

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

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-60399-FR
Octobre 2011

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

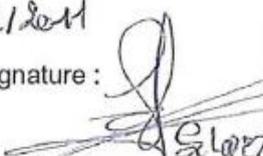
Rapport intermédiaire

BRGM/RP-60399-FR

Octobre 2011

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

**V. HAMM, M. LE BRUN, C. CASTILLO, J-Y Ausseur, O. Borozdina, E. Cordier,
A-L. Gille, P. Goblet, P. Ungemach**

Vérificateur :
Nom : LOPEZ Simon
Date : 01/12/2011
Signature : 

Approbateur :
Nom : VERNIER Romain
Date : 03/12/2011
Signature : 

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

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

Mots clés : Géothermie, aquifère du Dogger, doublet géothermique, simulations numériques, température, percée thermique, sensibilité, indice de saturation, Ile-de-France

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

Hamm V., Le Brun M., Castillo C., Ausseur J-Y., Borozdina O., Cordier E., Gille A.-L., Goblet P., Ungemach P. (2011) - Gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France – Année 2011. Rapport intermédiaire BRGM/RP-60399-FR, 94 p, 61 fig., 12 tabl., 5 ann.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport constitue le rapport intermédiaire du projet PSP11GTH20 « Gestion du Dogger » de la convention ADEME-BRGM n° 0905C0119 notifiée le 16 mai 2011. Il décrit les avancées concernant deux tâches du projet dont les objectifs sont rappelés ci-dessous :

- **Objectif n°1** : mettre à jour et améliorer les modélisations hydrothermiques de l'aquifère du Dogger avec l'intégration des nouvelles connaissances suite à de nouvelles opérations et la prise en compte des nouvelles chroniques d'exploitation (débit, température d'injection) pour les doublets du Val-de-Marne et de Seine-St-Denis. Cette tâche intègre également la finalisation du Workshop démarré en octobre 2010 avec les membres du groupe de travail « Modélisation au Dogger » (rapport BRGM/RP-59591-FR) sur le test d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet d'Alfortville où la percée thermique est avérée ;
- **Objectif n°2** : poursuivre l'analyse physico-chimique des fluides en tête de puits de production et réaliser une cartographie de la géochimie des eaux du Dogger pour des paramètres influant sur les phénomènes de corrosion et dépôt sur les installations. Les paramètres retenus sont la température en tête de puits d'exhaure (lieu de prélèvement pour les analyses chimiques), le pH, les concentrations en Fer et en Sulfures, le Potentiel Redox (pe) ;
- **Objectif n°3** : élaborer un cahier des Charges pour la reconversion de l'ancien puits producteur de Coulommiers GCO1 en puits d'observation en définissant les contraintes administratives, juridiques, techniques et financières de la mise en place d'un tel dispositif ;
- **Objectif n°4** : réaliser une étude de sensibilité, d'une part sur les paramètres influençant les transferts thermiques (notamment sur le temps de percée thermique et la décroissance thermique au puits de production) afin d'identifier ceux qui ont le plus grand impact sur la précision des résultats obtenus, et d'autre part, sur les indices de saturation des minéraux potentiellement indicateurs de la percée thermique (SiO_2 notamment) vis-à-vis des variations de température et des incertitudes de mesures;
- **Objectif n°5** : pérenniser la collecte des données au Dogger (données d'exploitation, physico-chimiques, hydrogéologiques) via des fichiers Excel standardisés et une routine d'intégration dans la base Dogger.

Les résultats présentés dans ce rapport concernent **les travaux de l'objectif 4 sur l'étude de sensibilité ainsi que la suite et fin du travail d'inter-comparaison sur le doublet d'Alfortville (partie de l'Objectif 1).**

Les paramètres étudiés pour la sensibilité sur les transferts thermiques sont les épaisseurs des épontes intercalaires entre niveaux producteurs, la structure verticale du réservoir (modèle bi ou multicouches), la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs, les propriétés thermiques de la roche (conductivité thermique, capacité calorifique, dispersivité), les paramètres d'exploitation (débit, température d'injection) et l'écartement entre l'impact au réservoir des puits de production et d'injection. Les résultats de cette étude montrent que les paramètres les plus sensibles à la fois sur le temps de percée thermique (début de recyclage de l'eau froide injectée) et sur l'amplitude de la décroissance thermique sont : **le débit, la température d'injection, l'écartement entre puits et l'épaisseur des épontes entre niveaux producteurs**. Ces paramètres doivent donc être introduits dans les modèles de simulation numérique de manière la plus précise possible au risque d'introduire une incertitude importante sur les résultats finaux. En particulier, **l'amélioration de la modélisation des « bulles froides » se développant dans l'aquifère du Dogger pour prévoir la durabilité des exploitations géothermiques ne pourra se faire qu'à la condition d'obtenir et archiver des données fiables sur les débits et températures injectés**. Les propriétés thermiques des couches productrices et des épontes jouent également un rôle important car ils contrôlent, d'une part, la vitesse d'avancée du front froid via la capacité calorifique et la diffusivité thermique et, d'autre part, les échanges thermiques par conduction aux épontes via la conductivité thermique. Par ailleurs, **la structure verticale du modèle (bi- ou multi-couches) a un impact limité au puits producteur**, au cours de la propagation du front froid dans les strates horizontales et verticales, le front s'homogénéise au fur et à mesure sur la verticale et l'impact de la structure devient plus faible à l'approche du puits de production.

L'analyse de sensibilité sur les données de la silice ne permet pas de dégager de façon claire l'annonce de l'approche du front froid (cas du doublet d'Alfortville). En effet, pour ce faire, il paraît indispensable d'améliorer la qualité des analyses réalisées. Cependant, les techniques analytiques actuelles ne permettent pas *a priori* (comm. pers. Conte) de doser la silice dissoute dans les fluides du Dogger (relativement minéralisé) avec une incertitude inférieure à 10% (erreur minimale admise avec des méthodes comme la colorimétrie par ex.). **Aussi, avec une incertitude de 10%, la température du fluide produit doit avoir chuté d'au moins 5°C pour pouvoir être observée à l'aide des géothermomètres à silice et de l'indice de saturation de la calcédoine**. Il est à noter par ailleurs que l'étude réalisée ne considère pas le mélange de fluide au puits producteur qui au moment de la percée thermique est constitué majoritairement (à environ 70-80%) d'un fluide non perturbé présent initialement dans le réservoir. L'utilisation de ces paramètres comme **précurseur de l'arrivée du front froid ne semble ainsi pas adaptée**.

L'exercice d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet d'Alfortville dans son contexte régional entre différentes équipes de modélisation (ANTEA, CFG Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM) **a montré un refroidissement du fluide prélevé fin 2010 compris entre 1,5 et 3,8 °C suivant les modèles pour une baisse estimée actuellement à 3°C**. Cet exercice finalise les travaux antérieurs sur les pratiques de modélisation au Dogger (cf. rapport BRGM/RP-59591-FR). Il a permis de comparer différentes méthodes d'interprétation et de traitement de données, différents

modèles conceptuels et plusieurs logiciels (COMSOL, MARTHE, METIS et TOUGH2) et a permis de réaliser plus généralement un inventaire des pratiques de modélisation en géothermie sur la géothermie profonde dans le bassin de Paris.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Etude de sensibilité sur les paramètres influençant les transferts thermiques	17
2.1. OBJECTIF DE L'ETUDE	17
2.2. CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE POUR LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	18
2.3. IMPACT DES ÉPAISSEURS PRODUCTIVES ET NON PRODUCTIVES ET DU NOMBRE DE NIVEAUX PRODUCTEURS.....	20
2.3.1. Etude de l'impact de l'épaisseur cumulée des épontes (niveaux non producteurs ou épontes intermédiaires)	20
2.3.2. Etude de l'impact de la discrétisation verticale pour le cas du d'une éponte de 25 m ou de 50 m	24
2.3.3. Etude de l'impact du nombre de niveaux producteurs	27
2.4. IMPACT DE LA RÉPARTITION DE LA TRANSMISSIVITÉ AU SEIN DES NIVEAUX PRODUCTEURS	32
2.5. IMPACT DES PARAMÈTRES THERMIQUES DES ÉPONTES ET DES NIVEAUX PRODUCTEURS	39
2.5.1. Etude de l'impact de la conductivité thermique de la roche	39
2.5.2. Etude de l'impact de la capacité calorifique de la roche	43
2.5.3. Etude de l'impact de la dispersivité thermique du milieu.....	46
2.6. IMPACT DES PARAMÈTRES D'EXPLOITATION (TEMPÉRATURE ET DÉBIT INJECTÉS) ET DE L'ÉCARTEMENT ENTRE PUIITS.....	54
2.6.1. Impact du débit d'exploitation	54
2.6.2. Impact de la température de réinjection.....	59
2.6.3. Impact de l'écartement entre puits.....	63
2.7. CONCLUSION	65
3. Etude de sensibilité des concentrations en silice et de l'indice de saturation de la calcédoine identifiée comme précurseur potentiel de la percée thermique	67
3.1. OBJECTIF DE L'ETUDE	67
3.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE L'INDICE DE SATURATION DE LA CALCÉDOINE	67
3.2.1. Généralités.....	67

3.2.2. Déroulement de l'analyse de sensibilité	69
3.2.3. Résultats	70
3.2.4. Conclusion sur la sensibilité de l'IS de la calcédoine	73
3.3. ANALYSE DES CONCENTRATIONS EN SILICE	73
3.3.1. Généralités	73
3.3.2. Résultats	74
3.4. APPORT DE LA GÉOTHERMOMÉTRIE	76
3.4.1. Généralités	76
3.4.2. Application aux fluides d'Alfortville	76
3.5. CONCLUSION.....	78
4. Finalisation de l'exercice d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet d'Alfortville	81
4.1. OBJECTIF DE L'EXERCICE	81
4.2. CONTEXTE ET DONNÉES POUR LA MODÉLISATION.....	81
4.3. HYPOTHÈSES POUR LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	83
4.4. RÉSULTATS DES SIMULATIONS	86
4.5. CONCLUSION.....	88
5. Conclusions.....	89
6. Bibliographie	91

Liste des illustrations

Figure 1: Maillage horizontal (haut : maillage global, bas : agrandissement sur la zone du doublet).....	20
Figure 2 : Evolution de la température de production pour différentes épaisseurs cumulées des niveaux non producteurs	23
Figure 3 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température (rouge) en fonction de l'épaisseur cumulée des épontes intermédiaires.....	23
Figure 4 : Discrétisation supplémentaire de l'épaisseur cumulée productive et non productive	24
Figure 5 : Ecart de température dans la couche productrice entre un modèle non discrétisé et un modèle discrétisé pour une épaisseur non productive de 25 m.....	25

Figure 6 : Ecart de température dans la couche productrice entre un modèle non discrétisé et un modèle discrétisé pour une épaisseur non productive de 50 m	25
Figure 7 : Coupes verticales sur l'axe du doublet du champ de température dans les cas du modèle non discrétisé et discrétisé pour une durée d'exploitation de 10 ans (A et B) et 30 ans (C et D) pour une épaisseur d'éponte de 50 m	26
Figure 8 : Evolution de la température au puits de production pour les 6 modèles étudiés de la répartition des niveaux producteurs	27
Figure 9 : Evolution de la température aux points d'observation pour le modèle à 2, 3 et 7 niveaux producteurs.....	28
Figure 10 : Ecart de température entre modèles bicouches et tricouches	29
Figure 11 : Ecart de température entre modèles bicouches et 7 couches	29
Figure 12 : Coupes verticales sur l'axe du doublet du champ de température dans les cas du modèle à 2 ou à 7 niveaux producteurs au bout de 1 année d'exploitation (A et B) et 30 ans d'exploitation (C et D)	31
Figure 13: Modèles à 2, 3 et 4 niveaux producteurs (jaune : couches productrices, bleu : couches non productrices = épontes)	32
Figure 14 : Evolution de la température de production pour le modèle bicouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices	36
Figure 15 : Evolution de la température de production pour le modèle tricouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches extrêmes ont les mêmes transmissivités et la couche centrale une transmissivité différente)	36
Figure 16 : Evolution de la température de production pour le modèle tricouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les deux premières couches ont les mêmes transmissivités et la troisième couche une transmissivité différente)	37
Figure 17 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 3, ainsi que les couches 2 et 4, ont des transmissivités équivalentes)	37
Figure 18 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 2, ainsi que les couches 3 et 4, ont des transmissivités équivalentes)	38
Figure 19 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 4, ainsi que les couches 2 et 3, ont des transmissivités équivalentes)	38
Figure 20 : Evolution de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche (cas du modèle à 2 niveaux producteurs).....	41
Figure 21 : Evolution de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche (cas du modèle à 7 niveaux producteurs).....	41
Figure 22 : Comparaison de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche entre les modèles à 2 et 7 niveaux producteurs. Seul la date de	

la percée thermique change, la décroissance thermique est peut affectée par la structure du réservoir (cf. également la Figure 23)	42
Figure 23 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température au bout de 60 ans (rouge) au puits producteur en fonction de la conductivité thermique de la roche (triangles pleins : structure bicouches, triangles creux : structure multicouches)	42
Figure 24 : Evolution de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche (cas du modèle à 2 niveaux producteurs)	44
Figure 25 : Evolution de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche (cas du modèle à 7 niveaux producteurs)	45
Figure 26 : Comparaison de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche entre les modèles à 2 et 7 niveaux producteurs	45
Figure 27 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température après 60 ans (rouge) au puits producteur en fonction de la capacité calorifique de la roche (triangles pleins : structure bicouches, triangles creux : structure multicouches)	46
Figure 28 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) avec incidence de la dispersivité transversale (modèle avec structure bicouches).....	49
Figure 29 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.1 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)	50
Figure 30 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.1 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)	50
Figure 31 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.2 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)	51
Figure 32 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.2 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)	51
Figure 33 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 1 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)	52
Figure 34 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 1 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)	52
Figure 35 : Evolution du temps de percée (triangles pleins) et de la baisse de température (triangles creux) à la production en fonction de la dispersivité longitudinale pour différents ratios de la dispersivité transversale pour le modèle bicouches (bleu : ratio de 0.1 ; rouge : ratio de 0.2 et vert : ratio de 1).....	53
Figure 36 : Evolution du temps de percée (triangles pleins) et de la baisse de température (triangles creux) à la production en fonction de la dispersivité longitudinale pour différents ratio de la dispersivité transversale pour le modèle multicouches (bleu : ratio de 0.1 ; rouge : ratio de 0.2 et vert : ratio de 1).....	53

Figure 37 : Ecart sur les temps de percée (triangles pleins) et la baisse de température au puits de production (triangles creux) entre les modèles multicouches et bicouches. En bleu : ratio de 0.1 ; en rouge : ratio de 0.2 et en vert : ratio de 1	54
Figure 38 : Evolution de la température de production pour les différents débits testés (modèle bicouches)	57
Figure 39 : Evolution de la température de production pour les différents débits testés (modèle multicouches)	57
Figure 40 : Comparaison des courbes de décroissance thermique au puits de production entre les modèles bicouches (2c) et multicouches (7c) pour des débits extrêmes	58
Figure 41 : Evolution de la date de percée (courbes bleues) et de la baisse de température (courbes rouges) en fonction du débit d'exploitation (traits pleins : modèle bicouches, pointillés : modèle à 7 couches)	58
Figure 42 : Evolution de la température de production pour les différentes températures d'injection testées (modèle bicouches)	61
Figure 43 : Evolution de la température de production pour les différentes températures d'injection testées (modèle multicouches)	61
Figure 44 : Comparaison des courbes de décroissance thermique au puits de production entre les modèles bicouches et 7 couches pour des températures de réinjection extrêmes	62
Figure 45 : Evolution de la date de percée (courbes bleues) et de la baisse de température (courbes rouges) en fonction de la température injectée (triangles pleins : modèle bicouches, triangles creux : modèle à 7 couches)	62
Figure 46 : Evolution de la température de production pour différents écartements de puits	64
Figure 47 : Evolution de la date de percée (courbe bleue) et de la baisse de température (courbe rouge) en fonction l'écartement entre puits	64
Figure 48 : Impacts maximaux sur la variation du temps de percée et de la baisse de température à la production pour les 9 paramètres étudiés	66
Figure 49 : Evolution du produit de solubilité de la calcédoine en fonction de la température du fluide. Comparaison avec le cas d'autres minéraux	68
Figure 50 : Dépendance de la constante cinétique de la calcédoine en fonction de la température du fluide. Comparaison avec le cas d'autres minéraux. D'après Palandri et Kharaka, 2004	68
Figure 51 : Evolution de l'IS de la calcédoine du fluide produit sur le site d'Alfortville depuis 1988	69
Figure 52 : Sensibilité de l'indice de saturation de la calcédoine à de légers changements de la température du fluide (i.e. température initiale +/- 5°C)	71
Figure 53 : Influence de la température initiale T_0 du fluide prélevé sur la sensibilité de l'IS de la calcédoine aux variations de température.	72
Figure 54 : Sensibilité de l'indice de saturation de la calcédoine aux incertitudes analytiques.	72
Figure 55 : Evolution des concentrations en Si (mol/kg H ₂ O) mesurées dans le fluide produit sur le site d'Alfortville depuis 1988	74

Figure 56 : IS du fluide d'Alfortville vis-à-vis de la calcédoine en fonction de la variation de température imposée, et, variation de la concentration en Si (en mol/kg H ₂ O) dissous dans le fluide correspondante (ou quantité de Si précipitée).....	75
Figure 57 : Variation de la concentration en Si (en mol/kg H ₂ O) induite par la précipitation de la calcédoine à T=56,6°C (soit pour un ΔT=15°C).....	75
Figure 58 : Application de quatre géothermomètres à silice aux eaux prélevées sur le site d'Alfortville. Comparaison des températures estimées et mesurées au cours du temps.	77
Figure 59 : Sensibilité du géothermomètre à calcédoine aux incertitudes analytiques.	78
Figure 60: Carte des doublets en région parisienne avec indication des doublets pris en considération dans le cercle bleu.(source : Rapport BRGM/RP-59845-FR).....	83
Figure 61 : Température simulée en fond de puits de production d'Alfortville jusqu'à fin 2010 par les différentes équipes de modélisation. Comparaison avec les données en tête de puits.	87
Tableau 1: Paramètres pour les simulations numériques	19
Tableau 2 : Résultats de l'étude de sensibilité sur le rapport épaisseur cumulée productive / épaisseur cumulée non productive	22
Tableau 3 : Résultats des tests de sensibilité de répartition de la perméabilité par niveau producteur et type de modèle (rouge : cas homogènes).....	35
Tableau 4 : Résultats des tests de sensibilité sur la conductivité thermique de la roche pour les modèles à 2 et 7 couches	40
Tableau 5 : Résultats des tests de sensibilité sur la capacité calorifique de la roche pour les modèles à 2 et 7 couches.....	44
Tableau 6 : Résultats des tests de sensibilité sur la dispersivité thermique longitudinale et transversale pour les modèles à 2 et 7 couches	48
Tableau 7 : Résultats des tests de sensibilité sur le débit d'exploitation pour les modèles à 2 et 7 couches. Le débit de référence est indiqué en rouge.....	56
Tableau 8 : Résultats des tests de sensibilité sur la température de réinjection pour les modèles à 2 et 7 couches. La température d'injection de référence est indiquée en rouge.....	60
Tableau 9 : Résultats de l'étude de sensibilité sur l'écartement des puits (rouge : état de référence)	63
Tableau 10 : Composition chimique du prélèvement d'eau d'Alfortville prise comme référence dans cette étude de sensibilité. Température et pH mesurés en tête de puits.	70
Tableau 11 : Caractéristiques des modèles pour chaque équipe de modélisation.....	85
Tableau 12 : Comparaison des résultats pour la percée thermique (ΔT>0,5 °C) et la baisse de température à fin 2010	88

Liste des annexes

Annexe 1 Equations des géothermomètres utilisées.....	93
Annexe 2 Rapport technique d'ANTEA.....	97
Annexe 3 Rapport technique de CFG Services	101
Annexe 4 Rapport technique de GPC I&P.....	105
Annexe 5 Rapport technique de Mines ParisTech	109

1. Introduction

Le projet « Gestion du réservoir géothermique du Dogger en Ile-de-France » PSP11GTH20 est l'un des projets de la convention de Service Public ADEME-BGRM 2011 (convention n°0905C0119 notifiée le 16 mai 2011). Ce projet fait suite notamment au projet « Gestion du Dogger 2010 » (Rapport BRGM/RP-59845-FR) et au projet « Dogger phase 3 » (Rapport BRGM/RP-58834-FR).

Le projet comprend cinq objectifs majeurs rappelés ci-dessous :

- Mettre à jour et améliorer les modélisations hydrothermiques du réservoir carbonaté du Dogger avec l'intégration des nouvelles connaissances suite à de nouvelles opérations et la prise en compte des nouvelles chroniques d'exploitation (débit, température d'injection) pour les doublets du Val-de-Marne et de Seine-St-Denis. Cette tâche intègre également la finalisation de l'atelier démarré en octobre 2010 avec les membres du groupe de travail « Modélisation au Dogger » (rapport BRGM/RP-59591-FR) effectuant l'inter-comparaison des pratiques de modélisation sur le doublet d'Alfortville, où la percée thermique est avérée ;
- Poursuivre l'analyse physico-chimique des fluides en tête de puits de production et réaliser une cartographie de la géochimie des eaux du Dogger pour des paramètres influant sur les phénomènes de corrosion et de dépôt dans les installations. Les paramètres retenus sont la température en tête de puits d'exhaure (lieu de prélèvement pour les analyses chimiques), le pH, les concentrations en Fer et en Sulfures, le Potentiel Redox (pe) ;
- Élaborer un cahier des Charges pour la reconversion de l'ancien puits producteur de Coulommiers GCO1 en puits d'observation en définissant les contraintes administratives, juridiques et financières de la mise en place d'un tel dispositif ;
- Réaliser une étude de sensibilité, d'une part sur les paramètres influençant les transferts thermiques (notamment sur la percée thermique et la décroissance thermique au puits de production) afin d'identifier ceux qui ont le plus grand impact sur la précision des résultats obtenus, et d'autre part sur les indices de saturation des minéraux potentiellement indicateurs de la percée thermique (SiO_2 notamment) vis-à-vis des variations de température et des incertitudes de mesures;
- Pérenniser la collecte des données au Dogger (données d'exploitation, physico-chimiques) via des fichiers Excel standardisés et une routine d'intégration dans la base Dogger.

Ce rapport intermédiaire de la Gestion du Dogger 2011 décrit :

- **les travaux réalisés sur l'étude de sensibilité sur les paramètres hydrothermiques et sur l'état de saturation des fluides** (notamment l'indice de saturation de la calcédoine, indicateur potentiel de la percée thermique) ;
- **les travaux sur l'exercice d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet d'Alfortville dans son contexte régional** (suite du rapport BRGM/RP-59591-FR). Ce travail d'inter-comparaison sur les pratiques de modélisation au Dogger a été réalisé en partenariat avec ANTEA, CFG Services, GPC I&P et Mines ParisTech.

2. Etude de sensibilité sur les paramètres influençant les transferts thermiques

2.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Afin de quantifier les incertitudes sur les résultats des modélisations hydrothermiques et en particulier sur la date d'apparition de la percée thermique et sur la pente de la décroissance thermique du fluide de production, une analyse de sensibilité a été menée sur les paramètres influençant les transferts thermiques. Cette analyse a pour objectif d'évaluer les paramètres ayant le plus grand impact sur l'évolution de la température du fluide produit. Les différents paramètres étudiés sont les suivants :

- **épaisseurs productives et non productives et nombre de niveaux producteurs**

L'objectif est, d'une part, d'étudier la réponse thermique du système suivant l'amplitude du rapport entre l'épaisseur productive et l'épaisseur non productive pour un modèle de type bicouches équivalent - aussi appelé « modèle sandwich » (Antics et al, 2005) - et, d'autre part, d'étudier l'influence du nombre de niveaux producteurs (modèle de type multicouches) en considérant une répartition homogène de la transmissivité au sein des différents niveaux producteurs. On s'intéresse à la réponse thermique du réservoir liée à l'augmentation de la surface d'échange entre niveaux producteurs dans lesquels les transferts thermiques sont majoritairement convectifs et les épontes intermédiaires dans lesquels ces transferts sont conductifs. Dans cette partie, l'influence de la discrétisation verticale sera également étudiée pour deux ordres de grandeur du rapport épaisseur productive/épaisseur non productive.

- **répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs**

Il s'agit ici de regarder sur quelques structures verticales de réservoir (bicouches, tricouches...) l'incidence d'une répartition non homogène de la transmissivité. Dans ce cas, le fluide transitera de manière non homogène dans les différents niveaux producteurs ce que montrent généralement les tests de débitmétrie au Dogger.

- **paramètres thermiques des épontes et des niveaux producteurs**

Les paramètres qui seront étudiés ici sont la conductivité thermique, la capacité calorifique thermique et la dispersivité thermique. On étudiera sur deux modèles de structure verticale extrême (bicouches ou 7 couches) différentes valeurs de la capacité et conductivité thermique de la roche. Les valeurs de la conductivité thermique seront étudiées dans une fourchette de 1 à 5 W/m/K, ce qui correspond à l'ordre de grandeur qu'on trouve pour des roches sédimentaires et les valeurs de la capacité calorifique seront étudiées entre 2 et 3 MJ/m³/K. De même, la dispersivité du milieu (paramètre très mal connu) caractérisant l'hétérogénéité du champ de vitesse sera étudiée avec

une dispersivité longitudinale variée entre 10 et 100 m et un facteur 1, 0.2 ou 0.1 pour la dispersivité transversale.

– **paramètres d'exploitation (température et débit injectés) et écartement des puits**

Les débits et températures sont consignés par l'exploitant dans une main courante, au pas journalier, ou mesurés automatiquement, au pas horaire, par GTC (Gestion Technique Centralisée). Ces données sont très variables dans le temps (variations horaires) et sont fonction des besoins du réseau de chaleur associé. Dans le cadre du modèle de gestion de l'aquifère du Dogger, les débits et températures sont moyennés (à un pas mensuel). Il s'agit ici d'évaluer la réponse thermique du système pour des variations sur le débit ou sur la température.

Le positionnement de l'impact des puits dans le réservoir est calculé en fonction des coordonnées en surface, des coordonnées au toit de la formation, de l'angle d'inclinaison, du nombre de niveaux producteurs identifiés sur les logs de débitmétrie et de la contribution de chaque niveau au débit total. Il s'agit des coordonnées barycentriques de la production ou de l'injection. Nous avons évalué l'impact d'une variation de l'écartement entre puits sur le temps de percée.

2.2. CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE POUR LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations numériques du comportement du réservoir ont été réalisées avec le code de calcul MARTHE du BRGM reposant sur la méthode des volumes finis. Les résultats des calculs (charge hydraulique, température) sont restitués au centre de chaque cellule du domaine maillé. Le maillage 3D pour les simulations thermiques est basé sur un modèle type bicouches équivalent ou « sandwich » (Antics *et al*, 2005) avec un niveau réservoir scindé en deux parties symétriques par une éponte intermédiaire. Par ailleurs, les limites inférieure et supérieure sont des épontes semi-infinies. Cette structure est ensuite évolutive suivant le type de modèle testé (2 à 7 niveaux producteurs). Horizontalement, on a une symétrie suivant l'axe du doublet parallèle à l'axe des x, avec une extension de -10 à +10 km suivant x et de 0 à 10 km suivant y pour ne pas être influencé par les conditions aux limites (conditions d'un doublet isolé loin de limites hydrauliques). Le maillage principal est constitué de mailles carrées de 250 m de côté avec un raffinement autour de la zone étudiée à 25 m de côté (figure 1). L'injection est réalisée au point I de coordonnées $(-D/2 ; 0)$, la production au point P $(+D/2 ; 0)$, avec D la distance entre puits, et le suivi de la température est réalisé en ces points ainsi qu'en deux points intermédiaires I1 $(-D/4 ; 0)$ et I2 $(0 ; 0)$.

Les paramètres considérés pour les simulations thermiques sont les paramètres moyens caractérisant les doublets au Dogger en région parisienne. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 1. Dans le cadre de l'étude de sensibilité, ces paramètres feront l'objet de variations, excepté pour les paramètres caractérisant le fluide et la porosité.

Paramètre	Valeur
Écartement puits injecteur et producteur dans la formation aquifère	1200 m
Débit de production	200 m ³ /h
Température de réinjection	40 °C
Perméabilité	2.5 Darcy
Épaisseur productive cumulée	15 m
Épaisseur cumulée des épontes (niveaux non producteurs)	25 m
Porosité des niveaux producteurs	15 %
Porosité des épontes	1 %
Capacité calorifique de la roche	2.2 MJ/m ³ /°C
Conductivité thermique de la roche	3 W/m/°C
Viscosité de l'eau	0.4 cp
Capacité calorifique de l'eau	4.18 MJ/m ³ /°C
Conductivité thermique de l'eau	0.6 W/m/°C
Dispersivités longitudinale et transversale	(20 m ; 10 m)

Tableau 1: Paramètres pour les simulations numériques

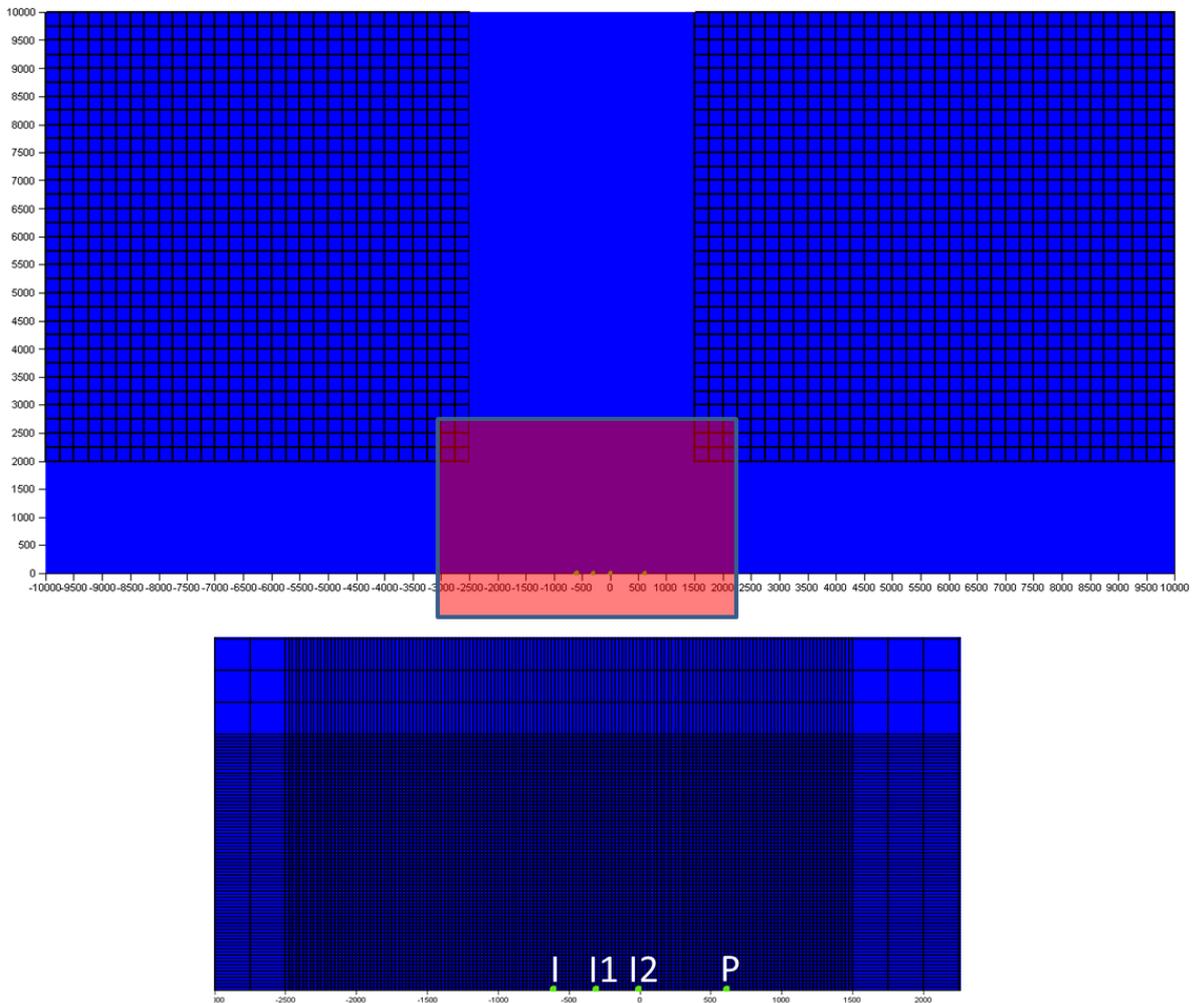


Figure 1: Maillage horizontal (haut : maillage global, bas : agrandissement sur la zone du doublet)

2.3. IMPACT DES ÉPAISSEURS PRODUCTIVES ET NON PRODUCTIVES ET DU NOMBRE DE NIVEAUX PRODUCTEURS

2.3.1. Étude de l'impact de l'épaisseur cumulée des épontes (niveaux non producteurs ou épontes intermédiaires)

Pour les 85 forages étudiés dans les départements du Val-de-Marne et Seine-St-Denis ou limitrophes (puits à l'arrêt ou en exploitation), l'épaisseur cumulée des niveaux producteurs varie entre 5,6 et 31,4 m (moyenne de 16 m avec un écart-type de 6 m) alors que l'épaisseur cumulée des niveaux non producteurs varie entre 3,4 et 94,6 m (moyenne de 27 m avec un écart-type de 17 m). La plage de variation de l'épaisseur

des niveaux non producteurs est beaucoup plus importante du fait de l'étalement des niveaux producteurs sur une épaisseur importante du Dogger entre 10 et 100 m. Ainsi il est particulièrement important d'étudier l'impact de la proportion de l'épaisseur cumulée des niveaux non producteur par rapport à celle des niveaux producteurs sur la percée thermique (début de refroidissement mesurable en définissant comme perceptible une baisse de 0.5 °C) et l'importance de la décroissance thermique au cours de l'exploitation. Pour l'étude de sensibilité, l'épaisseur productive est fixée à 15 m et on fait varier l'épaisseur cumulée non productive entre 5 et 50 m avec un pas de 5 m (ceci correspond à une répartition des niveaux producteurs entre 20 et 65 m d'épaisseur et représente un grand nombre de profils flowmétriques). Le tableau 2 résume les résultats obtenus pour les percées et décroissances thermiques au puits de production au bout de 30 et 60 ans d'exploitation du doublet. La figure 2 montre l'évolution de la température au cours du temps pour les différentes épaisseurs d'épentes étudiées. Enfin, en figure 3 sont représentées les courbes de percée thermique et de baisse de température au bout de 60 ans en fonction de l'épaisseur des épentes.

Ces résultats montrent :

- Une percée thermique qui varie entre 14 ans pour une épente de 5 m (épaisseur cumulée des niveaux producteurs fixée à 15 m) et 28,5 ans pour une épente de 50 m. La baisse de température après 30 années est comprise entre 0,6°C (épente de 50 m) et 2,6°C (épente de 5 m) et après 60 ans entre 3,1°C (épente de 50 m) et 5,4°C (épente de 5 m).
- La baisse de température peut être assimilée à une fonction linéaire décroissante de l'épaisseur cumulée des épentes. La date de percée croît de manière non linéaire (polynôme) avec l'épaisseur des épentes. Les épentes constituent un stock de chaleur et jouent donc un rôle tampon en retardant l'arrivée du front froid.

Épaisseur épontes	Date Percée (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
5	14	2.6	5.4
10	16	2.3	5.1
15	18	1.95	4.9
20	19.8	1.6	4.6
25	21.5	1.4	4.3
30	23.2	1.1	4.1
35	24.6	1	3.8
40	26	0.8	3.6
45	27.2	0.7	3.3
50	28.5	0.6	3.1

Tableau 2 : Résultats de l'étude de sensibilité sur le rapport épaisseur cumulée productive / épaisseur cumulée non productive

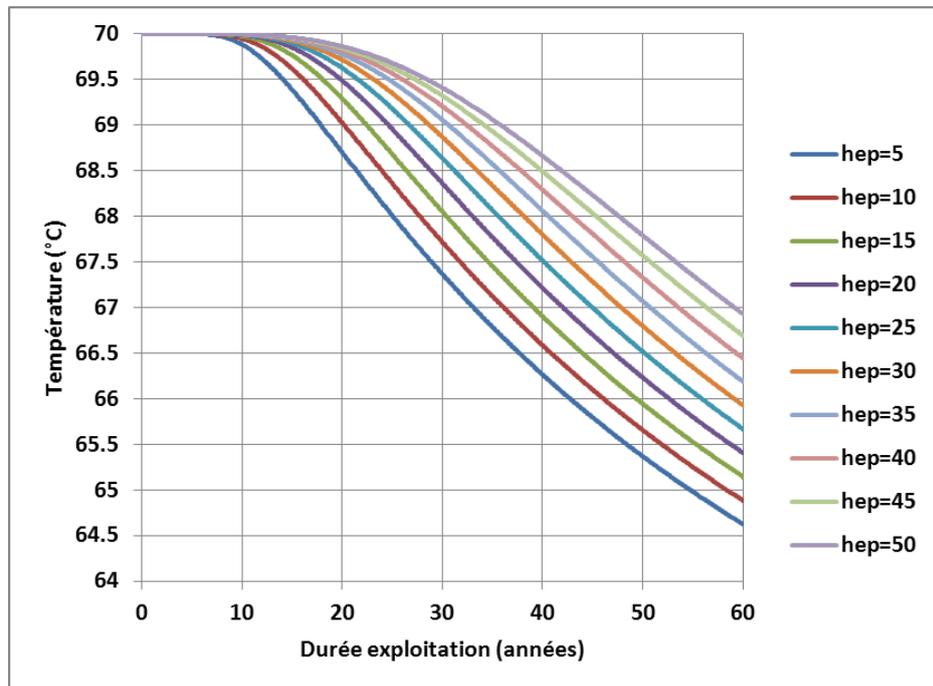


Figure 2 : Evolution de la température de production pour différentes épaisseurs cumulées des niveaux non producteurs

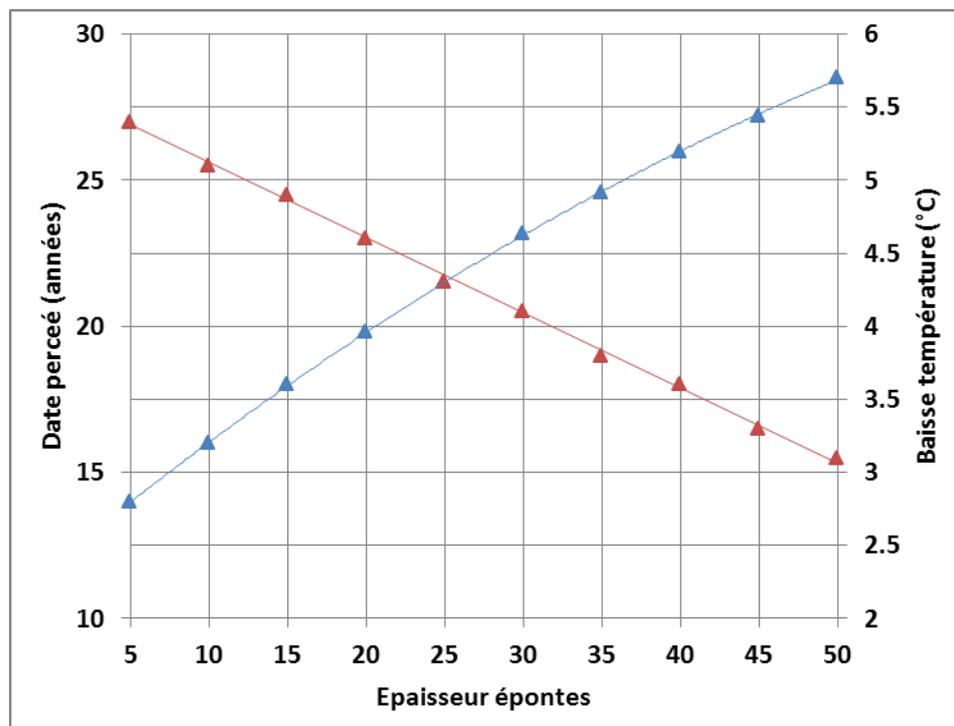


Figure 3 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température (rouge) en fonction de l'épaisseur cumulée des épontes intermédiaires

2.3.2. Étude de l'impact de la discrétisation verticale pour le cas du d'une éponte de 25 m ou de 50 m

Dans ce cas, comparé aux simulations précédentes (modèle à trois couches correspondant respectivement à l'éponte analytique semi-infinie supérieure, à la demi-épaisseur cumulée productive et la demi-épaisseur cumulée non productive), on ajoute des lignes horizontales de discrétisation supplémentaire (cf. figure 4). Le but est d'étudier l'impact de cette discrétisation sur les courbes de décroissance thermique. Deux cas sont étudiés, l'épaisseur cumulée des niveaux producteurs restant fixée à 15 m : le cas d'une épaisseur cumulée non productive de 25 m (cas moyen) et un cas plus extrême avec une épaisseur cumulée non productive de 50 m. Chacun des cas est comparé à une simulation pour laquelle la demi-couche productrice et l'éponte intermédiaire ne sont pas discrétisées.

Les figures 5 et 6 montrent les écarts de température obtenus entre les modèles discrétisés et les modèles non-discrétisés aux différents points d'observation pour les deux épaisseurs d'éponte étudiées. Ces écarts correspondent à la température obtenue pour un modèle non discrétisé à laquelle est retranché la température moyenne obtenue pour un modèle discrétisé. Pour les deux configurations (éponte de 25 et 50 m), les écarts maximaux sont observés dans l'ordre d'arrivée du front froid aux différents points d'observation (I : Injection puis I1, I2 et P : Production). On observe ensuite un amortissement de cet écart au cours du déplacement du front.

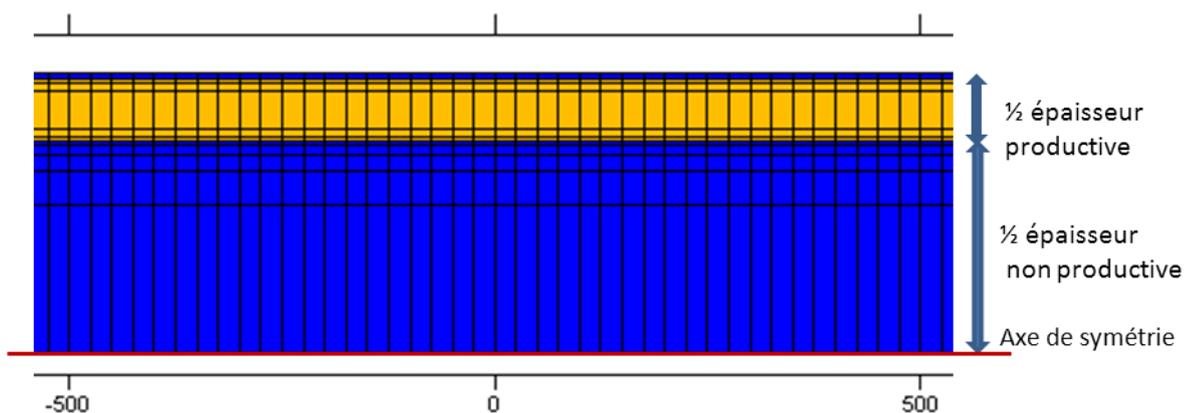


Figure 4 : Discrétisation supplémentaire de l'épaisseur cumulée productive et non productive

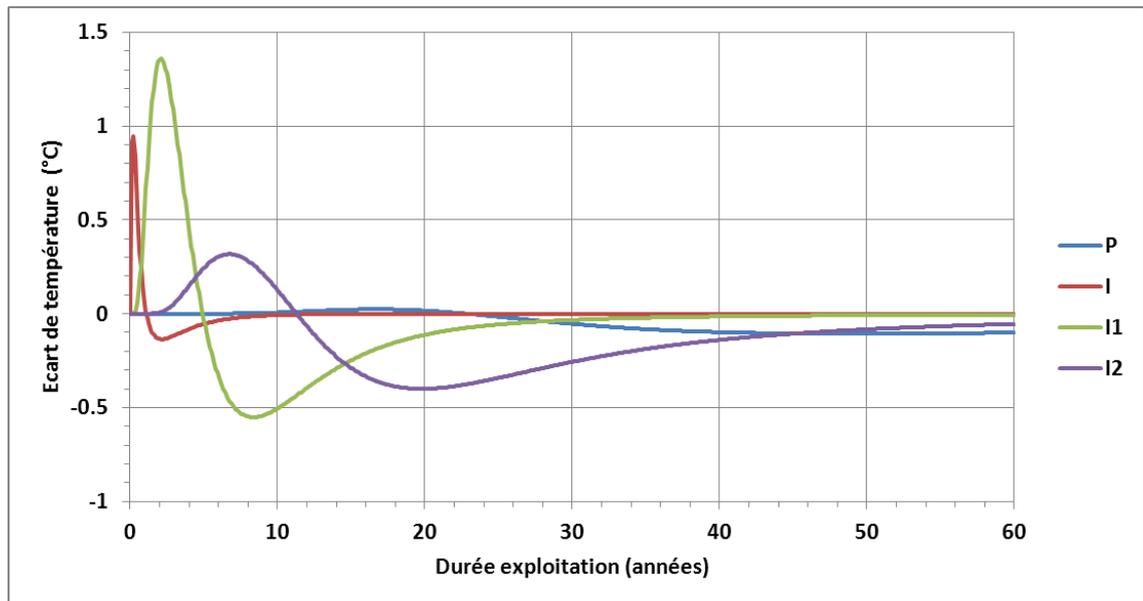


Figure 5 : Ecart de température dans la couche productrice entre un modèle non discrétisé et un modèle discrétisé pour une épaisseur non productive de 25 m

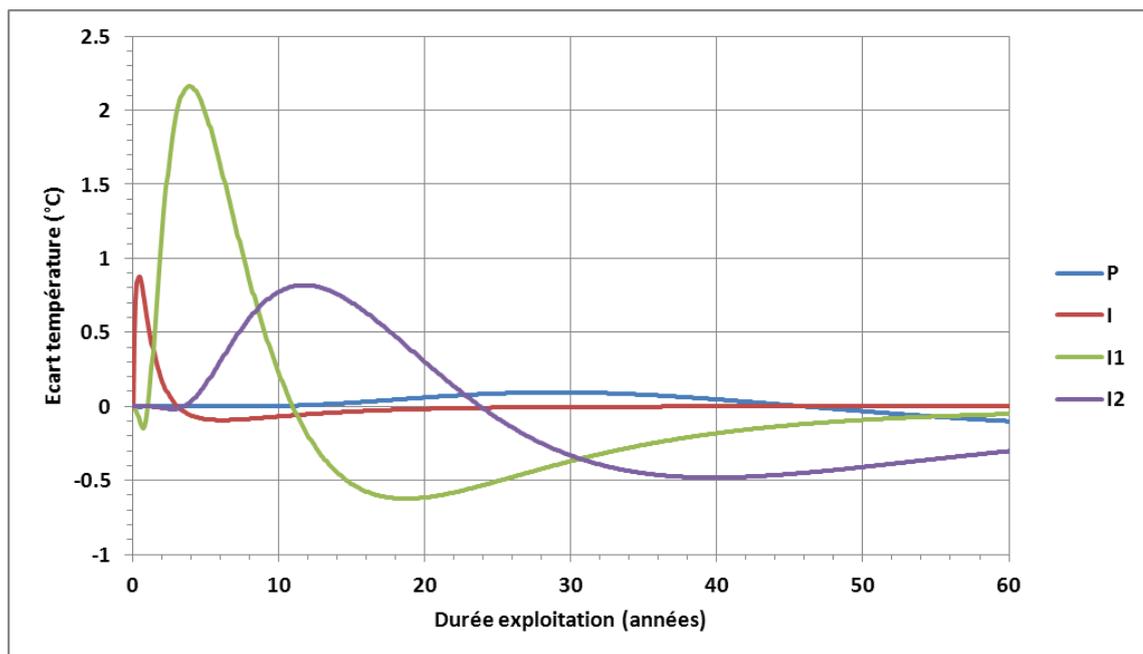


Figure 6 : Ecart de température dans la couche productrice entre un modèle non discrétisé et un modèle discrétisé pour une épaisseur non productive de 50 m

Par ailleurs, lorsque le front froid atteint le puits producteur, on observe peu de différence entre la température calculée pour un modèle non discrétisé et celle calculée pour un modèle discrétisé contrairement aux points plus proches de l'injection. Ce phénomène d'atténuation s'explique par l'homogénéisation de la température sur la verticale au cours du temps et donc de l'avancée du front froid, d'où un impact réduit de la discrétisation loin de l'injection (cf. figure 7). Cette atténuation est moins rapide dans le cas d'une épaisseur d'éponte plus grande du fait de l'équilibrage des températures par conduction sur la verticale plus lente. L'écart de la température calculée au puits de production reste inférieur ou égale à 0.1 °C entre le modèle discrétisé et non discrétisé.

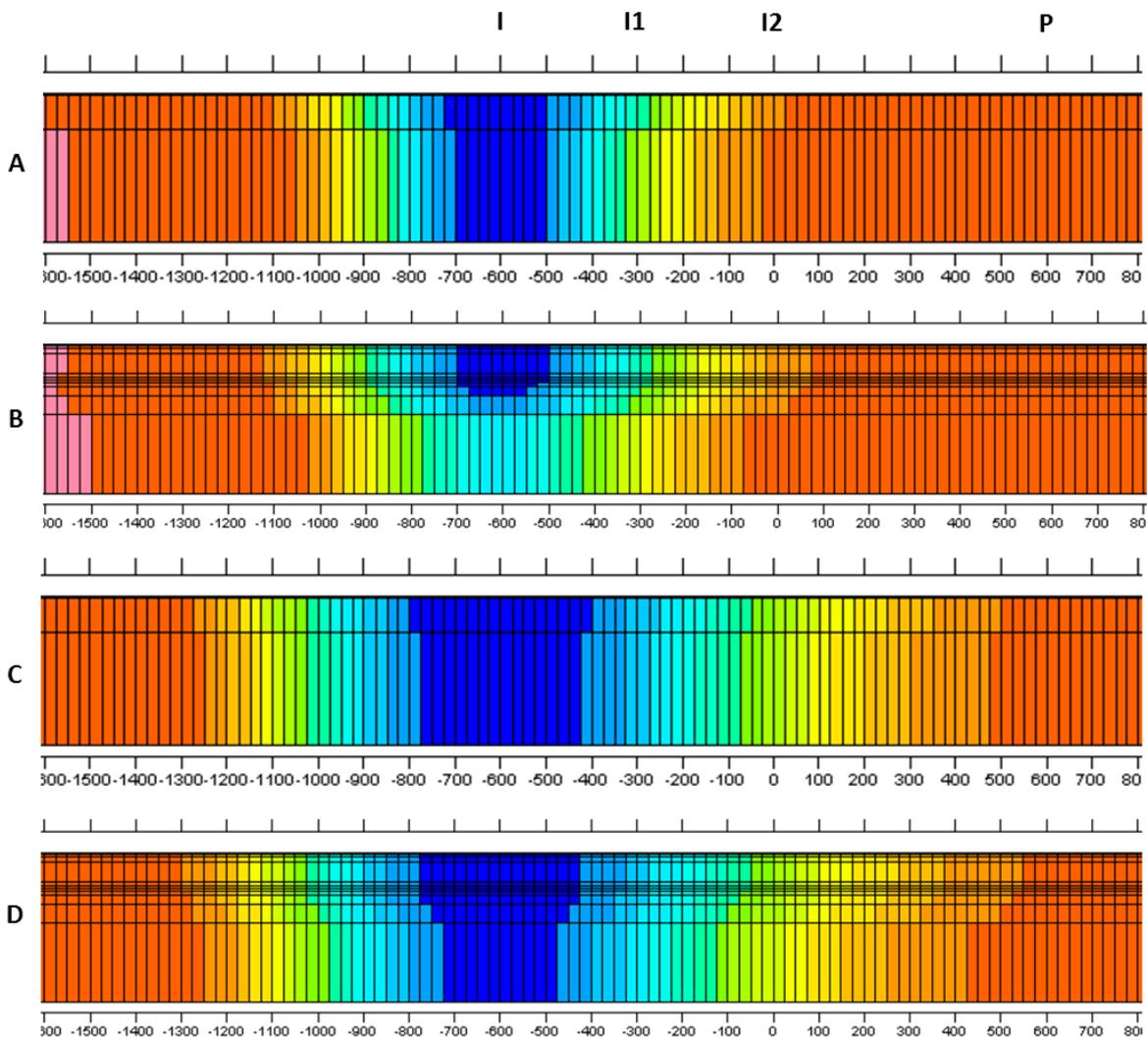


Figure 7 : Coupes verticales sur l'axe du doublet du champ de température dans les cas du modèle non discrétisé et discrétisé pour une durée d'exploitation de 10 ans (A et B) et 30 ans (C et D) pour une épaisseur d'éponte de 50 m

2.3.3. Étude de l'impact du nombre de niveaux producteurs

Nous avons testé l'impact de la répartition des niveaux producteurs sur la percée et la décroissance thermique. Nous avons comparé le modèle «sandwich» à 2 niveaux producteurs scindé par l'épaisseur cumulée des niveaux non producteurs à des modèles à plusieurs niveaux producteurs (de 3 à 7). Le nombre moyen de niveaux producteurs observés sur les profils de débitmétrie est autour de 6 mais présente une grande disparité. Les figures 8 et 9 montrent, respectivement, l'évolution de la température au puits de production pour les différents modèles testés et sur les points intermédiaires I1 et I2 dans le cas des modèles à 2, 3 et 7 couches¹.

