Pression exhaure		bars/relatifs (1 décimale)														
11	Pression Injection		bars/relatifs (1 décimale)														
16	Température Extérieure		°C (1 décimale)														
19	Volume exploité		m3 (entier)														
20	Energie électrique Exhaure		index compteur en kW.h														
21	Energie électrique Injection		index compteur en kW.h														
24	Température Entrée Primaire échangeur		°C (1 décimale)														
25	Pression Sortie Primaire échangeur		bars/relatifs (1 décimale)														
26	Température Sortie Primaire échangeur		°C (1 décimale)														
28	Débit Secondaire échangeur		m3/h (entier)														
30	Température Entrée Secondaire échangeur		°C (1 décimale)														
32	Température Sortie Secondaire échangeur		°C (1 décimale)														
33	Energie thermique Secondaire		index compteur en Mwh														
34	Commentaires		préciser changement compteurs, capteurs, marche, arrêt, pannes, etc.														

Annexe 4

Situation des négociations avec la société DALKIA pour l'acquisition des données quotidiennes d'exploitation sur quinze sites géothermiques du bassin de Paris

Annexe 4.1 - Courrier du BRGM à DALKIA

DALKIA Ile-de-France

A l'attention de M. B. GRAVIÈRE

Technopolis 52

195 rue Jean-Jacques Rousseau

92138 ISSY-LES-MOULINEAUX

Orléans, le 9 mars 2005

N/Réf. : CDG/ENE/CITEG 2005L11

Objet : Gestion du réservoir géothermique du Dogger

Monsieur,

Il y a un peu plus de trois semaines, je vous rencontrais dans vos locaux de Châtillon afin de vous présenter la Base de données dédiée à la gestion à long terme des caractéristiques de l'aquifère du Dogger, actuellement exploité par 34 doublets géothermiques en région parisienne.

Comme j'ai pu alors vous le préciser ce programme, initié par l'ADEME en fin d'année 2001, a permis, dans le cadre de deux phases successives de travaux, de parvenir en fin d'année 2004 à l'intégration de l'ensemble des données historiques de ces opérations depuis leur origine.

Ces données ont été intégrées à la Base par le biais de 12 fiches thématiques réparties dans 3 champs : Opération, Ouvrage, Exploitation.

C'est sur ce dernier champ que votre participation, en tant qu'exploitant de 16 doublets géothermiques de l'Ile-de-France, est désormais indispensable afin de pouvoir conserver les informations nécessaires à l'interprétation régulière de l'évolution des caractéristiques chimiques mais surtout thermiques du Dogger.

Je confirme que votre intérêt, ainsi que celui du maître d'ouvrage avec lequel vous êtes en relation contractuelle, est de connaître ces évolutions pour mieux préparer ou prévenir une éventuelle modification des caractéristiques du réservoir.

Je vous proposais alors de rechercher le moyen de transmettre par message électronique, en début de chaque mois et à partir de chaque site, 17 informations au maximum, à relever quotidiennement (main courante) du lundi au vendredi.

Vous m'indiquez en retour que vous préparerez cette participation à l'approvisionnement de la Base en concertation avec vos collaborateurs.

Je vous proposais également d'assister les ingénieurs ou techniciens chargés de ces prestations sur chaque site concerné par CFG Services ou GPC, missionnés pour la collecte des données historiques et pour l'assistance à la collecte des données quotidiennes d'exploitation.

Je transmets donc copie du présent courrier à ces deux sociétés de services afin qu'elles prennent contact avec vous pour la suite du processus.

Comptant sur votre aide, je reste bien évidemment à votre disposition et vous prie de croire, Monsieur, en l'expression de mes salutations distinguées.