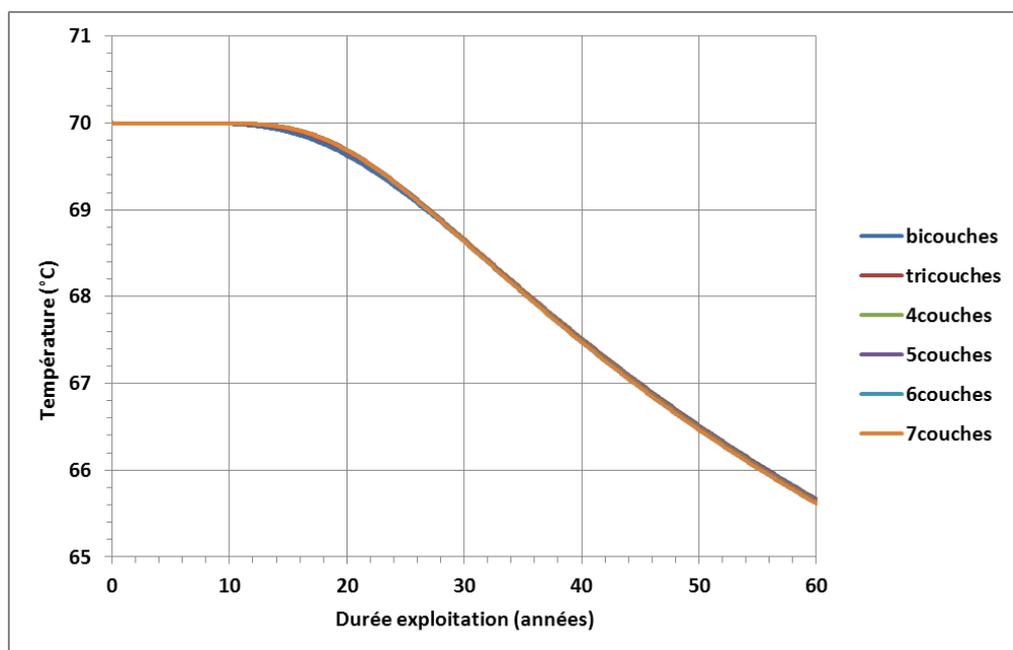


Figure 8 : Evolution de la température au puits de production pour les 6 modèles étudiés de la répartition des niveaux producteurs

¹ On emploiera par la suite couche comme synonyme de niveau producteur

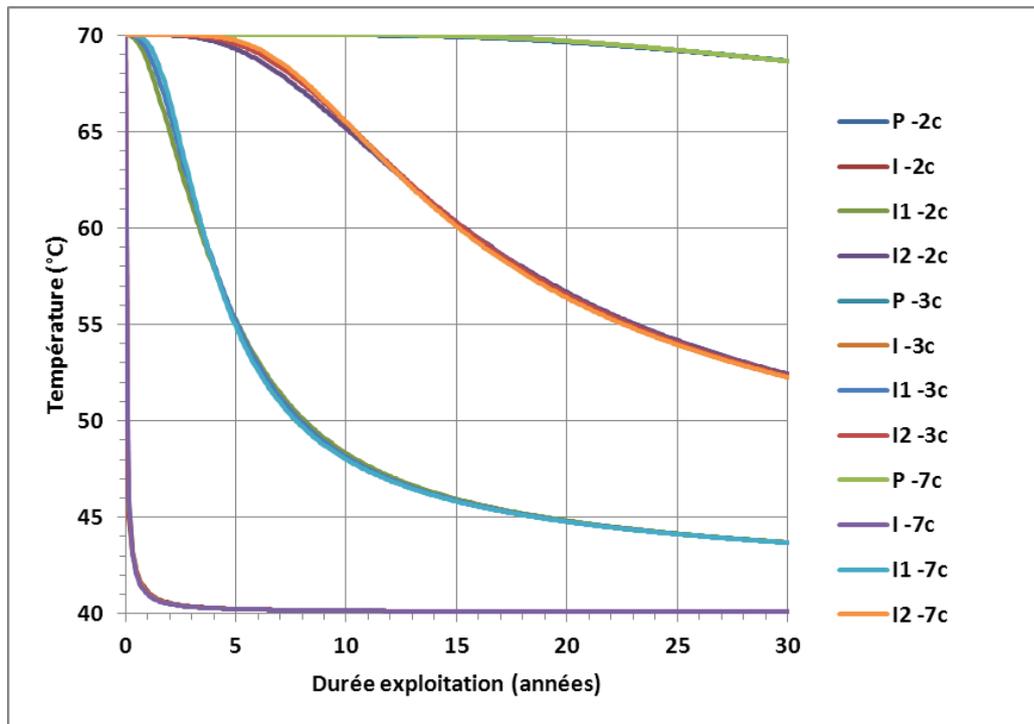


Figure 9 : Evolution de la température aux points d'observation pour le modèle à 2, 3 et 7 niveaux producteurs

Les figures 10 et 11 donnent l'écart de température, aux points d'observation, respectivement entre un modèle à 2 et 3 couches et un modèle à 2 et 7 couches.

Ces simulations montrent que l'impact de la structure verticale est faible et limité proche de l'injection avec des écarts maximaux au début de la progression du front froid et une atténuation des écarts observés entre modèles au cours de la durée d'exploitation (cf. fig.10 et 11). Le phénomène est le même que celui observé précédemment (§ 2.3.2) car en prenant plusieurs niveaux on introduit une discrétisation supplémentaire par rapport au cas où l'on rassemble les niveaux producteurs. On observe que, plus on a de niveaux producteurs (cf. fig.11), plus on accroît l'écart de température avec un refroidissement plus tardif (écart négatif) suivi ensuite d'une baisse plus rapide (écart positif) avec une atténuation des écarts loin de l'injection.

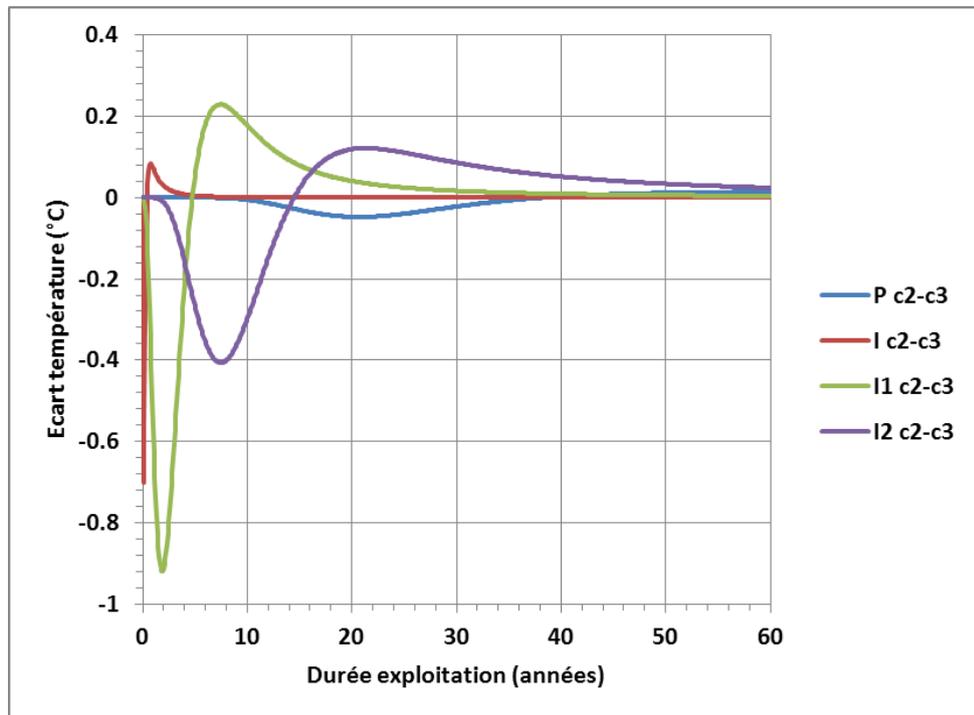


Figure 10 : Ecart de température entre modèles bicouches et tricouches

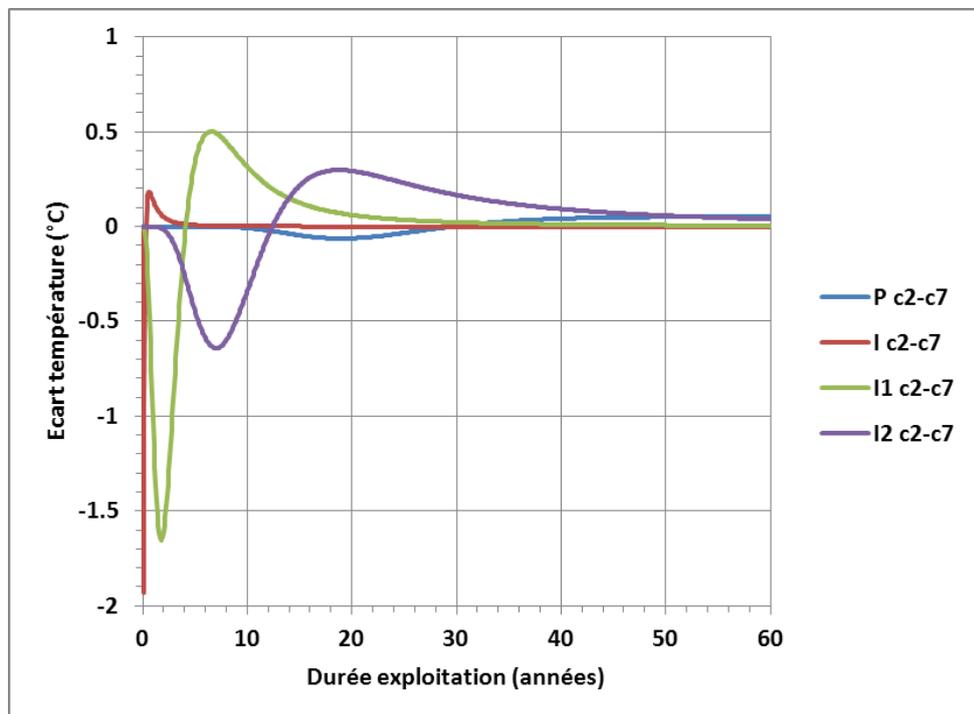


Figure 11 : Ecart de température entre modèles bicouches et 7 couches

La figure 12 montre des profils verticaux du champ de température pour le modèle à 2 niveaux producteurs et celui à 7 niveaux producteurs. On observe qu'au bout d'un an de simulation, le front froid est un peu moins étendu dans les couches productrices pour le modèle à 7 niveaux producteurs avec un refroidissement amplifié des niveaux non producteurs sur la verticale comparé au modèle à 2 niveaux producteurs où l'épaisseur cumulée non productrice est moins refroidie. Au bout de 30 ans de simulation, cette différence entre les deux modèles s'estompe, avec néanmoins au voisinage du puits injecteur un front un peu plus étendu sur les couches centrales par rapport à celles proches des épontes inférieures et supérieures pour le modèle à plusieurs couches.

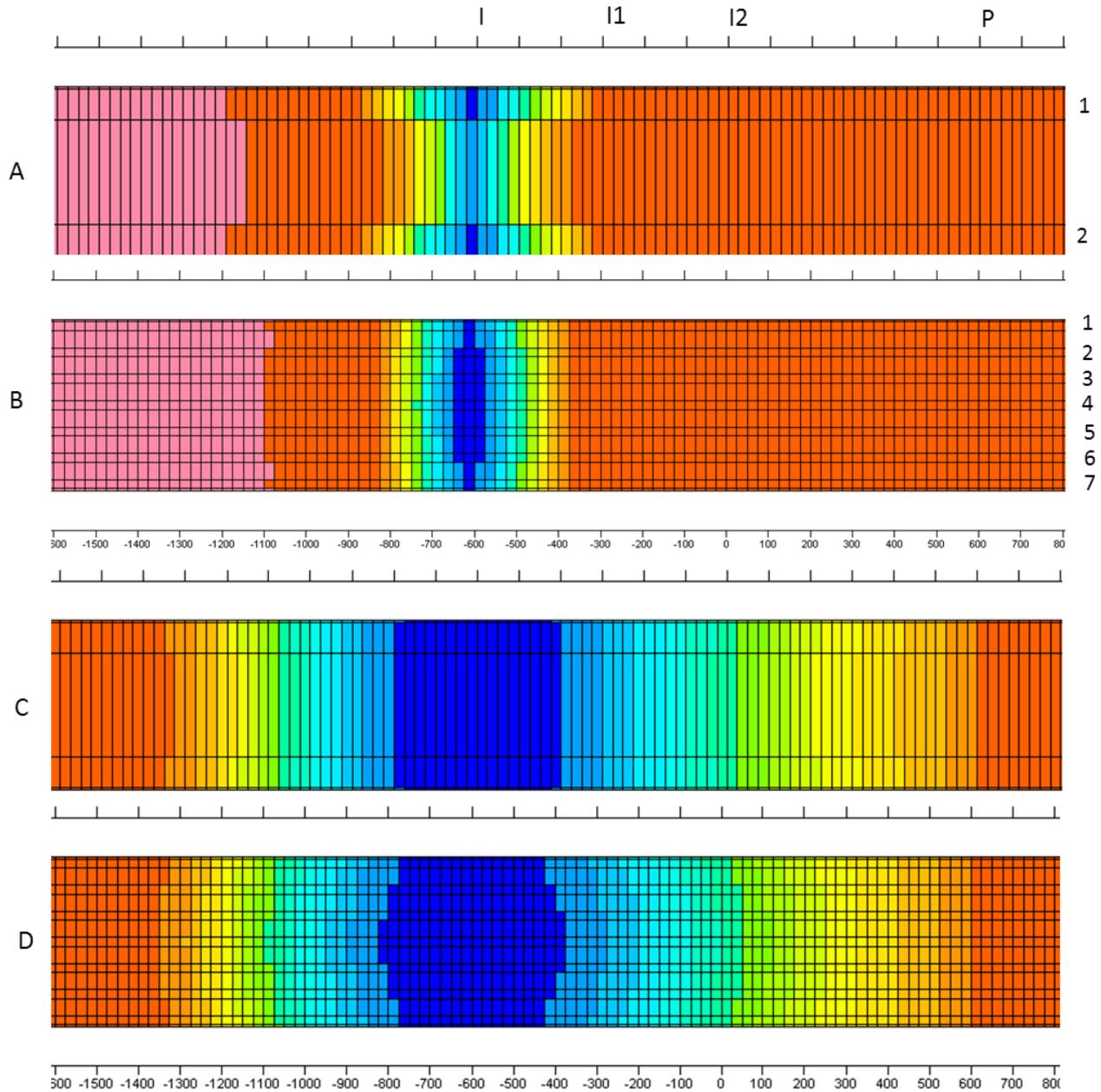


Figure 12 : Coupes verticales sur l'axe du doublet du champ de température dans les cas du modèle à 2 ou à 7 niveaux producteurs au bout de 1 année d'exploitation (A et B) et 30 ans d'exploitation (C et D)

2.4. IMPACT DE LA RÉPARTITION DE LA TRANSMISSIVITÉ AU SEIN DES NIVEAUX PRODUCTEURS

Les simulations réalisées précédemment (§2.3) ont été faites dans l'hypothèse d'une répartition uniforme de la transmissivité au sein des niveaux producteurs, le but étant d'étudier l'impact du nombre de niveaux producteurs. Dans ce chapitre est étudié pour un nombre de niveaux producteurs fixé (cf. figure 13), l'impact d'une hétérogénéité de la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs.

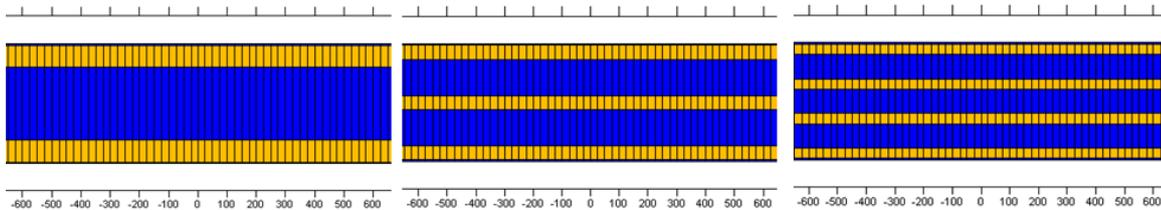


Figure 13: Modèles à 2, 3 et 4 niveaux producteurs (jaune : couches productrices, bleu : couches non productrices = épontes)

Le calcul de la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs est fait selon les critères suivants :

$$(1) \sum_{i=1}^n T_i = T \text{ où } T_i = k_i \times h_i$$

$$(2) \sum_{i=1}^n h_i = h \text{ avec } h_{i+1} = h_i$$

Le premier critère signifie que la somme des transmissivités des couches productrices est constante et égale à la transmissivité moyenne mesurée au Dogger (soit 37.5 Dm). Le second critère signifie que la somme des épaisseurs productrices est constante et égale à l'épaisseur moyenne cumulée (soit 15 m) et que chaque couche a une épaisseur équivalente. La distribution de la transmissivité se fait donc via la perméabilité des couches. Le tableau 3 résume, pour les trois modèles étudiés et les différentes répartitions de la perméabilité au sein des niveaux producteurs, le début de la percée thermique (baisse de température de 0.5 °C), la décroissance thermique au bout de 30 ans puis 60 ans d'exploitation du doublet. Les figures 14 à 19 montrent les courbes de décroissance thermique pour les différents cas étudiés.

Les résultats appellent les observations suivantes :

- Pour le modèle à **deux niveaux producteurs**, la percée thermique se produit entre 15,5 et 21,5 ans, la décroissance thermique est comprise entre 1,4 et 2°C au bout de 30 ans et entre 4,3 et 4,8 °C au bout de 60 ans. Les écarts maximaux sont observés pour le cas d'une hétérogénéité d'un facteur 10 entre les deux niveaux producteurs (ligne 2 du tableau 3) par rapport au cas homogène (ligne 1).
- Pour le modèle à **trois niveaux producteurs** où 12 cas de répartition de la transmissivité sont étudiés, l'apparition de la percée thermique varie entre 14,3

et 22,3 ans, la décroissance thermique est comprise entre 1,3 et 2,3 °C au bout de 30 ans et entre 4,3 et 5,0 °C au bout de 60 ans. Les cas les plus défavorables en ce qui concerne la percée thermique et le refroidissement au puits de production sont ceux dont l'hétérogénéité de la transmissivité est la plus grande entre niveaux producteurs. Le cas où la percée thermique est observée en premier lieu correspond au cas où le niveau le plus perméable se situe proche d'une des épontes semi-infinies du modèle.

- Pour le modèle à **quatre niveaux producteurs** où 16 cas de répartition de la transmissivité sont étudiés, l'apparition de la percée thermique varie entre 17,3 et 22,7 ans, la décroissance thermique est comprise entre 1,3 et 2,0 °C au bout de 30 ans et entre 4,3 et 4,8 °C au bout de 60 ans. Les cas les plus défavorables en ce qui concerne la percée thermique et le refroidissement au puits de production sont ceux dont l'hétérogénéité de la transmissivité est la plus grande entre niveaux producteurs. Le cas le plus défavorable étant lorsque les niveaux les plus perméables sont côte à côte et proches d'une éponte semi-infinie.

Type modèle	Perméabilité intrinsèque (D)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
bicouches	K1=k2=2.5	21.5	1.4	4.3
	K1=0.5 et k2=4.5	15.5	2	4.8
	K1=1 et k2=4	17.8	1.8	4.6
	K1=1.5 et k2=3.5	19.5	1.5	4.4
	K1=2 et k2=3	20.7	1.4	4.3
tricouches	K1=k2=k3=2.5	22	1.35	4.35
	K1=k3=0.5 et k2=6.5	17	2	4.9
	K1=k3=1 et k2=5.5	19	1.75	4.7
	K1=k3=1.5 et k2=4.5	20.5	1.55	4.5
	K1=k3=2 et k2=3.5	21.5	1.4	4.4
	K1=k3=3 et k2=1.5	22.3	1.3	4.3
	K1=k3=3.5 et k2=0.5	22.2	1.3	4.3
	K1=k2=0.5 et k3=6.5	14.3	2.25	4.95
	K1=k2=1 et k3=5.5	17.3	1.8	4.6
	K1=k2=1.5 et k2=4.5	20	1.5	4.5
	K1=k2=2 et k3=3.5	21.8	1.4	4.35
	K1=k2=3 et k3=1.5	21.3	1.45	4.4
	K1=k2=3.5 et k3=0.5	19.3	1.7	4.6
4 couches	K1=k2=k3=k4=2.5	22.2	1.35	4.4
	K1=k3=0.5 et k2=k4=4.5	20.7	1.5	4.5
	K1=k3=1 et k2=k4=4	21.4	1.4	4.4
	K1=k3=1.5 et k2=k4=3.5	21.8	1.4	4.4

	K1=k3=2 et k2=k4=3	22	1.35	4.4
	K1=k2=0.5 et k3=k4=4.5	17.3	1.95	4.8
	K1=k2=1 et k3=k4=4	19.5	1.7	4.6
	K1=k2=1.5 et k3=k4=3.5	21	1.5	4.45
	K1=k2=2 et k3=k4=3	22	1.4	4.4
	K1=k4=0.5 et k2=k3=4.5	18.7	1.8	4.7
	K1=k4=1 et k2=k3=4	20	1.6	4.6
	K1=k4=1.5 et k2=k3=3.5	21	1.5	4.5
	K1=k4=2 et k2=k3=3	21.8	1.4	4.4
	K1=k4=3 et k2=k3=2	22.5	1.3	4.3
	K1=k4=3.5 et k2=k3=1.5	22.7	1.3	4.3
	K1=k4=4 et k2=k3=1	22.7	1.25	4.3
	K1=k4=4.5 et k2=k3=0.5	22.3	1.3	4.25

Tableau 3 : Résultats des tests de sensibilité de répartition de la perméabilité par niveau producteur et type de modèle (rouge : cas homogènes)

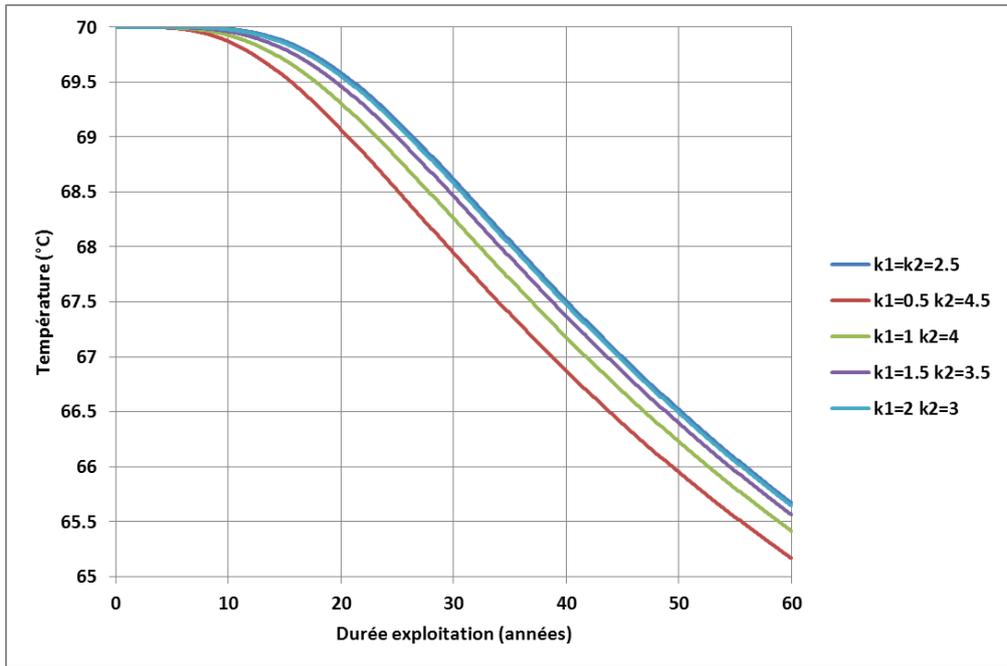


Figure 14 : Evolution de la température de production pour le modèle bicouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices

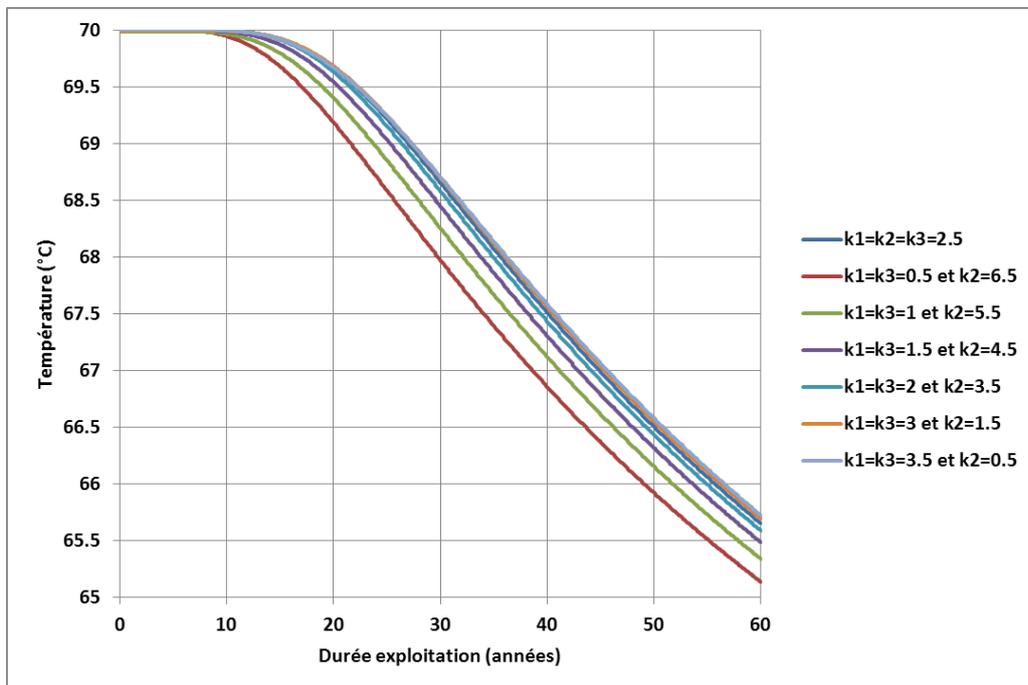


Figure 15 : Evolution de la température de production pour le modèle tricouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches extrêmes ont les mêmes transmissivités et la couche centrale une transmissivité différente)

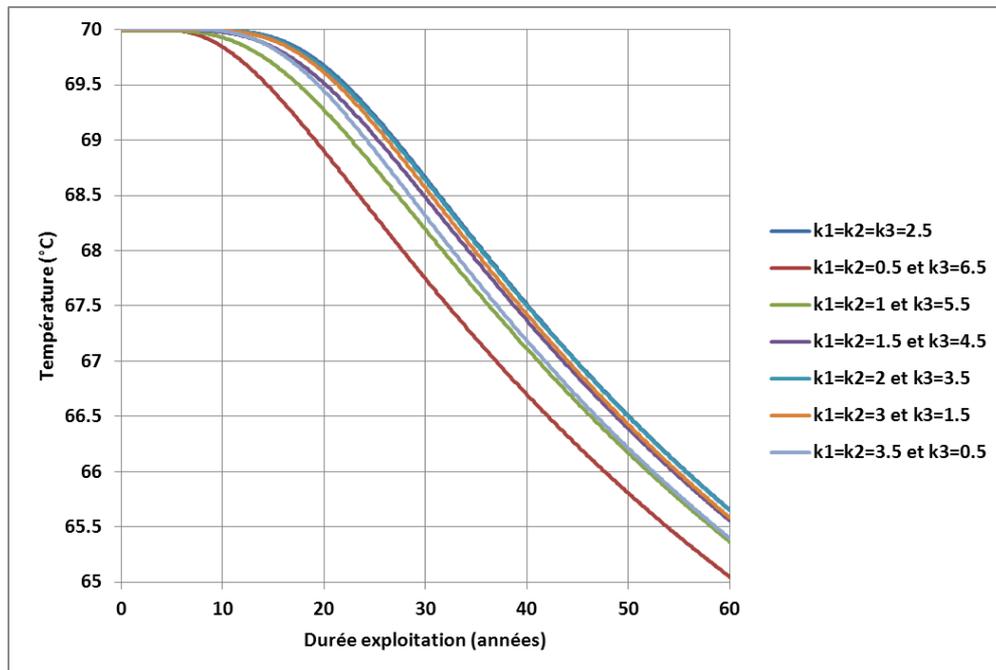


Figure 16 : Evolution de la température de production pour le modèle tricouches avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les deux premières couches ont les mêmes transmissivités et la troisième couche une transmissivité différente)

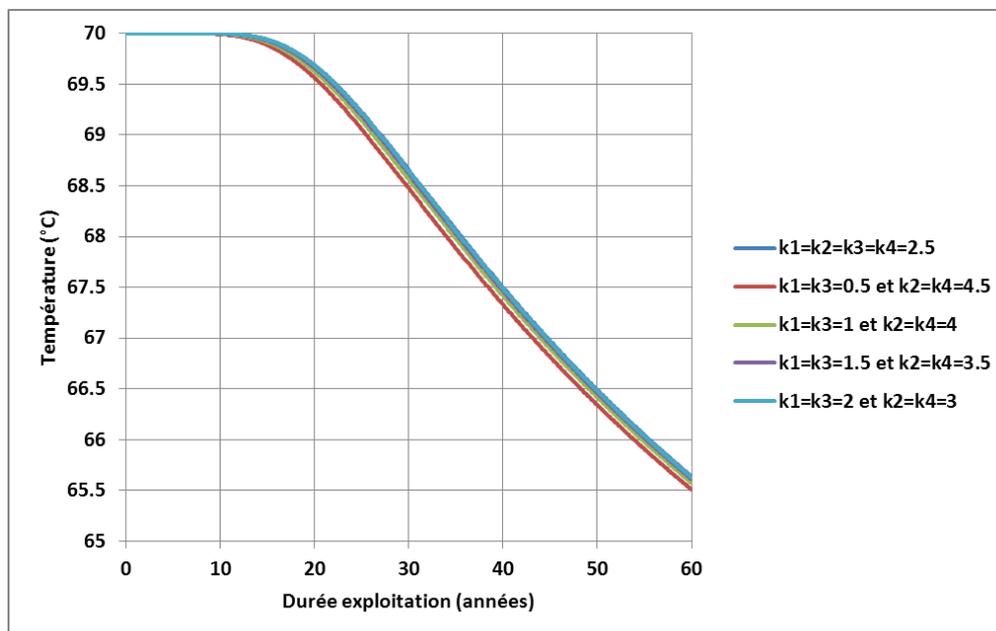


Figure 17 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 3, ainsi que les couches 2 et 4, ont des transmissivités équivalentes)

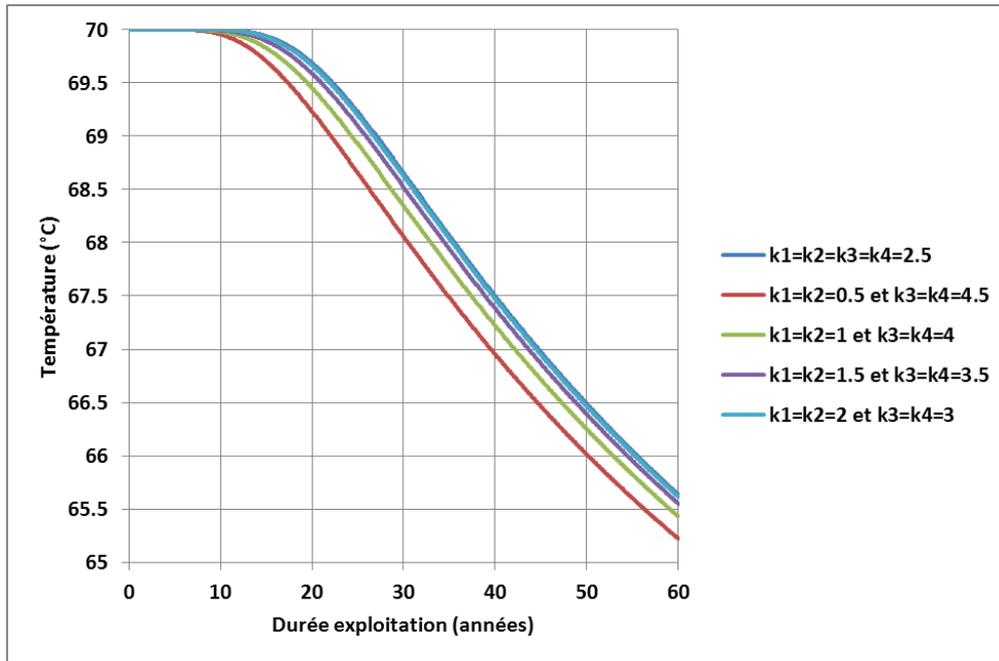


Figure 18 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 2, ainsi que les couches 3 et 4, ont des transmissivités équivalentes)

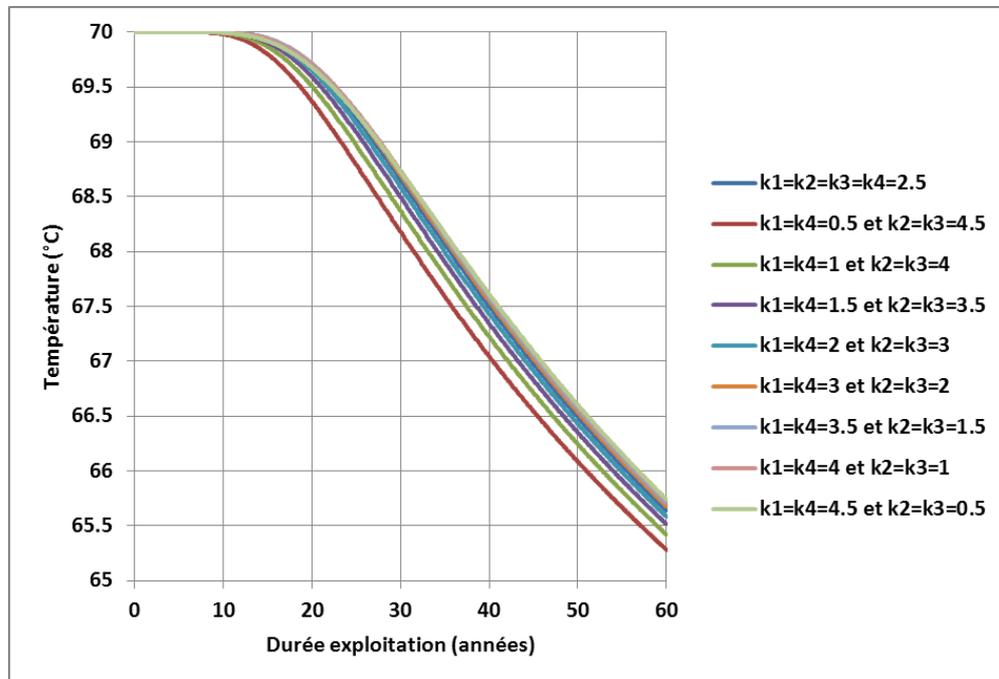


Figure 19 : Evolution de la température de production pour le modèle à 4 couches productrices avec différentes répartitions de la transmissivité dans les couches productrices (cas où les couches 1 et 4, ainsi que les couches 2 et 3, ont des transmissivités équivalentes)

2.5. IMPACT DES PARAMÈTRES THERMIQUES DES ÉPONTES ET DES NIVEAUX PRODUCTEURS

Les propriétés thermiques de la roche, conductivité thermique et capacité calorifique, ne sont pas connues avec précision et n'ont pas fait l'objet de mesures systématiques sur les ouvrages. Les seules mesures effectuées sur un ouvrage géothermique au Dogger sont celles d'Aulnay-sous-Bois. La variabilité spatiale de ces propriétés reste, quant à elle, inaccessible. Il est donc particulièrement intéressant d'étudier l'incidence des propriétés thermiques de la roche sur la percée thermique.

2.5.1. Étude de l'impact de la conductivité thermique de la roche

Les échanges aux épontes contribuent pour une grande partie à l'amplitude de la réponse thermique au puits de production. Or, les facteurs régissant ces échanges aux épontes sont la conductivité thermique du réservoir et celle de l'éponte qui sont dépendantes de la conductivité thermique de l'eau contenue dans la porosité et de la conductivité thermique de la roche.

Nous avons donc évalué, pour deux structures du réservoir (structure à 2 et 7 niveaux producteurs), et, pour différentes conductivité thermique de la roche (1 à 5 W/m/K), la réponse thermique au puits de production. Le tableau 4 récapitule les résultats de l'étude de sensibilité pour les deux structures retenues. Les figures 20, 21 et 22, montrent l'évolution de la température de production au cours du temps dans le cas du modèle à 2 couches, 7 couches et la comparaison entre les deux structures de modèle. Enfin la figure 23 indique l'évolution du temps de percée et de l'amplitude de la baisse de température au puits de production en fonction de la conductivité thermique.

Dans le cas de la **structure à 2 niveaux producteurs** (modèle bicouches), la date de percée thermique s'échelonne entre 16,3 ans pour la conductivité thermique la plus faible (1 W/m/K) et 25 ans pour la conductivité thermique la plus forte (5 W/m/K). L'amplitude de la décroissance thermique varie entre 0,85 (5 W/m/K) et 3 °C (1W/m/K) au bout de 30 années et entre 3,1 et 7,2 °C au bout de 60 ans.

Pour la **structure à 7 niveaux producteurs** (modèle multicouches) qui correspond au cas d'une surface d'échange plus grande aux épontes, la date de percée thermique s'échelonne entre 18,2 ans pour la conductivité thermique la plus faible (1 W/m/K) et 25,3 ans pour la conductivité thermique la plus forte (5 W/m/K). L'amplitude de la décroissance thermique varie entre 0,85 (5 W/m/K) et 2,9 °C (1W/m/K) au bout de 30 années et entre 3,2 et 7,2 °C au bout de 60 ans.

Par comparaison entre les deux types de structure (figures 22 et 23), on peut faire les observations suivantes :

- Par rapport à un modèle bicouches, on observe un retard de la percée thermique pour le modèle à 7 niveaux producteurs de l'ordre de 2 ans pour la conductivité thermique de 1 W/m/K et entre 3 à 4 mois pour la conductivité thermique la plus forte (5 W/m/K). Ce retard est supérieur à 1 année pour une

conductivité thermique inférieure à 3 W/m/K et inférieur à 1 année pour une conductivité thermique supérieure à 3 W/m/K. Ainsi plus la conductivité thermique de la roche est faible, plus la structure verticale multicouche aura une incidence sur la percée thermique dans le sens d'une percée plus tardive du fait de la surface de contact plus grande aux épontes.

- L'amplitude de la décroissance thermique est quasi similaire pour les différentes conductivités thermiques étudiées. La structure multicouche a donc peu d'incidence sur l'amplitude du refroidissement.

Type modèle	Conductivité thermique (W/m/K)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
bicouches	1	16.3	3	7.2
	2	19	1.9	5.4
	3	21.1	1.4	4.4
	4	23.2	1.1	3.65
	5	25	0.85	3.1
7 couches ou « multicouches »	1	18.2	2.9	7.2
	2	20.2	2	5.5
	3	22	1.4	4.4
	4	23.6	1.1	3.7
	5	25.3	0.85	3.2

Tableau 4 : Résultats des tests de sensibilité sur la conductivité thermique de la roche pour les modèles à 2 et 7 couches

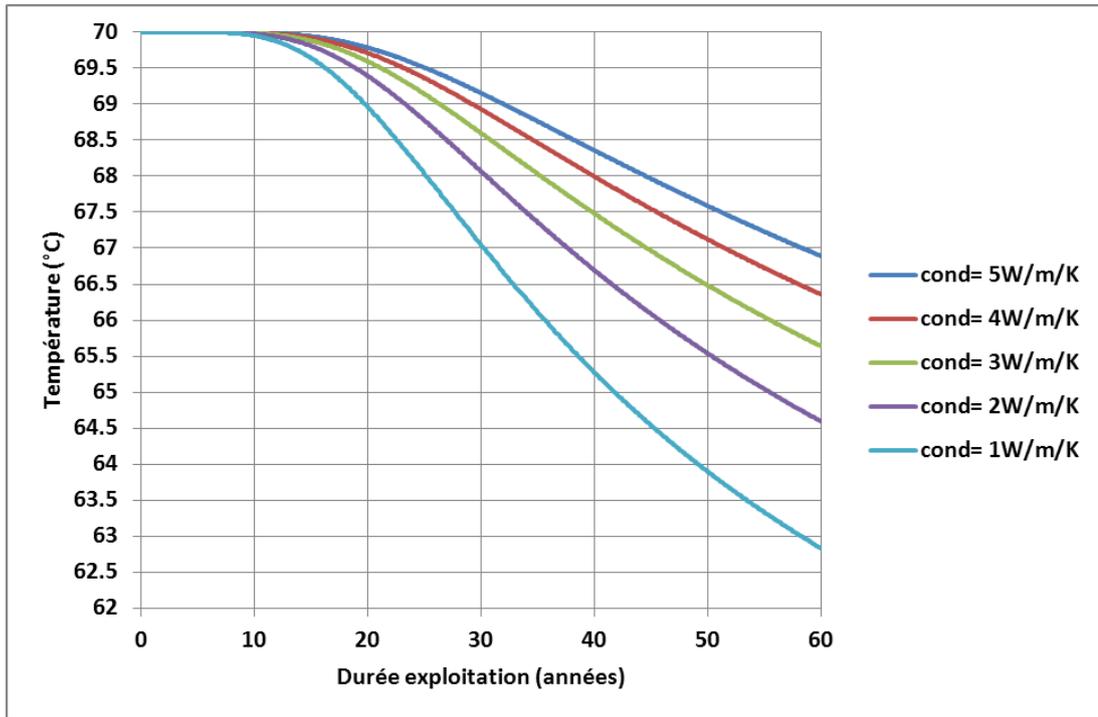


Figure 20 : Evolution de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche (cas du modèle à 2 niveaux producteurs)

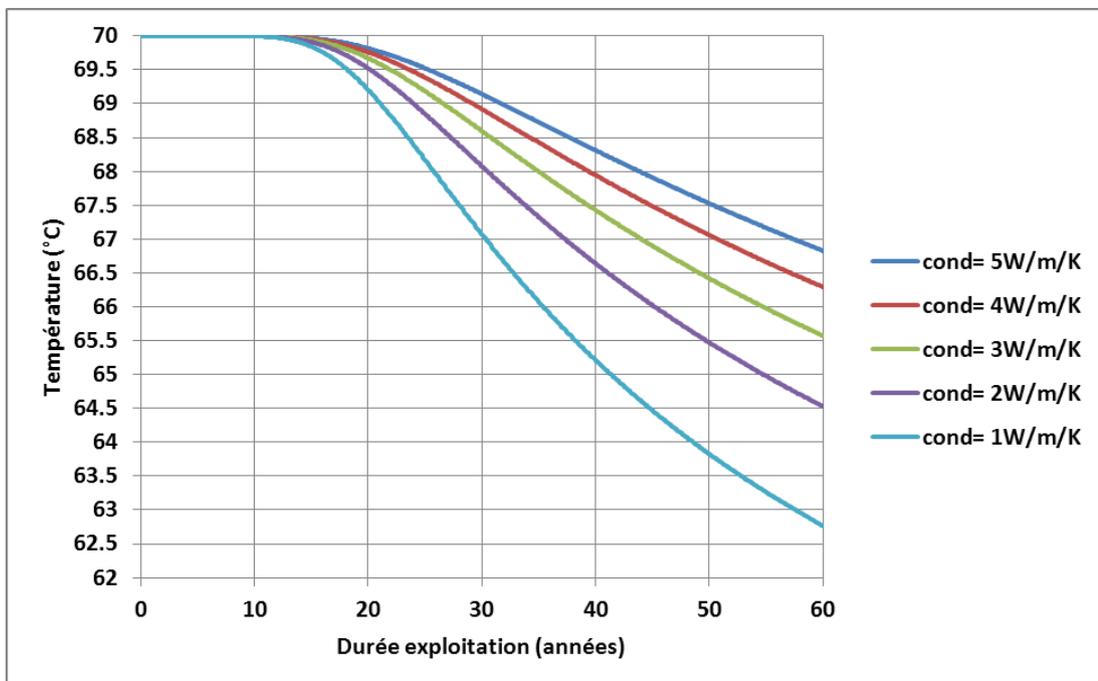


Figure 21 : Evolution de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche (cas du modèle à 7 niveaux producteurs).

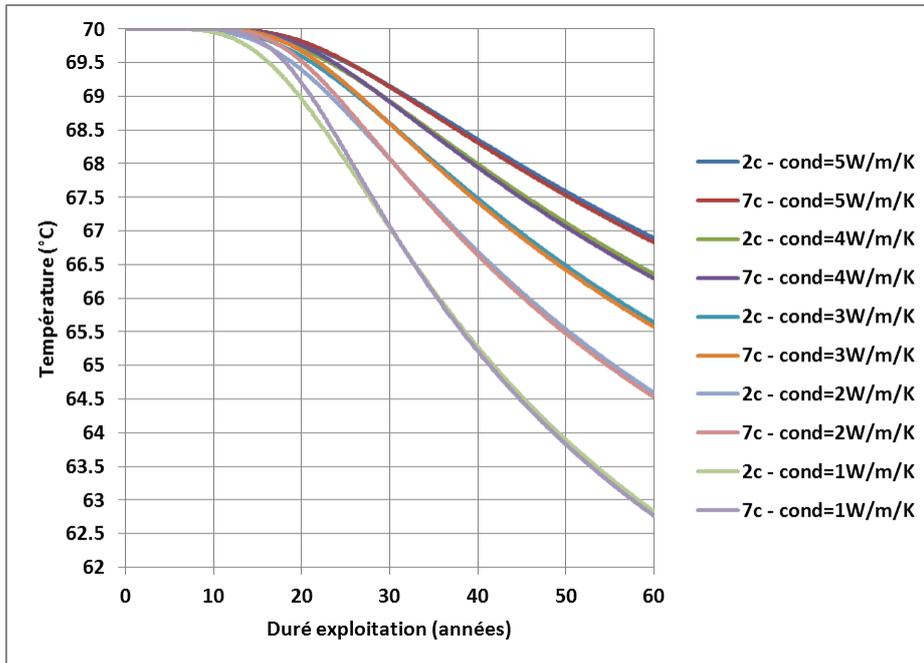


Figure 22 : Comparaison de la température de production pour différentes conductivité thermique de la roche entre les modèles à 2 et 7 niveaux producteurs. Seul la date de la percée thermique change, la décroissance thermique est peut affectée par la structure du réservoir (cf. également la Figure 23)

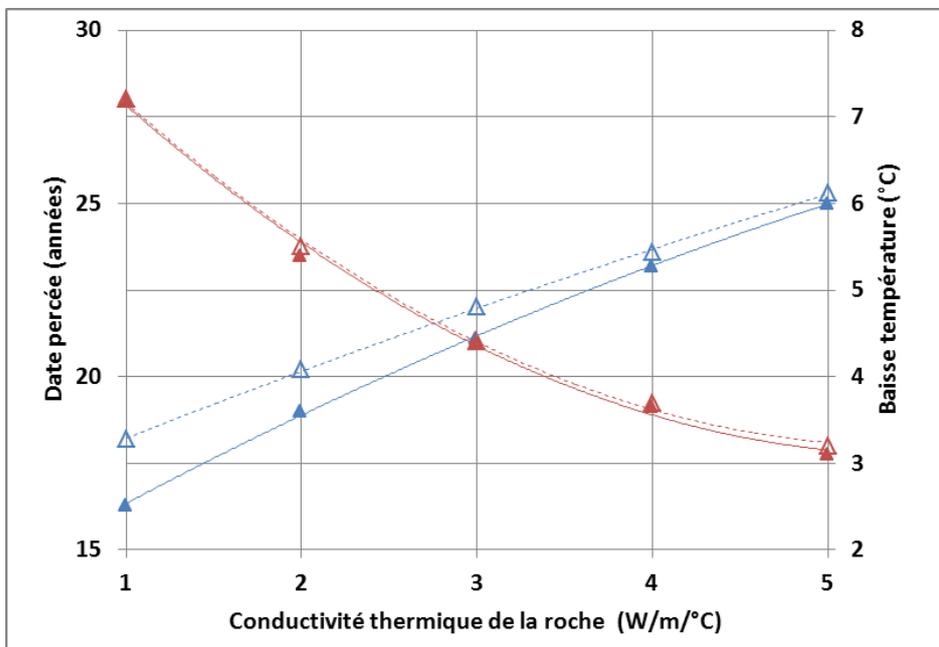


Figure 23 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température au bout de 60 ans (rouge) au puits producteur en fonction de la conductivité thermique de la roche (triangles pleins : structure bicouches, triangles creux : structure multicouches)

2.5.2. Étude de l'impact de la capacité calorifique de la roche

La vitesse d'avancée du front froid est égale au flux de Darcy multiplié par le ratio de la capacité calorifique de l'eau et celle de l'aquifère qui est fonction de celle de l'eau et de la roche. Ce ratio va donc dépendre de la capacité calorifique de la roche. Plus cette dernière est grande, plus ce ratio sera diminué et la percée thermique retardée. Par ailleurs, la diffusivité thermique dans l'aquifère et les épontes qui est le ratio de la conductivité thermique et de la capacité calorifique est également diminuée.

Le tableau 5 récapitule les résultats de l'étude de sensibilité pour les deux structures retenues. Les figures 24, 25 et 26, montrent respectivement l'évolution temporelle de la température de production dans le cas du modèle à 2 couches, 7 couches et la comparaison entre les deux structures de modèle.

La figure 27 indique le temps de percée et la baisse de température à la production (au bout de 60 ans) en fonction de la capacité calorifique de la roche.

Ces résultats montrent que :

- Dans le cas de la **structure à 2 niveaux producteurs**, la date de percée thermique s'échelonne entre 19,5 ans pour la capacité calorifique de 2 MJ/m³/K et 28,2 ans pour la capacité calorifique la plus grande (3 MJ/m³/K). L'amplitude de la décroissance thermique varie entre 0,6 (3 MJ/m³/K) et 1,7 °C (2 MJ/m³/K) au bout de 30 années et entre 3,0 et 4,8 °C au bout de 60 ans.
- Pour la **structure à 7 niveaux producteurs** qui correspond au cas d'une surface d'échange plus grande aux épontes (structure multicouches), la date de percée thermique s'échelonne entre 20 ans pour la capacité calorifique la plus faible et 29,2 ans pour la capacité calorifique la plus forte. L'amplitude de la décroissance thermique varie entre 0,6 et 1,7 °C au bout de 30 années et entre 3,1 et 4,9 °C au bout de 60 ans.

Par comparaison entre les deux types de structure (figures 26 et 27), on observe :

- Un retard de la percée thermique pour le modèle à 7 niveaux producteur de l'ordre de 6 mois pour la capacité calorifique de 2 MJ/m³/K et de 1 an pour la capacité calorifique de 3 MJ/m³/K. Ce retard tend à s'accroître pour une capacité calorifique plus grande qui se traduit par une énergie cédée par les épontes plus importante.
- L'amplitude de la décroissance thermique est similaire (+/- 0,1 °C) entre les deux types de structure pour les différentes conductivités thermiques étudiées. La structure multicouche a donc peu d'incidence sur l'amplitude du refroidissement.

Type modèle	Capacité calorifique (MJ/m ³ /K)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
bicouches	2	19.5	1.7	4.8
	2.2	21.5	1.4	4.3
	2.5	23.8	1.0	3.8
	3	28.2	0.6	3.0
7 couches ou « multicouches »	2	20	1.7	4.85
	2.2	22.2	1.4	4.4
	2.5	24.6	1.0	3.9
	3	29.2	0.55	3.1

Tableau 5 : Résultats des tests de sensibilité sur la capacité calorifique de la roche pour les modèles à 2 et 7 couches

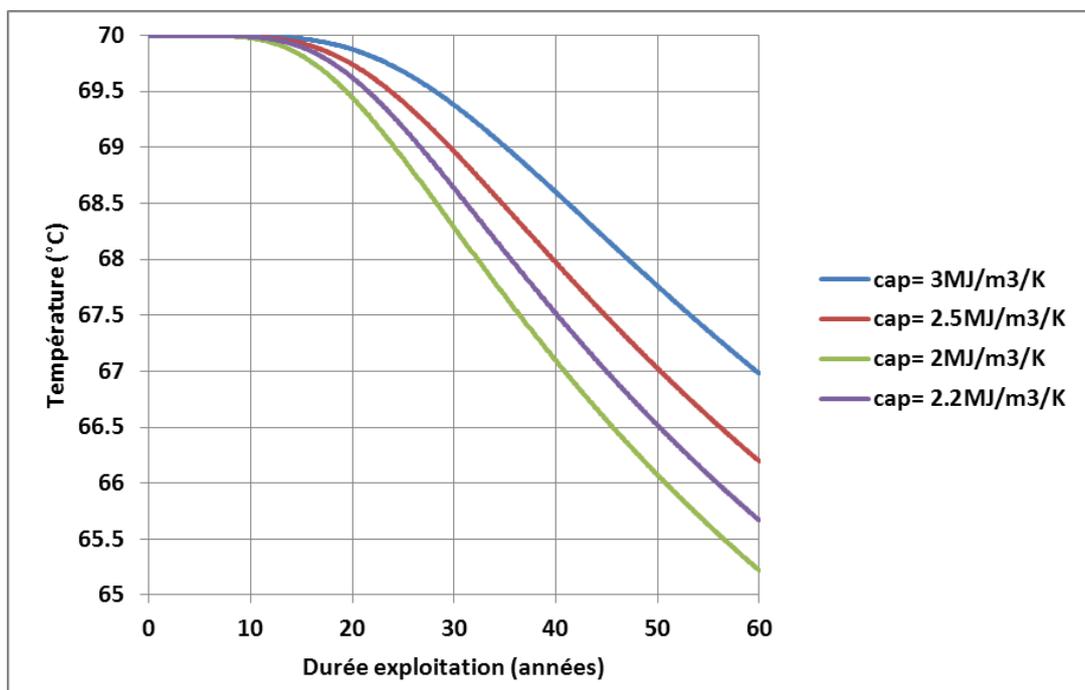


Figure 24 : Evolution de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche (cas du modèle à 2 niveaux producteurs)

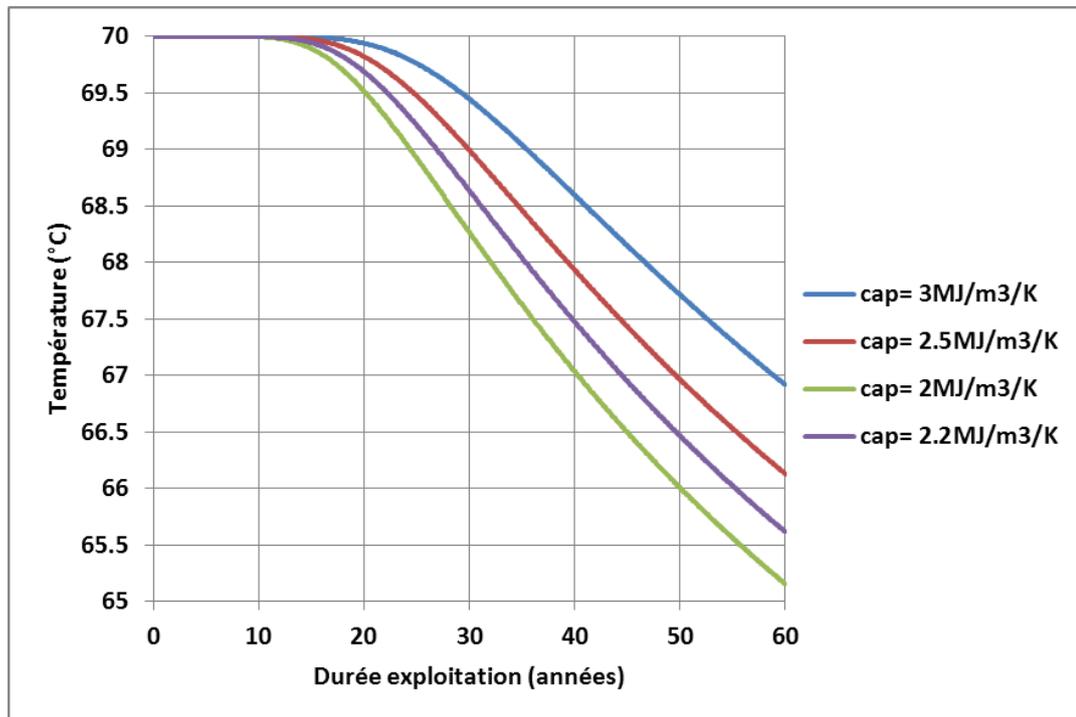


Figure 25 : Evolution de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche (cas du modèle à 7 niveaux producteurs)

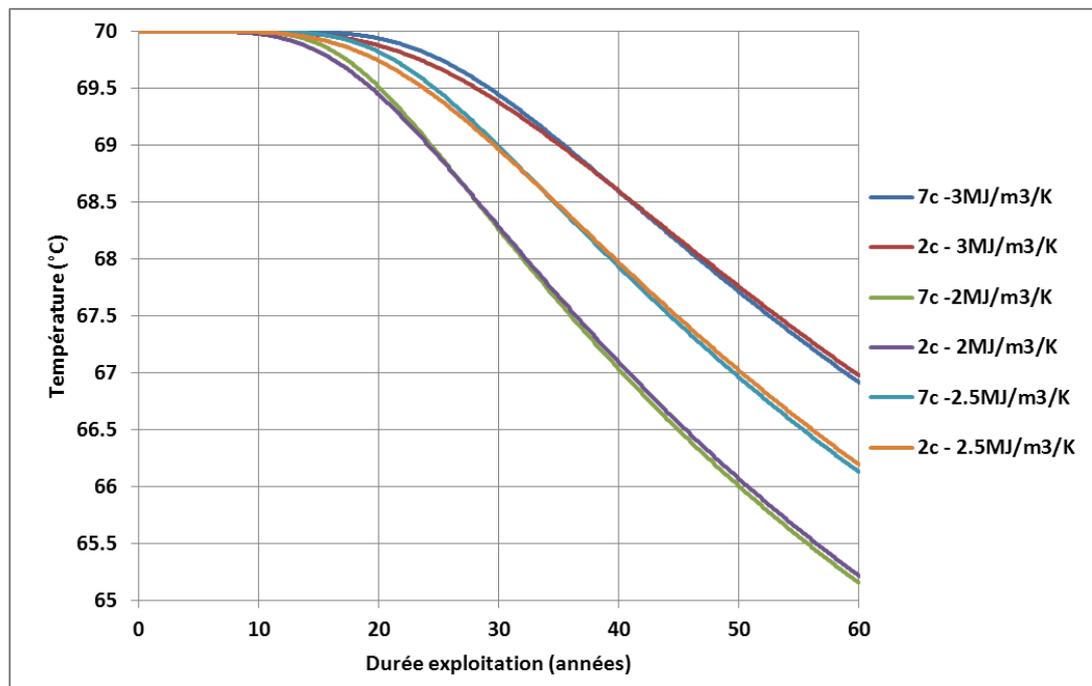


Figure 26 : Comparaison de la température de production pour différentes capacités calorifiques de la roche entre les modèles à 2 et 7 niveaux producteurs

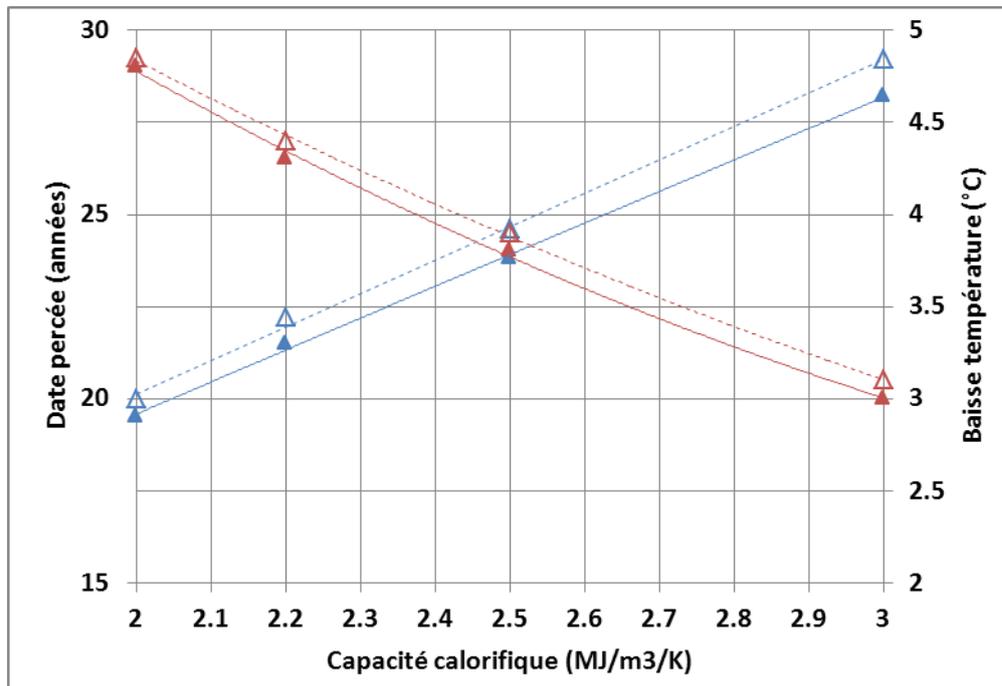


Figure 27 : Evolution du temps de percée (bleu) et de la baisse de température après 60 ans (rouge) au puits producteur en fonction de la capacité calorifique de la roche (triangles pleins : structure bicouches, triangles creux : structure multicouches)

2.5.3. Étude de l'impact de la dispersivité thermique du milieu

Le dernier paramètre influençant les transferts thermiques étudié est la dispersivité thermique du milieu. Cette dernière comprend deux composantes :

- la dispersivité longitudinale α_l parallèle à la direction principale de l'écoulement ;
- la dispersivité transversale α_t perpendiculaire à la direction principale de l'écoulement.

Dans le tableau 6 sont résumés les résultats des tests de sensibilité pour différentes valeurs de la dispersivité longitudinale (10, 25, 50 et 100 m) et pour différents ratios pour la dispersivité transversale ($\alpha_t = 0.1 \alpha_l$, $\alpha_t = 0.2 \alpha_l$ et $\alpha_t = \alpha_l$). Ces tests ont été réalisés pour des structures de types bicouches et multicouches.

Par ailleurs, la figure 28 montre pour une dispersivité longitudinale donnée l'impact de la dispersivité transversale sur la percée et la décroissance thermique.

Les figures 29 à 34 comparent l'impact de la dispersivité longitudinale sur la décroissance thermique au puits de production pour différents ratios α_t/α_l .

Les figures 35 et 36 indiquent le temps de percée et l'amplitude de décroissance de la température en fonction de la dispersivité longitudinale pour les 3 ratios de la dispersivité transversale étudiés, ceci, pour les modèles bi- et multicouches.

Enfin la figure 37 montre les écarts sur le temps de percée thermique et la baisse de température entre une structure multicouches et bicouches.

Ces résultats montrent :

- qu'une augmentation de la dispersivité transversale (ratio de 0.1 à 1) par rapport à la dispersivité longitudinale se traduit par un retard sur la percée thermique et une diminution de la décroissance thermique. Par ailleurs, l'écart entre les baisses de température observées pour différents ratios étudiés de la dispersivité transversale augmente avec la dispersivité longitudinale (cf. figures 28 et 35);
- que le refroidissement est maximal pour une dispersivité longitudinale de 100 m et transversale de 10 m (4,9 °C au bout de 60 ans) et minimal pour une dispersivité longitudinale et transversale de 100 m (4 °C au bout de 60 ans);
- la percée thermique est atteinte en premier pour une dispersivité longitudinale de 100 m et transversale de 10 m (15,2 ans pour la structure bicouches et 15,8 pour la structure multicouches) alors que la percée la plus tardive correspond au cas d'une dispersivité longitudinale et transversale de 10 m (22,3 ans pour la structure bicouches et 23,2 pour la structure multicouches) et qui ne correspond pas au refroidissement minimal observé (cf. figures 33 à 36) ;
- la comparaison entre les 2 structures de modèle (cf. figure 37) indique que, pour une dispersivité longitudinale donnée, les écarts sur la percée et la baisse de température sont plus importants pour un faible ratio de la dispersivité transversale. Ces écarts observés entre les différentes dispersivités transversales se réduisent lorsque la dispersivité longitudinale augmente, et les écarts entre les temps de percée et de baisse de température entre les deux types de structure sont plus faibles.

Type modèle	Dispersivité thermique (m) (α_l ; α_t)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans ($^{\circ}C$)	ΔT au bout de 60 ans ($^{\circ}C$)
Structure bicouches	(10 ; 1)	18.8	1.65	4.6
	(10 ; 2)	19.5	1.6	4.55
	(10 ; 10)	22.3	1.3	4.3
	(25 ; 2.5)	18.3	1.7	4.6
	(25 ; 5)	19.4	1.6	4.5
	(25 ; 25)	22.2	1.3	4.2
	(50 ; 5)	17.3	1.8	4.7
	(50 ; 10)	18.3	1.7	4.6
	(50 ; 50)	20.8	1.4	4.1
	(100 ; 10)	15.2	2.1	4.85
	(100 ; 20)	16	2	4.7
	(100 ; 100)	18.3	1.6	4
Structure multicouches	(10 ; 1)	21	1.7	4.8
	(10 ; 2)	21.4	1.6	4.7
	(10 ; 10)	23.2	1.3	4.35
	(25 ; 2.5)	20	1.7	4.75
	(25 ; 5)	20.6	1.6	4.6
	(25 ; 25)	22.5	1.3	4.2
	(50 ; 5)	18.5	1.85	4.8
	(50 ; 10)	19	1.7	4.6
	(50 ; 50)	21	1.4	4.1
	(100 ; 10)	15.8	2.1	4.9
	(100 ; 20)	16.3	2	4.7
	(100 ; 100)	18.3	1.6	4

Tableau 6 : Résultats des tests de sensibilité sur la dispersivité thermique longitudinale et transversale pour les modèles à 2 et 7 couches

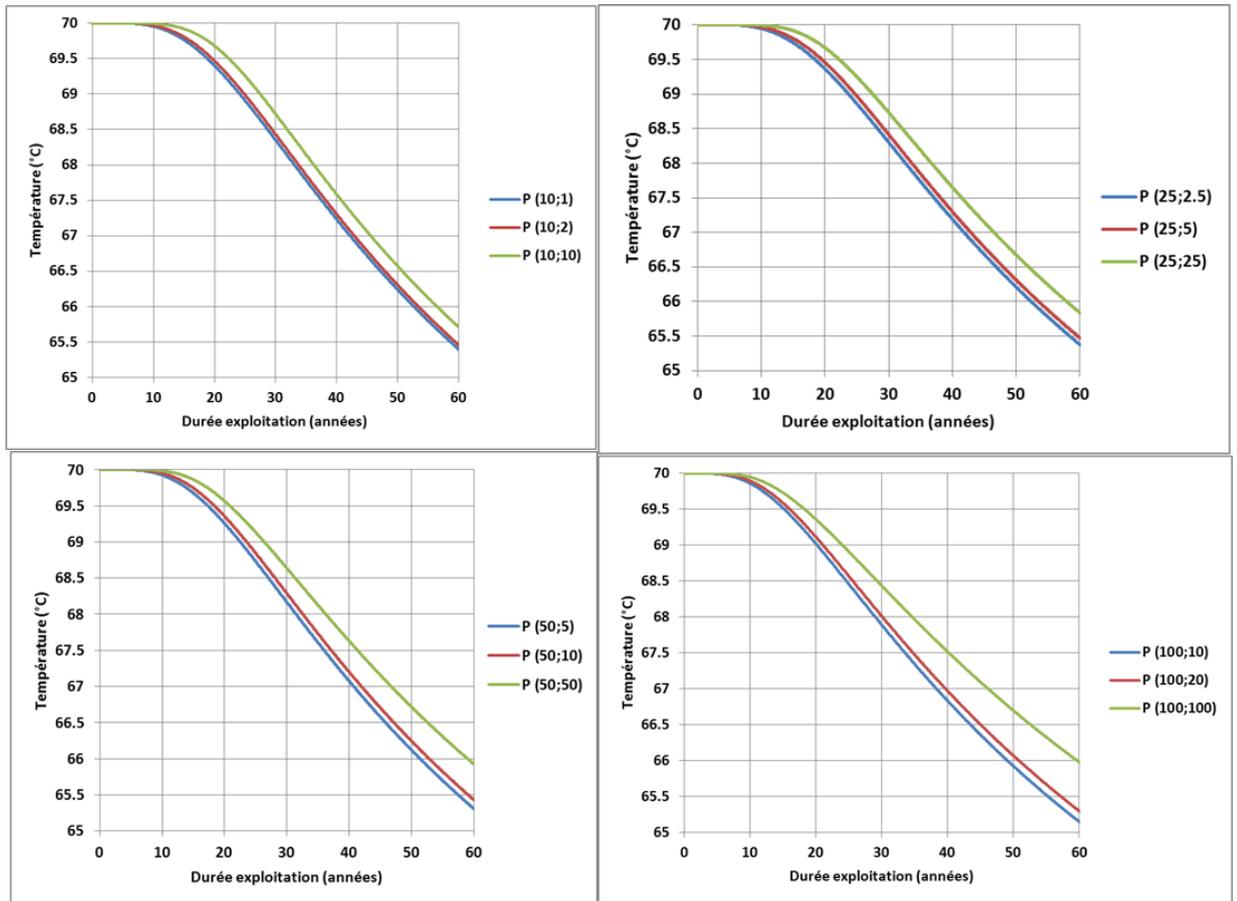


Figure 28 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) avec incidence de la dispersivité transversale (modèle avec structure bicouches)

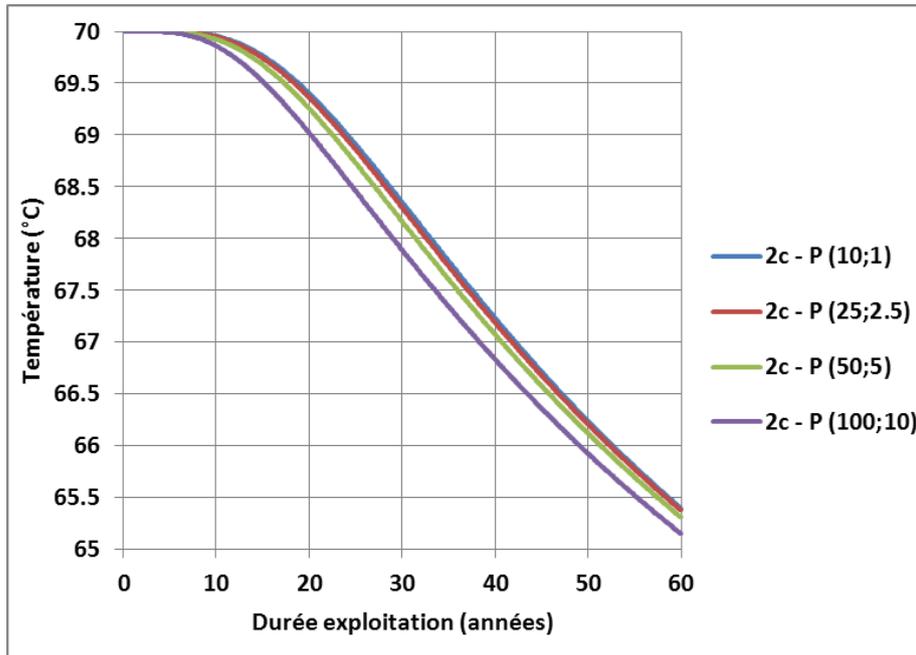


Figure 29 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.1 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)

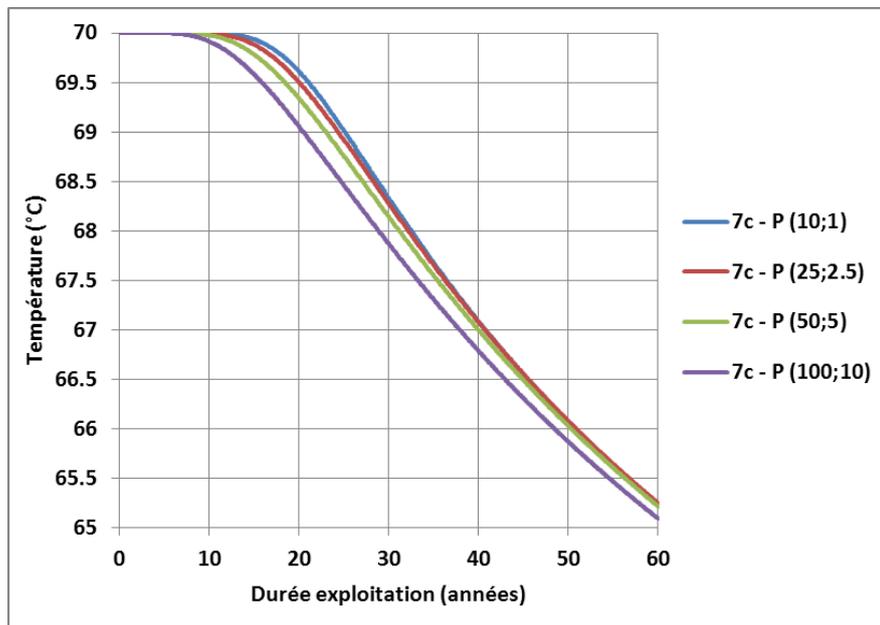


Figure 30 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.1 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)

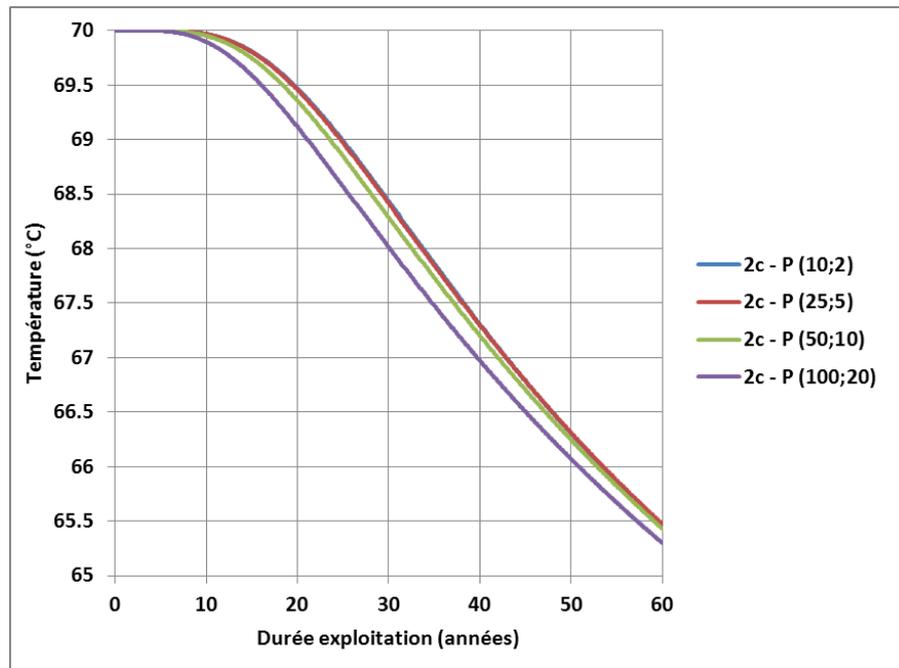


Figure 31 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.2 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)

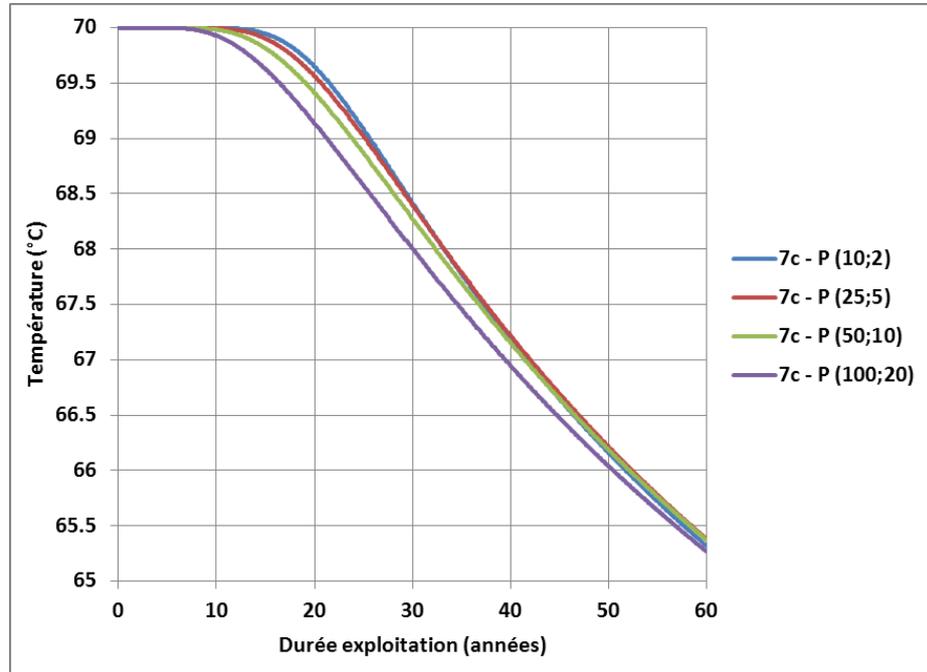


Figure 32 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 0.2 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)

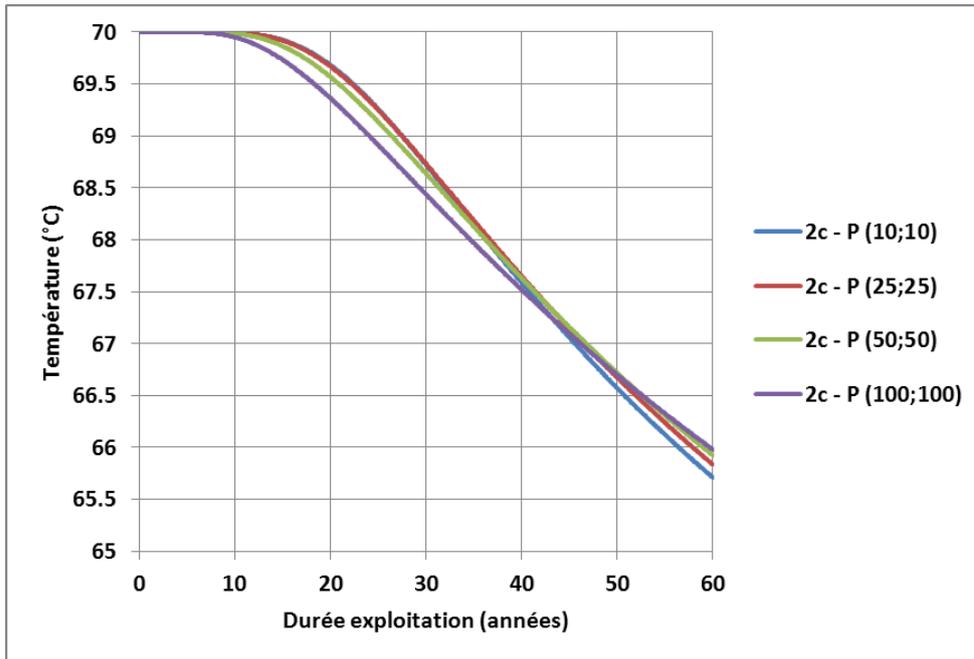


Figure 33 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 1 pour la dispersivité transversale (structure bicouches)

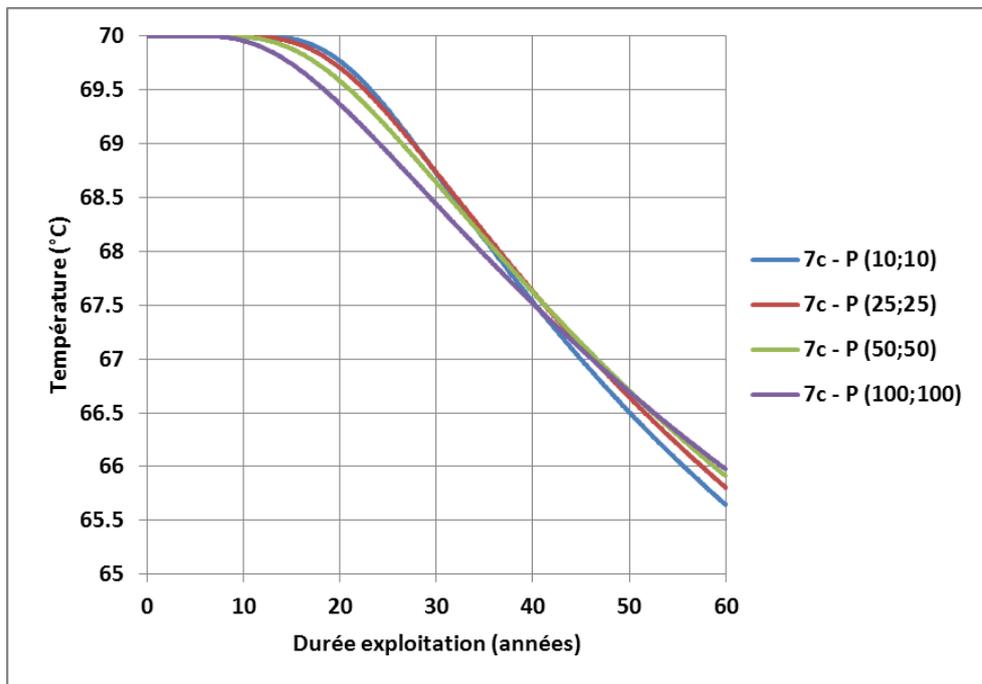


Figure 34 : Evolution de la température de production pour différentes dispersivités longitudinales (10, 25, 50 et 100m) et un ratio de 1 pour la dispersivité transversale (structure multicouches)

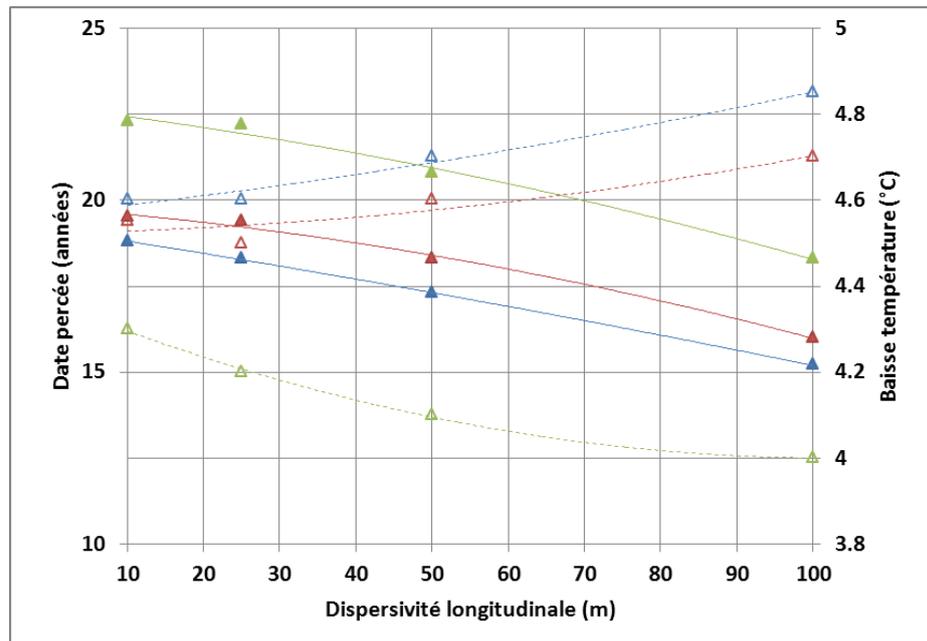


Figure 35 : Evolution du temps de percée (triangles pleins) et de la baisse de température (triangles creux) à la production en fonction de la dispersivité longitudinale pour différents ratios de la dispersivité transversale pour le modèle bicouches (bleu : ratio de 0.1 ; rouge : ratio de 0.2 et vert : ratio de 1).

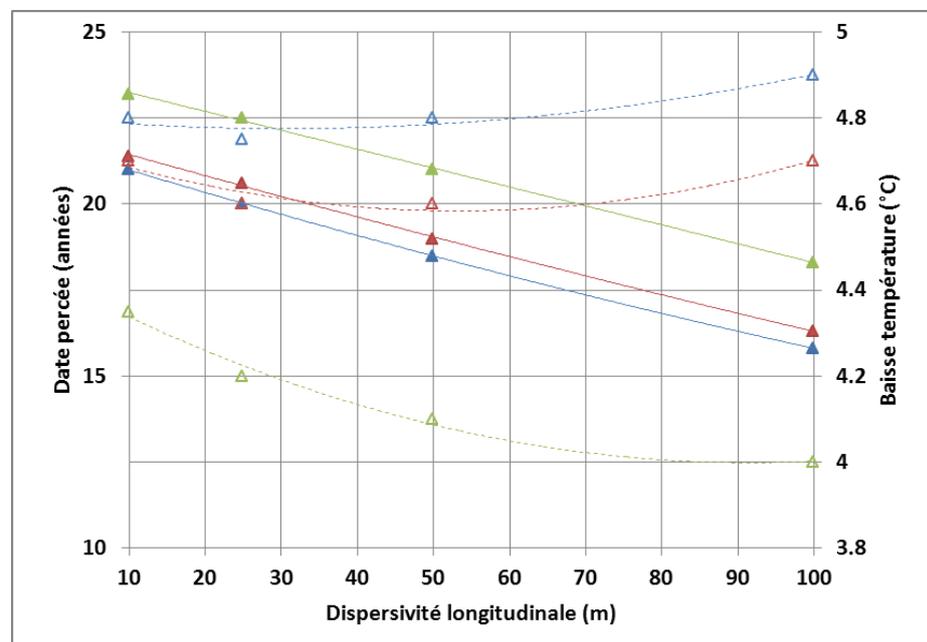


Figure 36 : Evolution du temps de percée (triangles pleins) et de la baisse de température (triangles creux) à la production en fonction de la dispersivité longitudinale pour différents ratio de la dispersivité transversale pour le modèle multicouches (bleu : ratio de 0.1 ; rouge : ratio de 0.2 et vert : ratio de 1).

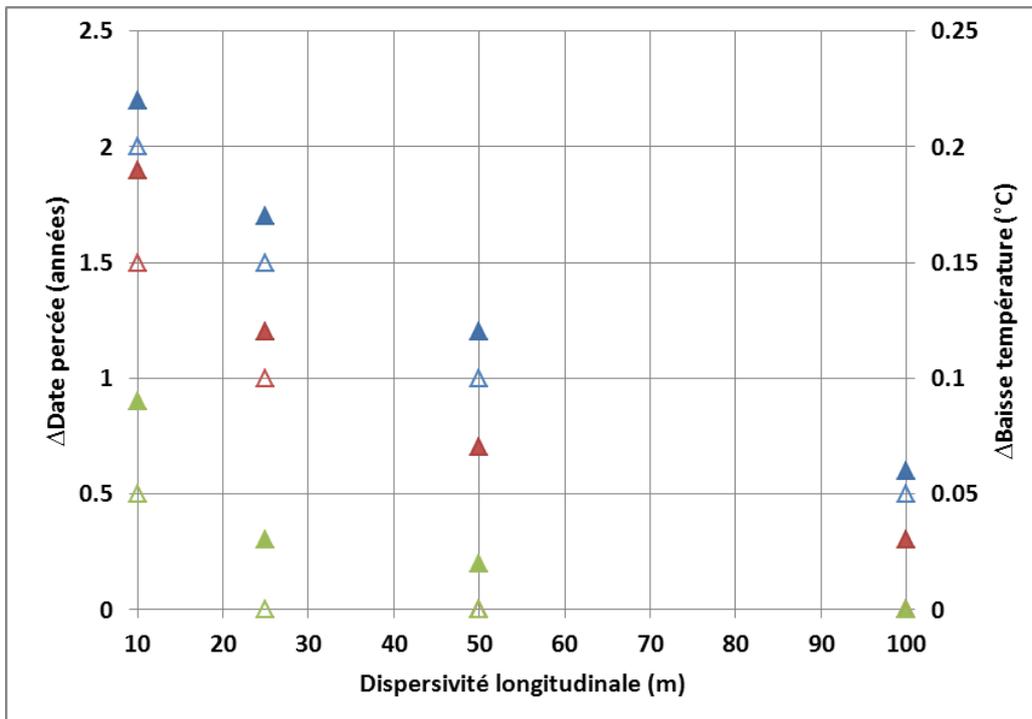


Figure 37 : Ecart sur les temps de percée (triangles pleins) et la baisse de température au puits de production (triangles creux) entre les modèles multicouches et bicouches. En bleu : ratio de 0.1 ; en rouge : ratio de 0.2 et en vert : ratio de 1

2.6. IMPACT DES PARAMÈTRES D'EXPLOITATION (TEMPÉRATURE ET DÉBIT INJECTÉS) ET DE L'ÉCARTEMENT ENTRE PUITES

Dans ce chapitre, on étudie l'impact du débit d'exploitation et de la température de réinjection sur la percée thermique.

On fait varier le débit de $\pm 10\%$ à $\pm 50\%$ par rapport au débit de référence ($200 \text{ m}^3/\text{h}$) et la température de $\pm 10^\circ\text{C}$ à $\pm 20^\circ\text{C}$ par rapport à la température de référence (40°C).

2.6.1. Impact du débit d'exploitation

Le tableau 7 récapitule les résultats obtenus sur l'évaluation de l'incidence du débit d'exploitation (le débit de production est égal au débit d'injection) pour une température d'injection fixée à 40°C et pour chacune des structures étudiées (bicouches et multicouches).

Les figures 38 et 39 indiquent par ailleurs les courbes de décroissance thermique obtenues pour les différents débits simulés respectivement pour le modèle bicouches et multicouches.

La figure 40 compare les résultats entre les deux structures pour le débit de référence et les débits extrêmes.

Enfin, la figure 41 montre l'évolution de la date de percée thermique et de l'amplitude de la décroissance thermique au bout de 60 ans pour les différents débits testés.

Ces résultats conduisent aux observations suivantes :

- L'amplitude de variation de la date de percée varie entre 13 et 54 ans pour un débit respectivement de 300 ou 100 m³/h et la baisse de température en fond de puits, après 60 ans d'exploitation, entre 1°C (débit de 100 m³/h) et 7,5 °C (débit de 300 m³/h). L'amplitude de variation est très grande, le débit injecté joue un rôle majeur puisqu'il est le moteur principal dans la propagation du front froid ;
- Pour un débit moyen de 200 m³/h, il y a peu de différences sur les résultats entre un modèle type bicouches ou multicouches. Par contre, pour les débits extrêmes (100 et 300 m³/h), on observe un décalage sur la date de percée thermique (figures 40 et 41). Ce décalage est de 5,5 ans pour un débit de 100 m³/h et dans le sens d'une percée plus tardive pour le modèle bicouches et d'environ 1 an pour un débit de 300 m³/h et dans le sens d'une percée plus tardive pour le modèle multicouches. Dans le cas d'un faible débit la structure verticale a une incidence plus grande : dans le cas d'une structure avec plusieurs niveaux producteurs, les épontes intermédiaires vont se refroidir plus rapidement que dans le cas où l'on a regroupé l'ensemble des niveaux producteurs (transfert de chaleur plus efficace du fait d'une plus grande surface d'échange) avec pour conséquence un refroidissement plus précoce à la production. Dans le cas d'un fort débit, on observe l'effet inverse : les épontes intermédiaires se refroidissent moins rapidement car les échanges conductifs aux épontes sont moins efficaces et par conséquent la percée est un peu plus tardive mais avec un écart moindre comparé aux faibles débits ;
- La baisse de température à la production est assimilable à une fonction linéaire qui croît avec le débit (cf. figure 41) : un accroissement du débit de 10 % engendre une baisse de température supplémentaire de l'ordre de 0,7 °C. La date de percée décroît avec le débit de manière asymptotique : plus le débit est grand, plus la percée est précoce et l'écart sur la date de percée est réduit. À partir d'un certain seuil de débit, la percée doit tendre vers la percée théorique dans le cas d'une convection pure et seule l'amplitude de la décroissance thermique est alors modifiée.

Type modèle	Débit d'exploitation (m ³ /h)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
Structure bicouches	100	54	-	0.7
	120	42	-	1.3
	140	34	-	2.1
	160	28.3	0.6	2.75
	180	24.3	1	3.6
	200	21.5	1.4	4.3
	220	18.7	1.9	5.1
	240	16.7	2.4	5.7
	260	15.1	2.9	6.3
	280	13.8	3.4	6.9
	300	12.6	4	7.4
	Structure multicouches	100	48.5	-
120		42.2	-	1.4
140		34.3	-	2.1
160		29	0.6	2.9
180		25	0.95	3.7
200		22.2	1.4	4.4
220		19.5	1.9	5.1
240		17.5	2.4	5.8
260		16	2.95	6.4
280		14.6	3.5	6.95
300		13.4	4	7.5

Tableau 7 : Résultats des tests de sensibilité sur le débit d'exploitation pour les modèles à 2 et 7 couches. Le débit de référence est indiqué en rouge.

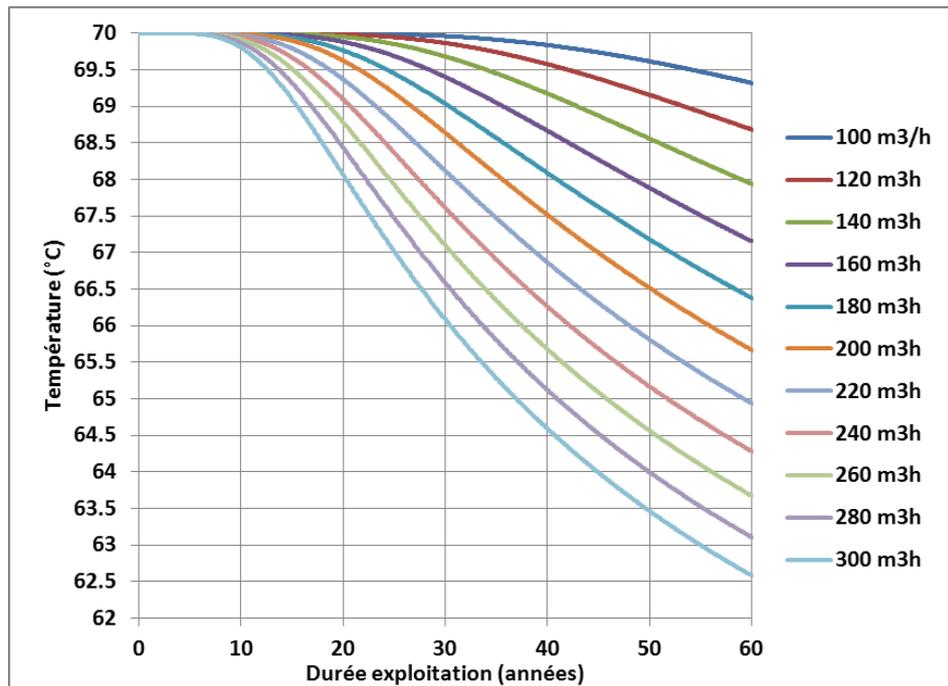


Figure 38 : Evolution de la température de production pour les différents débits testés (modèle bicouches)

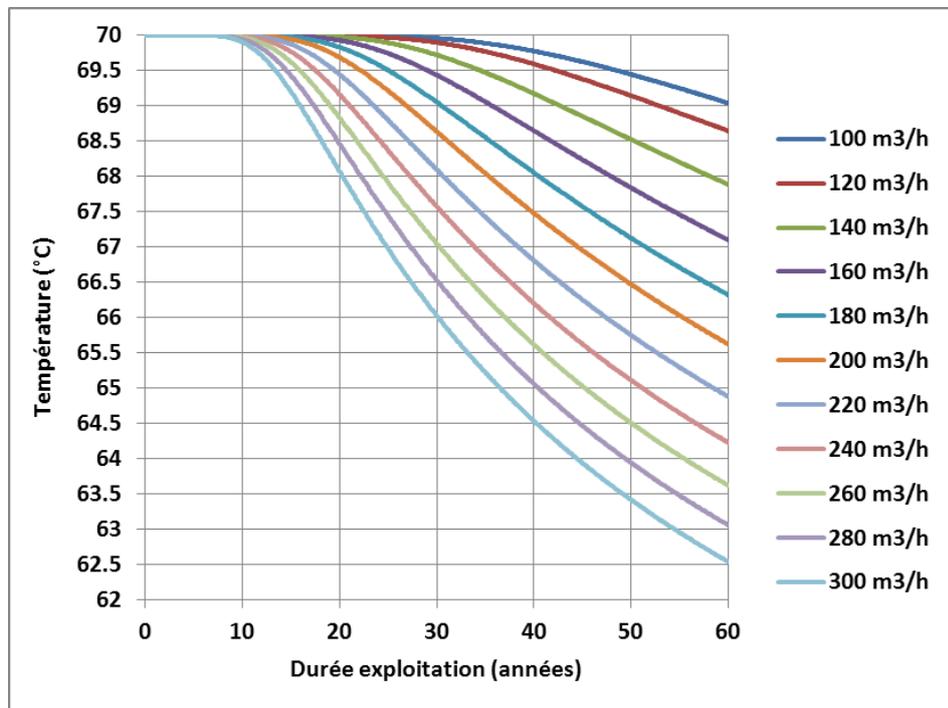


Figure 39 : Evolution de la température de production pour les différents débits testés (modèle multicouches)

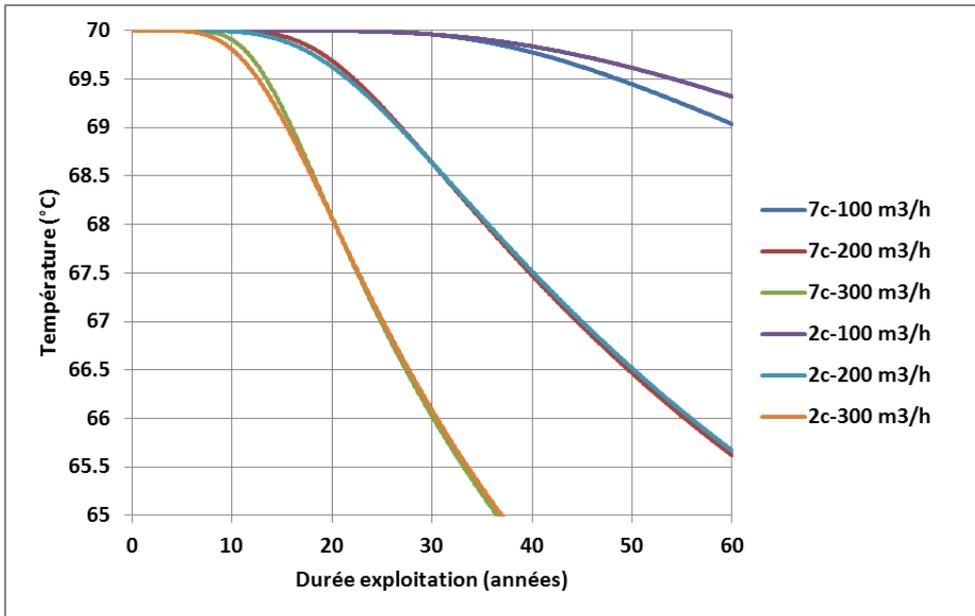


Figure 40 : Comparaison des courbes de décroissance thermique au puits de production entre les modèles bicouches (2c) et multicouches (7c) pour des débits extrêmes

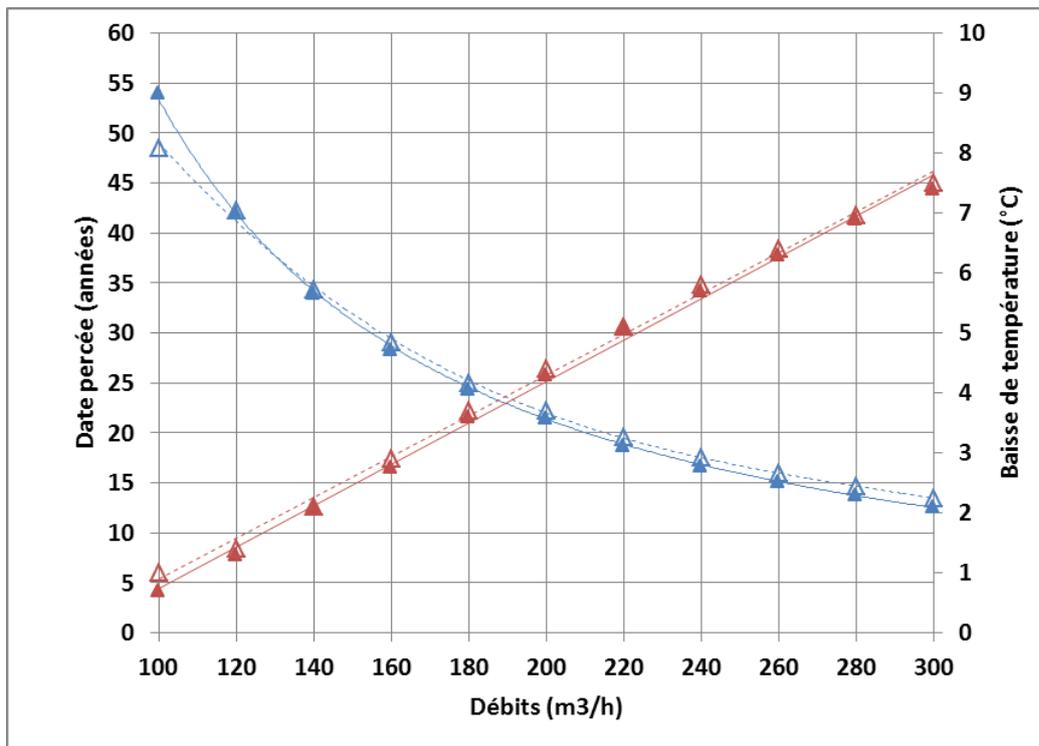


Figure 41 : Evolution de la date de percée (courbes bleues) et de la baisse de température (courbes rouges) en fonction du débit d'exploitation (traits pleins : modèle bicouches, pointillés : modèle à 7 couches)

2.6.2. Impact de la température de réinjection

Le tableau 8 synthétise les résultats obtenus sur l'incidence de la température de réinjection au puits injecteur pour un débit d'exploitation fixé à 200 m³/h et pour chacune des structures étudiées (bicouches et multicouches).