O. GOYENECHÉ

CDG/ENE/CITEG

Copie : CFG Services

GPC

Annexe 4.2 - Courrier du BRGM à CFG Services

CFG Services

A l'attention de Ph. DESMIS et G. SCALISI

3 avenue Claude Guillemin - BP 6429

45064 ORLEANS Cedex 2

Orléans, le 10 mars 2005

N/Réf. CDG/ENE/CITEG-OG/FC-2005L12

Objet : Gestion du réservoir géothermique du Dogger

Messieurs et Chers amis,

Dans le cadre de l'achèvement de la phase 2 du projet de gestion du Dogger, vous trouverez, ci-joint, copie d'une lettre adressée à monsieur **Bruno GRAVIÈRE**, Directeur des exploitations à la société Dalkia, que je rencontrais le 14 février dernier pour lui présenter la Base Dogger et lui préciser notre demande de voir la société Dalkia s'impliquer dans la transmission des données quotidiennes d'exploitation des sites relevant de son autorité.

Monsieur Gravière me demandait alors de lui laisser quelques semaines pour faire le point avec ces collaborateurs et mettre en place la méthode de mise en oeuvre de cette demande.

Je vous propose donc, comme prévu dans le contrat de sous-traitance en vigueur, de bien vouloir prendre contact avec monsieur Gravière, soit à l'adresse indiquée sur le courrier, soit par téléphone au 01/46/62/70/61, soit encore par e-mail à bgraviere@dalkia.com.

Vous pouvez également vous adresser à monsieur **Bruno SARREY**, Responsable de l'ingénierie grands projets, qui participait à la réunion et qui est joignable à :

- Adresse : 28 rue Kléber BP 69 92322 Châtillon Cedex
- tél. : 01/55/58/21/08
- E-mail : bsarrey@dalkia.com

Merci de me tenir informé du démarrage de la transmission des données sur les sites de DALKIA mais également sur les sites d'ELYO, comme je vous l'avais demandé lors de notre dernière réunion.

Dans cette attente et restant à votre disposition, je vous prie de croire, Messieurs et Chers amis, en mes plus amicales salutations.

O. GOYENECHÉ

CDG/ENE/CITEG

Annexe 4.3 - Courrier du BRGM à GPC

GPC

A l'attention de M. ANTICS et P.
UNGEMACH

**Paris Nord II - Lot 109 - 14 rue de la
Perdrix**

95946 ROISSY CDG Cedex

Orléans, le 10 mars 2005

N/Réf. CDG/ENE/CITEG-OG/FC-2005L13

Objet : Gestion du réservoir géothermique du Dogger

Messieurs et Chers amis,

Dans le cadre de l'achèvement de la phase 2 du projet de gestion du Dogger, vous trouverez, ci-joint, copie d'une lettre adressée à monsieur **Bruno GRAVIÈRE**, Directeur des exploitations à la société Dalkia, que je rencontrais le 14 février dernier pour lui présenter la Base Dogger et lui préciser notre demande de voir la société Dalkia s'impliquer dans la transmission des données quotidiennes d'exploitation des sites relevant de son autorité.

Monsieur Gravière me demandait alors de lui laisser quelques semaines pour faire le point avec ces collaborateurs et mettre en place la méthode de mise en oeuvre de cette demande.

Je vous propose donc, comme prévu dans le contrat de sous-traitance en vigueur, de bien vouloir prendre contact avec monsieur Gravière, soit à l'adresse indiquée sur le courrier, soit par téléphone au 01/46/62/70/61, soit encore par e-mail à bgraviere@dalkia.com.

Vous pouvez également vous adresser à monsieur **Bruno SARREY**, Responsable de l'ingénierie grands projets, qui participait à la réunion et qui est joignable à :

- Adresse : 28 rue Kléber BP 69 92322 Châtillon Cedex
- tél. : 01/55/58/21/08
- Email : bsarrey@dalkia.com

Merci de me tenir informé du démarrage de la transmission des données sur les sites de DALKIA mais également sur les sites d'ELYO, comme je vous l'avais demandé lors de notre dernière réunion.

Dans cette attente et restant à votre disposition, je vous prie de croire, Messieurs et Chers amis, en mes plus amicales salutations.

O. GOYENECHÉ

CDG/ENE/CITEG

Contenu du CD-Rom :

- la dernière version (21 mars 2005) de l'application de saisie-consultation et le mode opératoire ;
- les données originales ;
- les fichiers statistiques relatifs aux tables hors lexiques ;
- les versions successives des copies de la base Oracle, version finale incluse.



Centre scientifique et technique
Service connaissance et diffusion de l'information géologique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34