Les figures 42 et 43 indiquent les courbes de décroissance thermique obtenues pour les différents cas de température d'injection étudiés respectivement pour les modèles bicouches et multicouches.

La figure 44 compare les résultats entre les deux structures pour la température de référence et les températures extrêmes.

Enfin la figure 45 montre l'évolution de la date de percée thermique et de l'amplitude de la décroissance thermique au bout de 60 ans pour les différentes températures d'injection simulées.

Ces résultats appellent les conclusions suivantes :

- L'amplitude de variation de la date de percée varie entre 18,5 (température réinjectée à 20 °C) et 31 ans (température réinjectée à 60 °C). La baisse de température à la production, au bout de 60 ans, varie entre 1,5 °C (injection à 60 °C) et 7,5 °C (injection à 20 °C). Les amplitudes de variation sur la baisse de température sont du même ordre de grandeur que pour les débits (baisse de l'ordre de 1 °C pour un débit de 100 m³/h et 7,5 °C pour un débit de 300 m³/h). Par contre l'amplitude de variation sur la date de percée est réduite comparée à celle pour les débits (amplitude de 12,5 ans pour une température d'injection comprise entre 20 et 60 °C et de 41 ans pour un débit d'exploitation compris entre 100 et 300 m³/h). Une injection plus froide va se traduire par un gradient thermique plus important dans le réservoir et par conséquent accroître la conduction thermique dans le réservoir. De même les épontes vont être refroidies plus rapidement.
- Les courbes de décroissance thermiques entre les modèles bi- et multi-couches sont relativement similaires avec une percée un peu plus précoce (de l'ordre de 1 an) pour une température injectée inférieure ou égale à 40°C dans le cas du modèle bicouches.
- La figure 45 montre un comportement inversé par rapport à la figure 41. La baisse de température à la production décroît linéairement quand la température d'injection augmente. Une augmentation de 10°C sur la température injectée se traduit par une diminution de 1,5 °C de la baisse de température au puits producteur. La date de percée thermique croît de manière exponentielle avec la température d'injection, plus cette dernière est faible, plus la percée est précoce et l'écart sur la date de percée se réduit.

Type modèle	Température d'injection (°C)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
Structure bicouches	20	18.5	2.3	7.3
	30	19.6	1.9	5.8
	40	21.2	1.4	4.4
	50	24	1	2.9
	60	31	-	1.4
Structure multicouches	20	19.6	2.35	7.4
	30	20.5	1.9	5.9
	40	22	1.4	4.4
	50	24.4	1	3
	60	30.8	-	1.5

Tableau 8 : Résultats des tests de sensibilité sur la température de réinjection pour les modèles à 2 et 7 couches. La température d'injection de référence est indiquée en rouge.

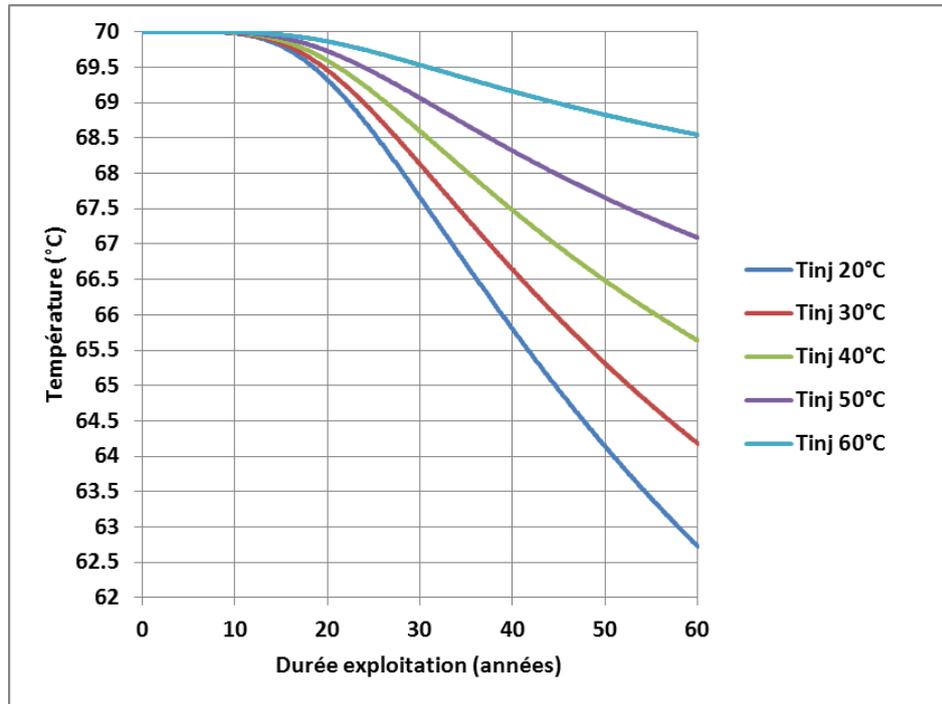


Figure 42 : Evolution de la température de production pour les différentes températures d'injection testées (modèle bicouches)

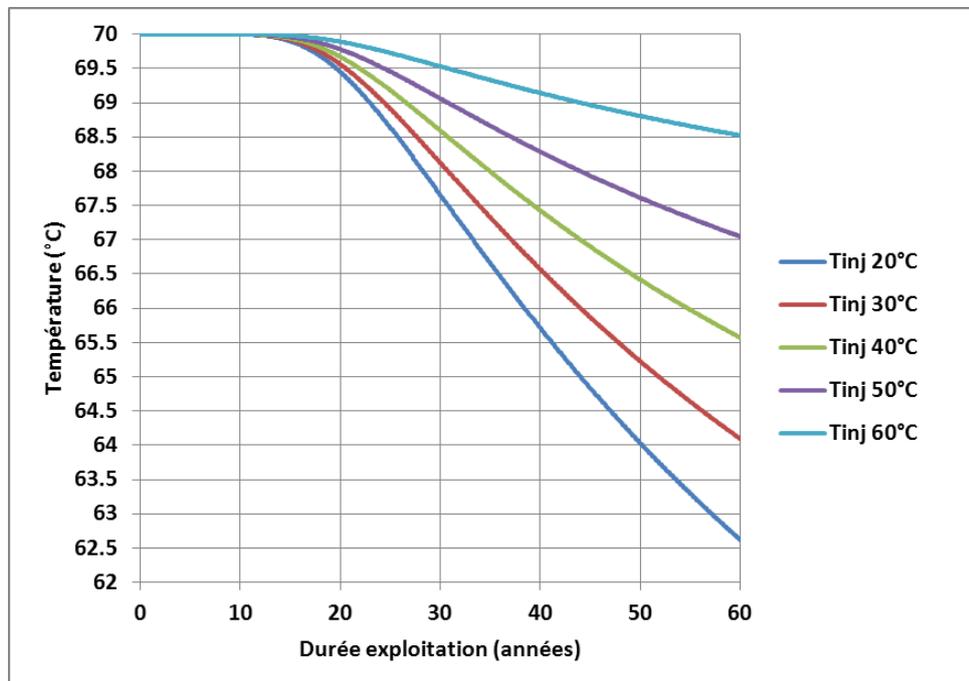


Figure 43 : Evolution de la température de production pour les différentes températures d'injection testées (modèle multicouches)

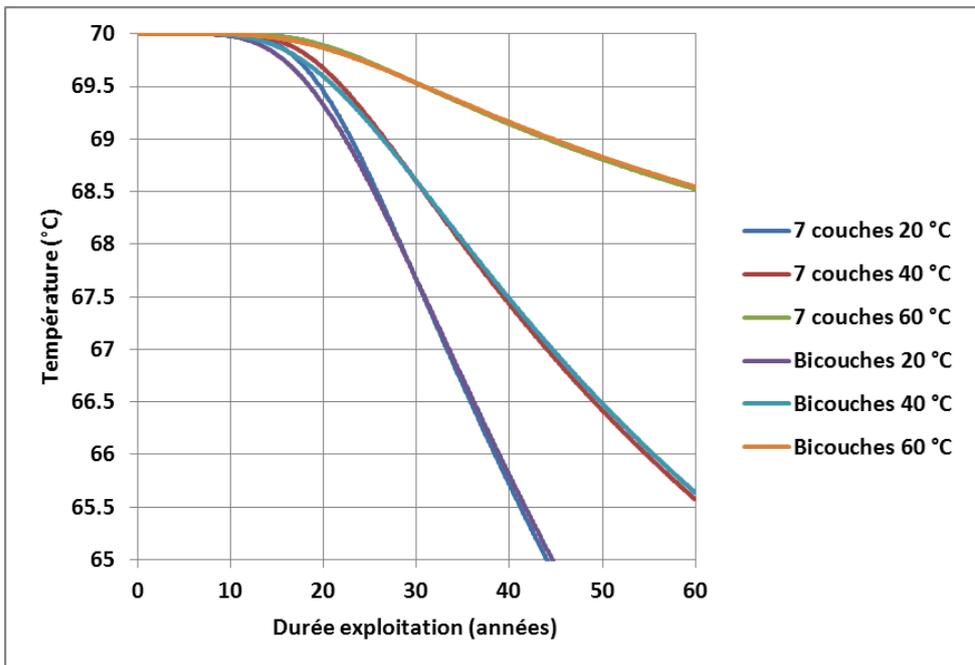


Figure 44 : Comparaison des courbes de décroissance thermique au puits de production entre les modèles bicouches et 7 couches pour des températures de réinjection extrêmes

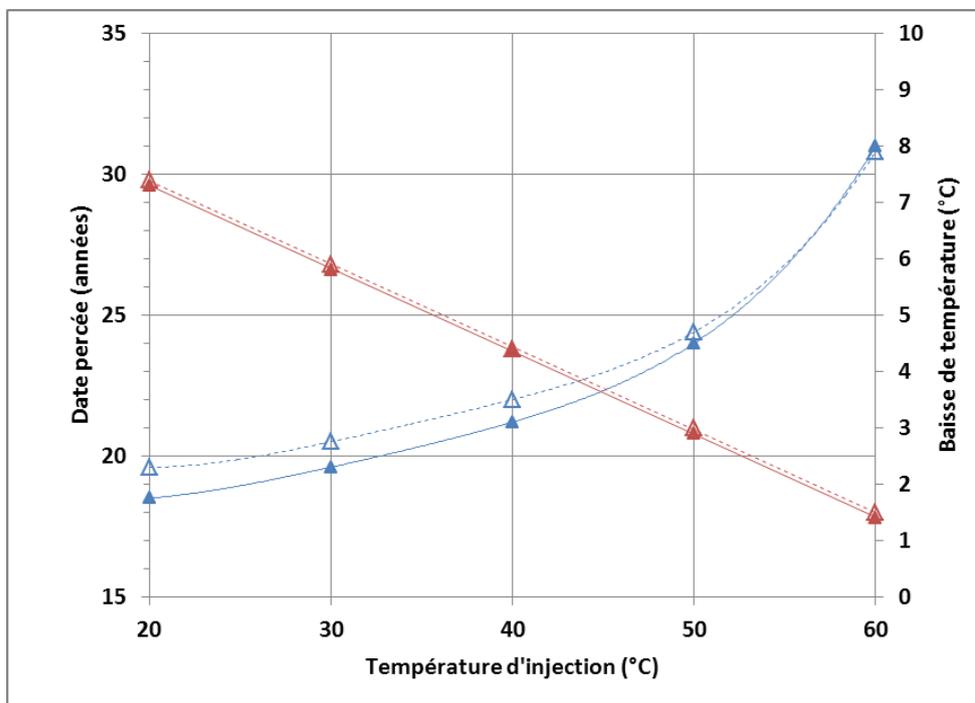


Figure 45 : Evolution de la date de percée (courbes bleues) et de la baisse de température (courbes rouges) en fonction de la température injectée (triangles pleins : modèle bicouches, triangles creux : modèle à 7 couches)

2.6.3. Impact de l'écartement entre puits

Les écartements des impacts des puits des doublets au Dogger varient pour la majorité entre 1000 et 1400 m avec une moyenne de 1240 m. Nous avons étudié pour cette tranche d'intervalle l'amplitude de la percée et de la décroissance thermique obtenue. Le tableau 9 résume pour les trois écartements de puits la date de percée et la baisse de température au bout de 30 et 60 ans. Les figures 46 et 47 montrent respectivement l'évolution de la température de production au cours du temps pour les trois écartements et le temps de percée et la baisse de température au bout de 60 ans en fonction de l'écartement.

Ces résultats indiquent un temps de percée qui varie entre 13 ans (écartement de 1000 m) et 33 ans (écartement de 1400 m), soit une amplitude de 20 ans entre l'écartement le plus petit et le plus grand. Les baisses de température sont respectivement de 4,6 °C et 7 °C au bout de 30 et 60 ans pour l'écartement de 1000 m. Pour l'écartement de 1400 m, la baisse de température est inférieure à 0,5 °C au bout de 30 ans et vaut 2,3 °C au bout de 60 ans. L'accroissement du temps de percée et de la décroissance thermique ne sont pas des fonctions linéaires de la distance entre puits. Une diminution de l'écartement de 200 m réduit le temps de percée de 8,5 ans et accroît la chute de température d'environ 3°C alors qu'une augmentation de l'écartement de 200 m accroît le temps de percée de 11,5 ans et diminue la baisse de température de 2 °C. L'écartement entre puits est donc un facteur important sur le temps de percée et l'amplitude de la décroissance thermique.

Écartement puits (m)	Percée thermique (années)	ΔT au bout de 30 ans (°C)	ΔT au bout de 60 ans (°C)
1000	13	4.6	7
1200	21.5	1.4	4.3
1400	33	-	2.3

Tableau 9 : Résultats de l'étude de sensibilité sur l'écartement des puits (rouge : état de référence)

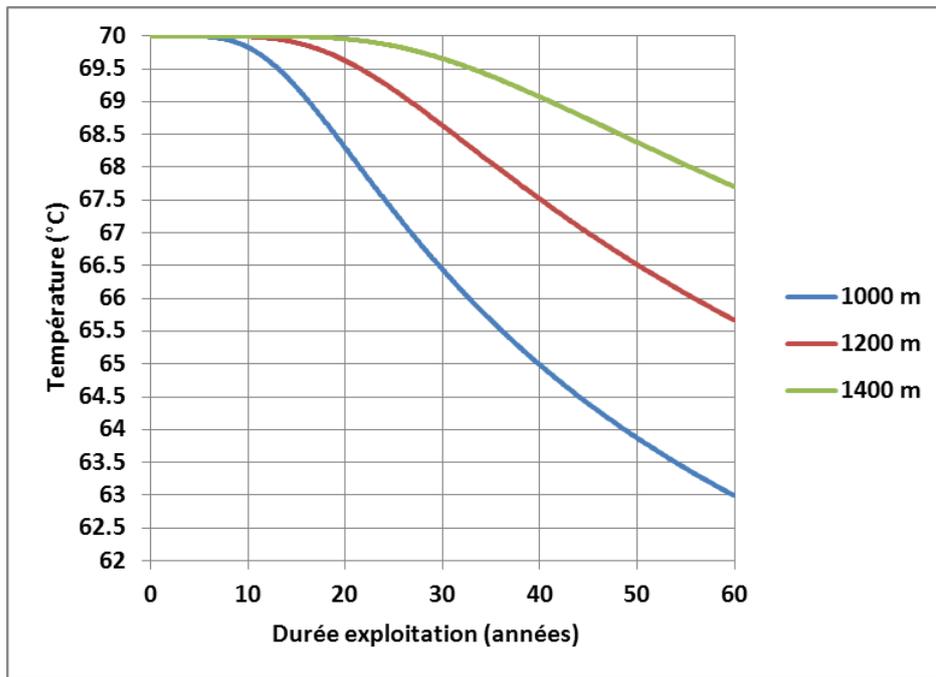


Figure 46 : Evolution de la température de production pour différents écartements de puits

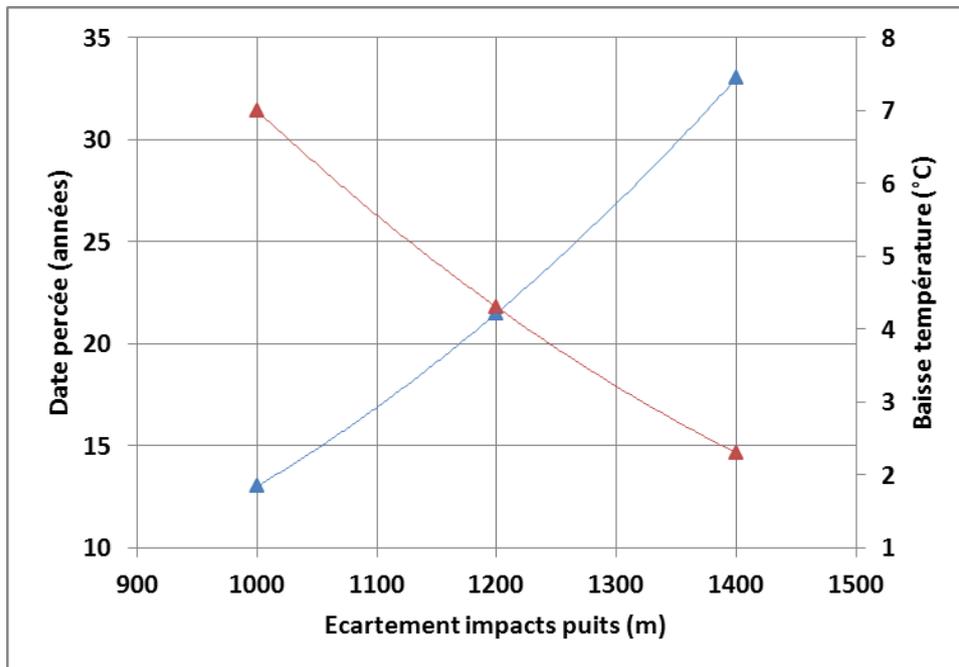


Figure 47 : Evolution de la date de percée (courbe bleue) et de la baisse de température (courbe rouge) en fonction l'écartement entre puits

2.7. CONCLUSION

L'histogramme ci-après (figure 48) synthétise les impacts maximaux sur le temps de percée thermique et la baisse de température pour chacun des 9 paramètres qui ont fait l'objet de l'étude de sensibilité. Il appelle les conclusions suivantes :

- En matière de temps de percée thermique, les paramètres les plus sensibles sont : **le débit d'exploitation, l'écartement entre puits, les épaisseurs des épontes intermédiaires et la température d'injection**. Suivent ensuite les propriétés thermiques de la roche, l'hétérogénéité de la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs et dans une moindre mesure la structure verticale du modèle ;
- En matière de baisse de température, qui quantifie la durabilité de l'exploitation, les paramètres les plus sensibles sont : **le débit d'exploitation, la température d'injection, l'écartement entre puits et la conductivité thermique de la roche**. Suivent ensuite l'épaisseur des épontes, la capacité calorifique, et dans une moindre mesure la dispersivité thermique, l'hétérogénéité de la répartition de la transmissivité au sein des niveaux producteurs et le nombre de niveaux producteurs.

Trois paramètres ont à la fois un impact majeur sur le début de recyclage thermique et sur l'amplitude du refroidissement, il s'agit **du débit, de la température d'injection et de l'écartement entre les puits**. L'écartement entre puits est un paramètre calculé qui est fonction des coordonnées en surface, des coordonnées au toit de la formation, de l'angle d'inclinaison, du nombre de niveaux producteurs et de la contribution de chaque niveau au débit total. L'ensemble de ces données se trouvent dans les DOE (Dossier d'Ouvrage Exécuté) de chacun des puits. Contrairement au débit et à la température d'injection qui sont des données temporelles, les erreurs possibles sur ce paramètre restent limitées. **Au final, le comportement hydrothermique du réservoir est essentiellement contrôlé par le débit et la température de l'eau injectée.**

Ainsi, l'amélioration des modélisations des « bulles froides » au Dogger pour prévoir la durabilité des exploitations géothermiques ne pourra se faire qu'à la condition d'obtenir et archiver des données fiables sur les débits et températures injectés dans l'aquifère du Dogger.

Enfin, on notera que, du fait d'un impact de la structure verticale limitée aux environs immédiats du puits injecteur, **une structure type bicouches ou « sandwich » est suffisante pour prédire le comportement thermique au puits producteur.**

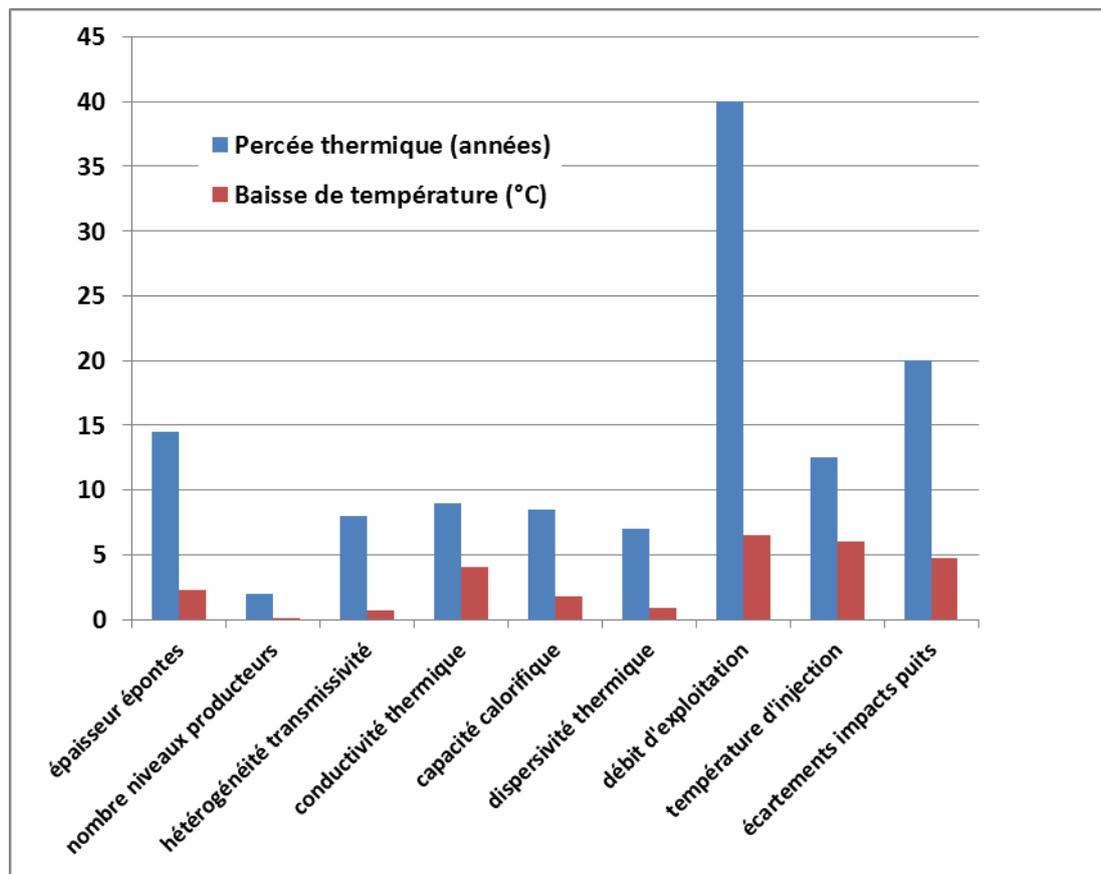


Figure 48 : Impacts maximaux sur la variation du temps de percée et de la baisse de température à la production pour les 9 paramètres étudiés

3. Etude de sensibilité des concentrations en silice et de l'indice de saturation de la calcédoine identifiée comme précurseur potentiel de la percée thermique

3.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le réservoir géothermique du Dogger du bassin de Paris (BP) est exploité de façon importante depuis les années 80 par doublet, ou triplet, de puits avec réinjection du fluide géothermique, ce qui provoque le refroidissement progressif de la ressource. Ainsi, si de nouveaux puits ne sont pas forés, une opération ne peut pas être exploitée indéfiniment en restant économiquement rentable. Prédire le déclin énergétique des installations actuellement en exploitation est donc un enjeu de première importance pour les exploitants.

Or, la dynamique de transfert des traceurs est trois à cinq fois plus rapide que celles des transferts thermiques, en raison des échanges énergétiques entre le fluide, la matrice et les épontes du réservoir (Goyénèche *et al.*, 2005). Les études précédentes, « Gestion du Dogger » (phases 1, 2, 3 et 2010), se sont ainsi attachées à identifier des précurseurs chimiques en regard de l'arrivée du front froid aux puits de production.

La concentration en silicium, et parallèlement les phases qui contrôlent cette concentration (comme la calcédoine), ont ainsi été définies comme « potentiellement indicatrices du refroidissement ». Cependant, ces mêmes études ont montré qu'aucun de ces deux paramètres ne suggère le refroidissement des fluides produits, bien que la chute de température du fluide prélevé sur le site d'Alfortville soit avérée (chute mesurée de 3°C au début 2011). Il semblerait, en fait, que ces deux précurseurs ne soient pas suffisamment sensibles aux variations thermiques.

En conséquence, l'objectif de cette étude est de définir dans quelle mesure ces deux paramètres peuvent être des précurseurs de l'arrivée du front froid.

3.2. ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE L'INDICE DE SATURATION DE LA CALCÉDOINE

3.2.1. Généralités

L'indice de saturation des fluides du Dogger vis-à-vis de la calcédoine est défini par :

$$IS_{\text{calcédoine}} = \log \frac{a(\text{SiO}_2)}{K(T)} \sim \log \frac{m(\text{SiO}_2)}{K(T)}$$

où K est le produit de solubilité de la calcédoine à la température T du fluide, et où, a et m représentent respectivement l'activité et la concentration en solution de l'espèce SiO_2 .

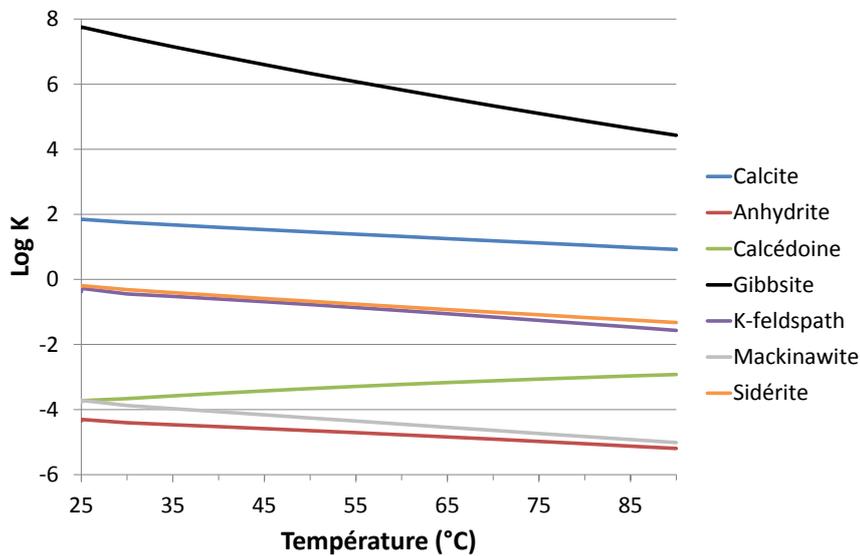


Figure 49 : Evolution du produit de solubilité de la calcédoine en fonction de la température du fluide. Comparaison avec le cas d'autres minéraux.

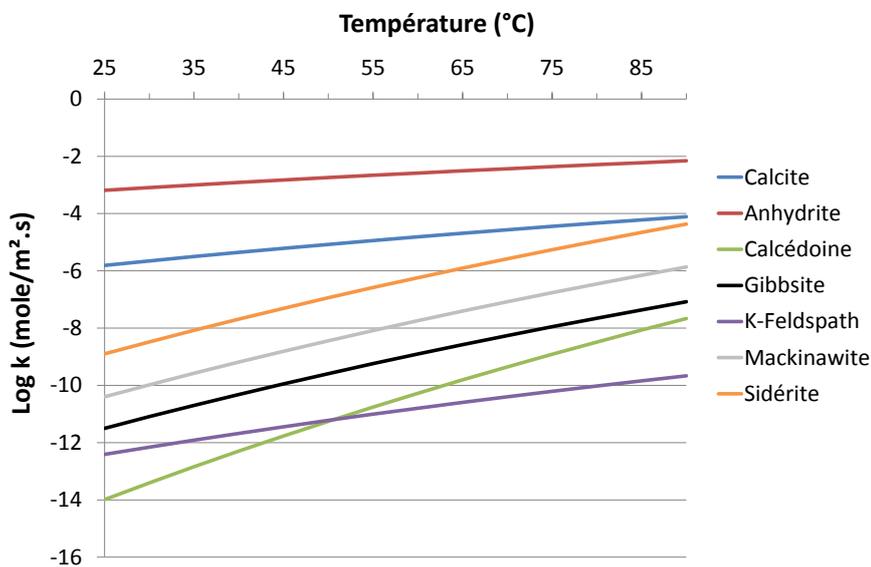


Figure 50 : Dépendance de la constante cinétique de la calcédoine en fonction de la température du fluide. Comparaison avec le cas d'autres minéraux. D'après Palandri et Kharaka, 2004

Le produit de solubilité K de la calcédoine diminue lorsque la température T du fluide diminue (*i.e.* IS augmente, Figure 49). On dit que la calcédoine a un comportement

prograde: elle tend à précipiter lorsque la température diminue. La calcédoine est, de plus, un minéral à cinétique lente. La constante cinétique k de la réaction de précipitation de la calcédoine est de l'ordre de 10^{-10} mole/m²/s à 70°C (Figure 50). Ces raisons expliquent que l'indice de saturation de la calcédoine peut être un **précurseur** de l'arrivée du front froid.

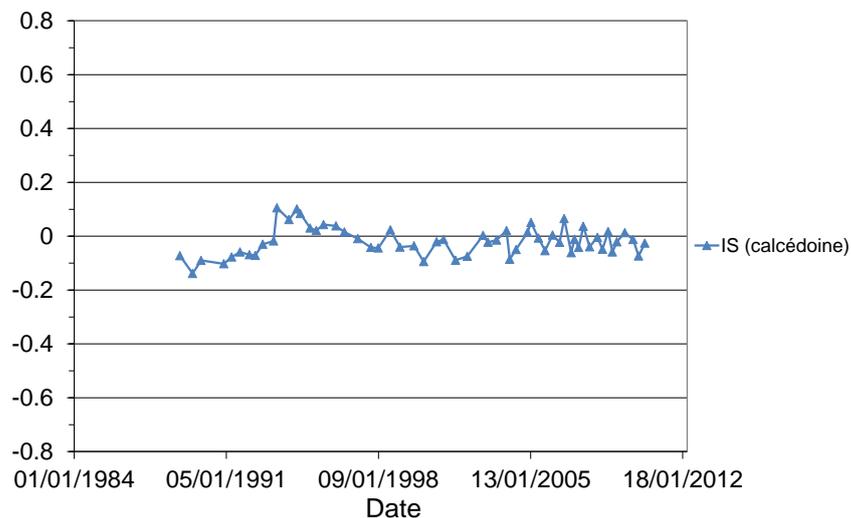


Figure 51 : Evolution de l'IS de la calcédoine du fluide produit sur le site d'Alfortville depuis 1988.

Cependant, au vu des valeurs calculées sur la période 1988-2010 pour le site d'Alfortville (Figure 51, stables autour de 0) alors que le refroidissement du fluide produit est avéré, il semble que l'IS de la calcédoine ne soit pas suffisamment sensible aux variations thermiques. D'où, l'analyse de sensibilité réalisée et présentée ci-dessous.

3.2.2. Déroulement de l'analyse de sensibilité

L'analyse d'eau utilisée dans cette étude provient d'un prélèvement effectué le 05/01/2010 en tête du puits de production géothermique d'Alfortville (GAL2) par CFG Services. Sa composition chimique est détaillée dans le Tableau 10.

Afin d'évaluer la sensibilité de l'IS de la calcédoine aux changements de température du fluide, nous avons progressivement fait varier la température du fluide pris comme référence (Tableau 10) de +/- 5°C. Parallèlement, afin d'estimer l'influence des incertitudes analytiques sur l'IS de la calcédoine, nous avons successivement fait varier la concentration de la silice en solution de +/- 5, 10, 15, 20 et 25%. Tous ces calculs ont été réalisés avec le code géochimique PhreeqC et la base de données thermodynamiques associée phreeqc.dat (Parkhurst et Appelo, 1999).

T (°C)	71.6
pH	6.13
Force ionique	3.59E-01
	mol/kg H₂O
Alcalinité	3.00E-03
Al	1.55E-07
B	1.26E-03
Ba	2.16E-06
C(4)	5.00E-03
Ca	2.32E-02
Cl	3.23E-01
F	1.99E-04
Fe	5.48E-07
K	2.50E-03
Mg	9.36E-03
Mn	7.62E-08
N(-3)	1.21E-03
Na	2.75E-01
S(-2)	5.09E-04
S(6)	9.32E-03
Si	6.20E-04
Sr	5.82E-04

Tableau 10 : Composition chimique du prélèvement d'eau d'Alfortville prise comme référence dans cette étude de sensibilité. Température et pH mesurés en tête de puits.

3.2.3. Résultats

Les résultats de l'étude de sensibilité sont illustrés Figure 52 et Figure 53.

a) Sensibilité de l'IS de la calcédoine aux variations thermiques

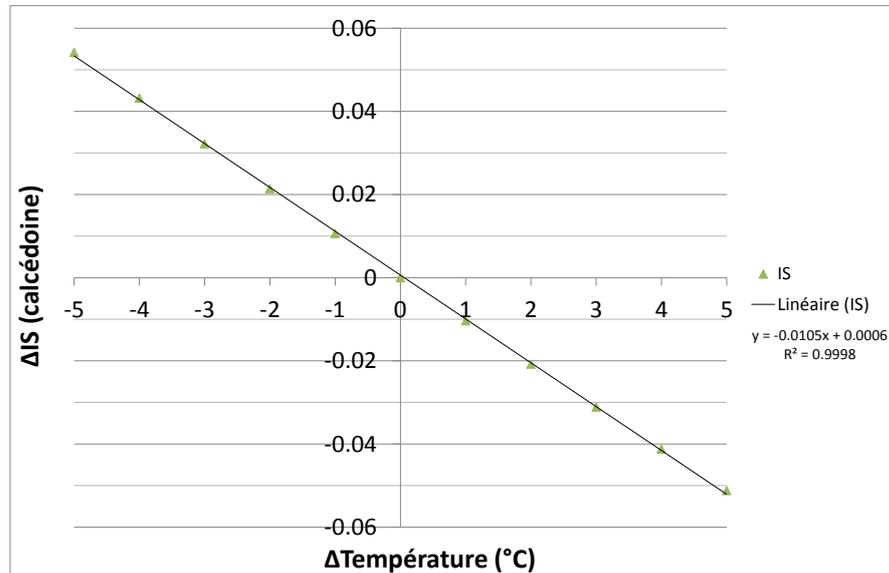


Figure 52 : Sensibilité de l'indice de saturation de la calcédoine à de légers changements de la température du fluide (i.e. température initiale +/- 5°C).

La Figure 52 montre la variation de l'IS de la calcédoine en fonction des changements de température imposés au fluide de référence (+/- 5°C). La variation de l'IS de la calcédoine évolue linéairement avec les écarts de température imposés. Une variation de +/- 1°C de la température du fluide se traduit ainsi par une variation d'environ +/- 0,01 de l'IS de la calcédoine ($\Delta IS_{\text{calcédoine}} = -0.01 \cdot \Delta T$).

Notons cependant qu'il semblerait (Figure 53) que l'amplitude de la variation de l'IS de la calcédoine soit d'autant plus forte (respectivement plus faible) que la température initiale du fluide est faible (respectivement forte). On remarquera ainsi que $\Delta IS_{\text{calcédoine}} = -0.015 \cdot \Delta T$ environ pour un fluide initialement à 40°C, et non $-0.01 \cdot \Delta T$ comme on a pu le calculer pour l'eau de référence initialement à 71,6°C. L'influence de la température initiale (T_0) du fluide sur l'amplitude de la variation de l'IS reste toutefois limitée (+/- 0.005 pour un ΔT_0 de 30°C)².

² La température du Dogger au droit du site d'Alfortville est comprise entre 68 et 78°C. Nous ne disposons donc pas de données d'eau de température initiale inférieure à 68°C. L'influence de la température initiale sur l'amplitude de la variation de l'IS de la calcédoine induit par un écart de température a été étudiée à partir d'une donnée d'eau simplifiée constituée de NaCl et de SiO₂ en solution et représentative de l'eau produite sur le site d'Alfortville.

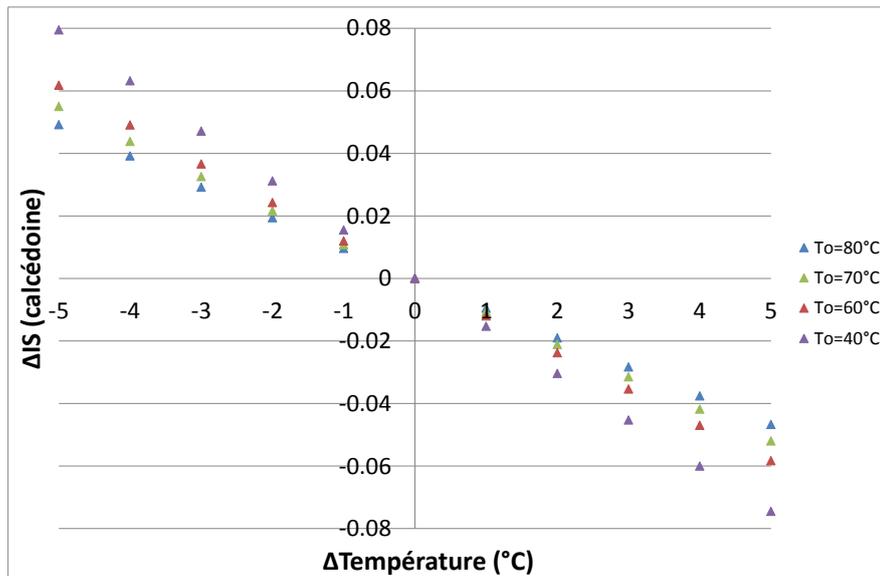


Figure 53 : Influence de la température initiale T_o du fluide prélevé sur la sensibilité de l'IS de la calcédoine aux variations de température.

b) Sensibilité de l'IS de la calcédoine aux incertitudes de mesure

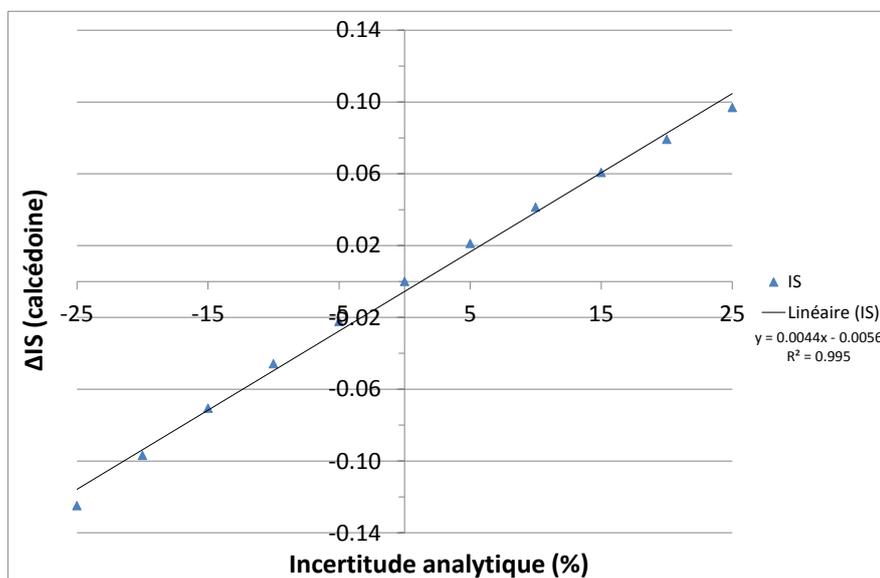


Figure 54 : Sensibilité de l'indice de saturation de la calcédoine aux incertitudes analytiques.

La Figure 54 montre l'influence des incertitudes de mesure de la teneur en SiO_2 dissous (jusqu'à +/- 25%) sur l'IS de la calcédoine. La variation de l'IS de la calcédoine évolue linéairement avec les incertitudes de mesure. Un écart de +/- 5% sur la concentration en SiO_2 se traduit ainsi par une variation d'environ +/- 0,02 de l'IS de la calcédoine ($\Delta\text{IS}_{\text{calcédoine}}=0.0044*\text{Incertitude}-0.0056$).

3.2.4. Conclusion sur la sensibilité de l'IS de la calcédoine

Depuis 1989, le dosage de SiO₂ dissous dans le fluide d'Alfortville est réalisé par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) par le service « Métrologie, Monitoring et Analyse » du BRGM.

L'incertitude analytique du SiO₂ dissous dans le fluide d'Alfortville est actuellement de 15%. L'ICP-AES, et les incertitudes de mesure associées, ont évolué depuis les années 80. Néanmoins, à défaut d'informations supplémentaires, nous avons supposé que la valeur 15% prévalait depuis 1987. Ainsi, on remarquera (Figure 52 et Figure 54) **que l'IS de la calcédoine ne sera pas informatif sur le refroidissement du fluide produit tant que la température n'aura pas chuté de plus de 6°C. La température du fluide produit sur le site d'Alfortville a diminué de 2-3°C depuis la mise en service de la centrale en octobre 1987 (référence). Cette diminution n'est donc pas suffisante pour être identifiée à l'aide de l'IS de la calcédoine.** Il faudrait en effet que l'erreur analytique du SiO₂ dissous soit inférieure ou égale à 5%, ce qui est *a priori* utopiste. Il est, en effet, techniquement délicat d'obtenir des résultats d'analyses corrects de la silice en solution minéralisée comme c'est le cas pour les saumures du Dogger du BP (TDS entre 5 et 35 g/l). La colorimétrie est actuellement la technique la plus adaptée à ce type de solution (comm. pers. Conte). Or, l'incertitude de mesure du SiO₂ associée à cette méthode est de l'ordre de 10%³.

3.3. ANALYSE DES CONCENTRATIONS EN SILICE

3.3.1. Généralités

La calcédoine (SiO₂) est un minéral à comportement prograde : elle est d'autant plus stable que la température diminue. En d'autres termes, elle tend à précipiter lorsque la température diminue. Les eaux du Dogger sont initialement à l'équilibre avec la calcédoine. Une fois refroidies (exploitation géothermique), elles sont donc susceptibles de précipiter de la calcédoine.

³ Pour information, le dosage de SiO₂ dissous dans les fluides produits sur les sites gérés par GPC IP est actuellement réalisé par spectrométrie d'absorption atomique (Atomic Absorption Spectrometry). L'incertitude de mesure du SiO₂ dissous avec cette autre technique est également de l'ordre de 10%.

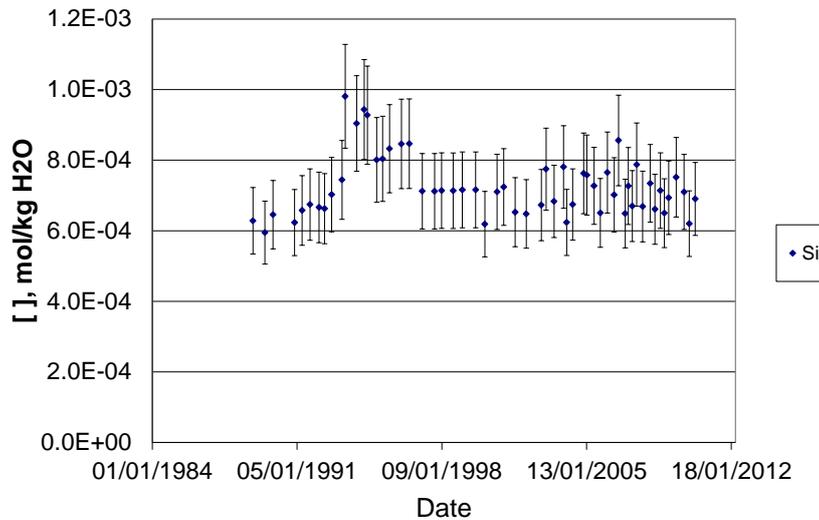


Figure 55 : Evolution des concentrations en Si (mol/kg H₂O) mesurées dans le fluide produit sur le site d'Alfortville depuis 1988.

La cinétique de précipitation de la calcédoine est relativement lente (cf. § 3.2.1 Figure 50 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Néanmoins, il est possible qu'elle ait précipité avant que le fluide ne parvienne au puits de production. Or, au vu des concentrations en Si mesurées depuis 1988 (Figure 55, stable aux erreurs analytiques près), ceci ne semble pas être le cas pour le fluide produit à Alfortville. Mais, encore une fois, il est possible que les incertitudes de mesure nous cachent l'information.

Afin de vérifier cela, nous avons simulé le refroidissement et le réchauffement progressif (migration vers le puits de production) du fluide d'Alfortville, puis nous avons provoqué la mise à l'équilibre (*i.e.* la précipitation) de la calcédoine pour chaque température ainsi simulée. Ces simulations ont été réalisées avec le code géochimique PhreeqC et la base de données phreeqc.dat. Il s'agit ici d'avoir une idée des variations de concentrations en Si potentiellement induites dans le réservoir du Dogger par la réinjection du fluide refroidi.

3.3.2. Résultats

Les résultats obtenus sont illustrés Figure 56 et Figure 57.

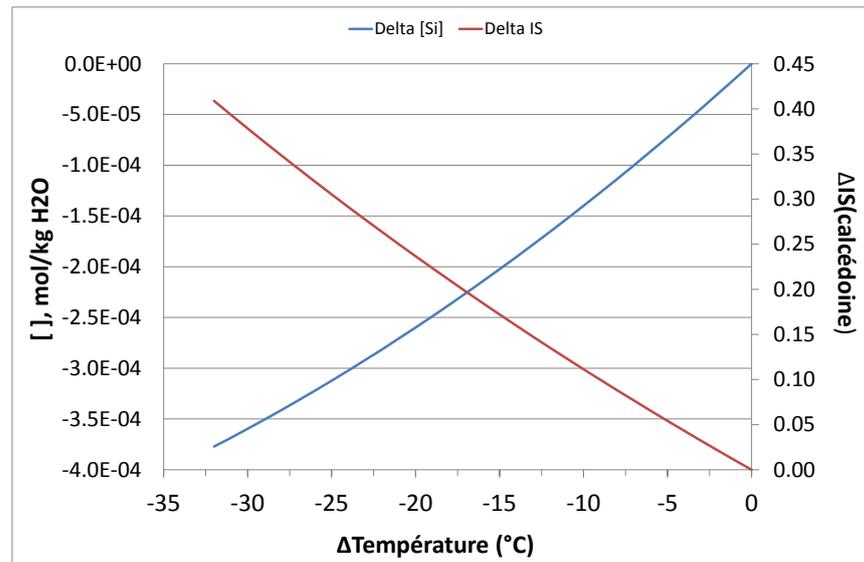


Figure 56 : IS du fluide d'Alfortville vis-à-vis de la calcedoine en fonction de la variation de température imposée, et, variation de la concentration en Si (en mol/kg H₂O) dissous dans le fluide correspondante (ou quantité de Si précipitée).

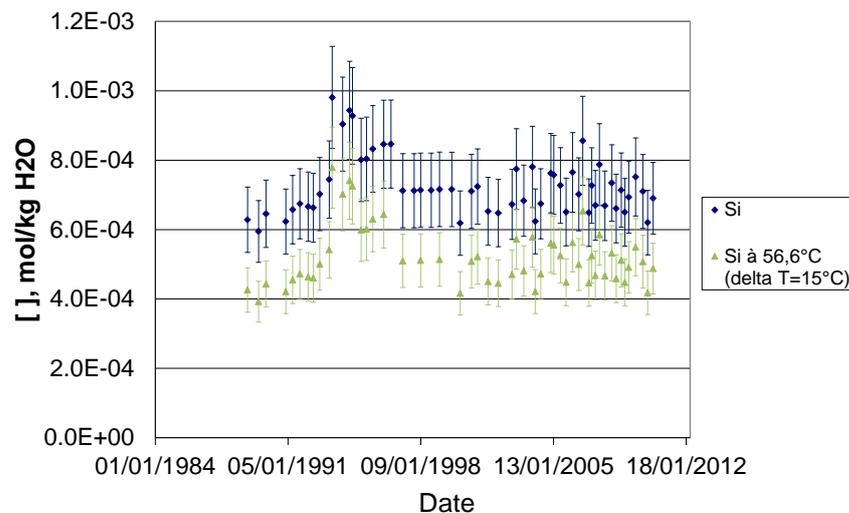


Figure 57 : Variation de la concentration en Si (en mol/kg H₂O) induite par la précipitation de la calcedoine à T=56,6°C (soit pour un $\Delta T=15^\circ\text{C}$).

La Figure 56 montre que plus l'écart de température ΔT entre le fluide produit et le fluide réinjecté est grand, plus la quantité de Si précipitée est importante (jusqu'à $3,77 \cdot 10^{-4}$ mol/kg H₂O pour un ΔT de 32°C ; soit environ 23 ppm). En conséquence, les incertitudes de mesure du SiO₂ dissous dans le fluide d'Alfortville étant de 15%, il apparaît (Figure 57) que la variation de concentration en Si dissous provoquée par la réinjection du fluide exploité ne pourra être observable que si la calcedoine s'équilibre avant que le fluide atteigne 55°C ($\Delta T > 15^\circ\text{C}$). Cet écart de température minimal doit

être considéré avec prudence. En effet, tous les calculs ont été réalisés en « batch ». Ils négligent donc les flux de matière, et ainsi, les phénomènes d'accumulation et/ou d'atténuation des quantités de Si précipitées. De plus, ils supposent que la réaction de précipitation de la calcédoine est instantanée et complète ($IS=0$, équilibre thermodynamique). Les quantités de Si précipitée présentées dans ce paragraphe correspondent donc aux quantités maximales de Si pouvant précipiter depuis le démarrage de l'exploitation. À l'heure actuelle, nous ne pouvons donc pas savoir dans quelle mesure la calcédoine est parvenue à précipiter depuis 1988 (si elle y est parvenue) ni où (à quelle distance du puits de production). Pour ce faire, à l'avenir, il nous paraît nécessaire de considérer des flux de matière « réalistes » en simulant un système ouvert (1D ou 2D), et, de prendre en compte la cinétique de précipitation de la calcédoine. La cinétique de précipitation de la calcédoine pourra alors être précisée et adaptée au contexte du Dogger parisien (présence d'inhibiteurs naturels tels que les sulfates et le bore) par une étude bibliographique préliminaire.

3.4. APPORT DE LA GÉOTHERMOMÉTRIE

3.4.1. Généralités

Les géothermomètres sont des outils couramment utilisés en prospection géothermique pour estimer la température d'un réservoir géothermique à partir de la composition chimique des eaux prélevées. L'utilisation de ces outils en prospection repose sur l'hypothèse que le fluide est à l'équilibre avec les minéraux du réservoir dans les conditions de pression et de température de ce réservoir, et que cet état d'équilibre n'est pas masqué par des variations de composition chimique pouvant intervenir lors de la remontée du fluide en surface, c'est à dire que le rééquilibrage et les mélanges d'eau sont supposés négligeables (Serra et Sanjuan, 2004).

Parmi les géothermomètres « classiques », on retrouve les géothermomètres à silice. Ces géothermomètres sont basés sur l'équilibre du système SiO_2-H_2O , on peut donc imaginer qu'ils puissent nous permettre d'estimer la dernière température d'équilibre de la calcédoine.

3.4.2. Application aux fluides d'Alfortville

Les données utilisées dans cette étude géothermométrique proviennent des mesures périodiques effectuées en tête du puits de production d'Alfortville par CFG Services depuis 1988. Le fluide d'Alfortville est relativement salé (TDS~20 g/l). Or, les géothermomètres à silice sont sensibles à la salinité du fluide (TDS). Nous avons donc utilisé quatre relations géothermométriques (dont deux définies pour des eaux concentrées $Cl \geq 10^{-3}$ M) pour estimer la température du fluide d'Alfortville, et son évolution depuis 1988, à partir des analyses en SiO_2 disponibles. Les formules thermométriques utilisées sont données en annexe 2.

Les résultats obtenus sont illustrés Figure 58.

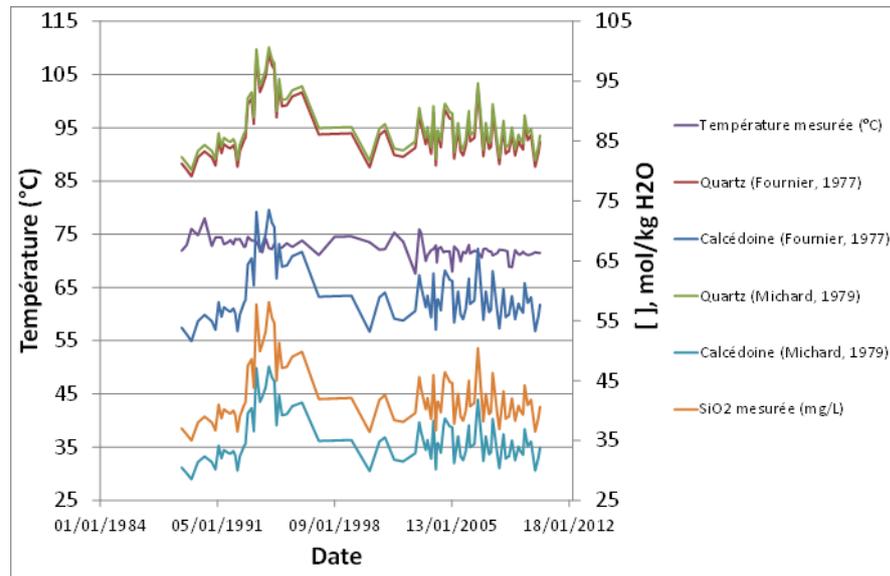


Figure 58 : Application de quatre géothermomètres à silice aux eaux prélevées sur le site d'Alfortville. Comparaison des températures estimées et mesurées au cours du temps.

La Figure 58 montre que les températures estimées avec le géothermomètre à calcédoine proposé par Fournier (1977) sont celles se rapprochant le plus des températures mesurées. Une température estimée par géothermométrie est considérée comme « acceptable » si elle correspond à la température mesurée avec une erreur de +/- 20% (Serra et Sanjuan, 2004). Ainsi, parmi les géothermomètres utilisés, seul le thermomètre à calcédoine de Fournier (1977) donne des valeurs de température « correctes ». Néanmoins, quel que soit le géothermomètre utilisé, on remarquera que les températures estimées entre 1993 et 1996 sont plus fortes que la moyenne (de l'ordre de 15%) ; ce qui paraît surprenant sachant que la ressource géothermale refroidi depuis 1988. Les équations des géothermomètres à silice sont directement exprimées en fonction de la concentration en silice mesurée (Annexe 1). Les températures estimées à partir de ces géothermomètres sont donc sensibles aux erreurs de mesure faites sur ces concentrations. Or, entre 1993 et 1996, les concentrations en SiO_2 dosées sont 20% plus fortes que la moyenne. On peut donc facilement imaginer qu'elles sont erronées, et donc, que les températures estimées à partir de ces concentrations le sont aussi.

Pour illustrer l'influence des incertitudes analytiques sur la « fiabilité » des géothermomètres à silice, nous avons successivement fait varier la concentration de silice en solution dans le prélèvement du 05/01/2010 (Tableau 10) de +/- 5, 10, 15, 20 et 25%. Tous ces calculs ont été réalisés avec le code géochimique PhreeqC et la base de données thermodynamiques associée phreeqc.dat. Les résultats sont illustrés Figure 59.

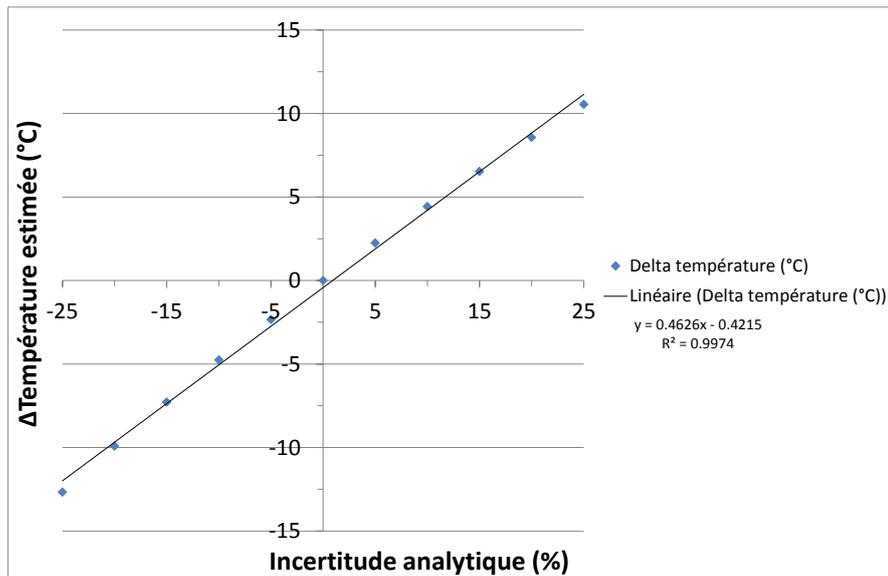


Figure 59 : Sensibilité du géothermomètre à calcédoine aux incertitudes analytiques.

L'influence des incertitudes de mesure du SiO_2 (jusqu'à +/- 25%) sur la température estimée à l'aide du géothermomètre à calcédoine est linéaire. Une erreur analytique de +/- 15% (valeur admise pour Alfortville, § 3.2.43.2) sur la concentration en SiO_2 se traduit ainsi par une variation d'environ +/- 7°C sur la température estimée ($\Delta T_{\text{estimée}} = 0.4826 \cdot \text{Incertitude} - 0.4215$).

L'augmentation de température observée entre 1993 et 1996 est donc bien négligeable. La température du fluide d'Alfortville serait ainsi constante depuis 1988 d'après les géothermomètres utilisés (Figure 588). De ce fait, il semble à nouveau possible que la calcédoine n'ait pas encore précipité du fait du refroidissement, ou plus vraisemblablement que les incertitudes de mesure sur le SiO_2 soient trop importantes pour que les géothermomètres soient informatifs.

3.5. CONCLUSION

Les données d'analyses de la silice en solution actuellement disponibles ne permettent pas d'identifier de façon certaine l'annonce de l'approche du front froid. En effet, pour ce faire, il paraît indispensable d'améliorer la qualité des analyses réalisées. Cependant, les techniques analytiques actuelles ne permettent pas *a priori* (comm. pers. Conte) de doser la silice dissoute dans les fluides du Dogger (relativement minéralisé) avec une incertitude inférieure à 10% (erreur minimale admise avec des méthodes comme la colorimétrie par ex.). Néanmoins, utiliser de telles techniques améliorerait sensiblement les résultats des sites gérés par les bureaux d'étude sous-sol comme Alfortville (incertitude de 15%). De ce fait, on peut imaginer qu'identifier les possibles évolutions de la concentration en silice dissoute dans les fluides du Dogger sera plus aisé. Cependant, avec une incertitude de 10%, la température du fluide produit doit avoir chuté d'au moins 5°C pour pouvoir être observée à l'aide des géothermomètres à silice et de l'IS de la calcédoine. Il est à noter par ailleurs que

l'étude réalisée ne considère pas le mélange de fluide au puits producteur qui au moment de la percée thermique est constitué majoritairement (à environ 70-80%) d'un fluide non perturbé présent initialement dans le réservoir.

L'utilisation de ces paramètres comme précurseurs de l'arrivée du front froid ne semble ainsi pas adaptée.

4. Finalisation de l'exercice d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet d'Alfortville

4.1. OBJECTIF DE L'EXERCICE

Un premier exercice d'inter-comparaison entre différents modèles conceptuels et équipes de modélisation (ANTEA, CFG-Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM) avait été réalisé dans le cadre du projet PSP10GTH21 de la convention BRGM-ADEME 2010 n° 09 05 C0016. Cet exercice avait pour objectif de comparer les méthodes de modélisation des différents intervenants sur le Dogger en région Parisienne en réalisant, dans un premier temps, la simulation d'un doublet géothermique pour des hypothèses particulières où l'on connaît une solution analytique et dans un second temps une simulation sur les données d'un doublet type (Alfortville) en région Parisienne (**sans prise en compte des doublets voisins**) pour étudier la variabilité des résultats obtenus (cf. rapport BRGM/RP-59591-FR). Cette troisième et dernière partie de l'exercice d'inter-comparaison a consisté à **reprendre la simulation du doublet d'Alfortville en prenant en compte les doublets avoisinants dans un rayon de 5 km** et de comparer l'évolution de la température de production aux mesures réalisées en tête de puits producteur.

4.2. CONTEXTE ET DONNÉES POUR LA MODÉLISATION

Le doublet d'Alfortville se situe dans le secteur du Val-de-Marne qui est le département qui compte actuellement la plus forte densité de doublets (20 doublets sur les 35 doublets en exploitation en Ile-de-France). Cette forte densité implique d'une part, une bonne connaissance du réservoir dans ce secteur et d'autre part, la nécessité d'avoir un outil d'aide à la gestion du réservoir du Dogger pour une prévision à moyen et long termes de la durée de vie des opérations géothermiques.

La modélisation du comportement hydrothermique du réservoir est donc un élément essentiel, mais la précision des modèles dépend d'une part, de la qualité et quantité des données disponibles et d'autre part, des données de référence disponibles pour calibrer les modèles. Ce sont ces dernières données qui font le plus défaut, car contrairement à la gestion des ressources en eau où l'on dispose de piézomètres pour calibrer les modèles, dans le cas de l'exploitation de la ressource géothermique, les seules données disponibles sont les mesures en tête de puits. Or, actuellement, une baisse de température sensible (de l'ordre de 3°C) n'est observée que pour un seul doublet. Les mesures de température en tête de puits sont d'ailleurs parfois difficiles à interpréter, du fait qu'elles ne sont pas stables mais varient avec le débit d'exploitation. Ainsi une baisse mesurée en tête n'est pas forcément le signe d'un refroidissement du réservoir, elle ne l'est que si cette tendance est confirmée dans le temps ce qui est le cas du doublet d'Alfortville. Pour cette raison ce doublet a été choisi comme doublet d'étude pour l'exercice d'inter-comparaison.

Les données pour la modélisation sont :

- Les données issues de l'interprétation des tests de flowmétrie (nombre de niveaux producteurs, épaisseurs productrices, épaisseurs des niveaux non producteurs)
- Les données issues de l'interprétation des essais de production (transmissivité, température de fond)
- Les données d'exploitation moyennées au pas mensuel (débit et température d'injection)

Le BRGM, qui gère la base de données Dogger, a fourni ces données à l'ensemble des équipes du groupe modélisation pour le doublet d'Alfortville et les 11 doublets environnants (Maisons Alfort I et II, Créteil, Bonneuil-sur-Marne, Villeneuve St Georges, Orly 1 Gazier, Orly 2 Le Nouvelet et Orly 2 Le Nouvelet 2, Thiais, Chevilly-Larue et Ivry-sur-Seine). La figure 60 montre la zone d'étude.

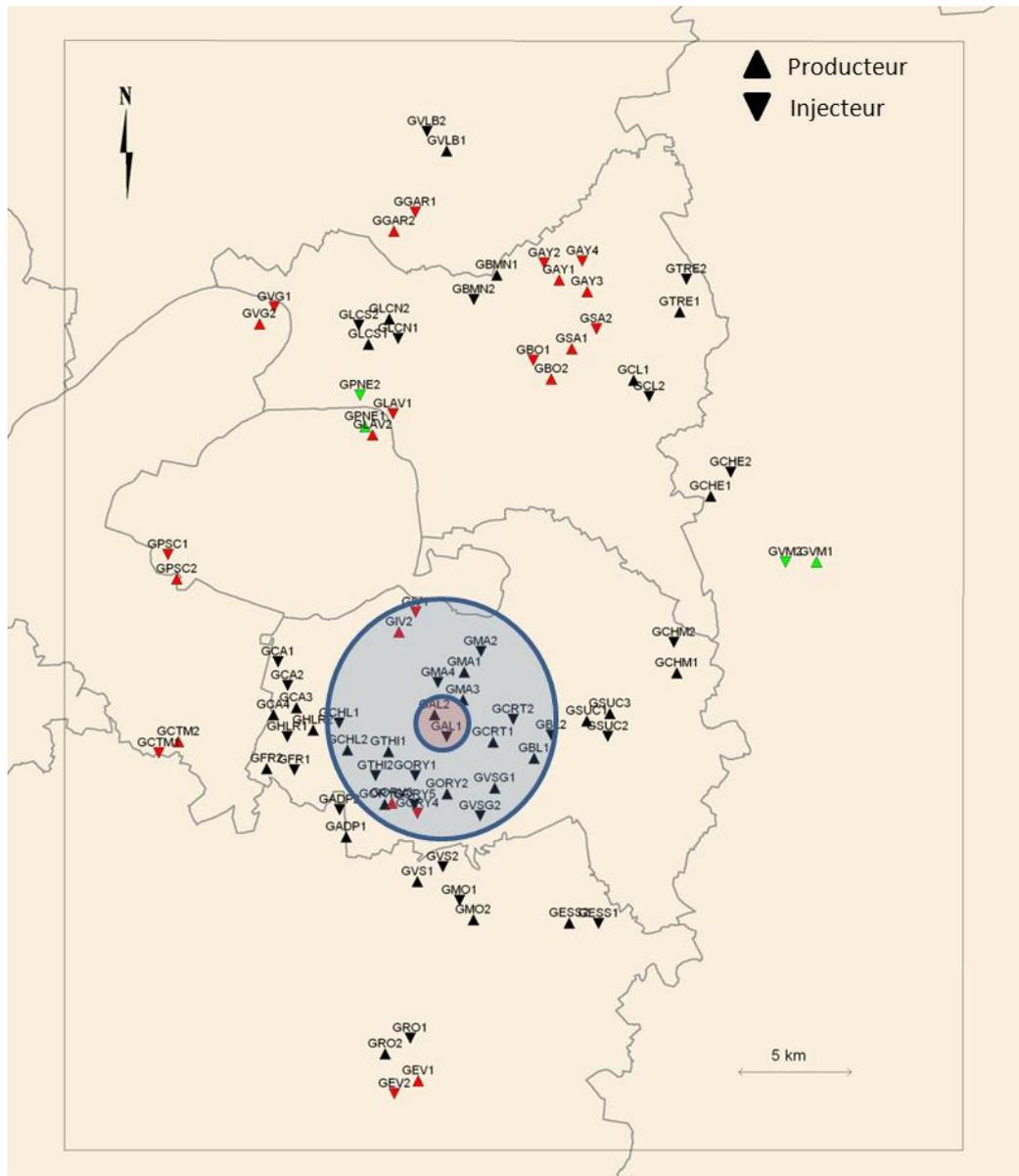


Figure 60: Carte des doublets en région parisienne avec indication des doublets pris en considération dans le cercle bleu.(source : Rapport BRGM/RP-59845-FR)

4.3. HYPOTHÈSES POUR LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Chaque équipe a été libre du choix de la structure du réservoir, ainsi que du traitement des données (moyennes, interpolation par krigeage, etc.). Par ailleurs les logiciels utilisés pour chaque équipe sont les mêmes que dans l'étude précédente, c'est-à-dire des codes de calcul aux éléments finis comme METIS pour Mines ParisTech et

COMSOL pour CFG Services et des codes de calcul aux différences ou volumes finis comme TOUGH2 pour GPC I&P et MARTHE pour ANTEA et le BRGM. Le tableau 11 résume les caractéristiques des différents modèles pour chacun des modélisateurs.

Deux types de structure verticale ont été simulées : un modèle monocouche équivalent et un modèle bicouche équivalent ou « sandwich » (Antics *et al*, 2005). On rappelle que dans le premier cas les niveaux producteurs sont cumulés en une seule couche productrice (rôle thermique des épontes intermédiaires non pris en compte) et dans le second cas, les niveaux producteurs sont cumulés et scindés en deux couches productrices symétriques séparées par une éponte intermédiaire correspondant au cumul des niveaux non producteurs.

L'épaisseur cumulée productrice a été krigée sur la zone d'étude par l'ensemble des modélisateurs. La transmissivité a été krigée, soit directement à partir des données aux forages et la répartition de la perméabilité intrinsèque déduite des cartes de transmissivités et des épaisseurs krigées (BRGM, CFG, Mines ParisTech), soit il a été calculé une perméabilité intrinsèque ponctuelle au forage à partir des données de l'épaisseur et de la transmissivité et la perméabilité a ensuite été krigée (ANTEA, GPC). Le champ de température a également été krigé à partir des mesures de température réalisées en fond de forage lors des essais de production par l'ensemble des équipes excepté ANTEA qui a choisi de prendre une température constante sur l'ensemble du domaine et égale à la température mesurée au puits producteur d'Alfortville.

Les différentes méthodes pour l'estimation régionale des paramètres (épaisseur, perméabilité, température) donnent des résultats similaires qui peuvent différer un peu suivant le modèle de variogramme utilisé pour l'interpolation des données (portée, palier, anisotropie, dérive, etc.). Les résultats des interpolations ne sont pas détaillés ici mais sont visibles dans les annexes 2 à 5 et le rapport BRGM/RP-59845-FR. Les débits et températures d'injection sont issus de la base Dogger et moyennés au pas mensuel. Ces données ont été utilisées à ce pas par les équipes ANTEA, BRGM et MINES. Des moyennes saisonnières de débits et températures d'injection (été/hivers) ont été prises par GPC I&P. Enfin des débits et températures moyennés sur la durée de l'exploitation ont été utilisés par CFG Services. Pour la porosité, contrôlant pour partie les propriétés thermique des couches productrices et des épontes, ce paramètre a été moyenné pour le réservoir par l'ensemble des équipes (valeur prise entre 15 et 18%) excepté pour GPC I&P qui a également krigé ce paramètre (valeurs comprises entre 12 et 20%). La porosité des épontes a été prise en général plus faible voire nulle.

Enfin les propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique volumique) ont été, soit prises similaires pour le réservoir et les épontes, soit différenciées avec des propriétés thermiques moins bonnes pour les épontes. La conductivité thermique de la roche est comprise entre 2,5 et 3 W/m/°C pour la partie productrice, 2,1 et 3 W/m/°C pour les épontes et la capacité calorifique entre 2,16 et 2,5 MJ/m³/°C pour le réservoir et 2,1 et 2,2 MJ/m³/°C pour les épontes. Le phénomène de dispersion cinétique (hétérogénéité locale du champ de vitesse) est défini au choix des modélisateurs (prise en compte ou non d'une composante de dispersivité longitudinale et transversale à l'écoulement).

	ANTEA	BRGM	CFG	GPC	MINES
Structure verticale	Monocouche	Bicouches	Monocouche	Bicouches	Monocouche
Traitement paramètres hydrodynamiques (transmissivités ou perméabilités, épaisseurs)	Krigeage	Krigeage	Krigeage	Krigeage	Krigeage
Température initiale	Constante 75°C	Krigée	Krigée	Krigée	Krigée
Charge ou pression initiale	124 m	120 m	170 bars	169 bars	0 m
Débits et températures d'injection	Variables au pas mensuel	Variables au pas mensuel	Moyennés	Variables saisonnières (été/hivers)	Variables au pas mensuel
Porosité des niveaux producteurs	18 %	15 %	15.5 %	krigée	-
Porosité des épontes	10 %	1 %	0 %	0.01 %	-
Conductivité thermique de la roche (réservoir)	2.5 W/m/°C	3 W/m/°C	2.5 W/m/°C	2.5 W/m/°C	2.5 W/m/°C (conductivité globale aquifère)
Conductivité thermique de la roche (épontes)	2.5 W/m/°C	3 W/m/°C	2.5 W/m/°C	2.1 W/m/°C	2.5 W/m/°C (conductivité globale éponte)
Capacité calorifique de la roche (réservoir)	2.16 MJ/m ³ /°C	2.2 MJ/m ³ /°C	2.16 MJ/m ³ /°C	2.5 MJ/m ³ /°C	2.5 MJ/m ³ /°C (capacité globale aquifère)
Capacité calorifique de la roche (épontes)	2.16 MJ/m ³ /°C	2.2 MJ/m ³ /°C	2.16 MJ/m ³ /°C	2.1 MJ/m ³ /°C	2.1 MJ/m ³ /°C (capacité globale éponte)
Dispersivité thermique longitudinale et transversale (α_l, α_t)	(10m ; 1m)	(20m ; 10m)	(10m ; 1m)	(0 ; 0)	(2m ; 0.5m) ou (20m ; 1m)

Tableau 11 : Caractéristiques des modèles pour chaque équipe de modélisation

4.4. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

L'ensemble des résultats des modélisations effectuées est détaillé pour chaque équipe dans les annexes 2 à 5.

Nous présentons ici la synthèse des résultats obtenus pour le doublet d'Alfortville qui est le doublet cible de l'étude et pour lequel les données de température en tête de puits montrent une baisse de l'ordre de 3°C depuis le démarrage de l'exploitation en octobre 1987. La figure 61 compare les 5 courbes de la température simulée en fond de puits sur laquelle on a, par ailleurs, fait figurer les mesures de température en tête de puits. La température mesurée en fond de puits au puits producteur d'Alfortville en fin de forage était de 75,2 °C. Lors du démarrage de l'exploitation, la température mesurée en tête est proche de 74 °C. Cette différence de température entre le fonds et la surface est fonction du débit et s'explique par les pertes thermiques le long du forage. **Ainsi pour comparer les résultats aux mesures effectuées en tête, l'interprétation est faite en regardant d'une part, le temps de percée (écart de température >0,5 °C par rapport à la température initiale) et d'autre part, l'amplitude de la décroissance thermique fin 2010.** Ceci est fait à la fois sur chacune des courbes simulées et également sur les mesures ponctuelles en tête de puits. Le tableau 12 résume les écarts relatifs entre modèles et mesures sur la percée et la baisse de température fin 2010.

Suivant les modèles, **la percée thermique simulée au doublet d'Alfortville se situe entre 1996 et 2003, et la décroissance thermique fin 2010 varie entre 1,5 et 3,8 °C. Les modèles encadrent donc les données observées en tête avec une percée entre 1999 et 2002 et un ΔT de l'ordre de 3 °C à fin 2010.** Les disparités observées entre les différentes courbes de température ne sont pas liées à la structure verticale du modèle puisque les modèles de même structure verticale ne donnent pas des résultats similaires. De même, les données des épaisseurs des couches productives, des transmissivités, de la température initiale et les données d'exploitation sont des données communes à l'ensemble des modélisateurs avec néanmoins un traitement spécifique pour chacun. Les paramètres qui doivent expliquer ces différences semblent être les propriétés thermiques des couches productrices et des épontes qui ne sont pas prises identiques et qui ont une influence non négligeable sur les transferts thermiques (en particulier la conductivité thermique et la capacité calorifique) comme l'a montré l'étude de sensibilité (chapitre 2).

On peut par ailleurs noter que la simulation la plus pessimiste pour la prédiction du refroidissement au puits de production est un modèle type bicouches équivalent (avec prise en compte des épontes intermédiaires) et le plus optimiste un modèle monocouche (non prise en compte des épontes intermédiaires). Dans ce cas, les propriétés thermiques ont un impact plus important que le stock de chaleur contenu dans les épontes intermédiaires au droit du doublet d'Alfortville ce qui n'est pas une observation générale car le comportement dépend de l'épaisseur des épontes intermédiaires.

Une autre remarque concerne **le doublet de Maisons-Alfort 1** pour lequel l'ensemble des courbes de température simulée (cf. annexes) montre, **suivant les modèles, une**

décroissance thermique comprise en 1 et 3 °C à fin 2010. Or, les données de température en tête depuis le début de l'exploitation du doublet sont relativement stables et ne montrent pas cette évolution. Afin de mieux contraindre le calage des modèles il serait donc important d'avoir des données de température directement en fond de puits non perturbées par les pertes conductives le long du forage. Des prototypes de mesures sur des puits en exploitation vont être proposés en 2012, à la demande du BRGM, par les deux bureaux d'étude principaux (CFG Services et GPC I&P) intervenant en tant que maîtres d'œuvre sur les puits géothermiques en Ile-de-France.

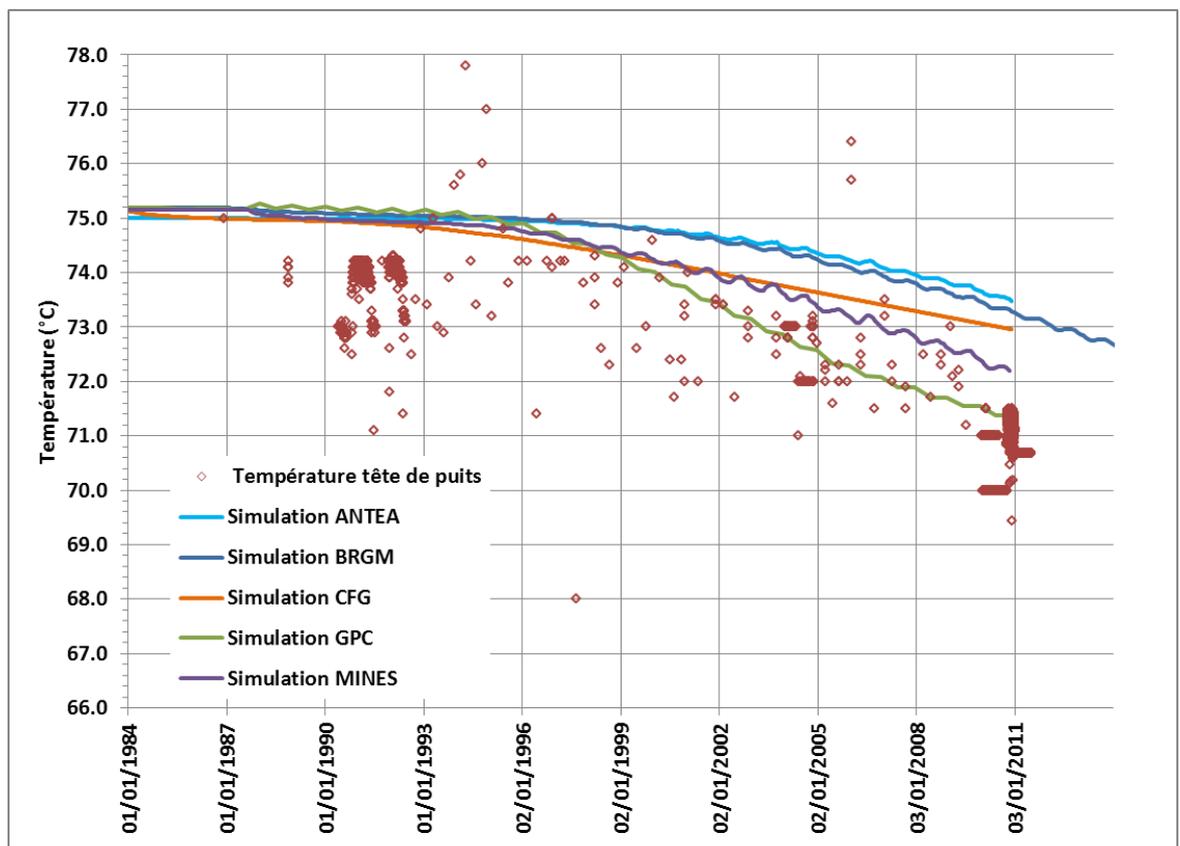


Figure 61 : Température simulée en fond de puits de production d'Alfortville jusqu'à fin 2010 par les différentes équipes de modélisation. Comparaison avec les données en tête de puits.

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

Tableau 12 : Comparaison des résultats pour la percée thermique ($\Delta T > 0,5$ °C) et la baisse de température à fin 2010

4.5. CONCLUSION

Ce chapitre achève le travail d'inter-comparaison sur la modélisation du doublet géothermique d'Alfortville, pris dans son contexte régional, par les cinq équipes en modélisation ayant participées à l'étude (ANTEA, CFG Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM). Il conduit à deux conclusions :

- Les décroissances thermiques prédites au puits producteur d'Alfortville fin 2010 par les différents modèles varient de l'ordre de 2°C. **La variabilité des résultats obtenus semble plus venir des propriétés thermiques utilisées que de la structure verticale du modèle (monocouche ou bicouches) ou des paramètres hydrodynamiques (épaisseur productrice, transmissivité) et d'exploitation (débits, température de réinjection) qui sont issus de la base Dogger.**
- Afin de mieux contraindre les modèles, et, de ce fait, améliorer les prévisions de la durée de vie des exploitations, il serait utile d'avoir des mesures de température en fond non perturbées par le comportement hydraulique et thermique le long du tubage. Des prototypes d'instrumentation de puits en exploitation seront ainsi proposés en 2012, sur projet BRGM, par les deux principaux intervenants en maîtrise d'œuvre sur les doublets en Ile-de-France.

5. Conclusions

Ce rapport intermédiaire de la Gestion du Dogger 2011 répond aux objectifs suivants :

- Déterminer quels sont les paramètres qui ont la plus grande incidence sur les transferts hydrauliques et thermiques induits par l'exploitation géothermique au Dogger, en ce qui concerne en particulier le temps de percée thermique et l'amplitude du refroidissement du fluide prélevé ;
- Déterminer si l'analyse des concentrations en silice et l'indice de saturation de la calcédoine peuvent être des indicateurs potentiels de la percée thermique, et en particulier à quelle variation de température ils sont sensibles;
- Finaliser l'exercice d'intercomparaison sur le doublet d'Alfortville dans son contexte régional entre les différentes équipes de modélisation au Dogger (ANTEA, CFG Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM).

Trois paramètres ont à la fois un impact majeur sur le début de recyclage thermique et sur l'amplitude du refroidissement. Il s'agit **du débit, de la température d'injection et de l'écartement entre les puits.**

L'écartement entre puits est un paramètre calculé qui est fonction des coordonnées en surface, des coordonnées au toit de la formation, de l'angle d'inclinaison, du nombre de niveaux producteurs et de la contribution de chaque niveau au débit total.

L'ensemble de ces données se trouve dans le DOE (Dossier d'Ouvrage Exécuté) de chacun des puits. Contrairement au débit et à la température d'injection, qui sont des données temporelles, les erreurs possibles sur ce paramètre restent limitées. **Au final, le comportement hydrothermique du réservoir est essentiellement contrôlé par le débit et la température de l'eau injectée.** Ainsi l'amélioration des modélisations des « bulles froides » au Dogger pour prévoir la durabilité des exploitations géothermiques ne pourra se faire qu'à la condition d'une obtention de données fiables sur les débits et températures injectés dans l'aquifère du Dogger.

Les données d'analyses de la silice en solution, actuellement disponibles, ne permettent pas d'identifier de façon certaine l'approche du front froid. En effet, pour ce faire, il paraît indispensable d'améliorer la qualité des analyses réalisées. Cependant, les techniques analytiques actuelles ne permettent pas *a priori* (comm. pers. Conte) de doser la silice dissoute dans les fluides du Dogger (relativement minéralisé) avec une incertitude inférieure à 10% (erreur minimale admise avec des méthodes comme la colorimétrie par ex.). Néanmoins, utiliser de telles techniques améliorerait sensiblement les résultats des analyses faites actuellement (incertitude de 15%). **Par contre, avec une incertitude de 10% sur la mesure, la température du fluide produit doit avoir chuté d'au moins 5°C pour pouvoir être observée à l'aide des géothermomètres à silice et de l'IS de la calcédoine.** Il est à noter, par ailleurs, que l'étude réalisée ne considère pas le mélange de fluides au puits producteur qui au moment de la percée thermique est

constitué majoritairement (à environ 70-80%) d'un fluide non perturbé présent initialement dans le réservoir. **L'utilisation de ces paramètres comme précurseurs de l'arrivée du front froid ne semble ainsi pas adaptée.**

Le travail d'inter-comparaison sur la modélisation sur le doublet d'Alfortville pris dans son contexte régional par les cinq équipes en modélisation ayant participées à l'étude (ANTEA, CFG Services, GPC I&P, Mines ParisTech et BRGM) amène à deux conclusions :

- **Les décroissances thermiques prédites au puits producteur d'Alfortville fin 2010 par les différents modèles varient de l'ordre de 2°C** La variabilité des résultats obtenus semble plus venir des propriétés thermiques utilisées que de la structure verticale du modèle (monocouche ou bicouches) ou des paramètres hydrodynamiques (épaisseur productrice, transmissivité) et d'exploitation (débits, température de réinjection) qui sont issus de la base Dogger.
- **Afin de mieux contraindre les modèles, et, de ce fait, améliorer les prévisions de la durée de vie des exploitations, il serait utile d'avoir des mesures de température en fond non perturbées par le comportement hydraulique et thermique le long du tubage.** Des prototypes d'instrumentation de puits en exploitation seront ainsi proposés en 2012, à la demande du BRGM, par les deux principaux intervenants en maîtrise d'œuvre sur les doublets en Ile-de-France.

6. Bibliographie

Antics M., Papachristou M., Ungemach P. (2005) – Sustainable Heat Mining. A Reservoir Engineering Approach. In Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, January 31-February 2, 2005.

Fournier R. O. (1977) – Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, Vol. 5, pp. 41-50.

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

Goyénèche O., Desplan A., Bretteville V., Fabris H., 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, 110 p., 35 fig., 5 ann.

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

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

Le Brun M., Hamm V., Lopez S., Antics M., Ausseur J.Y., Cordier E., Giuglarie E., Goblet P., Lalos P., Ungemach P., Goyénèche O. (2011) – Pratiques de modélisation hydraulique et thermique pour des exploitations géothermiques au Dogger dans la région parisienne. Rapport final. BRGM/RP-59591-FR, 102p, 34 fig., 8 ann.

Michard G. (1979) – Géothermomètres chimiques. *Bull. du BRGM (2ème série)*, Section III, n°2, p. 183-189.

Palandri J. –L., Kharaka Y. –K. (2004) – A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modelling. U.S. Geological Survey Report 2004-1068.

Parkurst D.L., Appelo C.A.J. (1999) - User's guide to PHREEQC (version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p.

Serra H., Sanjuan B. (2004) – Synthèse bibliographique des géothermomètres chimiques appliqués aux eaux géothermales. Rapport final BRGM/RP-52430-FR, 79 p., 4 ann.

Annexe 1

Equations des géothermomètres utilisées

Géothermomètre	Equations	Référence
Quartz, pas de perte de vapeur	$T(^{\circ}C) = \frac{1309}{5,19 - \log SiO_2} - 273,15$ <p style="text-align: center;">SiO₂ en ppm</p>	Fournier (1977)
Calcédoine	$T(^{\circ}C) = \frac{1032}{4,69 - \log SiO_2} - 273,15$ <p style="text-align: center;">SiO₂ en ppm</p>	
Quartz, eaux très concentrées (Cl ≥ 10 ⁻³ M) avec une faible teneur en silice	$T(^{\circ}C) = \frac{1322}{0,435 - \log SiO_2} - 273,15$ <p style="text-align: center;">SiO₂ en mol/l</p>	Michard (1979)
Calcédoine, eaux très concentrées (Cl ≥ 10 ⁻³ M) avec une faible teneur en silice	$T(^{\circ}C) = \frac{1015}{0,125 - \log SiO_2} - 273,15$ <p style="text-align: center;">SiO₂ en mol/l</p>	

Annexe 2

Rapport technique d'ANTEA

Groupe de travail

Modélisation au DOGGER

Phase 2 : Prise en compte de l'environnement du doublet d'ALFORTVILLE

*Octobre 2011
A 64057/A*

BRGM
3 avenue Claude GUILLEMIN
BP36009
45060 ORLÉANS CEDEX 2
Téléphone : 02 38 64 34 34

*Direction Technique
ZAC du MOULIN
803, boulevard Duhamel du Monceau
CS 30602
45166 OLIVET CEDEX
Tél. : 02 38 23 23 39
Fax. : 02 38 23 23 82*

Sommaire

	Pages
1. Introduction	3
2. Caractéristiques du modèle de simulation	3
2.1. Extension adoptée et maillage retenu	3
2.2. Découpage vertical adopté	4
2.3. Paramètres hydrodynamiques et thermiques pris en compte	5
3. Résultats obtenus	6

Liste des figures

Figure 1 : Extension du modèle	3
Figure 2 : Différentes échelles de maillage	4
Figure 3 : Différentes couches de mailles du modèle – Vue selon une coupe W -> E passant par le doublet d'ALFORTVILLE.....	4
Figure 4 : Demi-épaisseur de la couche conductrice (m) après interpolation	5
Figure 5 : Perméabilités intrinsèques (m ²) après interpolation	5
Figure 6 : Températures simulées en septembre 2010 aux différents forages de production	6
Figure 7 : Températures simulées aux forages de production ALFORTVILLE, MAISON ALFORT 1 et MAISON ALFORT 2 (les débits sont en noir tireté)	7
Figure 8 : Températures simulées aux forages de production IVRY, CHEVILLY-LARUE et THIAIS (les débits sont en noir tireté).....	8
Figure 9 : Températures simulées aux forages de production ORLY GAZIER, ORLY NOUVELET et ORLY NOUVELET 2 (les débits sont en noir tireté)	9
Figure 10 : Températures simulées aux forages de production BONNEUIL, CRÉTEIL et VILLENEUVE ST GEORGE (les débits sont en noir tireté)	10
Figure 11 : Comparaison entre la température simulée au forage de production du doublet d'ALFORTVILLE et les mesures réalisées en tête de puits	11

1. Introduction

Dans le cadre du groupe de travail « Modélisation au DOGGER » piloté par le BRGM, un premier exercice d'inter-comparaison a été réalisé en 2010 sur le doublet géothermique d'ALFORTVILLE. Les simulations mises en œuvre avec le logiciel MARTHE du BRGM se sont intéressées à ce seul doublet, sans prendre en compte son environnement immédiat. Il s'agit ici de compléter cette première phase de modélisation en intégrant les doublets voisins dans un rayon de 5 km. Afin de faciliter l'interprétation des résultats des différentes équipes, les chroniques de débit et de températures d'injection ont été fournies par le BRGM à tous les groupes jusqu'en décembre 2010.

2. Caractéristiques du modèle de simulation

2.1. Extension adoptée et maillage retenu

Les doublets intégrés dans le modèle sont les suivants : ALFORTVILLE depuis octobre 1987, BONNEUIL depuis janvier 1987, CHEVILLY LARUE et CRÉTEIL depuis octobre 1985, IVRY de janvier 1984 à décembre 1993, MAISON ALFORT 1 et 2 depuis respectivement juillet 1985 et octobre 1986, ORLY1 GAZIER depuis janvier 1984, ORLY2 NOUVELET et NOUVELET2 de janvier 1987 à juin 2005 pour le premier et depuis janvier 2008 pour le second, THIAIS depuis juillet 1986 et VILLENEUVE ST GEORGE depuis octobre 1987. La figure 1 représente l'extension du modèle et la localisation des 12 doublets.

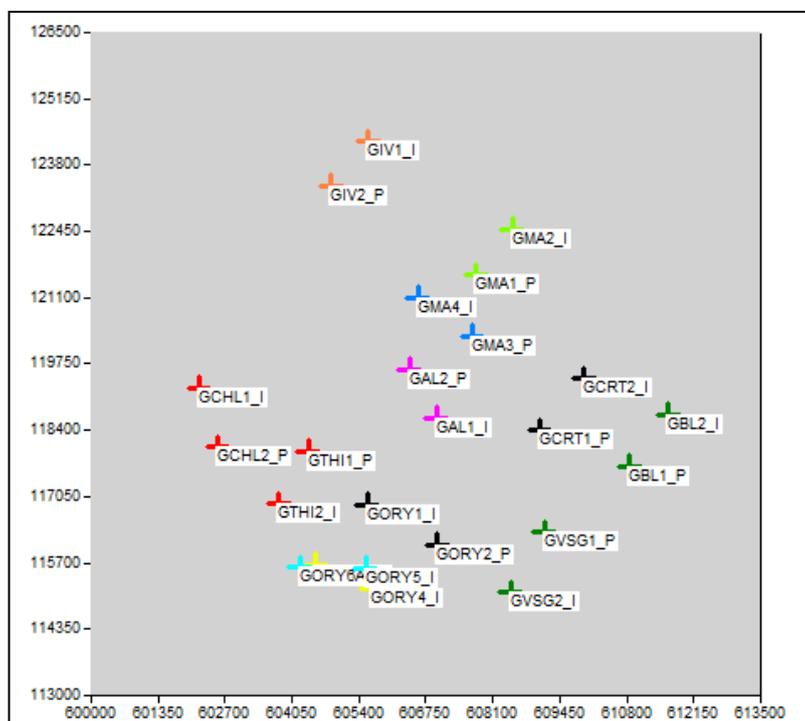


Figure 1 : Extension du modèle

La figure 2 représente les différentes échelles de mailles adoptées. Le maillage le plus fin (10 m de côté) englobe le doublet d'ALFORTVILLE, principale zone d'intérêt de l'exercice. Les autres doublets

sont simulés avec des mailles carrées de 33 m de côté, tandis que le maillage principal est à l'échelle de 100 m.

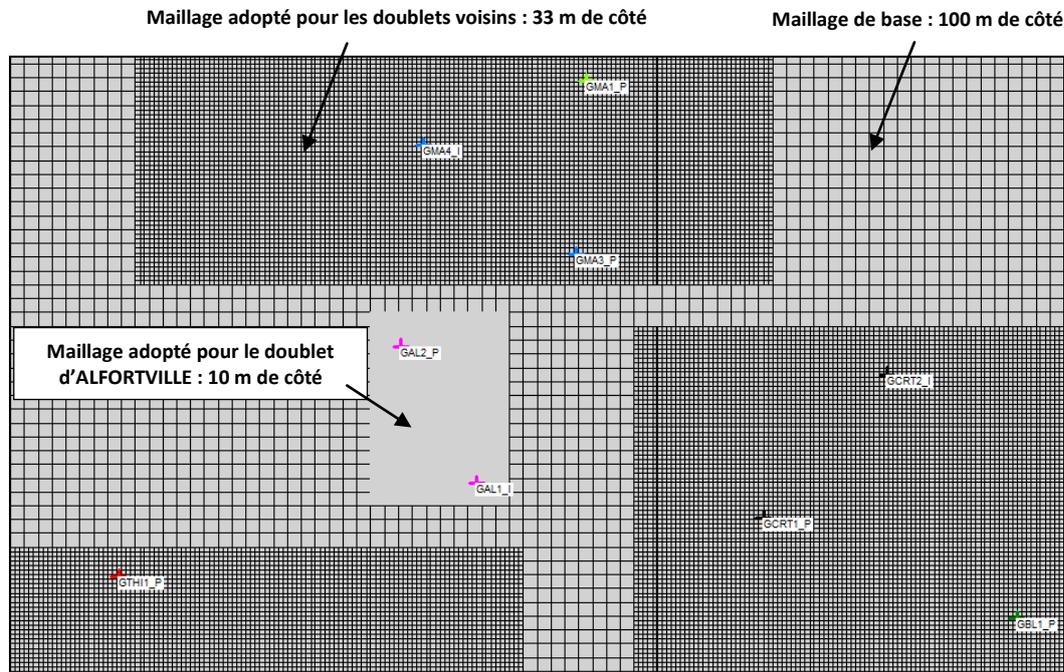


Figure 2 : Différentes échelles de maillage

2.2. Découpage vertical adopté

On a conservé les mêmes hypothèses que lors de la première phase, en faisant jouer la symétrie verticale du modèle. Ceci a permis un gain appréciable en nombre de mailles et en temps calcul. Le modèle est ainsi constitué de cinq couches de mailles. Les quatre premières depuis la surface correspondent à l'éponte supérieure. La cinquième correspond à la couche conductrice, dont l'épaisseur a été calculée par krigeage à partir des données fournies par le BRGM. N'est prise en compte dans le modèle que la demi épaisseur de la couche, par raison de symétrie (cf. figures 3 et 4 ci-après).

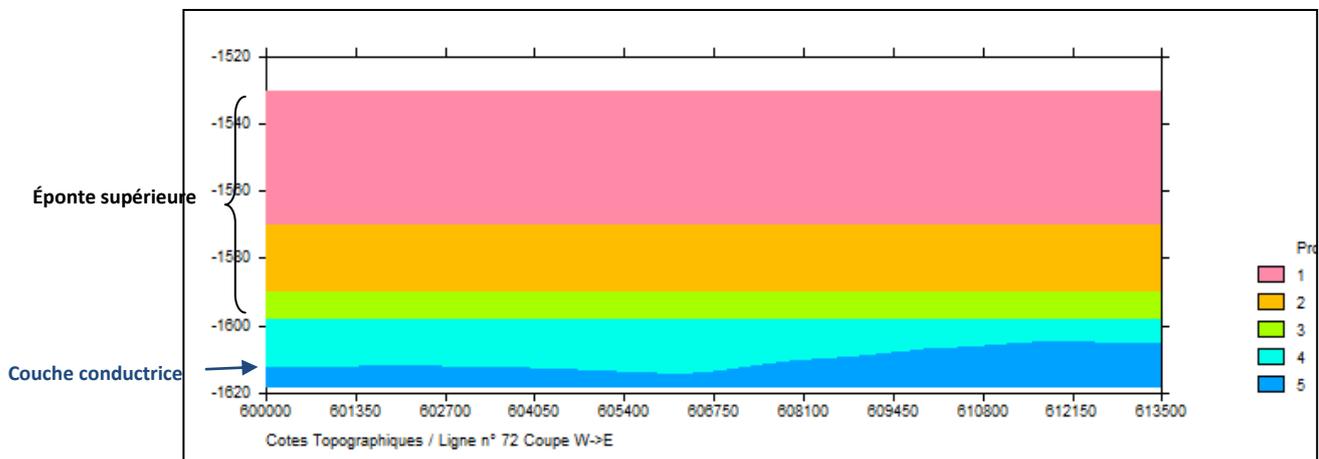


Figure 3 : Différentes couches de mailles du modèle – Vue selon une coupe W -> E passant par le doublet d'ALFORTVILLE

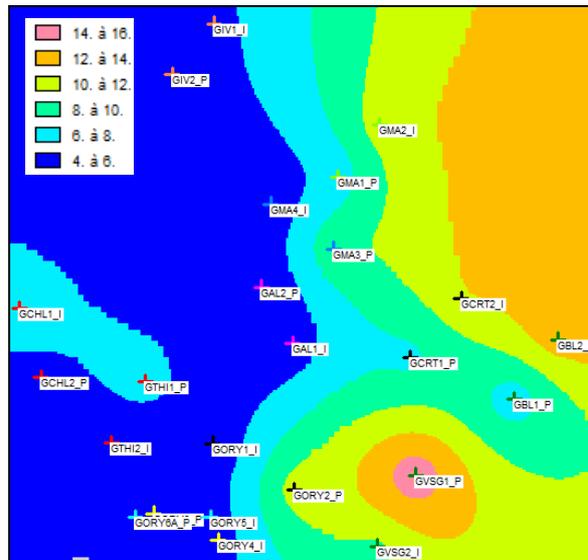


Figure 4 : Demi-épaisseur de la couche conductrice (m) après interpolation

2.3. Paramètres hydrodynamiques et thermiques pris en compte

Les perméabilités intrinsèques fournies par le BRGM ont été interpolées par krigeage, en l'absence de critères de zonation pertinents. Elles apparaissent en figure 5 ci-après.

Pour ce qui est des paramètres thermiques, les valeurs adoptées sont les suivantes :

- Conductivité thermique de la roche : 2,5 W/m/deg ;
- Conductivité thermique de l'eau : 0,6 W/m/deg ;
- Chaleur spécifique volumique de la roche : $2,16 \cdot 10^6$ J/m³/deg ;
- Chaleur spécifique massique de l'eau : 4185 J/kg/deg.

La porosité est prise égale à 18 % dans la couche conductrice et à 10 % dans l'éponte supérieure, comme pour la première phase. La température initiale dans l'éponte supérieure et la couche conductrice est prise égale à 75 °C.

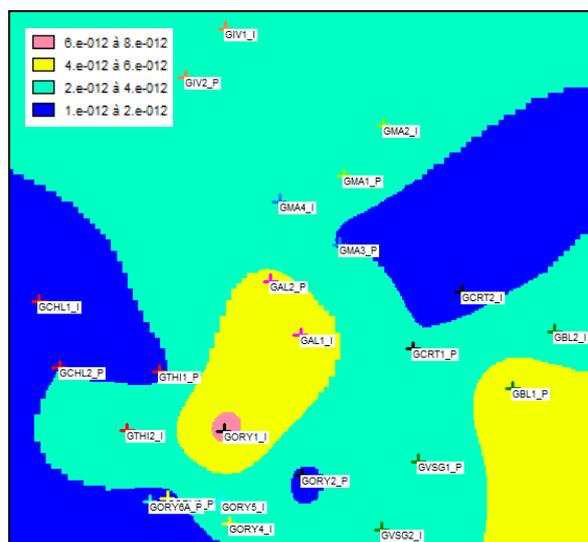


Figure 5 : Perméabilités intrinsèques (m²) après interpolation

3. Résultats obtenus

Les simulations ont été réalisées en régime transitoire sur la période janvier 1984 – décembre 2010 au pas de temps mensuel. L'emménagement spécifique adopté est de $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, comme lors de la première phase.

Les résultats obtenus concernent

1. La carte des températures simulées en septembre 2010 (figure 6) ;
2. L'évolution des températures aux différents forages de production (figures 7 à 10) ;
3. La comparaison entre la température simulée au forage de production du doublet d'ALFORTVILLE GAL2P et la température mesurée en tête de puits (figure 11).

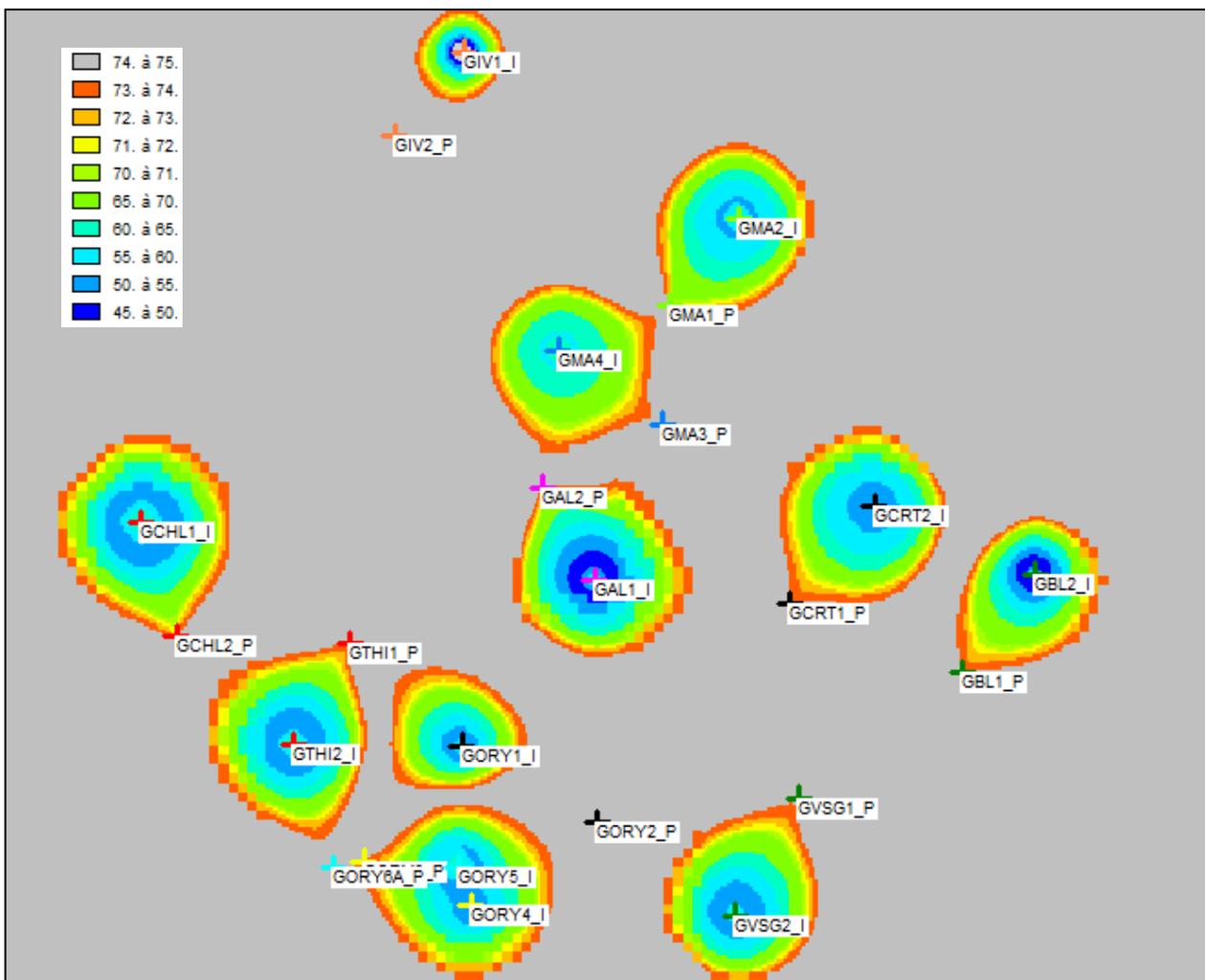


Figure 6 : Températures simulées en septembre 2010 aux différents forages de production

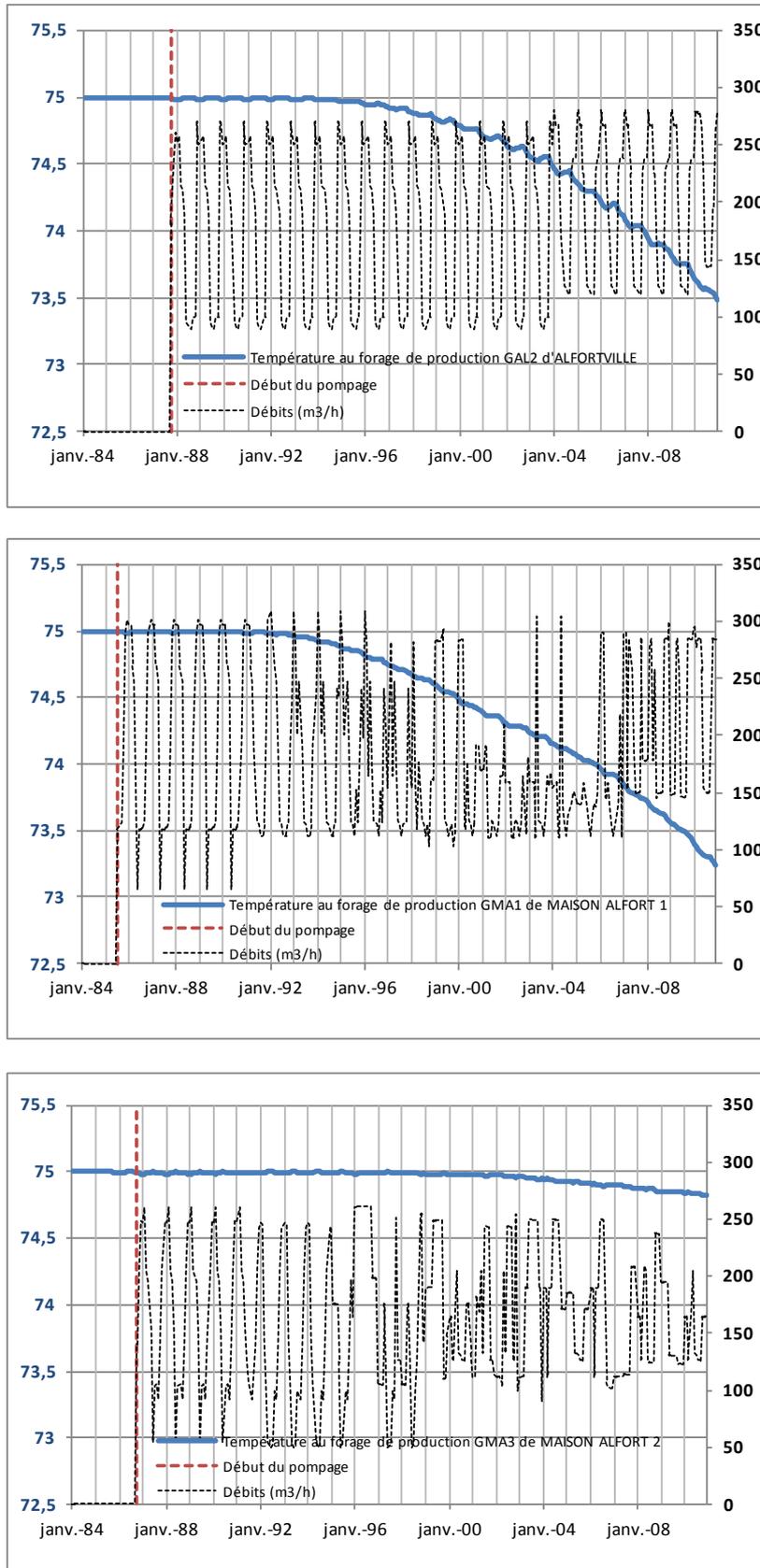


Figure 7 : Températures simulées aux forages de production ALFORTVILLE, MAISON ALFORT 1 et MAISON ALFORT 2 (les débits sont en noir tireté)

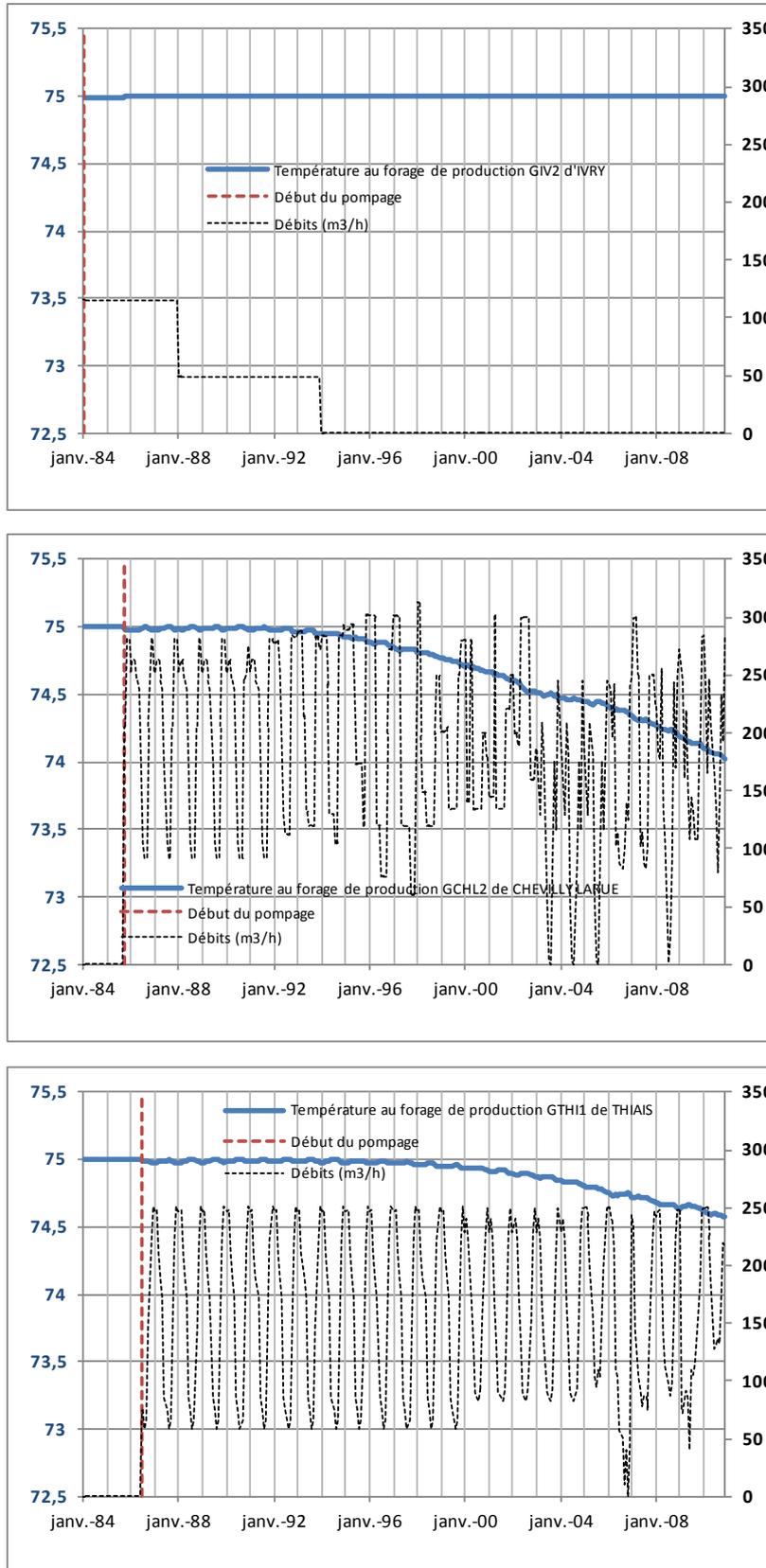


Figure 8 : Températures simulées aux forages de production IVRY, CHEVILLY-LARUE et THIAIS (les débits sont en noir tireté)

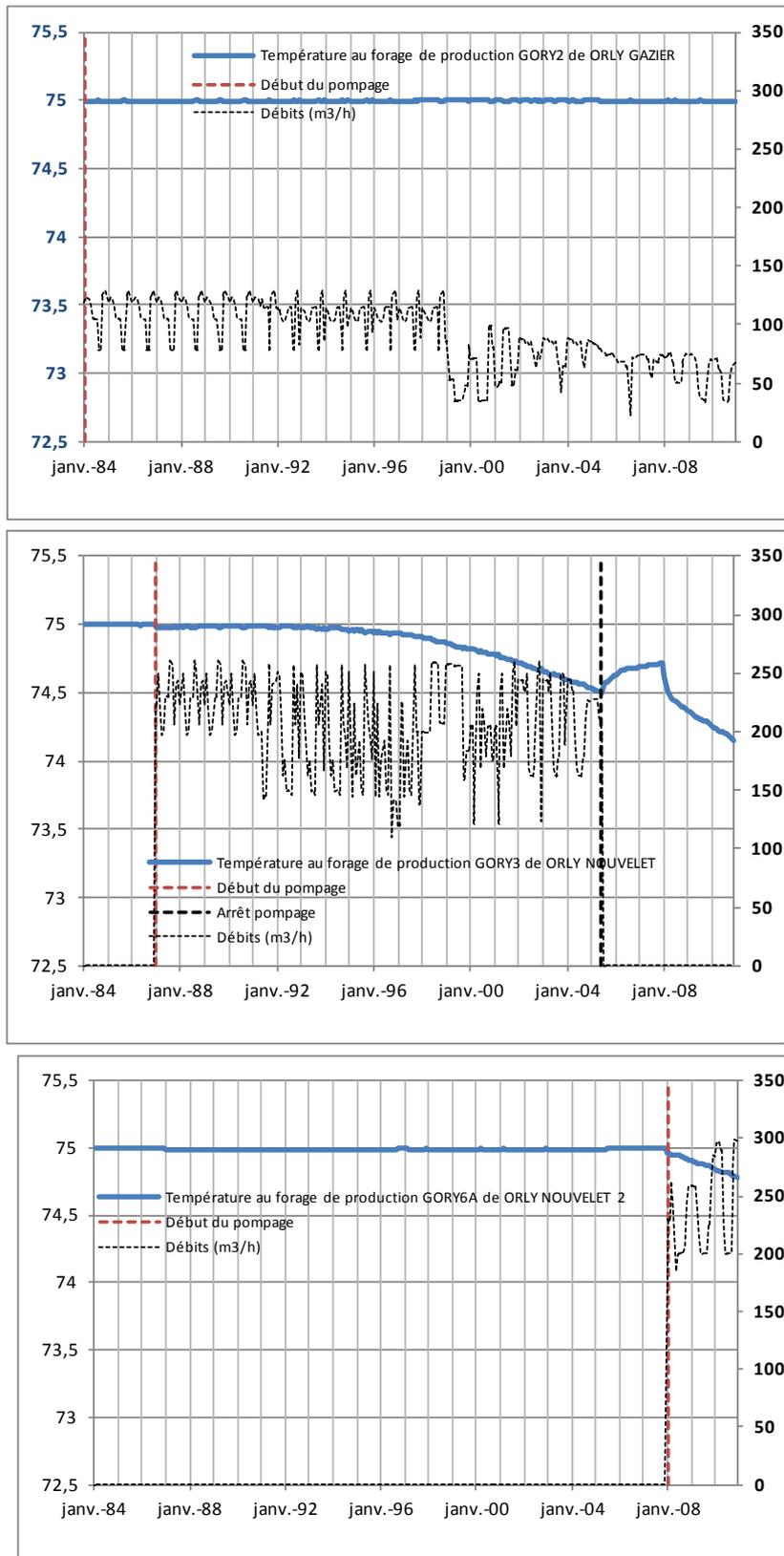


Figure 9 : Températures simulées aux forages de production ORLY GAZIER, ORLY NOUVELET et ORLY NOUVELET 2 (les débits sont en noir tireté)

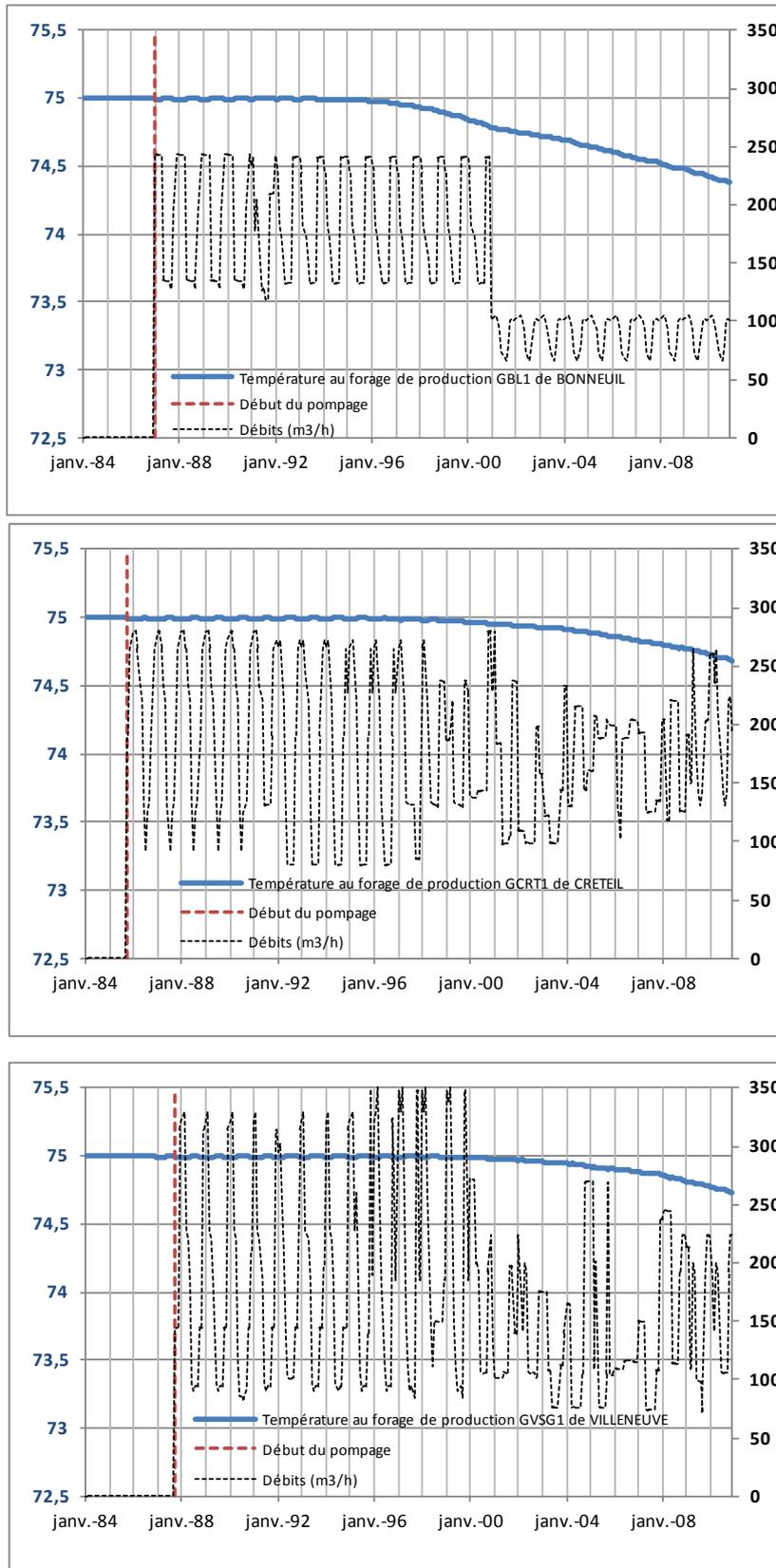


Figure 10 : Températures simulées aux forages de production BONNEUIL, CRÉTEIL et VILLENEUVE ST GEORGE (les débits sont en noir tireté)

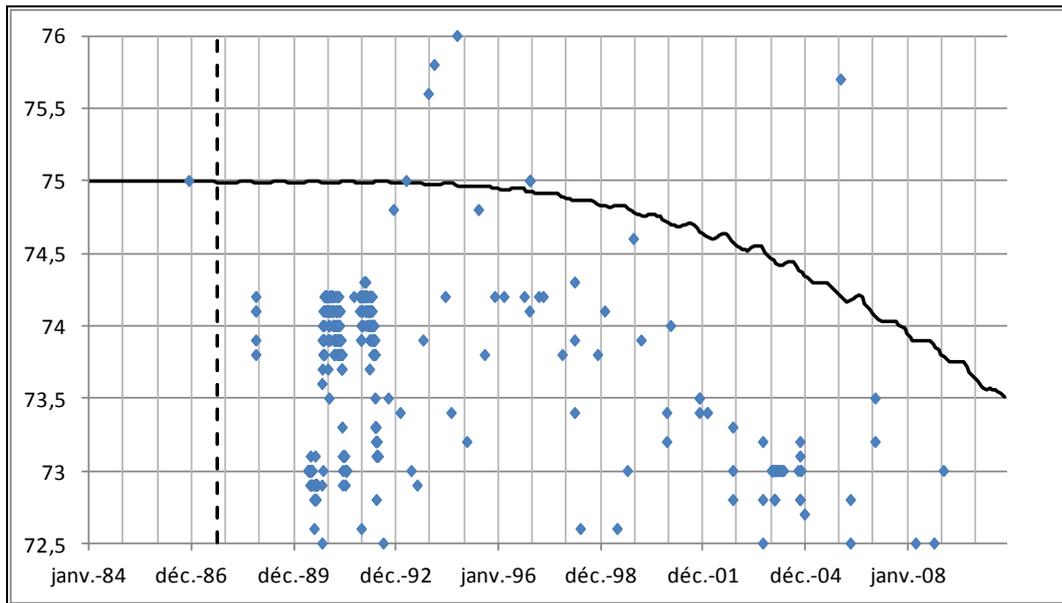


Figure 11 : Comparaison entre la température simulée au forage de production du doublet d'ALFORTVILLE et les mesures réalisées en tête de puits

L'analyse de ces différentes figures met en évidence, pour le secteur ALFORTVILLE, MAISON ALFORT 1 et MAISON ALFORT 2

1. Des baisses de température significatives aux doublets d'ALFORTVILLE et de MAISON ALFORT 1. Ceci est à relier à des $\frac{1}{2}$ épaisseurs productives localement faibles (de 5 à 7m), des débits importants (200 m³/h ou plus, en moyenne) et, pour le doublet MAISON ALFORT 1 à un phénomène probable d'interférence avec le doublet MAISON ALFORT 2 ;
2. Dans ce contexte, un temps de percée pour le forage d'ALFORTVILLE de l'ordre de 10 ans ;
3. Une décroissance des températures au forage GAL2P cohérente avec la tendance générale à la baisse des températures mesurées en tête de puits.

On peut noter par ailleurs que la quasi-absence de baisse des températures sur le doublet ORLY GAZIER est due à de faibles débits (100 m³/h en moyenne contre 200 m³/h pour les autres doublets) et à une distance inter forage importante (1645 m). Dans le cas du doublet de BONNEUIL, la diminution du débit observée depuis 2001 se traduit par un ralentissement très perceptible de la baisse des températures.

Enfin, on note une remontée des températures à l'arrêt du doublet ORLY NOUVELET, suivie d'une baisse très nette dès le démarrage du doublet ORLY NOUVELET 2 en janvier 2008.

4. Conclusion

L'intégration des 12 doublets voisins dans un rayon de 5 km autour d'ALFORTVILLE a permis d'affiner les résultats obtenus en première phase.

A cette occasion, on a intégré les épaisseurs conductrices et les perméabilités intrinsèques fournies par le BRGM pour chaque ouvrage. Les valeurs ponctuelles ont été sommées, puis interpolées par krigeage, et enfin affectées à chacune des mailles du modèle.

Le modèle est donc plus étendu qu'en première phase, de manière à intégrer les 12 doublets. Par raison de symétrie, il comporte cinq couches de mailles dont les quatre premières représentent l'éponte supérieure et la cinquième la couche conductrice dont l'épaisseur a été calculée comme indiqué précédemment.

Les simulations mises en œuvre sur la période janvier 1984 – décembre 2010 montrent que les baisses de température sur les doublets d'ALFORTVILLE et de MAISON ALFORT1 sont significatives (1,5 à 2 °C à «échéance de 2010»). Ceci est du à des épaisseurs productives localement faibles, à des débits importants et probablement à des interférences entre les doublets MAISON ALFORT 1 et MAISON ALFORT 2 qui accentuent le phénomène. Le temps de percée associé est de l'ordre de 10 ans au doublet d'ALFORTVILLE.

Si l'on compare les températures simulées à ALFORTVILLE en GAL2P à celles mesurées en tête de puits, on s'aperçoit que la tendance à la baisse des températures mesurées est bien rendue par le modèle. On ne peut cependant simuler ni les températures proprement dites (écart de plus d'1 °C), ni leur très grande variabilité temporelle.



Fiche signalétique

Rapport

Titre : Groupe de travail « Modélisation au DOGGER » - Phase 2 : Prise en compte de l'environnement du doublet d'ALFORTVILLE.

Numéro et indice de version : A 64057 /A

Date d'envoi : Octobre 2011

Nombre d'annexes dans le texte : 0

Nombre de pages : 13

Nombre d'annexes en volume séparé :

Client

Coordonnées complètes : BRGM

*3 avenue Claude GUILLEMIN
BP 36009 – 45060 ORLÉANS CEDEX 2
Téléphone : 02 38 64 34 34
Télécopie :*

Nom et fonction des interlocuteurs : Morgane LEBRUN – Département Géothermie

Antea Group

Unité réalisatrice : Direction Technique

Nom des intervenants et fonction remplie dans le projet :

Interlocuteur commercial : Jean Yves AUSSEUR

Responsable de projet : Jean Yves AUSSEUR

Rédacteur : Jean SCHWARTZ

Secrétariat : Claudine THIBault

Qualité

Contrôlé par : *Jean Yves AUSSEUR*

Date : 14/10/ 2011 - Version A

N° du projet : *IDFP 11 0201*

Références et date de la commande :

Mots clés : GEOTHERMIE, MODELISATION

Annexe 3

Rapport technique de CFG Services



Participation à l'exercice d'inter-comparaison du Groupe modélisation

Elaboration d'un scénario de modélisation appliqué au cas du site d'Alfortville

Note technique

Affaire n° PGC 10 037

Octobre 2011

Rapport N° 11 CFG 61



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

QUALITE

N° affaire : PGC 11 037

N° rapport : 11 CFG 61

Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Gille Anne-Lise	Lasne Eric	Lasne Eric

REVISION

Indice	Date	Chapitre	Modification
A	13/10/2011	-	Document d'origine
B			
C			
D			
E			
F			

CLIENT

Lebrun Morgane

BRGM
3 Avenue Claude Guillemin
BP 6429
45064 Orléans Cedex 2 France

Diffusion

Lebrun Morgane, Hamm Virginie, Goyeneche Olivier

SOMMAIRE

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

2 CONSTRUCTION DU MODELE SOUS COMSOL.

2.1 MODELISATION NUMERIQUE RELATIVE A L'AQUIFERE DU DOGGER.

- 2.1.1 *Contexte hydrogéologique du site d'Alfortville*
- 2.1.2 *Caractéristiques hydrodynamiques du réservoir*
- 2.1.3 *Caractéristiques thermiques du réservoir*

2.2 CHOIX DU MODELE CONCEPTUEL ET HYPOTHESES DE MODELISATION.

- 2.2.1 *Modèle numérique mono-couche*
- 2.2.2 *Paramètres du modèle*
- 2.2.3 *Aspects numériques*

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 ANALYSE PARAMETRIQUE.

- 3.1.1 *Résultats du Test n°1*
- 3.1.2 *Résultats du Test n°2*
- 3.1.3 *Résultats du Test n°3*
- 3.1.4 *Résultats du Test n°4*

3.2 ANALYSE DES TRANSFERTS HYDRAULIQUES.

3.3 ANALYSE DES TRANSFERTS THERMIQUES.

4 SYNTHESE

5 ANNEXES

6 BIBLIOGRAPHIE

Liste des figures

Figure 1 : Production relative des différentes lithologies du Dogger.....	22
Figure 2 : Géométrie du modèle mono-couche et axe de symétrie	23
Figure 3 : Représentation schématique du domaine modélisé	24
Figure 4: Discrétisation horizontale du domaine 3D	24
Figure 5 : Discrétisation verticale du domaine 3D	25
Figure 6 : Raffinement du maillage autour du puits GAL-1	26
Figure 7 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°1	27
Figure 8: Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°2	28
Figure 9: Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°3	26
Figure 10 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°4	20
Figure 11 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations d'Alfortville	21
Figure 12 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations d'Ivry sur Seine et de Villeneuve-Saint-Georges.....	22
Figure 13 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations de Thiais et de Chevilly-la-Rue et d'Alfortville	22
Figure 14 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations de Créteil et Bonneuil-sur-Marne	23
Figure 15 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations de Maison alfort 1 et Maison alfort 2	24
Figure 16 : Champ de pression prévisionnel pour les exploitations d'Orly	24
Figure 17 : Champ des températures prévisionnelles pour l'horizon fin 2010 à débit moyen.....	25
Figure 18 : Températures d'exhaure simulées au puits GAL-2.....	26
Figure 19 : Températures d'exhaure simulées aux puits du secteur d'étude.....	27
Figure 20: Récapitulatif des températures d'exhaure simulées en comparaison avec les températures mesurées au puits GAL-2	28

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Au sein du « groupe modélisation », financé par l'ADEME et sous la direction du département géothermie (GTH), un exercice d'inter-comparaison a été mis en place entre les différents participants (ANTEA, BRGM, CFG Services, GPC IP, Mines). Cet exercice a pour but de faire un point sur les différentes approches de la modélisation sur le Dogger du Bassin Parisien et s'inscrit dans le cadre de la rédaction d'un guide à l'intention de l'ADEME et des maîtres d'ouvrages.

Le précédent rapport (*BRGM/RP-59591-FR*) consistait à comparer les résultats de l'ensemble des modèles numériques utilisés par les participants à un cas simplifié de la solution analytique de Gringarten et Sauty (*Gringarten A.C, Sauty J.P, 1975*). Il était convenu également de comparer les différences de modèle conceptuel qui ont été retenus.

Ce rapport complète le travail effectué, en prenant en compte l'environnement du doublet d'Alfortville. L'influence des 11 doublets voisins (Maison Alfort 1, Maison Alfort 2, Ivry sur Seine, Villeneuve-Saint-Georges, Bonneuil-sur-Marne, Créteil, Thiais, Chevilly-Larue, Orly 1 Gazier, Orly 2 le Nouvelet et Orly 2 le Nouvelet 2).

Chaque groupe de modélisateurs est libre de construire sa propre méthodologie et d'y intégrer certains tests de sensibilité.

Néanmoins la prise en compte des chroniques d'exploitation (débit, température d'injection) communes à tous est de mise. Car in fine le but de cet exercice d'inter-comparaison est d'arriver à mieux comprendre et de reproduire au mieux la décroissance thermique observée actuellement au puits producteur d'Alfortville.

La modélisation du réservoir constitue un outil d'aide à la prise de décision pour lequel les choix et les hypothèses retenus doivent être clairement explicités. Cette note technique a pour but de présenter les solutions calculées par CFG Services.

2 CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE SOUS COMSOL

La modélisation numérique du réservoir ciblé par ce projet a été effectuée avec le logiciel COMSOL Multiphysics et le module Earth Science développés par la société COMSOL. Ce code de calcul résout, par la méthode des Eléments Finis en géométrie bi- ou tridimensionnelle, les équations décrivant l'écoulement et le transport de masse ou d'énergie en aquifère. L'objectif de la modélisation est :

- d'établir les sources de variabilité des résultats en fonction des différents paramètres retenus.
- d'étudier la sensibilité relative de ces paramètres.
- de reproduire au mieux la décroissance thermique observée actuellement au puits producteur d'Alfortville.

2.1 MODELISATION NUMERIQUE RELATIVE A L'AQUIFERE DU DOGGER.

Le secteur d'étude bénéficie d'une très bonne connaissance de la ressource basée sur les 11 dispositifs géothermiques existants dans l'environnement immédiat d'Alfortville:

- Les 2 doublets de Maisons-Alfort (1 et 2) et d'Ivry-sur Seine au nord ;
- Les doublets de Chevilly la Rue à l'ouest ;
- Le doublet de Bonneuil-sur-Marne et de Créteil à l'est ;
- Le doublet de Villeneuve-Saint-Georges au sud-est ;
- Les 3 doublets d'Orly (Orly gazier, Orly Le Nouvelet et Orly Le Nouvelet 2) et de Thiais au sud.

2.1.1 Contexte hydrogéologique du site d'Alfortville

A l'échelle du Bassin Parisien, l'aquifère du Dogger est caractérisé par l'existence d'un grand nombre de couches productives d'épaisseurs et de débits variables selon les secteurs.

Schématiquement, la succession stratigraphique des calcaires du Bathonien est la suivante, du haut vers le bas : un ensemble Comblanchien, un ensemble Oolithique et un ensemble d'Alternances marneuses et calcaires. La figure suivante (*Cf. Figure 1*) présente la contribution au débit total des trois faciès du Dogger pour chacun des puits du secteur d'étude d'Alfortville.

Production relative des différents faciès du Dogger

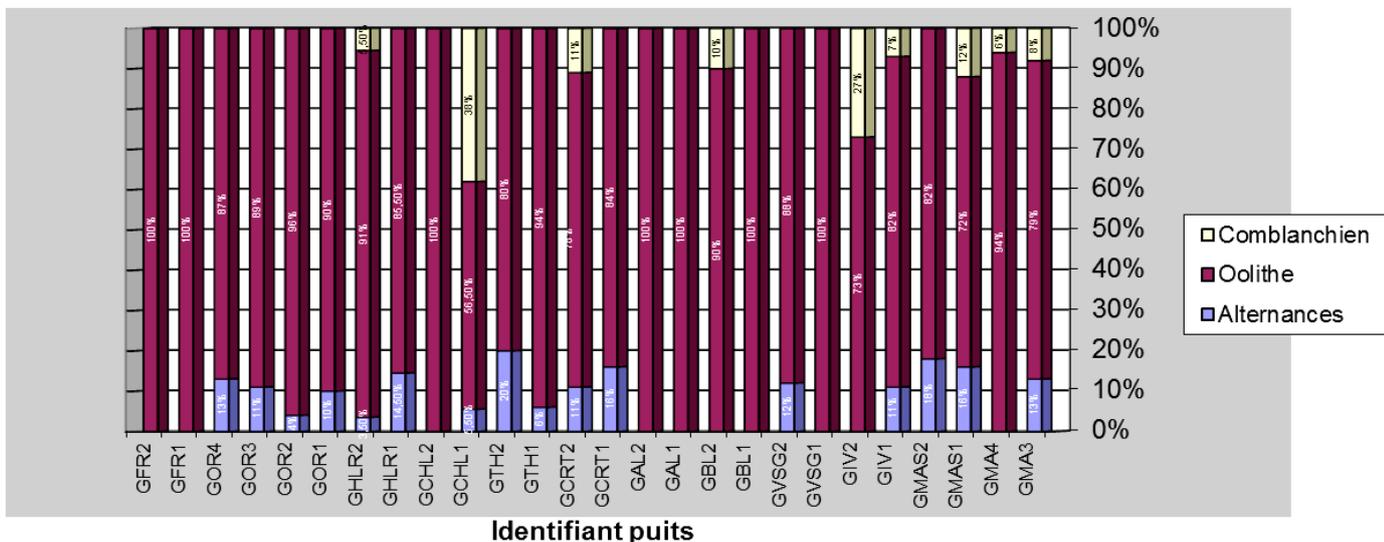


Figure 1 : Production relative aux différentes lithologies du Dogger, dans le secteur d'étude d'Alfortville.

Au niveau du secteur d'étude, les doublets voisins d'Alfortville sont rattachés au domaine du Val de Marne (Sud-Sud-est de Paris), qui présente une certaine homogénéité d'un point de vue sédimentaire. L'analyse des contributions à la production des différents faciès du Dogger montre que :

- La productivité du niveau oolithique est largement prédominante avec une contribution au débit total de **88 %** en moyenne sur l'ensemble des doublets du secteur.

Pour le doublet d'Alfortville, le faciès oolithique y contribue totalement.

- La contribution au débit total du niveau Comblanchien est de **12 %** en moyenne sur l'ensemble du secteur.

Le faciès Comblanchien semble n'être producteur que dans le secteur Nord, Est et Ouest d'Alfortville (GCRT2, GBL2, GMAS1, GMA3-4, GCHL1, GHLR2).

- La contribution au débit total du niveau marno-calcaire est de **14 %** en moyenne sur l'ensemble du secteur.

Le faciès d'alternances (marno-calcaire) contribue modérément à la productivité du réservoir sur la majorité des puits encerclant le doublet d'Alfortville.

Le réservoir du Dogger présente une géométrie et des caractéristiques de perméabilité complexes à l'échelle du bassin Parisien, voire même à l'échelle d'un doublet. Ceci peut s'expliquer par des phénomènes postérieurs au dépôt sédimentaire (compaction-dissolution, fracturation, dissolution, recristallisation...) qui affectent la porosité et la perméabilité du réservoir. Ces niveaux producteurs présentent de fortes hétérogénéités sur l'ensemble du bassin.

2.1.2 Caractéristiques hydrodynamiques du réservoir

Les principales caractéristiques hydrogéologiques du réservoir sont reportées dans le tableau 1. Ce tableau intègre les données des 12 puits forés dans le secteur d'étude. Les données du nouveau doublet d'Orly Nouvelet 2 (GOR-5 et GOR-6) sont incomplètes.

Du point de vue de la géométrie du réservoir, sur l'ensemble du secteur d'étude :

- Le toit des niveaux producteurs est plus profond au niveau de Bonneuil-sur-Marne (-1657,9 m NGF et -1676,4 m NGF respectivement pour les puits GBL-1 et GBL-2) qu'au niveau d'Alfortville (-1592 m NGF et -1589 m NGF respectivement pour les puits GAL-1 et GAL-2) conformément à la carte des isohypses du toit du Dogger (*Cf. Rojas et al, 1989*). Dans ce secteur, le toit des niveaux producteurs plonge globalement vers l'est.
- Les épaisseurs des niveaux producteurs augmentent vers l'ouest et le sud-ouest (*Cf. Annexe 2*).
 - GVSG-1 et GVSG-2 : respectivement 38.3 m et 23.4 m d'épaisseurs cumulées ;
 - GAL-1 et GAL-2 : respectivement 9.4 m et 8.2 m d'épaisseurs cumulées.
- Le nombre de niveaux producteurs est relativement équivalent entre les douze puits ; en moyenne 5.8 pour un écart-type de 1.9.

En raison de la dispersion géographique des puits, la structure verticale des niveaux producteurs est nettement mieux connue que son extension latérale. De plus les épaisseurs de couches productives et celles des épontes sont non uniformes latéralement.

Les outils géostatistiques (Logiciel Surfer) avec krigeage des données nous permettent de définir des lois de distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques. Les cartes géostatistiques (*Cf. Annexe 2*) sont basées sur des interpolations réalisées sur l'ensemble des données hydrogéologiques connues pour chacun des forages géothermique du bassin Parisien. Les variogrammes issues de ces interpolations sont ainsi utilisés afin de contraindre nos interpolations sur le

secteur d'étude d'Alfortville. L'hypothèse d'une distribution hétérogène, sur le secteur d'étude, des transmissivités, de l'épaisseur productrice pourra être approchée. La perméabilité du réservoir est déduite du rapport de la transmissivité et de l'épaisseur productrice du réservoir. Elle variera en fonction des tests et des hypothèses retenus.

2.1.3 Caractéristiques thermiques du réservoir

Les différences de température au sein d'un même doublet : par exemple 2.4 °C de différence pour le doublet de Maison Alfort 1, sont essentiellement dues à la variation de profondeur du toit du Dogger. Les températures du réservoir sont comprises entre 64.8 °C (GIV2) et 79.7 °C (GBL2) dans le secteur d'étude. D'après les simulations géostatistiques, les températures les plus fortes se situent à l'Est près du doublet de Bonneuil-sur-Marne (*Cf. Annexe 2*).

Les outils géostatistiques avec krigeage des données nous permettent de définir des lois de distribution spatiale des paramètres thermiques. L'hypothèse d'une distribution hétérogène, sur le secteur d'étude, des températures (initiales) est ainsi approchée.

Les valeurs de dispersivité thermique du milieu caractérisent le flux de chaleur résultant de l'hétérogénéité locale du champ de vitesse. Ce paramètre a tendance à modifier les vitesses de propagation thermique. Une valeur empirique est généralement utilisée. La sensibilité du modèle et l'influence de ce paramètre sera testé lors des simulations.

2.2 CHOIX DU MODELE CONCEPTUEL ET HYPOTHESES DE MODELISATION.

D'après le rapport *BRGM/RP6-59591-FR*, les sources de variabilités identifiées dans les processus de modélisation sont la diversité des modèles conceptuels de réservoir, les chroniques d'exploitations et les traitements numériques des phénomènes physiques mis en jeu.

Afin d'identifier ces différentes sources de variabilités, nous traiterons plusieurs cas d'études :

- Modèle monocouche régional prenant en compte 12 doublets avec une épaisseur moyenne constante de 16 m sur tout le domaine (Moyenne entre les 12 doublets).
- Modèle monocouche régional prenant en compte 12 doublets avec une épaisseur variable krigée sur tout le domaine.
- Des chroniques d'exploitation (Débits et températures d'injection) réelles et variables au cours du temps ;
- Des chroniques d'exploitation maximales (Débit d'injection maximal et température d'injection la plus froide) (*Cf. Annexe 1.b*).

-Des chroniques d'exploitation moyennes (Débit d'injection moyen et température d'injection moyenne).

-Des analyses paramétriques telles que l'influence d'une loi de viscosité et de densité dépendantes de la température, l'effet de la dispersivité thermique du fluide géothermal.

2.2.1 *Modèle numérique mono-couche.*

La contribution totale, du faciès oolithique, au débit pour le doublet d'Alfortville a conforté notre choix de modéliser un réservoir monocouche.

Le modèle mono-couche assimile tous les horizons producteurs en une seule couche productrice. Les épontes intermédiaires ne sont pas prises en compte.

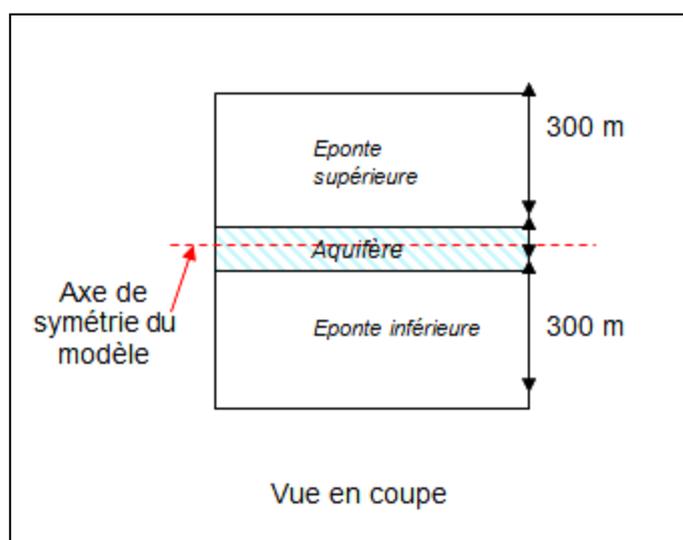


Figure 2 : géométrie du modèle mono-couche et axe de symétrie

Les épontes supérieures et inférieures ont une épaisseur de 300 mètres. Cette dernière est prise suffisamment grande pour ne pas avoir d'impact sur la thermique résolue.

Compte tenu des hypothèses de modélisation, le modèle physique présente une symétrie horizontale (épontes supérieure et inférieure identiques, aquifère homogène dans sa hauteur). Elle permet de ne simuler qu'une moitié du domaine et d'optimiser le modèle d'un point de vue numérique.

Géométrie et maillage du modèle

Le domaine modélisé représenté sur la figure ci-dessous correspond à un rectangle de 15 km de côté sur 15 km centré sur les deux puits d'Alfortville (Cf. Figure 3). Il permet d'intégrer l'ensemble des exploitations géothermiques du secteur d'étude.

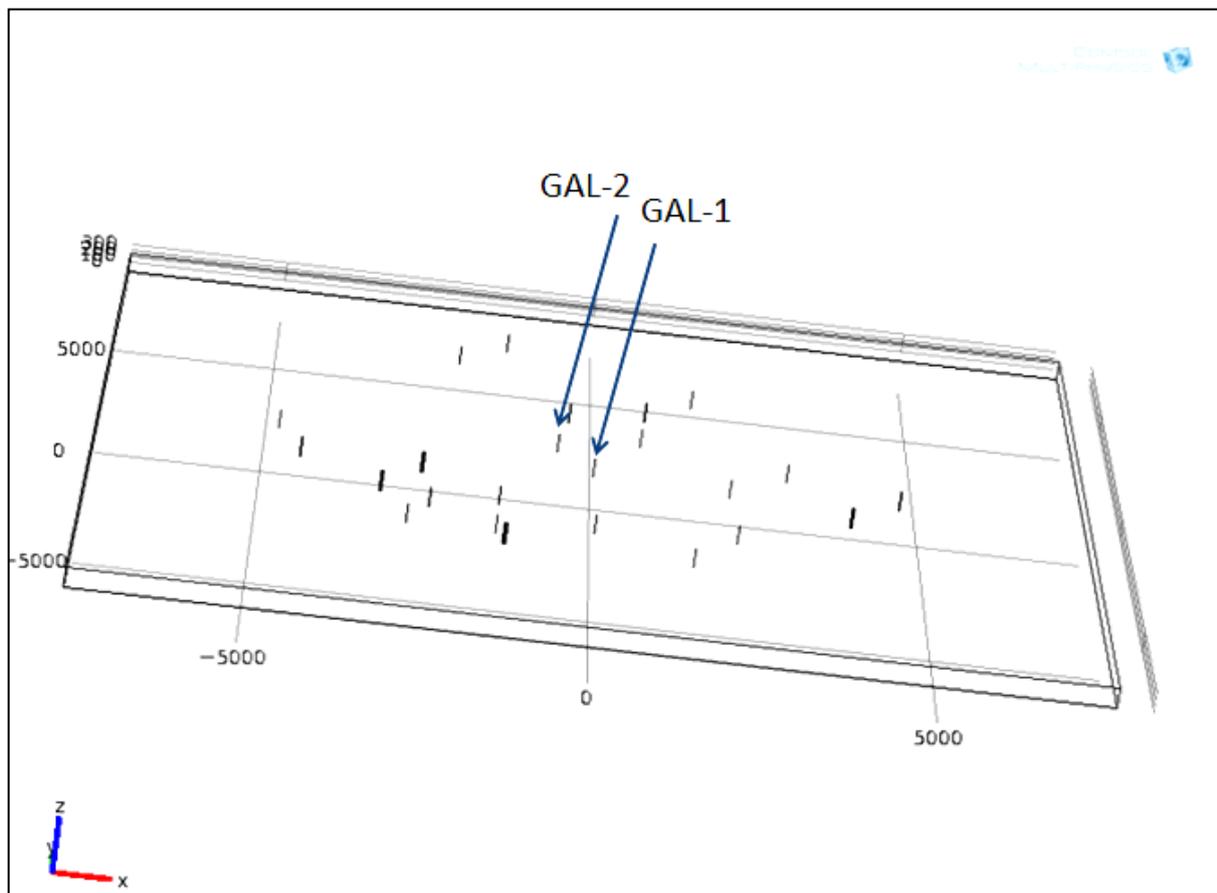


Figure 3: Représentation schématique du domaine modélisé.

L'écartement du doublet d'Alfortville est de 1130 mètres entre les barycentres des niveaux producteurs des deux puits.

Un domaine à trois dimensions (3D) est utilisé pour la partie concernant les calculs hydrodynamiques et thermiques de la simulation numérique. La figure suivante montre la discrétisation (maillage) du domaine 3D modélisé qui comporte **577440** éléments prismes et **173232** éléments triangles (Cf. Figure 4).

La discrétisation verticale des couches au niveau de la transition éponte/réservoir permet de représenter au mieux la recharge thermique par phénomène de conduction verticale de l'éponte vers le réservoir (Cf. Figure 5).

Le maillage est raffiné autour des puits (Cf. Figure 6). Les tailles extensibles des mailles s'adaptent à la progression de la perturbation. Le maillage est composé de

prismes évoluant de 20 centimètres autour des puits et d'un kilomètre aux frontières extérieures du domaine.

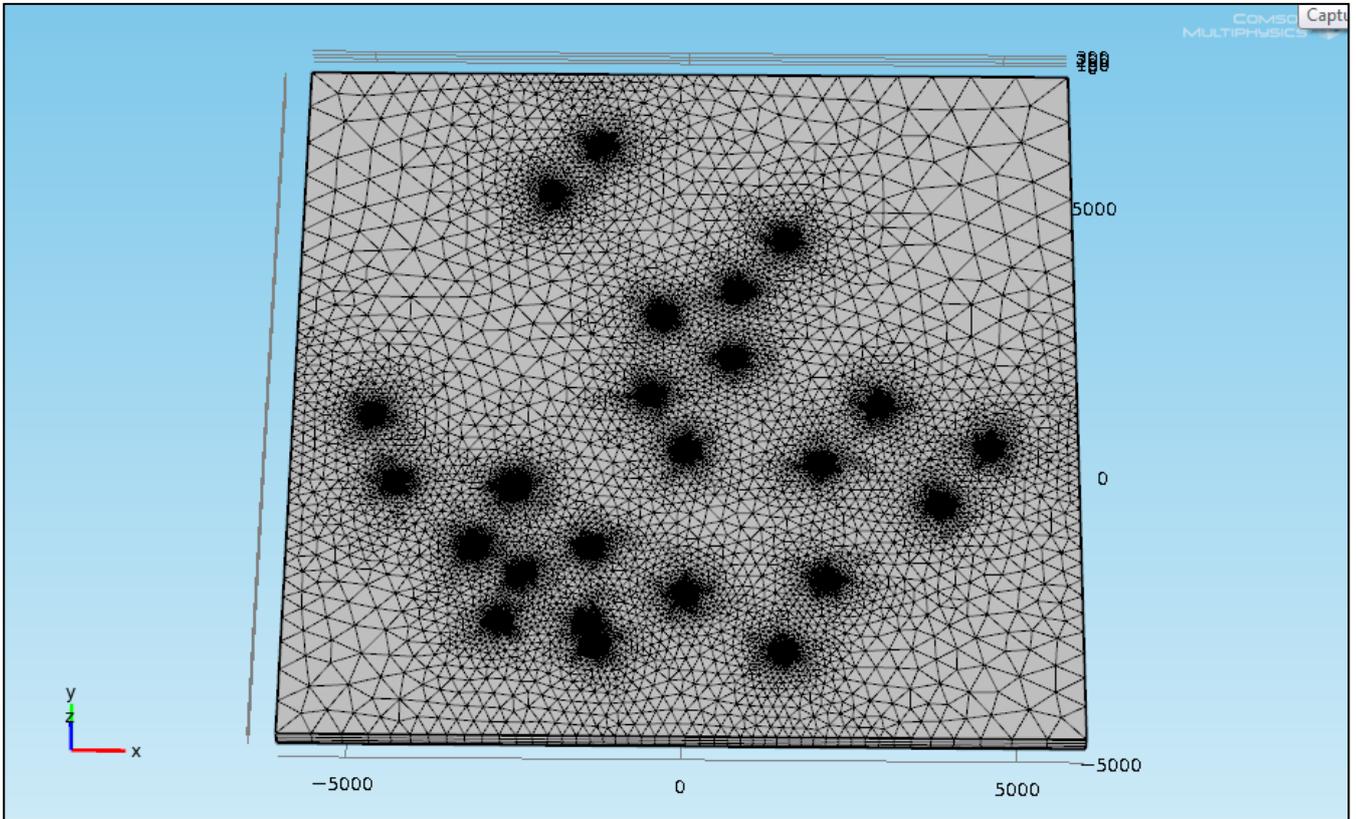


Figure 4 : Discrétisation horizontale (maillage) du domaine 3D.

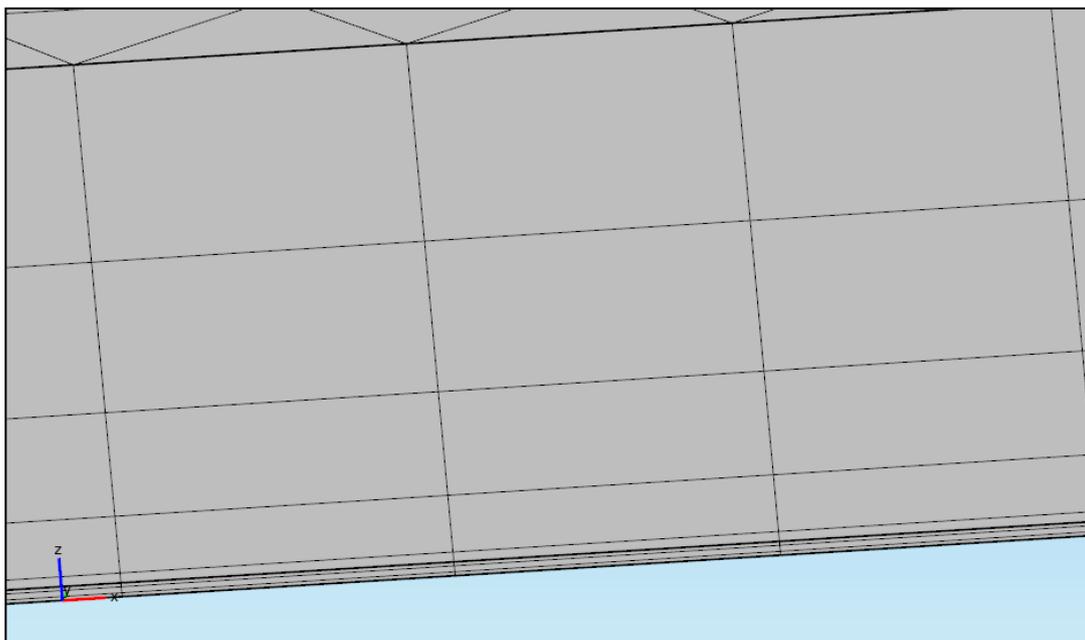


Figure 5 : Discrétisation verticale du domaine 3D.

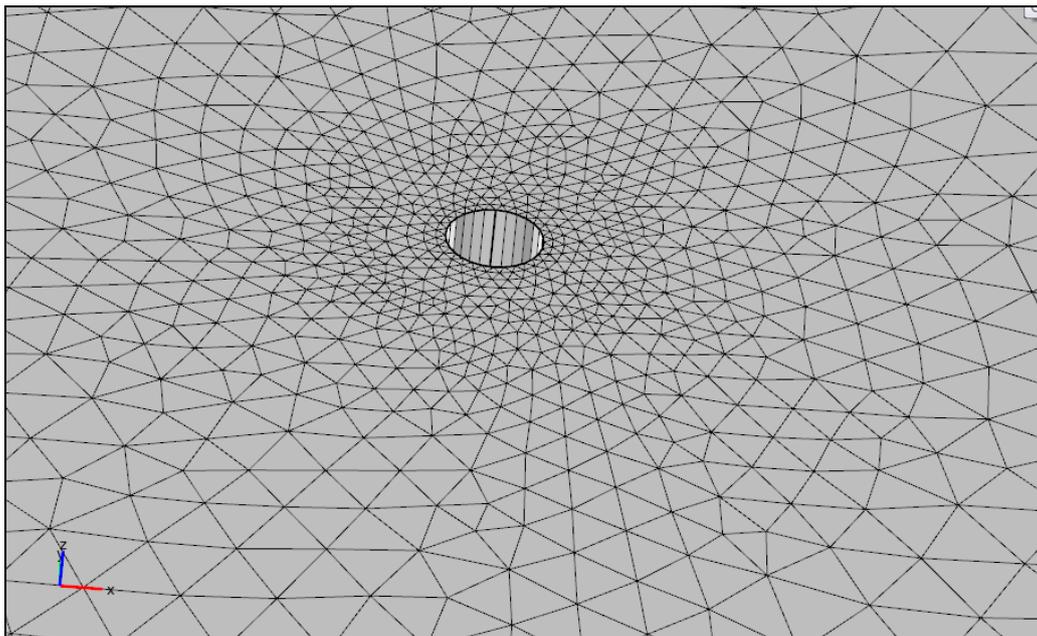


Figure 6 : Raffinement du maillage autour des puits.

2.2.2 Paramètres

Le modèle numérique comprend douze doublets dont le fonctionnement est simulé de janvier 1984 jusqu'en décembre 2010.

La géométrie des puits est définie en intégrant le facteur de skin de chaque ouvrage (facteur caractérisant le développement du puits au moment des essais de production). Les rayons calculés transcrivent un rayon efficace au proche puits, soit 0,563 m au puits producteur (GAL-2) et 0,798 m au puits injecteur (GAL-1) (Cf. Annexe 1.a).

La porosité, la densité et la compressibilité de la roche et du fluide sont considérés comme constants. Aucune distinction géologique n'est faite entre le réservoir et les épontes : la densité de la roche est similaire soit 2800 kg/m^3 .

Le modèle numérique intègre les paramètres suivants :

- Porosité moyenne : 15.5 %
- Salinité moyenne : 18 g/l
- Pression de gisement moyenne : 170 bars

La viscosité et la densité du fluide est prise fonction de la température moyenne mesurée au réservoir :

- densité du fluide à 76 °C pour salinité 18 g/l : 993.54 kg/m^3
- viscosité du fluide à 76 °C pour salinité 18 g/l : 0.387 cp

Pour tester l'influence de la viscosité et la densité du fluide, on définira, grâce à l'abaque de Chesnut, une fonction dépendante de la température, de la pression de gisement moyenne (soit 170 bars) et de la salinité moyenne (soit 18 g/l) afin de mieux rendre compte des pertes de charge dans le réservoir, jouant sur les vitesses d'écoulement et les pressions d'injection (Cf. Annexe 3).

Les valeurs des paramètres thermiques du réservoir et des épontes sont celles usuellement utilisées dans la modélisation du Bathonien du bassin de Paris. Elles sont issues de mesures effectuées sur les échantillons saturés d'Aulnay-sous-Bois pris en compte sont les suivants (Cf. Menjoz et al 1996):

- Conductivité thermique de la roche : 2.5 W/m/K
- Conductivité thermique du fluide: 0.6 W/mK
- Capacité calorifique de la roche: 2.16 MJ/m³/K
- Capacité calorifique du fluide: 4.18 MJ/m³/K

L'ensemble de ces paramètres sont constants sur l'ensemble du domaine.

2.2.3 Aspects numériques.

Les équations mathématiques utilisées dans le modèle numérique (Cf. Annexe 4) prennent en compte l'écoulement du fluide géothermal dans le milieu poreux et le transport de chaleur.

L'hydrodynamisme est résolu par les équations de Darcy sur l'aquifère. L'écoulement n'est pas résolu dans les épontes assimilées à des solides imperméables. L'hydrodynamisme est résolu en régime transitoire.

Les conditions aux limites sont en pression imposé ($P=0$ bar) sur les limites extérieures hydrodynamiques du domaine. Les limites du domaine ont été prises suffisamment grandes afin de simuler un réservoir semi-infini. Les températures relevées aux puits de production sont grandement sensible à la vitesse d'écoulement entre les puits. Les vitesses d'écoulement du fluide sont ainsi utilisées pour coupler les transferts hydrauliques et les transferts thermiques.

Le transport de chaleur intègre :

- la convection dans l'aquifère (entraînement de la chaleur par l'eau en mouvement) qui est le mécanisme dominant ;
- la conduction dans l'aquifère et dans les épontes (flux de chaleur résultant du gradient de température) qui retarde la progression du front froid.
- le transport de chaleur est résolu en régime transitoire ;
- les écoulements gravitaires sont négligés ;

- le gradient géothermique est négligé (température initiale constante selon toute verticale).
- Le phénomène de dispersion thermique cinématique est intégré : soit une dispersivité anisotrope 10 m selon l'axe horizontal (x), 1 m selon l'axe transversal (y).

Au niveau des limites extérieures du modèle, la température est imposée constante et égale à la température interpolée sur l'ensemble du secteur d'étude (*Cf. Annexe 2*).

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS.

Les résultats de cet exercice portent sur l'analyse de la courbe finale de température de production à Alfortville et de l'influence des différents paramètres testés pour le modèle monocouche. Tous les tests ont été effectués pour des températures et des transmissivités krigées sur l'ensemble du domaine.

D'après les précédentes conclusions du groupe de modélisation, le modèle monocouche est l'approche la plus pessimiste. Il a été observé que la structure verticale influe davantage sur temps de percée thermique.

3.1 ANALYSE PARAMETRIQUE

Pour évaluer l'influence des paramètres tel que l'épaisseur du réservoir, de la viscosité et de la dispersivité thermique sur la température d'exhaure à Alfortville, nous n'avons pas jugé nécessaire de prendre en compte tous les doublets du secteur. Pour cette analyse paramétrique, seul le doublet d'Alfortville a été pris en compte.

L'ajout de tests et de paramètres à prendre en compte s'est déroulé ainsi :

- Test n°1 : Epaisseur moyenne fixe sur tout le domaine
- Test n°2 : Effet de la viscosité (loi de viscosité dépendante de la température du réservoir) pour une épaisseur moyenne fixe
- Test n°3 : Ajout d'une épaisseur variable sur tout le domaine
- Test n°4: Ajout phénomène de dispersion thermique (10 m selon x, 1 m selon y)

Ces analyses paramétriques ont également été comparées aux températures mesurées sur site et en fonction des chroniques d'exploitation retenues ; débits maximaux, débits moyens et débits variables (chroniques communes au groupe de travail).

3.1.1 Résultats du Test n°1

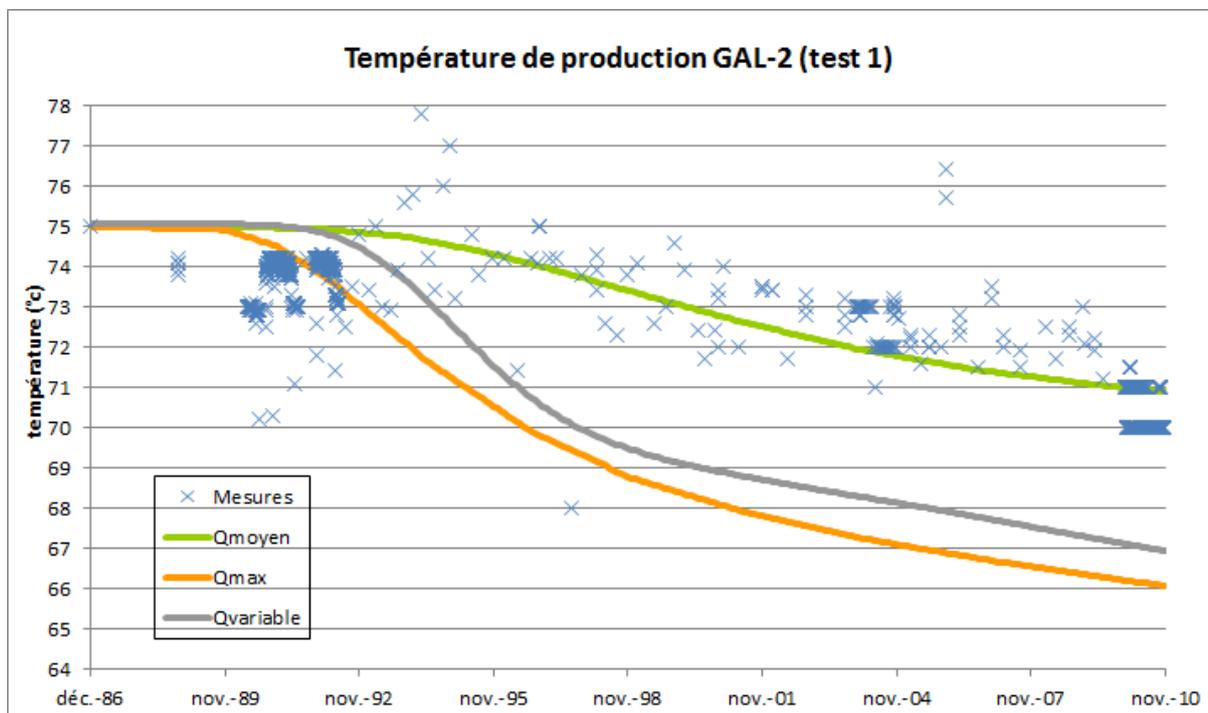


Figure 7 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°1

Les trois chroniques d'exploitation présentent clairement des différences. Le temps de percée thermique diffère. Il est de 6 ans pour des débits maximaux. Le temps de percée thermique pour des débits moyens (environ 9 ans) et variables (environ 8 ans) est quasi identique. Néanmoins la vitesse de décroissance thermique et l'allure de la courbe est plus prononcée pour des chroniques à débits variables. Ces derniers engendrent des résultats plus proches de celles à débits maximaux.

3.1.2 Résultats du Test n°2

L'influence de l'intégration de la viscosité sur les températures attendues au puits de production est testée à l'aide d'une loi d'interpolation linéaire (Cf. paragraphe 2.2.2).

Les conclusions des précédents rapports montrent que la prise en compte d'une loi de viscosité n'a pas d'impact sur le temps de percée mais a tendance à ralentir davantage la décroissance de température au puits de production.

Les résultats du test n°2 viennent confirmer ces conclusions (Cf. Figure 8), en comparaison avec les résultats du test n°1. Pour des débits et des températures d'injection variables, la température de production a diminué d'environ 5.6 °C entre 1984 et 2010, soit 2.5 °C de moins que pour le test n°1.

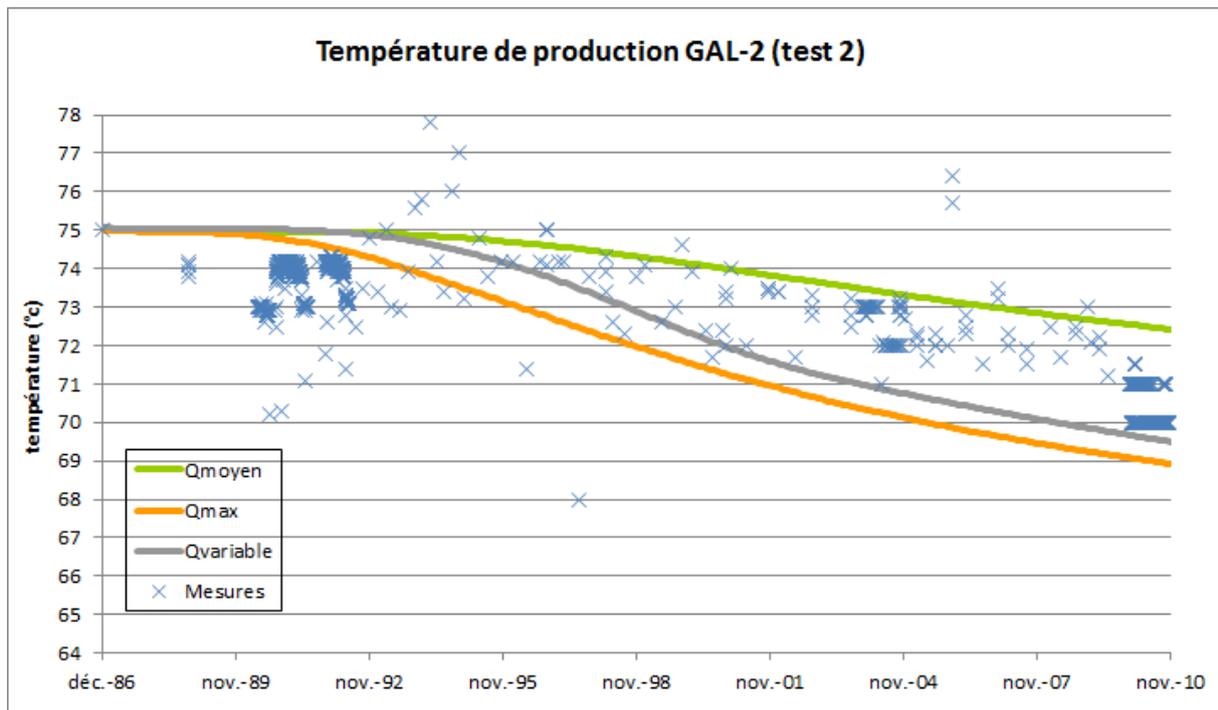


Figure 8 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°2

Les cinétiques de refroidissement sont légèrement modifiées. L'allure des courbes paraît plus lissée que pour le test n°1.

3.1.3 Résultats du Test n°3

Ce test rappelle le rôle primordial de l'épaisseur de l'aquifère prise en compte dans le calcul du temps de percée thermique. La détermination de l'épaisseur en jeu dans le système hydro-thermique est donc une étape fondamentale avant toute modélisation (Cf. Rapport BRGM/RP-595916-FR).

L'intégration d'une épaisseur variable impliquant des perméabilités krigées sur l'ensemble du domaine, diminue nettement le temps de percée thermique. Il est d'environ 6 ans pour des débits moyennés. Le temps de percée thermique pour des débits maximaux et variables (environ 4 ans) est quasi identique.

En comparaison avec le test n°2, la décroissance thermique observée pour le test n°3 est plus rapide (Cf. Figure 9). La température de production, en fin de simulation, a diminué d'environ 8°C pour des températures d'injection minimales, d'environ 4°C pour des températures de réinjection moyennes et d'environ 6.5°C pour des températures variables.

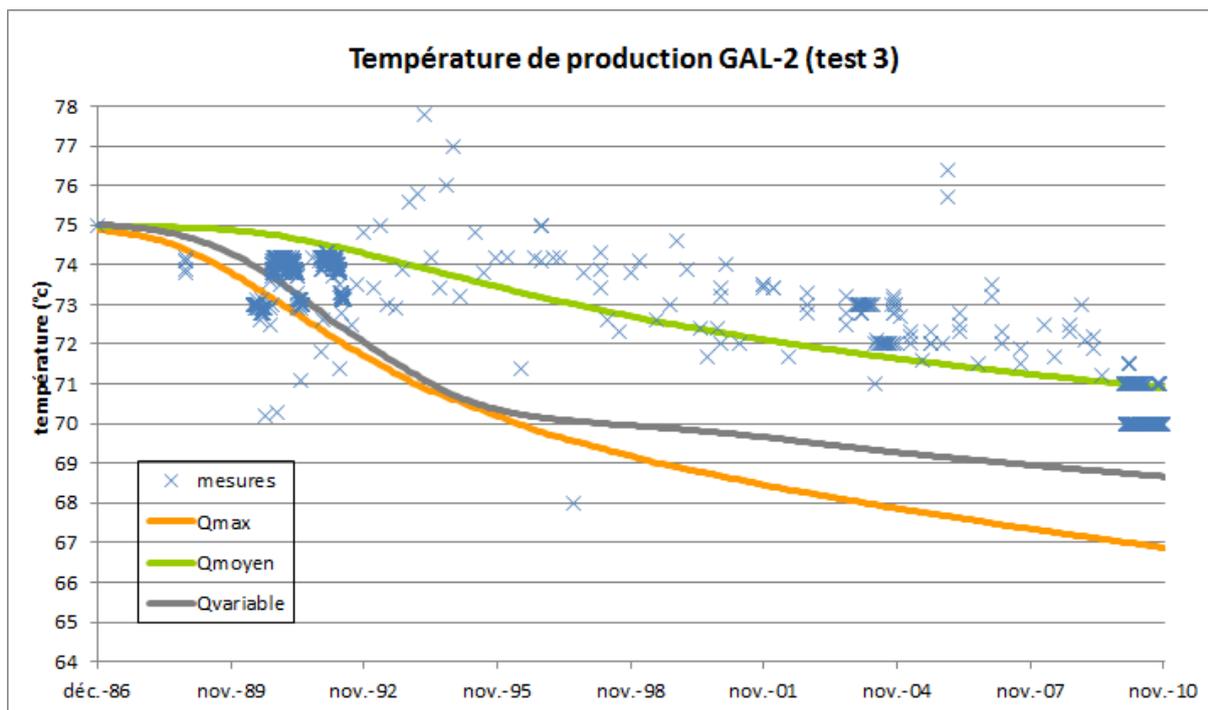


Figure 9 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°3

Pour les chroniques d'exploitation à débits variables, on observe un net décrochement et un ralentissement de la décroissance thermique à partir de Février 1995.

3.1.4 Résultats du Test n°4

L'intégration du phénomène de dispersion ne semble pas modifier le temps de percée thermique, en comparaison avec le test précédent.

Néanmoins la décroissance thermique observée pour le test n°4 est atténuée (Cf. Figure 10). La température de production, en fin de simulation, a diminué d'environ 7°C pour des débits maximaux, 3.5°C pour des débits moyens et d'environ 5.5°C pour des débits variables.

Les cinétiques de refroidissement sont légèrement modifiées. L'allure des courbes paraît plus lissée que pour le test n°3.

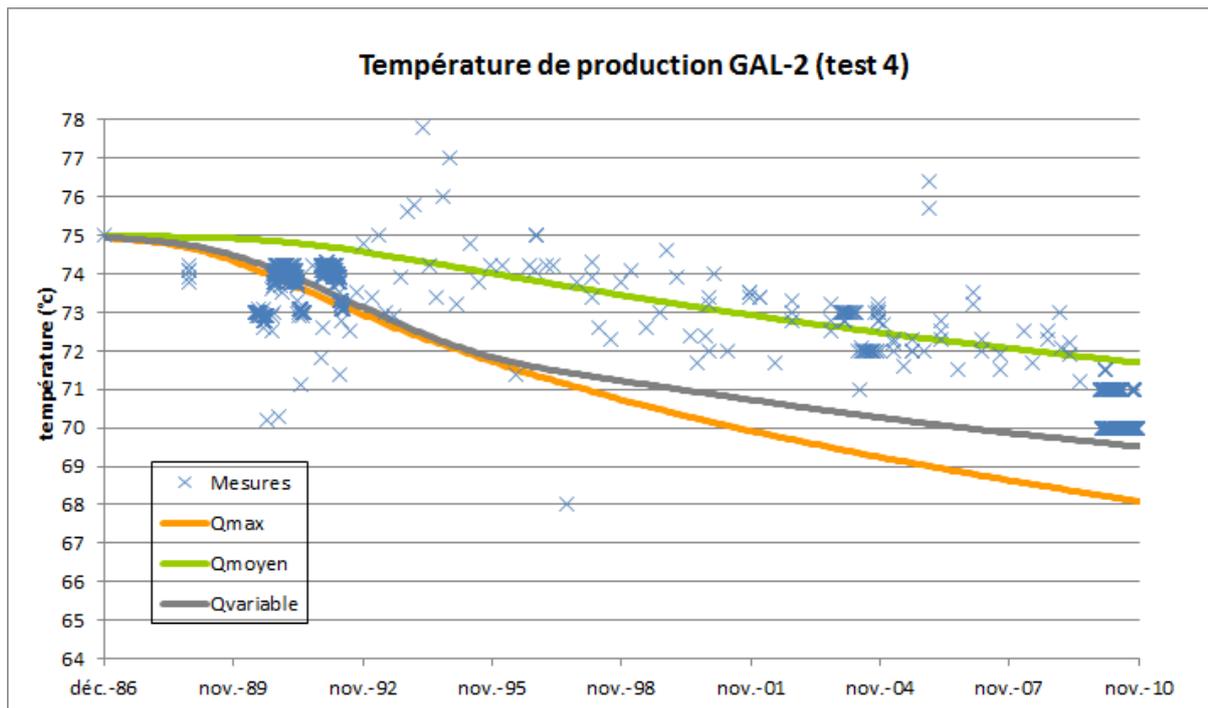


Figure 10 : Température d'exhaure au puits GAL-2 pour le test n°4

3.2 ANALYSE DES TRANSFERTS HYDRAULIQUES.

Pour construire un modèle régional, à l'échelle du secteur d'Alfortville, il est nécessaire de régionaliser les propriétés hydrauliques et thermiques du domaine. Etant donné le nombre important de puits du secteur, il est nécessaire d'optimiser la résolution spatiale et surtout le temps de résolution des calculs.

Afin de limiter des temps de calculs excessifs, il est préférable de déterminer les doublets qui potentiellement peuvent interagir avec celui d'Alfortville et ainsi déterminer qualitativement les doublets influents pour le calcul thermique.

Pour toute première analyse, le fonctionnement hydraulique des doublets du secteur d'Alfortville est modélisé en régime permanent en utilisant des débits maximaux ; soit l'hypothèse la plus pessimiste. Les variations hétérogènes des températures, des transmissivités et de l'épaisseur du réservoir sont prises en compte.

On considère généralement que l'impact hydraulique d'un doublet est négligeable lorsque celui-ci ne dépasse pas -0.5 et 0.5 bars.

Dans un premier temps, seul le doublet d'Alfortville est pris en compte (Cf. Figure 11). Le puits producteur d'Alfortville semble avoir une influence non négligeable sur les doublets de Maison Alfort (1 et 2).

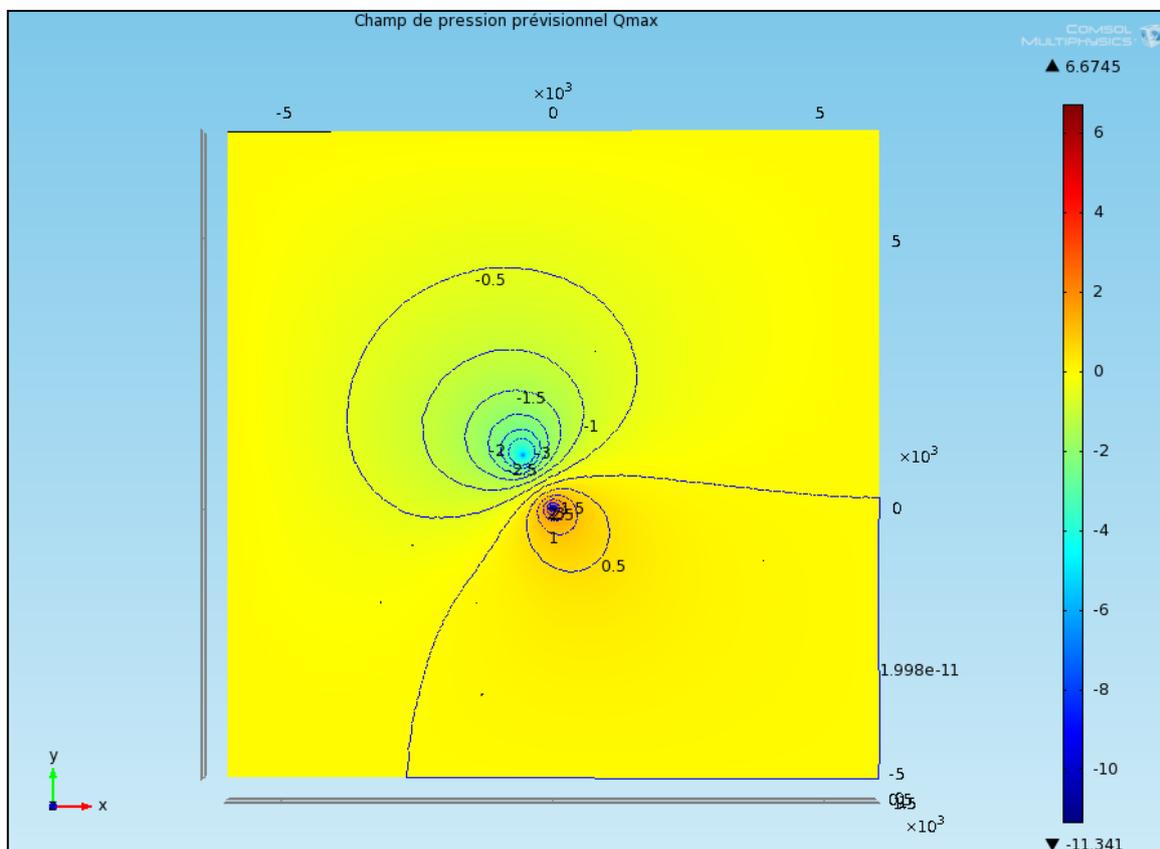


Figure 11: Champ de pression (bars) prévisionnel pour l'exploitation d'Alfortville (Débits maximaux).

Les doublets environnants sont ensuite successivement pris en compte. La première étape consiste à faire fonctionner les puits voisins un par un. La deuxième étape consiste à faire fonctionner plusieurs doublets ensemble. Qualitativement la disposition de certains doublets peut avoir un impact hydraulique qui aura tendance à s'annuler ou se cumuler.

L'éloignement des doublets d'Ivry sur Seine et de Villeneuve-Saint-Georges est considéré comme suffisant pour ne pas interagir avec le doublet d'Alfortville, d'autant plus que des débits maximaux sont imposés (Cf. Figure 12). Ces observations viennent corroborer les conclusions du rapport BRGM/RP-58834-FR.

Il en est de même pour les doublets de Thiais et Chevilly-Larue (Cf. Figure 13).

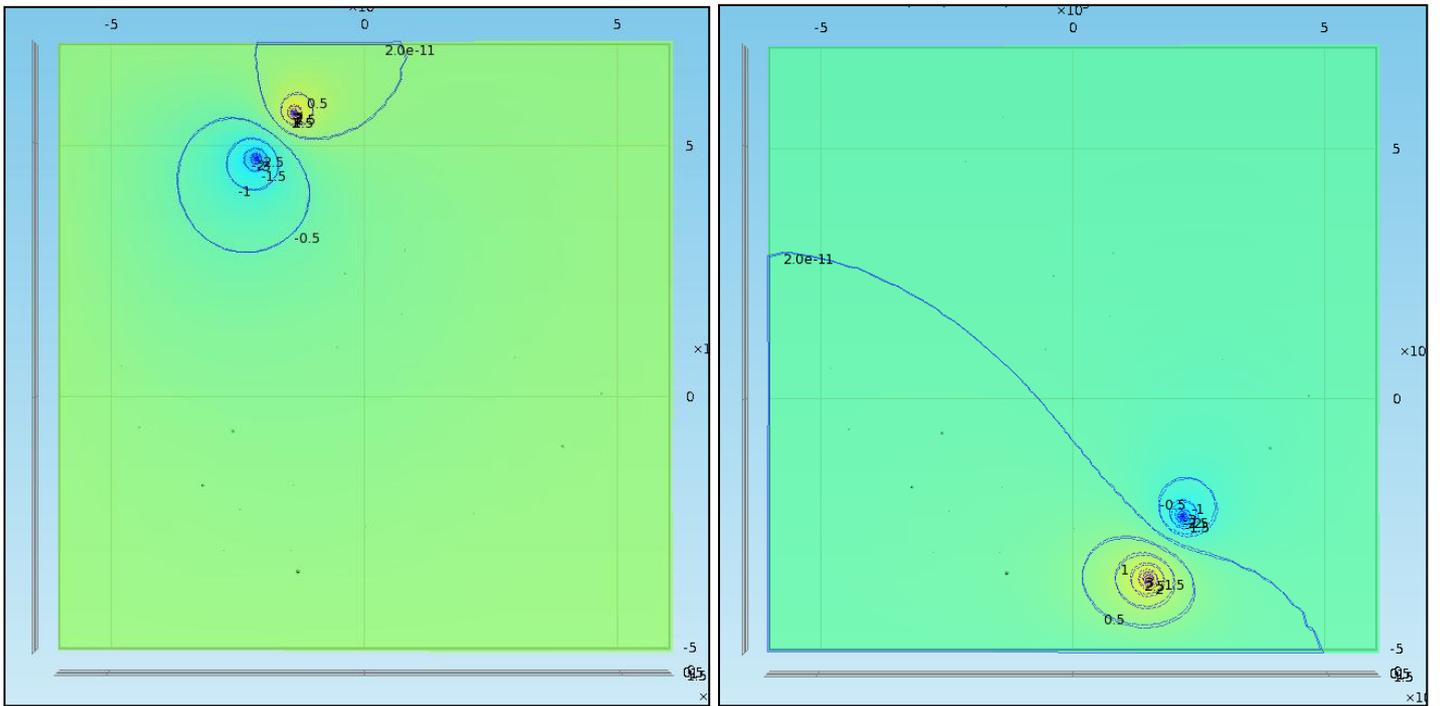


Figure 12: Champ de pression (bars) prévisionnel pour les exploitations d'Ivry sur Seine (à gauche) et de Villeneuve-Saint-Georges (à droite) pour des Débits maximaux.

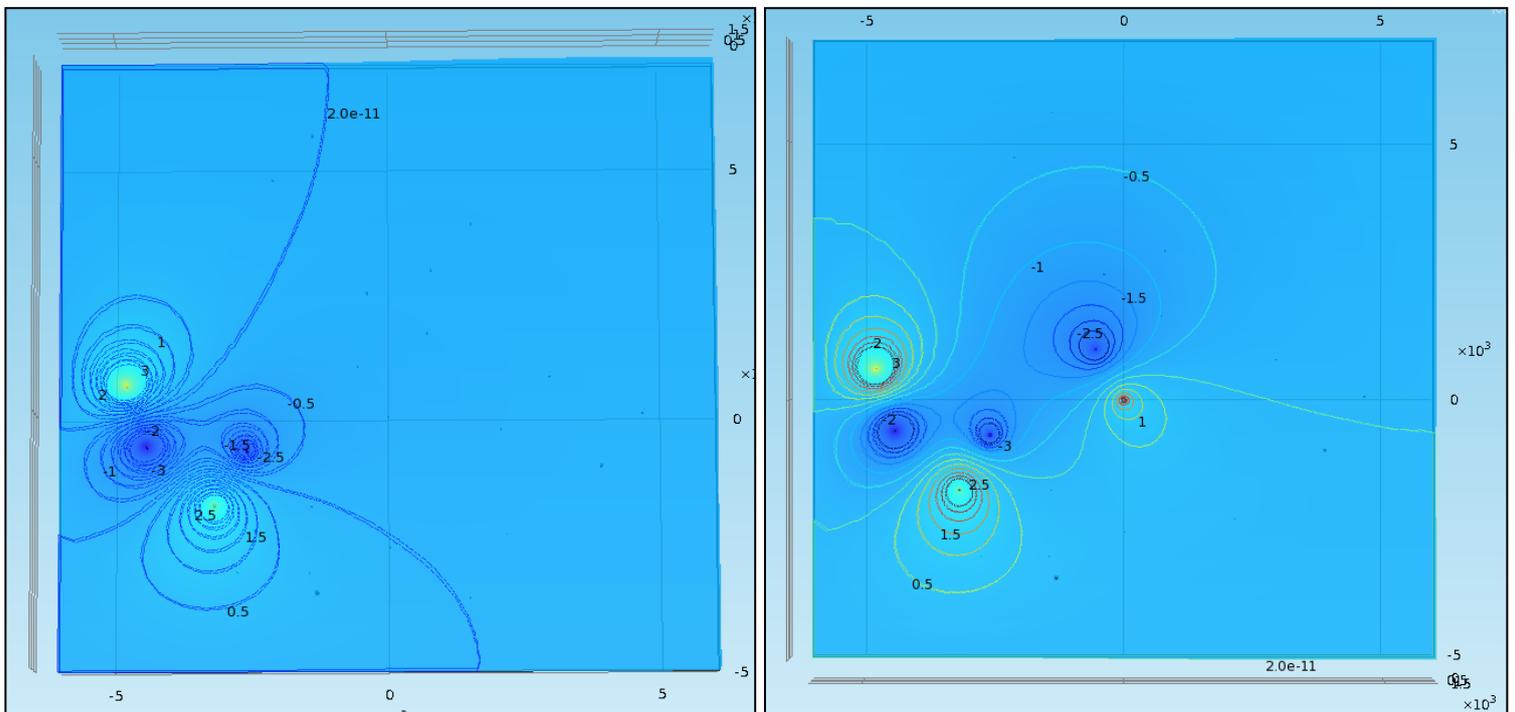


Figure 13: Champ de pression (bars) prévisionnel pour les exploitations de Thiais et Chevilly-Larue (à gauche) et avec Alfortville (à droite) pour des Débits maximaux.

Le doublet de Créteil semble interagir avec le doublet d'Alfortville. De plus le doublet de Bonneuil-sur-Marne vient accentuer l'impact hydraulique du puits producteur de Créteil. Ces deux dispositifs ne sont pas dissociables d'un point de vue hydraulique (Cf. Figure14).

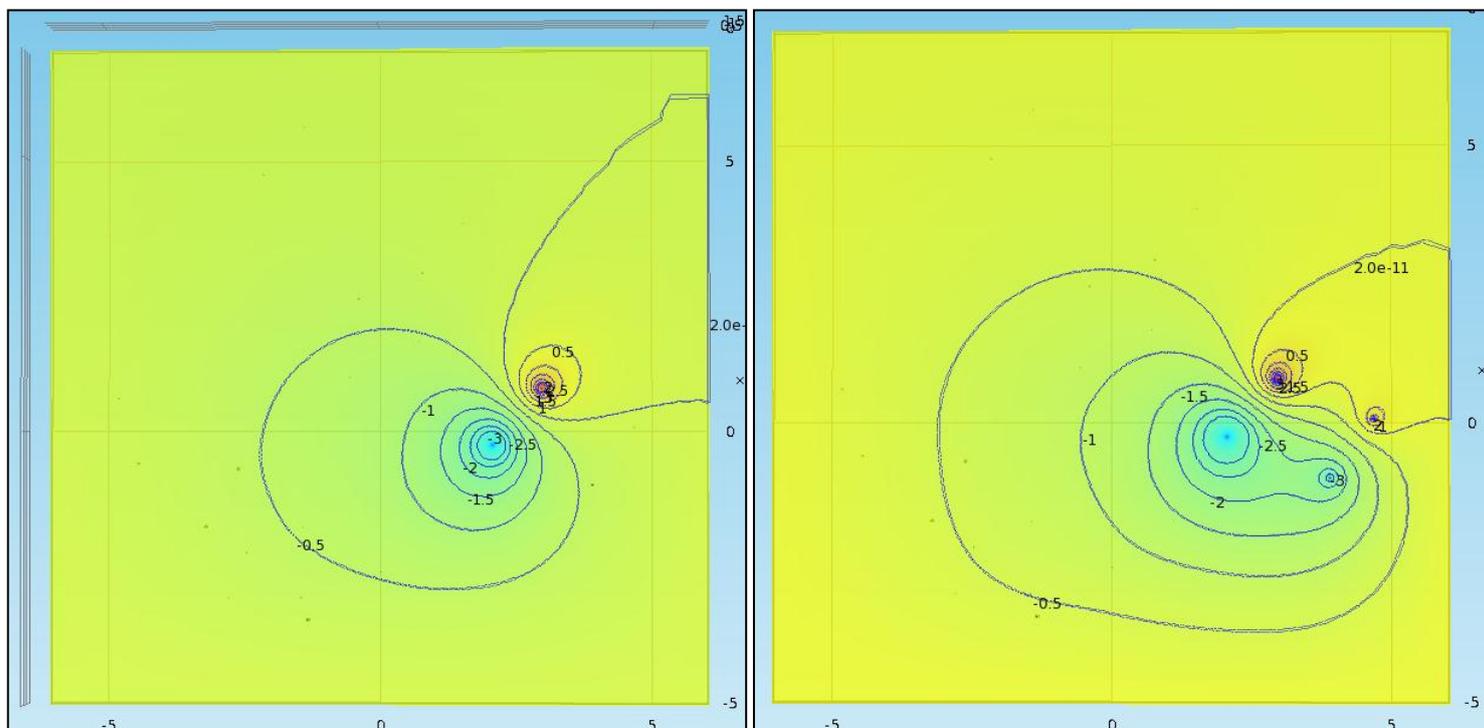


Figure 14: Champ de pression (bars) prévisionnel pour les exploitations de Créteil (à gauche) et Bonneuil-sur-Marne (à droite) pour des Débits maximaux.

Le puits producteur de Maison Alfort 1 interagit avec le doublet d'Alfortville. Mais la prise en compte du doublet Maison Alfort 2 joue le rôle de barrage vis à vis de ce premier. Le producteur d'Alfortville quant à lui interagit avec l'injecteur de Maison Alfort 2. Ces deux dispositifs ne sont pas dissociables d'un point de vue hydraulique (Cf. Figure15).

Le puits injecteur d'Orly 1 semble avoir un impact hydraulique modéré sur le doublet d'Alfortville (compris entre 0.5 et 1 bar). Néanmoins le producteur d'Orly 2 le Nouvelet atténue fortement son influence et le doublet d'Orly 2 le Nouvelet 2 la modifie peu (Cf. Figure 16). Les deux doublets d'Orly 2, en fonctionnement isolé, n'auront aucun impact hydraulique sur Alfortville. Les doublets d'Orly semblent davantage interagir avec le doublet de Thiais. La prise en compte, en cumulé, des doublets de Thiais et de Chevilly-Larue modifie peu l'influence des doublets d'Orly sur Alfortville.

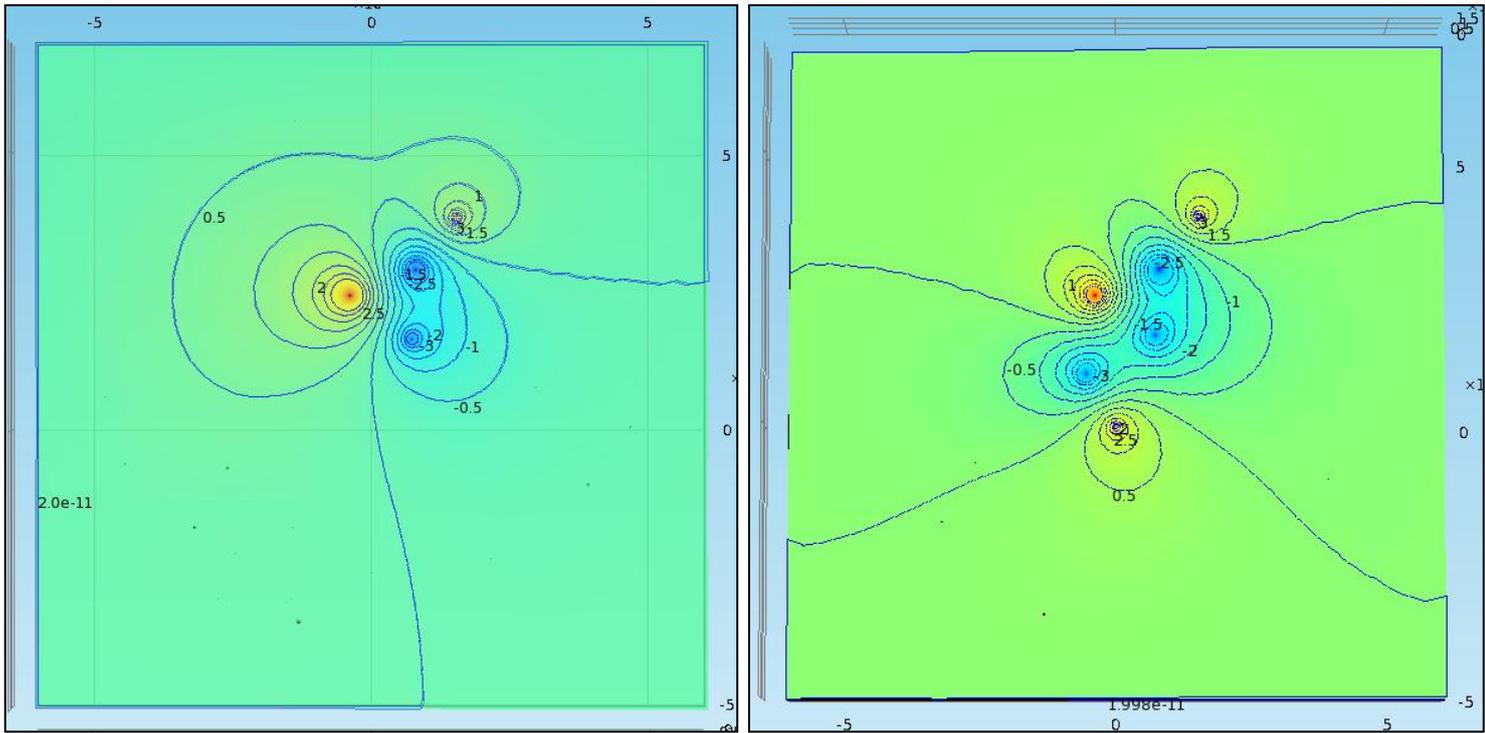


Figure 15: Champ de pression (bars) prévisionnel pour les exploitations de Maison-Alfort 1 et 2 (à gauche) et avec Alfortville (à droite) pour des Débits maximaux.

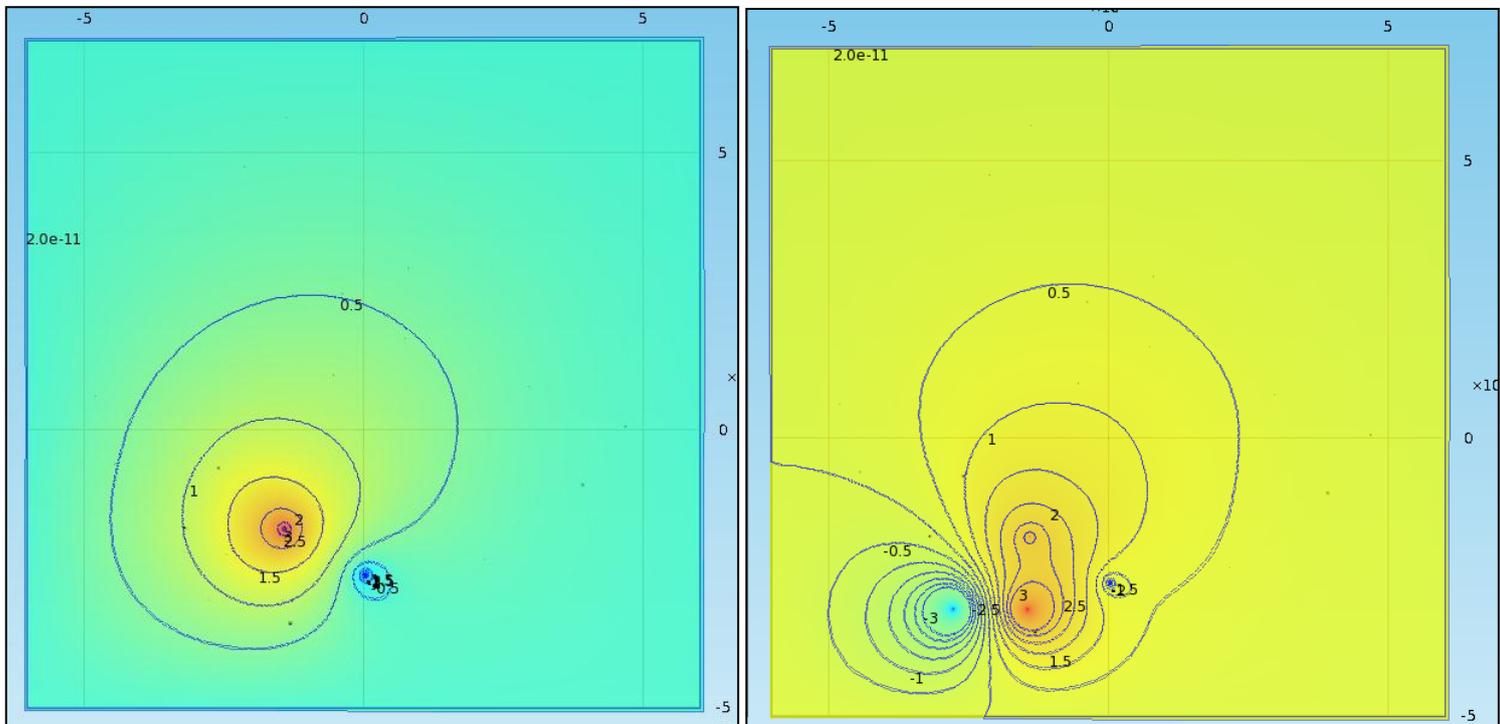


Figure 16: Champ de pression (bars) prévisionnel pour les exploitations d'Orly 1 (à gauche) avec Orly 2 le Nouvelet 2 (à droite) pour des Débits maximaux.

En résumé pour la modélisation du fonctionnement hydraulique et thermique du secteur d'Alfortville, le fonctionnement conjoint des doublets d'Alfortville, Maison Alfort 1, Maison Alfort 2, Créteil, Bonneuil-sur-Marne, Orly 1 Gazier est pris en compte.

3.2 ANALYSE DES TRANSFERTS THERMIQUES

Lors de l'analyse paramétrique, les quatre tests ont montré que les chroniques à débits moyens semblent mieux refléter les températures d'exhaure au puits GAL-2. Il faut néanmoins garder à l'esprit que ces valeurs, mesurées sur site, doivent être analysées avec précaution. En effet la précision et les calculs d'erreurs des mesures ne sont pas connus.

L'analyse des transferts thermiques, d'un point de vue régional, s'apparente au test n°4, à la différence que les doublets voisins potentiellement influents sont pris en compte. L'étendue des bulles froides des doublets d'Alfortville, Maison Alfort 1, Maison Alfort 2, Créteil, Bonneuil-sur-Marne et Orly 1 Gazier est analysée.

Les chroniques d'exploitation à débits moyens et températures de réinjection moyennes sont retenues. La figure suivante permet de visualiser l'étendue des bulles froide, sur le secteur, pour l'horizon fin 2010 (Cf. Figure 17).

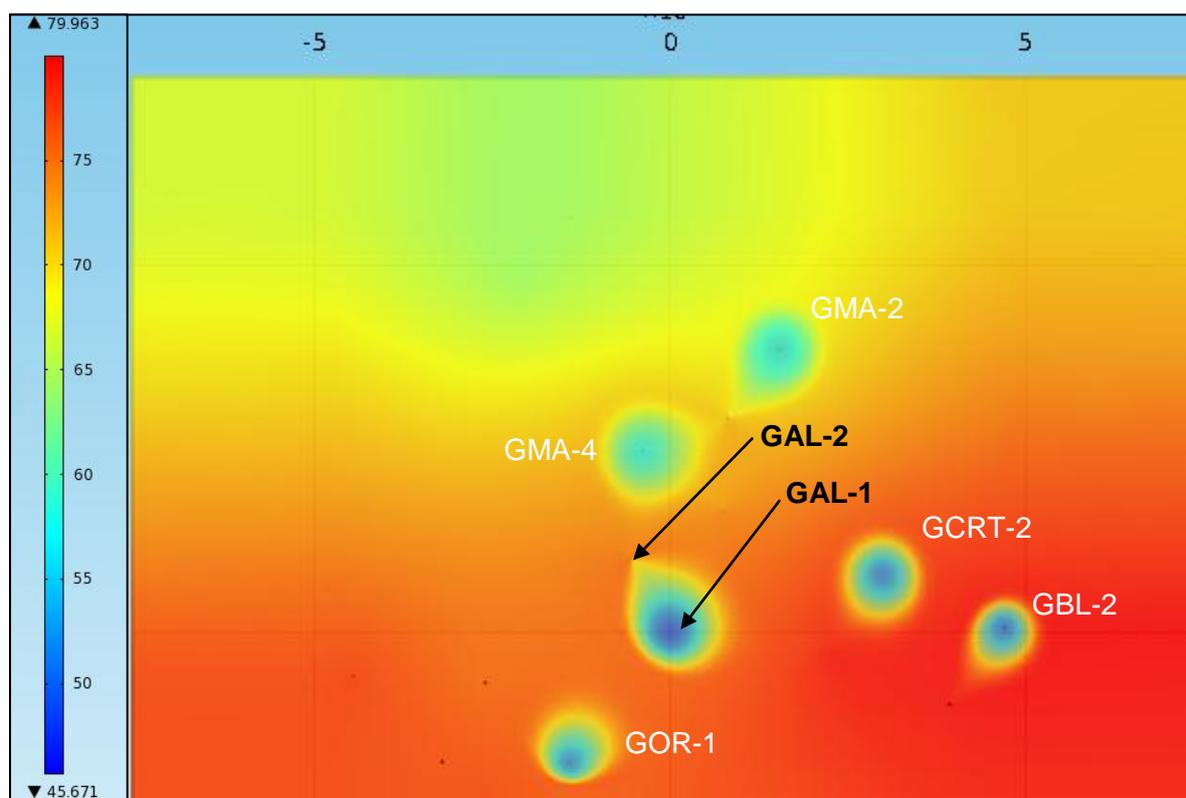


Figure 17: Champ des températures prévisionnelles (°C) pour l'horizon fin 2010, pour des chroniques d'exploitation à débits moyens.

La bulle froide du doublet d'Alfortville semble s'orienter uniquement vers le puits producteur GAL-2. La perturbation thermique engendrée par le puits GAL-1 semble atteindre le puits producteur GAL-2 à l'horizon fin 2010.

La figure suivante permet de visualiser l'évolution de la température de production au puits producteur et de la comparer à la solution donnée au test n°4 (Cf. Figure 18).

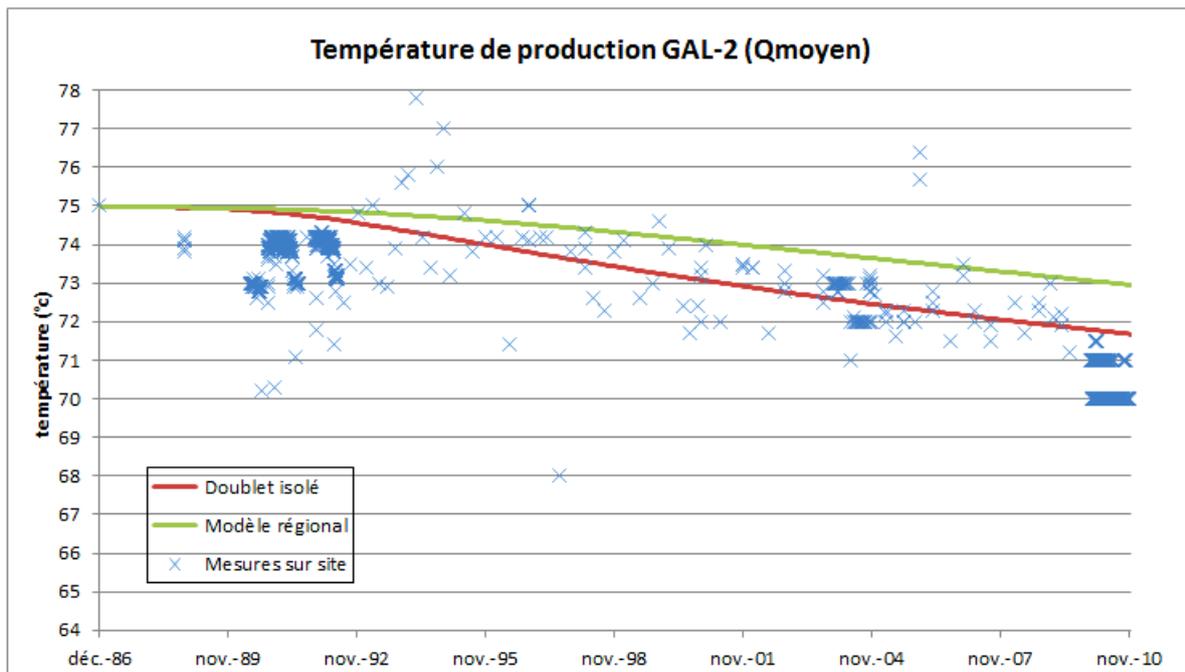


Figure 18: Températures de production pour le puits GAL-2, pour l'horizon fin 2010, avec des débits moyens.

Lors de la prise en compte des puits qui potentiellement interagissent avec le doublet d'Alfortville, on observe que le temps de percée thermique reste grossièrement inchangé. Toutefois dans un modèle régional, la décroissance thermique au puits GAL-2 semble ralentie. La température d'exhaure, décembre 2010, atteint la valeur de **72.95 °C** ; soit une baisse d'environ **2.2 °C** depuis le début des simulations. En doublet isolé la température finale atteint **71.7 °C** ; soit une baisse d'environ **3.45 °C**.

Ce ralentissement des écoulements, entre GAL-1 et GAL-2, pourrait s'expliquer par l'influence positive des doublets de Créteil et Bonneuil-sur-Marne. En effet l'impact hydraulique est positif vis à vis du puits injecteur d'Alfortville (GAL-1) puisque son niveau dynamique est inférieur lorsque le nouveau doublet de Créteil et Bonneuil-sur-Marne fonctionne conjointement. Cet impact reste cependant limité (de l'ordre de 1 bar) compte tenu des conditions pessimistes de la simulation correspondant à un fonctionnement des exploitations à des débits maximaux. L'impact hydraulique est positif vis-à-vis de GAL-2 puisque leur niveau dynamique est supérieur lorsque l'injecteur de Maison Alfort 2 fonctionne.

Un suivi précis des pressions relevées aux puits d'Alfortville permettront de mieux comprendre les interactions hydrauliques avec les puits environnants.

Les températures de production relevées pour les puits environnants le doublet d'Alfortville figurent sur le graphique suivant (Cf. Figure 19).

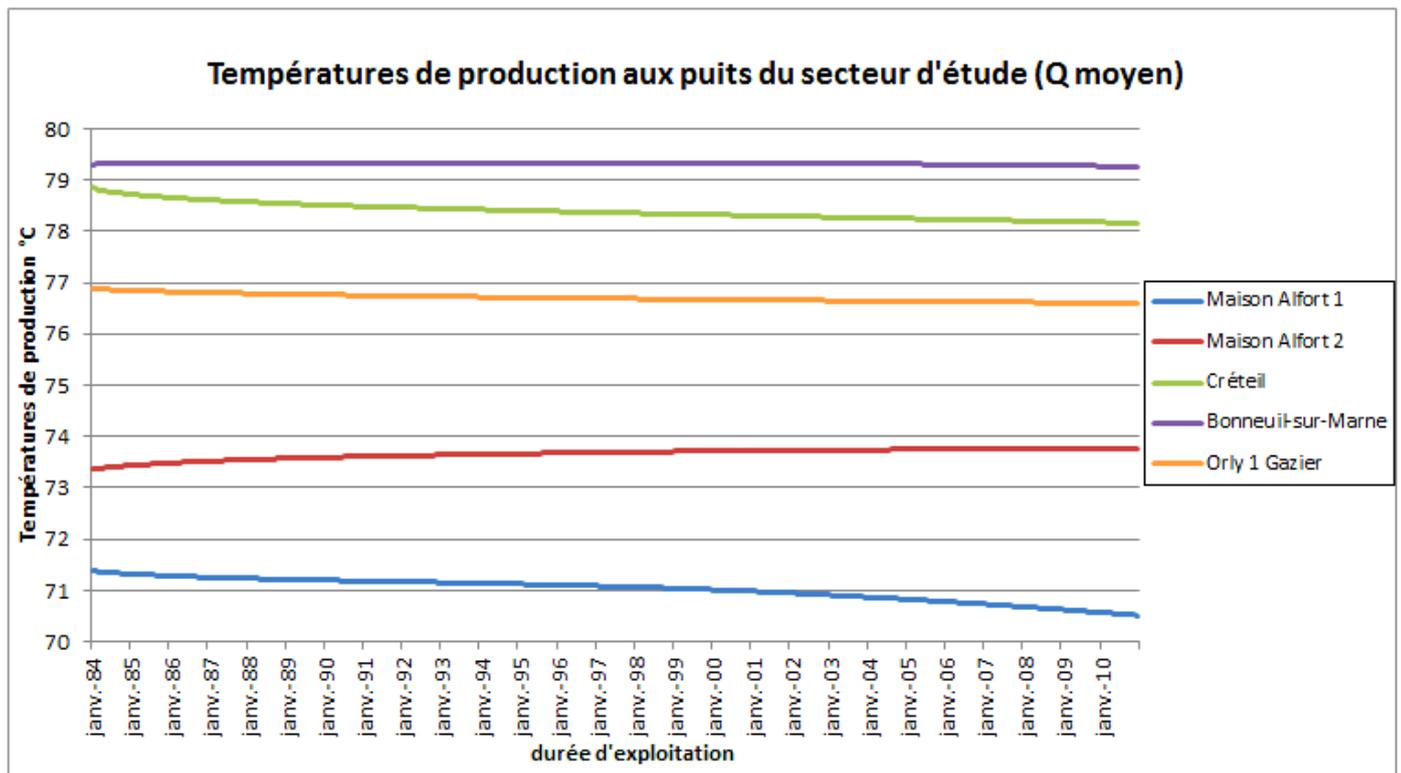


Figure 19: Températures de production pour les puits du secteur d'étude, pour l'horizon fin 2010, avec des débits moyens.

A l'horizon décembre 2010, la température de production au puits GMA-1 atteint 70.5°C ; soit une baisse de **0.86°C** depuis le début des simulations. Pour le puits GMA-3, la température atteint 73.75°C ; soit une hausse de **0.4°C**. Pour le doublet de Créteil, la température atteint la valeur de 78.16°C en fin de simulation ; soit une baisse de **0.68°C**. A Bonneuil-sur-Marne la température de production n'a pas évolué (baisse de **0.05°C**). Pour le doublet d'Orly 1 Gazier, la température finale atteint la valeur de 76.6°C ; soit une baisse de **0.28°C**.

4 SYNTHESE

Lors de l'analyse paramétrique, les quatre tests ont montré que les chroniques à débits moyens semblent mieux refléter les températures d'exhaure au puits GAL-2. Il faut toutefois garder à l'esprit que ces valeurs, mesurées sur site, doivent être analysées avec précaution. En effet la précision et les calculs d'erreurs des mesures ne sont pas connus. Grâce aux différents tests paramétriques, il a pu être observé que :

- L'influence de la viscosité dépendante de la température et de la dispersivité thermique ont tendance à ralentir la décroissance thermique aux puits de production (Cf. Test n°2 et n°4).

- L'ajout d'une épaisseur variable du réservoir sur l'ensemble du domaine a tendance à amorcer, de façon précoce, la décroissance thermique (Cf. Test n°3).

Même si l'allure des courbes de températures de production à débits variables diffère légèrement des chroniques à débits maximaux et moyens, on peut considérer que ces chroniques encadrent bien les résultats pour des débits et températures variables.

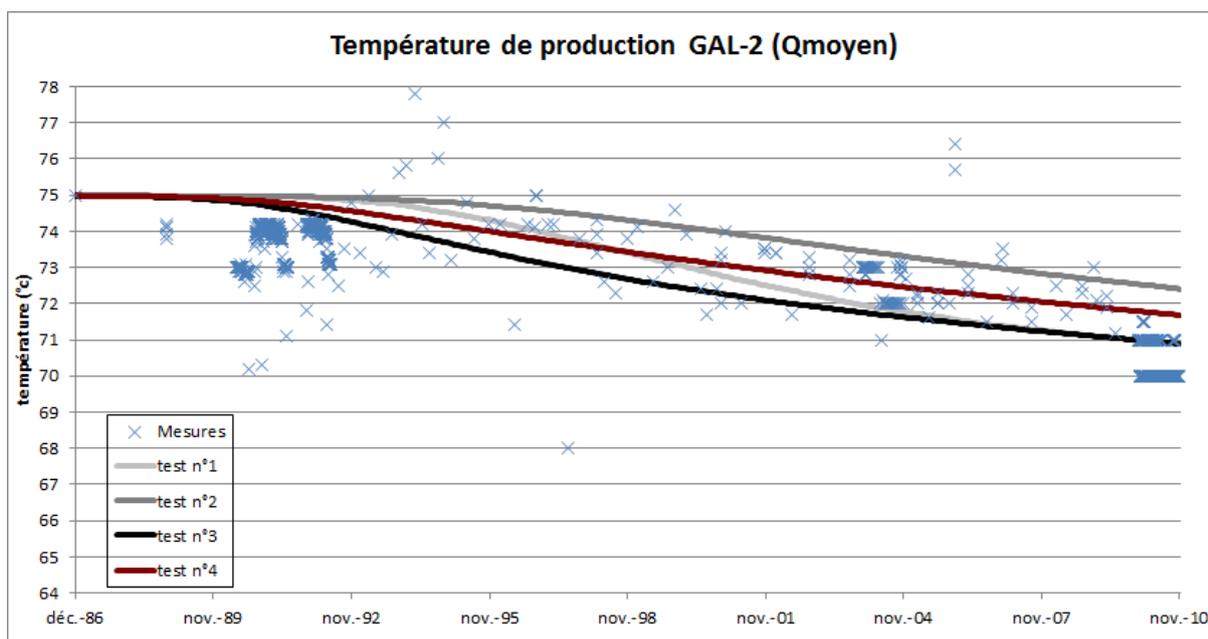


Figure 20: Températures d'exhaure simulées selon 4 tests d'étude pour des débits moyens, en comparaison avec les températures mesurées sur site.

La prise en compte des puits qui potentiellement interagissent avec le doublet d'Alfortville semble ralentir la décroissance thermique observée au puits GAL-2. Les pressions aux puits d'Alfortville devront être vérifiées en détail, afin de quantifier l'influence respective des puits environnants.

5 ANNEXES

Annexe 1.a : Données hydrogéologiques des doublets d'étude (Cf. Rojas et al, 1989).

Identification	Maison alfort2		Maison alfort1		Ivry sur seine	
	P	I	P	I	I	P
Nom	GMA3	GMA4	GMAS1	GMAS2	GIV1	GIV2
n° BSS	01838C0203	01838C0204	01838C0201	01838C0202	01837D0266	01837D0267
x toit reservoir	607 686,4	606 582,0	607 758,4	608 489,8	605 584,1	604 846,2
y toit reservoir	120 318,9	121 108,9	121 574,6	122 499,8	124 279,8	123 386,0
Epaisseur productrice (m)	19,5	9,2	13,3	22,1	14	10,4
Transmissivité (D.m)	36,3	22,2	33,2	58,3	33,5	37,2
Porosité	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15
Température au réservoir (°c)	73,3	72,6	71,4	69	65	64,8
Tubage (pouces)	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Nombre niveaux producteurs	8	5			6	3
Zone productrice (profondeur déviée en m)	1855 à 1932	1822,5 à 1866			1695,5 à 1768	1638,5 à 1656,5
Facteur de skin	-1,4	-3,7	-4,1	1	-2,1	-2,2
Distance injecteur-producteur (m)	1358		1179		1159	

Identification	Creteil		Thiais		Chevilly-Larue	
	P	I	P	I	I	P
Nom	GCRT1	GCRT2	GTH1	GTH2	GCHE1	GCHE2
n° BSS	02194X0171	02194X0172	02193X0376	02193X0377	01845X0124	01845X0125
x toit reservoir	609 035,9	609 927,4	604 379,8	603 786,6	602 175,6	602 545,2
y toit reservoir	118 411,2	119449,8	117 982,3	116 911,3	119 272,1	118 066,6
Epaisseur productrice (m)	14,7	23,6	16	10	14	13
Transmissivité (D.m)	30	33	20,1	26,2	13	22,5
Porosité	0,151	0,158	0,15	0,12	0,1	0,15
Température au réservoir (°c)	78,9	77,9	75,4	76,6	75,4	77,2
Tubage (pouces)	8	8	8,5	8,5	8,5	8,5
Nombre niveaux producteurs	5	7	3	4	7	6
Zone productrice (profondeur déviée en m)	1866 à 1930	1852,5 à 1940	1785 à 1822	1807 à 1850	1725 à 1799	1976 à 2000
Facteur de skin	-1,1	-2,5	-5,2	-5,1	-1	-4,1
Distance injecteur-producteur (m)	1369		1224		1261	

	vill st georges		Bonneuil sur marne		Alfortville	
Identification	P	I	P	I	I	P
Nom	GVSG1	GVSG2	GBL1	GBL2	GAL1	GAL2
n° BSS	02194X0177	02194X0178	02194X0169	02194X0170	02194X0173	02194X0174
x toit reservoir	609 123,3	608 454,6	610 861,3	611 626,9	606 963,1	606 418,4
y toit reservoir	116 346,4	115 097,6	117 683,0	118 729,9	118 662,3	119 652,0
Epaisseur productrice (m)	38,3	23,4	13,5	27	9,4	8,2
Transmissivité (D.m)	70	71,6	75	72	52,8	35,3
Porosité	0,165	0,165	0,21	0,203	0,161	0,181
Température au réservoir (°c)	77,9	76,5	79,3	79,7	75,2	75,2
Tubage (pouces)	8	8	8,5	8,5	8,5	6
Nombre niveaux producteurs	11	6	6	5	7	6
Zone productrice (profondeur déviée en m)	1860 à 1906	1856 à 1908,5	2028 à 2080	1912 à 1987	2071 à 2093,5	1686 à 1706
Facteur de skin	-1,6	-1,4	-5	-4	-2	-2
Distance injecteur-producteur (m)	1417		1297		1130	

	Orly I		Orly II		Orly II	
Identification	I	P	P	I	I	P
Nom	GOR1	GOR2	GOR3	GOR4	GORY5	GORY6
n° BSS	02193X0364	02193X0365	02193X0160	02193X0161		
x toit reservoir	605 561,6	606 991,0	604 523,6	605 658,2	605527	604205
y toit reservoir	116 895,9	116 080,3	116 433,3	115 199,1	115599,5	115608,5
Epaisseur productrice (m)	8,7	21,9	10	12		
Transmissivité (D.m)	60	35	13,9	22,2		
Porosité	0,141	0,113	0,15	0,15		
Température au réservoir (°c)	76	76,9	74,0	62,5		
Tubage (pouces)	6	6	8,5	8,5		
Nombre niveaux producteurs			4	6		
Zone productrice (profondeur déviée en m)			1802 à 1828,5	1881 à 1920		
Facteur de skin	-3	-3	-3,6	-5,5	-2	-2
Distance injecteur-producteur (m)	1646		1676		1322	

Annexe 1.b : Chroniques de débits maximaux et moyennes.

ALFORTVILLE			
	Q	T	
moy	185	50	1
max	280	65	2
min	89	39	

ORLY 1 GAZIER			
	Q	T	
moy	91	53	1
max	130	71	2
min	23	35	

	ALFORTVILLE		BONNEUIL		ORLY 2 LE NOUVELET		IVRY-SUR-SEINE		MAISON ALFORT 1		CRETEIL	
	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T
moy	185	50	147	53	208	54	75	16	186	55	182	53
max	280	65	243	69	261	74	115	25	310	70	280	75
min	89	39	66	38	109	38	49	10	65	43	79	12

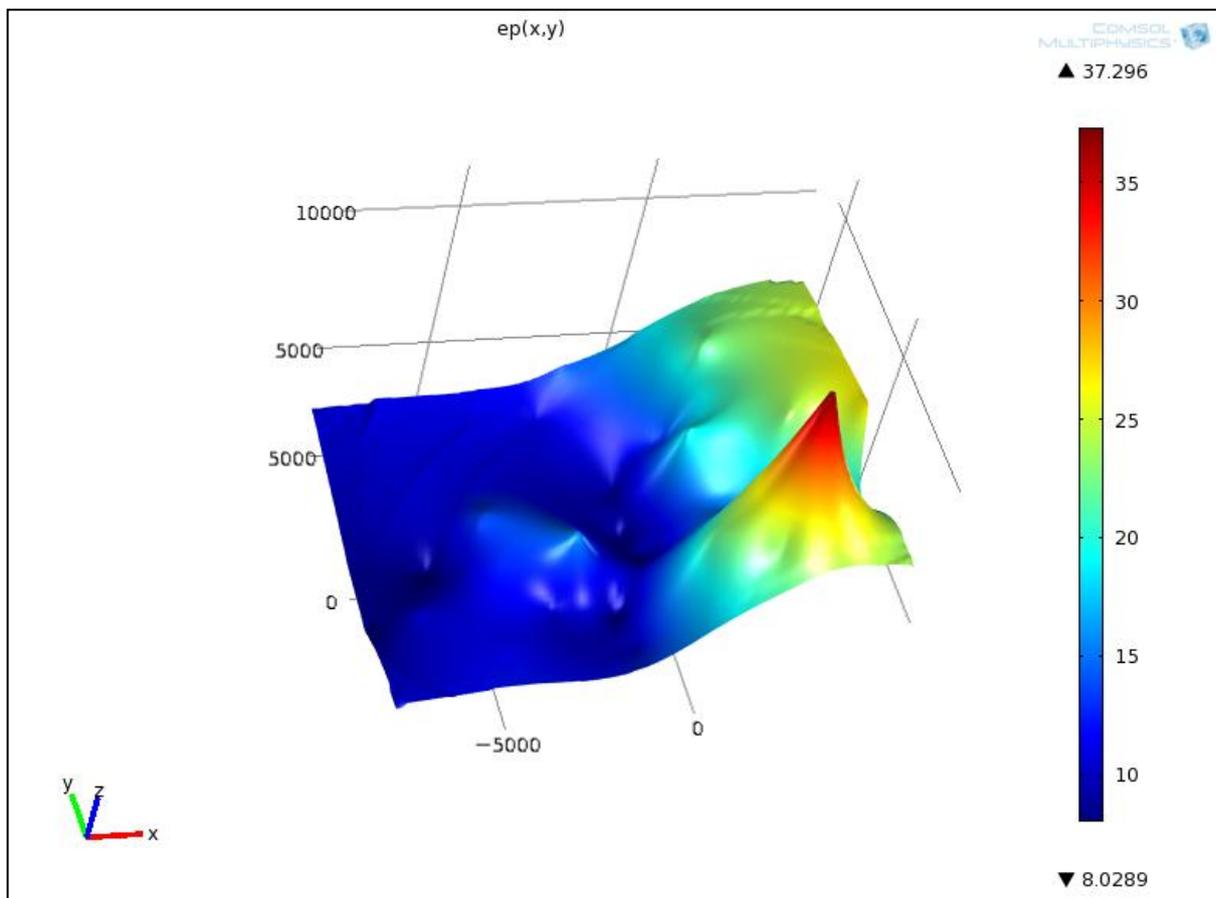
	ORLY 1 GAZIER		THIAIS		ORLY 2 LE NOUVELET2		CHEVILLY-LARUE		MAISON ALFORT 2		VILLENEUVE ST-GEORGES	
	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T
moy	91	53	162	50	237	49	190	47	163	57	174	53
max	130	71	251	69	299	69	313	71	262	72	350	67
min	23	35	10	41	185	30	1	26	50	42	72	20

FORT 1			CRETEIL		
T	Q	T	Q	T	
55	182	53			
70	280	75			
43	79	12			

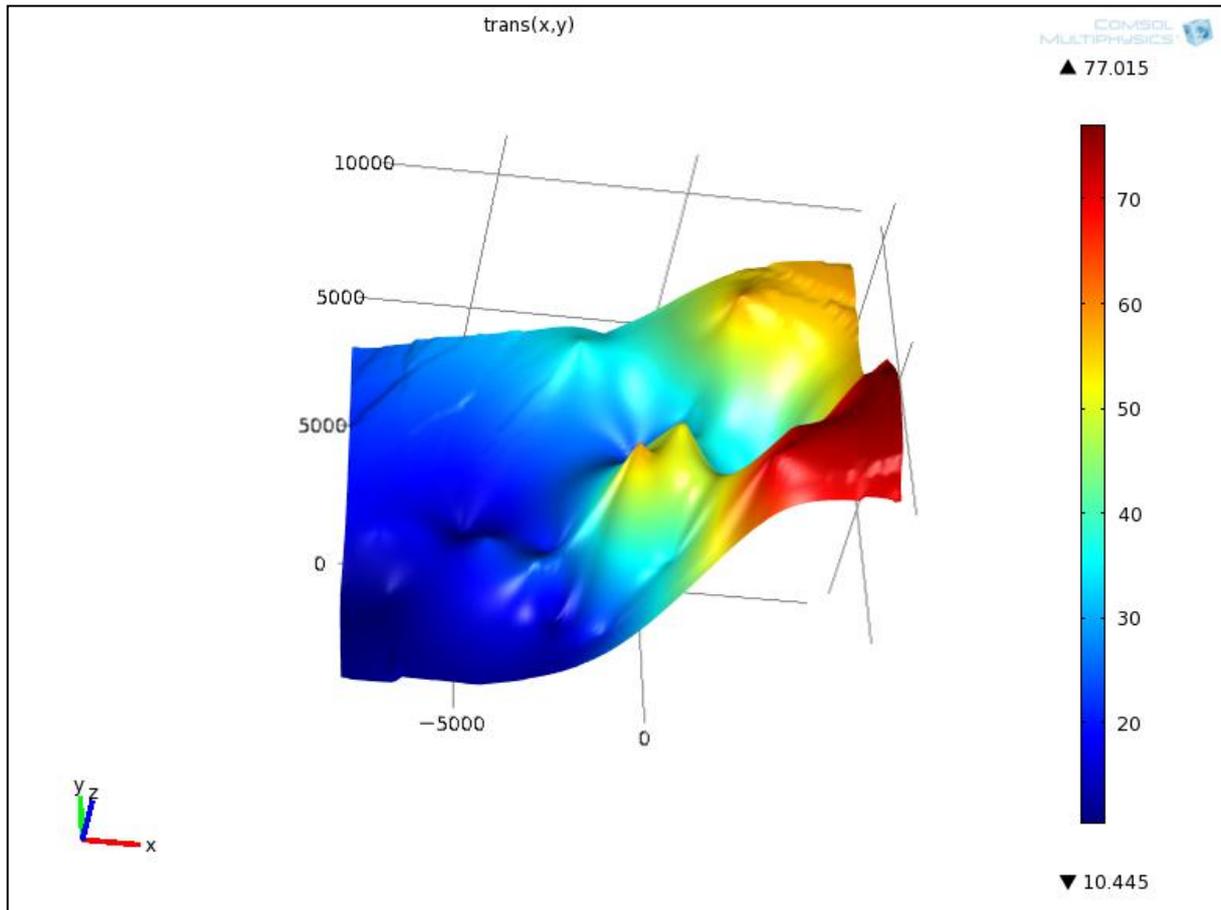
FORT 2			VILLENEUVE ST-GEORGES		
T	Q	T	Q	T	
57	174	53			
72	350	67			
42	72	20			

Annexe 2 : Cartes Géostatistiques du secteur d'Alfortville.

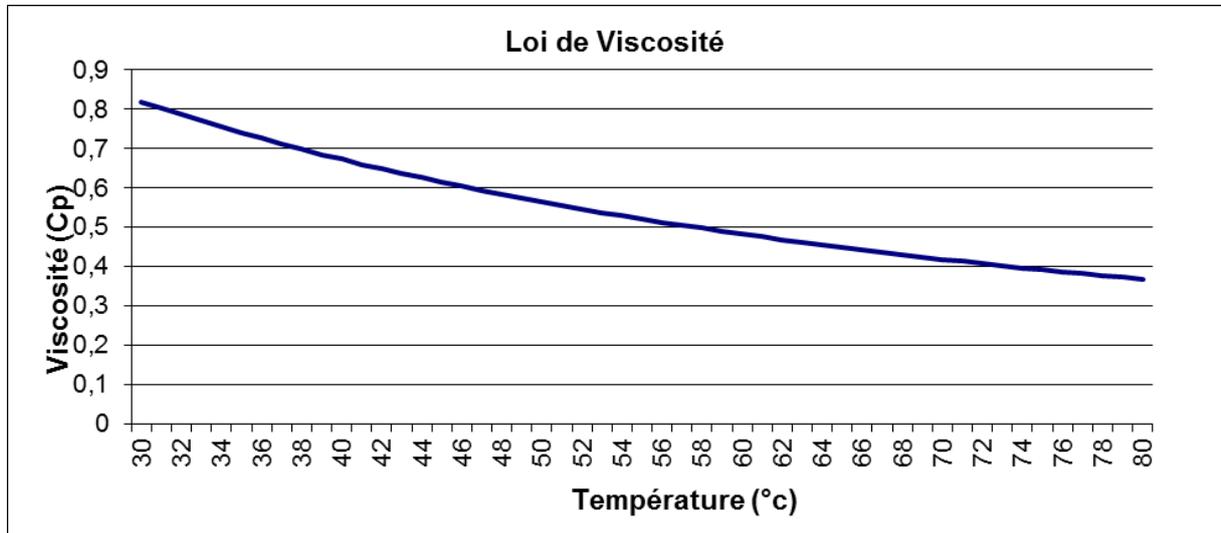
Carte des épaisseurs productrices cumulées (en mètres) krigées sur le secteur d'étude. Le puits GAL-1 aux coordonnées ($x=0$ et $y=0$).



Carte des transmissivités du réservoir krigées (en Darcy. Mètres) sur le secteur d'étude. Le puits GAL-1 aux coordonnées (x=0 et y=0).



Annexe 3 : Loi de viscosité (Abaque de Chesnut).



Pour une pression de gisement moyenne de 170 bars et une salinité moyenne de 18 g/l.

Annexe 4 : Equations mathématiques utilisées dans le modèle numérique d'Alfortville.

L'équation générale décrivant l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux sous les effets d'un gradient de pression et de la gravité est donnée par la Loi de Darcy :

$$S \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \left[\frac{k}{\eta} (\nabla P + \rho_f g \nabla D) \right] = Q_f$$

Avec :

S : le coefficient d'emmagasinement du milieu poreux

P : la pression du fluide

t : le temps

k : la perméabilité intrinsèque du milieu poreux

η : la viscosité dynamique du fluide

ρ_f : densité du fluide

g : l'accélération de la pesanteur

D : l'élévation verticale

Q_f : le débit volumique de fluide extrait ou soustrait par unité de volume du milieu poreux (terme source)

Le transport de chaleur par convection et conduction dans l'aquifère est décrit par l'équation générale suivante :

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (K_{eq} \nabla T) = -C_L u \nabla T + Q_C$$

Avec :

C_{eq} : la capacité calorifique volumique de l'ensemble fluide / roche

K_{eq} : la conductivité thermique de l'ensemble fluide / roche

Où : $K_{eq} = K_{DISP} (C_L, \lambda, \eta) + K_{PM}$

Avec : K_{DISP} : la dispersivité thermique du milieu dépendante des coefficients de dispersivité ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)

K_{PM} : la conductivité thermique du milieu poreux

C_L : la capacité calorifique volumique du fluide

u : la vitesse du fluide (vitesse de Darcy)

Q_C : le terme source de chaleur

6 BIBLIOGRAPHIE

Gringarten A.C., Sauty J.P. (1975), "A Theoretical Study of Heat Extraction From Aquifers". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, N° 35, p. 4956-4962.

Hamm V., Castillo C., Le Brun M., Goyénèche O. (2010) – Mise en œuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Île-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données - Rapport final de la phase 3. Rapport BRGM/RP-58834-FR, 77 p., 34 fig., 4 tabl., 11 ann.

Le Brun M., Hamm V., Lopez S., Antics M., Ausseur JY., Cordier E., Giuglaris E., Goblet P., Lalos P., Ungemach P., Goyénèche O. (2011) –Pratiques de modélisation hydraulique et thermique pour des exploitations géothermiques au Dogger dans la région parisienne. Rapport final. BRGM/RP-59591-FR, 102 p., 34 fig., 8ann.

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

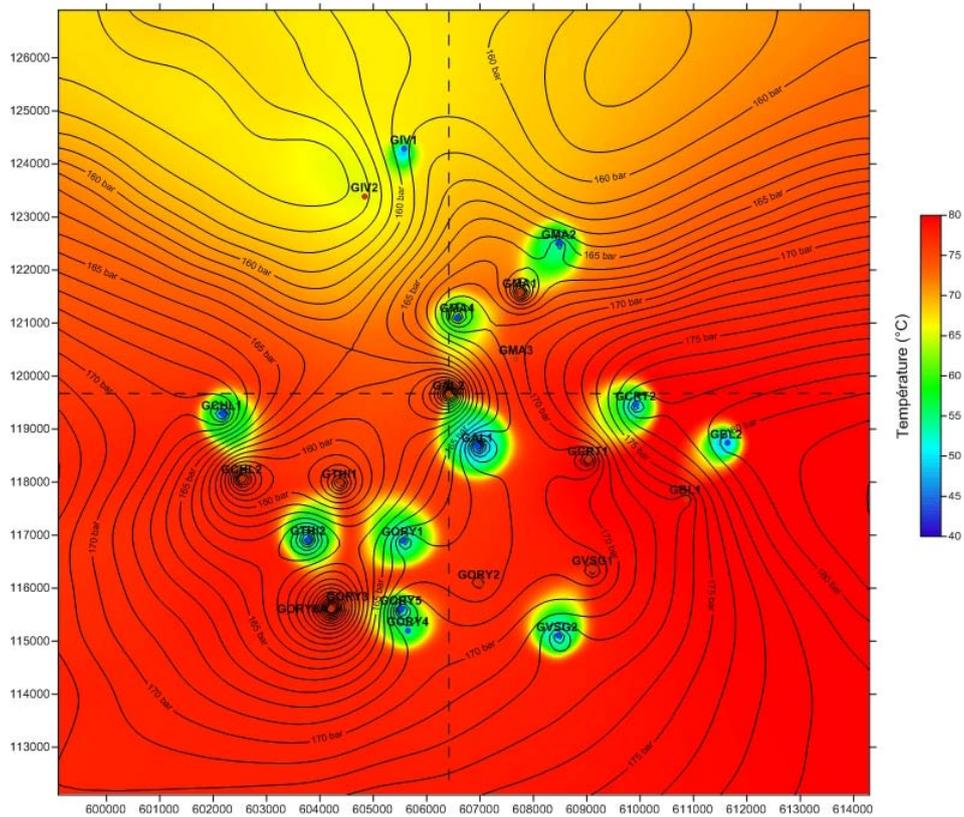
Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.-M., Criaud A., Fouillac C., Brach M., Menjoz A., Martin J.-C., Lambert M. (1989) - Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin parisien, France. Rapport final. BRGM/R 30169, 240 p.

Annexe 4

Rapport technique de GPC I&P

Gestion Dogger 2011

Modélisation supplémentaire Alfortville



Sommaire

1	Construction du modèle numérique du réservoir.....	4
1.1	Discrétisation spatiale	4
1.1.1	Structure horizontale.....	4
1.1.2	Structure verticale	5
1.2	Propriétés hydrauliques et thermiques du réservoir	6
1.2.1	Propriétés pétrophysiques	6
1.2.2	Champ de pression	8
1.2.3	Champ de température	9
2	Simulation entre 1984 et 2011.....	10
2.1	Chronique de débits et de températures d'injection.....	10
2.2	Résultats	11
3	Bibliographie.....	13
	Annexe 1 : état des réservoirs en 2011	14

Liste des figures

Figure 1 : Grille de discrétisation.....	4
Figure 2 : Modélisation verticale de type sandwich.....	5
Figure 3 : Visualisation 3D de la grille sous mView (avec une exagération de l'axe vertical)	5
Figure 4 : Champ de perméabilité krigé (portée 2000 m)	6
Figure 5 : Champ de porosité krigé (portée 5000 m)	7
Figure 6 : Champ de pression initiale dans le 1 ^{er} réservoir	8
Figure 7 : Champ de pression initiale, coupe suivant Y=119655.....	8
Figure 8 : Température initiale dans le 1 ^{er} réservoir	9
Figure 9 : Champ de température initiale, coupe suivant Y=119655.....	9
Figure 10 : Chronique de débits (Q en m ³ /h) et températures d'injection (T en °C) appliquée au modèle.....	10
Figure 11 : Cinétique de refroidissement comparée entre les données BRGM et la simulation GPC IP	11
Figure 12 : Cinétique de refroidissement simulée entre 1984 et 2011	12

1 Construction du modèle numérique du réservoir

1.1 Discrétisation spatiale

1.1.1 Structure horizontale

Le domaine intègre tout les doublets se situant dans un rayon de 5 km autour du doublet d'Alfortville. Ainsi, la dimension de la grille est de 15,4×15 km².

Les cellules de la grille ont une taille de 200×200 m². Autours de chaque doublet, les cellules sont affinées à la taille de 50×50 m². La connexion entre les cellules autours des doublets et le reste de la grille se fait à travers des cellules de 100×100 m².

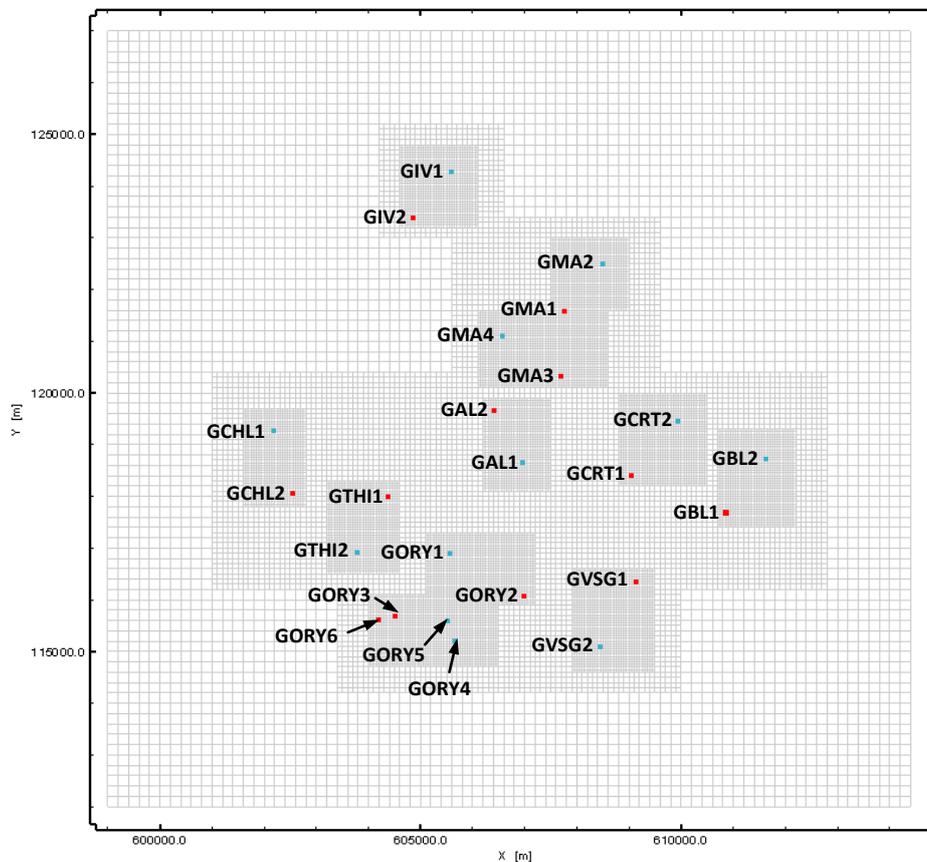


Figure 1 : Grille de discrétisation

1.1.2 Structure verticale

La modélisation verticale choisie est du type « sandwich » (Antics *et al* 2005). L'épaisseur productrice totale (h_p) ainsi que l'épaisseur cumulée des épontes intermédiaires (h_i) au droit de chaque puits ont été fournies dans la flowmétrique.

La discrétisation verticale est ensuite effectuée à partir de ces données, deux couches réservoirs d'épaisseur égale ($\frac{h_p}{2}$) sont séparées par une couche imperméable (h_i). Des épontes supérieure et inférieure de 200m d'épaisseur sont ajoutées afin de permettre un échange de chaleur.

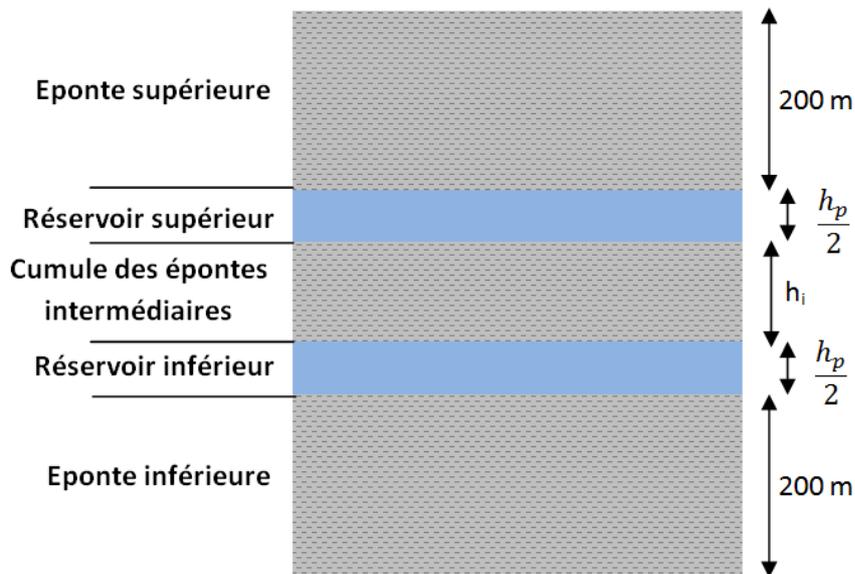


Figure 2 : Modélisation verticale de type sandwich

Le logiciel de géomodélisation GOCAD a été utilisé afin d'avoir une géométrie de réservoir plus réaliste. Les profondeurs du premier niveau producteur et les épaisseurs des couches productrices et intermédiaires au droit de chaque puits ont été interpolées afin d'obtenir la géométrie du réservoir.

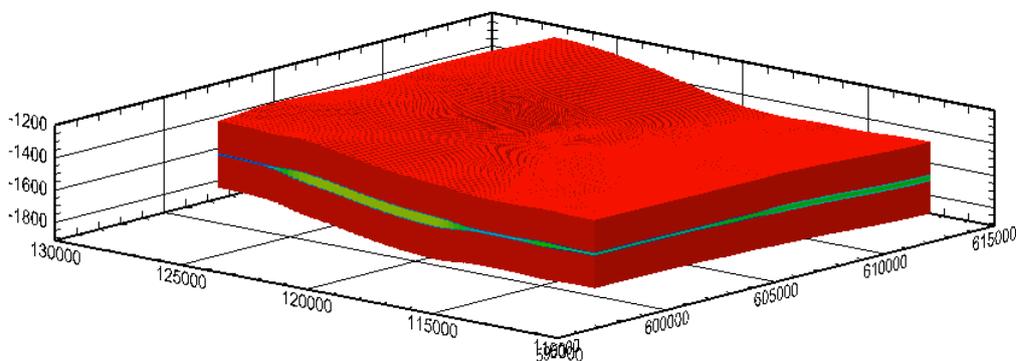


Figure 3 : Visualisation 3D de la grille sous mView (avec une exagération de l'axe vertical)

1.2 Propriétés hydrauliques et thermiques du réservoir

1.2.1 Propriétés pétrophysiques

Les propriétés pétrophysiques appliquées aux différentes couches sont les suivantes :

	Densité (kg/m ³)	Porosité	Perméabilité (m ²)	Conductivité (W/m°C)	Capacité calorifique massique (J/kg °C)
Eponte supérieure et inférieure	2500	0.0001	10 ⁻²⁰	2.1	840
1 ^{er} et 2 ^{ème} réservoirs	2500	Variable	Variable	2.5	1000
Eponte intermédiaire	2500	0.0001	10 ⁻²⁰	2.1	840

La valeur de perméabilité des couches réservoirs a été moyennée pour chaque doublet puis krigée avec le logiciel mView (voir figure 4).

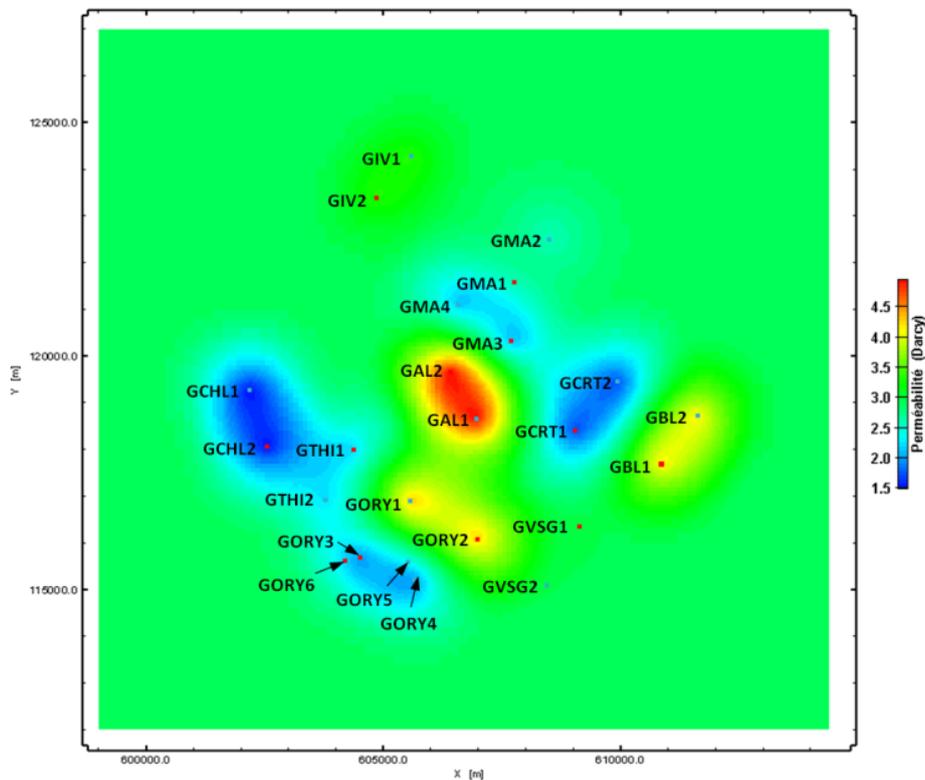


Figure 4 : Champ de perméabilité krigé (portée 2000 m)

La valeur de porosité des couches réservoirs au droit de chaque puits a aussi été krigées sous mView (voir figure 5).

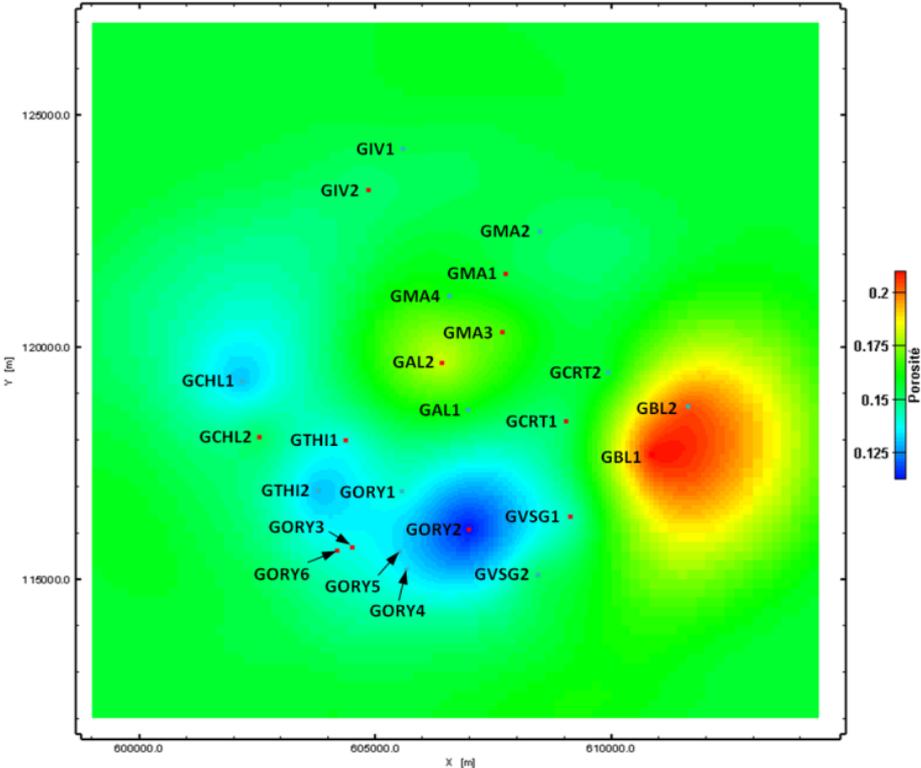


Figure 5 : Champ de porosité krigé (portée 5000 m)

1.2.2 Champ de pression

N'ayant pas de données de pression, il a été choisi d'appliquer une pression constante dans tout le modèle (pression hydrostatique à la profondeur moyenne du modèle plus 10 bars soit 169 bars).

Le modèle est ensuite simulé avec le logiciel Tough2 prenant en compte la gravité.

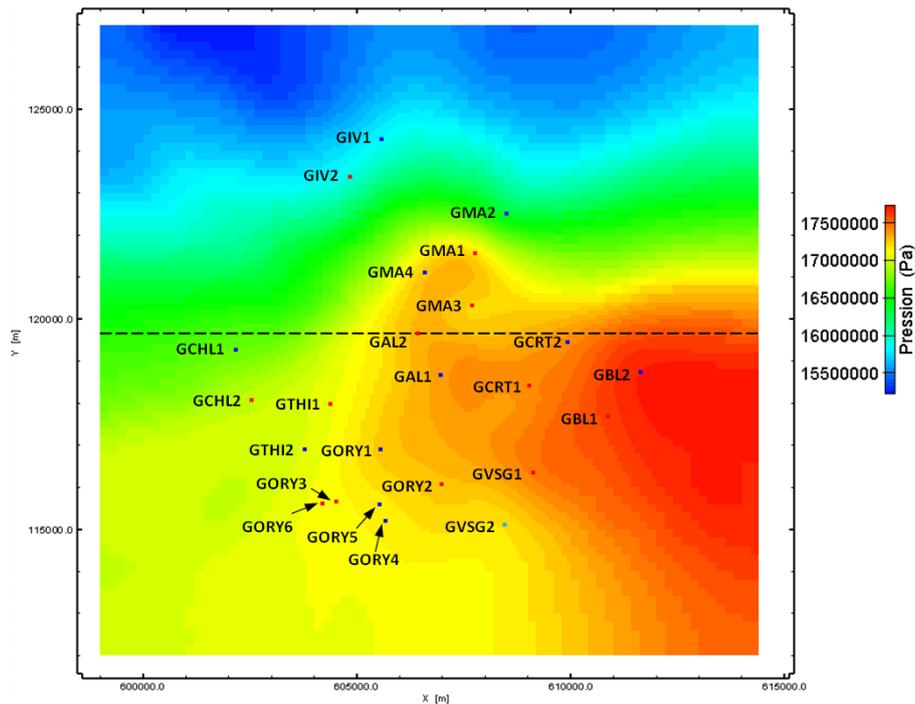


Figure 6 : Champ de pression initiale dans le 1^{er} réservoir

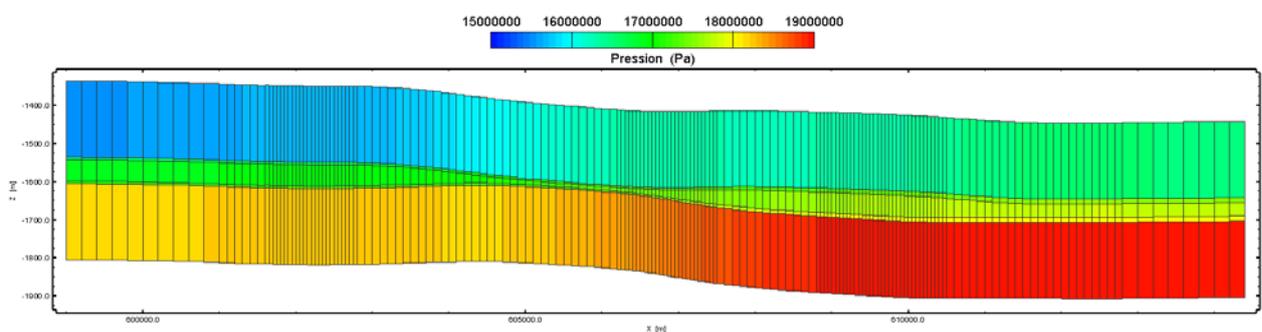


Figure 7 : Champ de pression initiale, coupe suivant Y=119655

1.2.3 Champ de température

La température du 1^{er} réservoir a été obtenue en krigeant les données de température au droit de chaque puits. Le champ de température dans les autres couches est le même que celui du 1^{er} réservoir plus ou moins un gradient géothermique (3,98°C pour 100 m).

Le modèle est ensuite simulé en posant des conditions de Dirichlet aux épontes supérieure et inférieure afin d'atteindre un équilibre thermique.

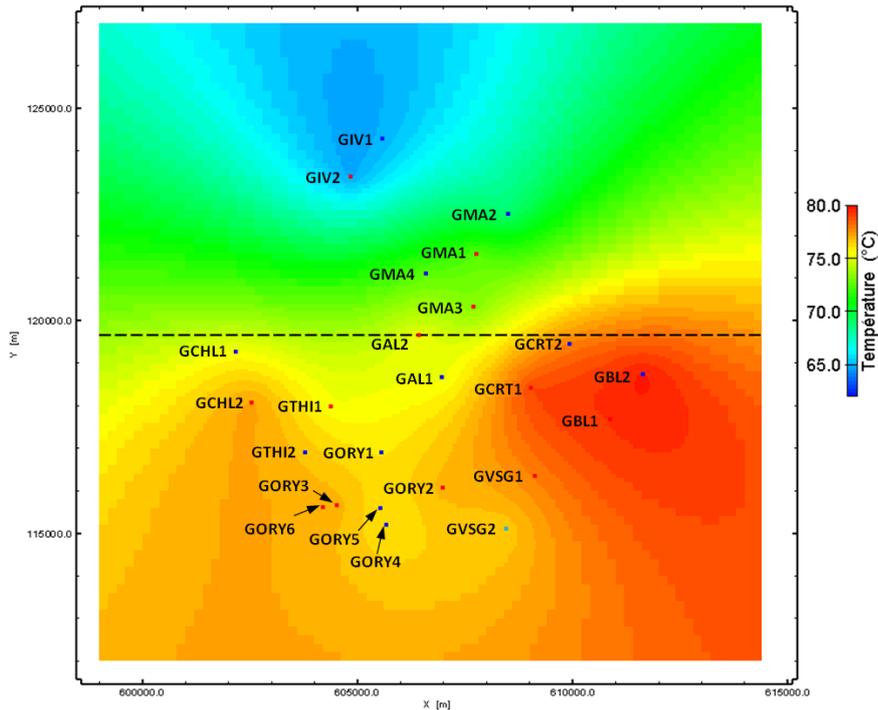


Figure 8 : Température initiale dans le 1^{er} réservoir

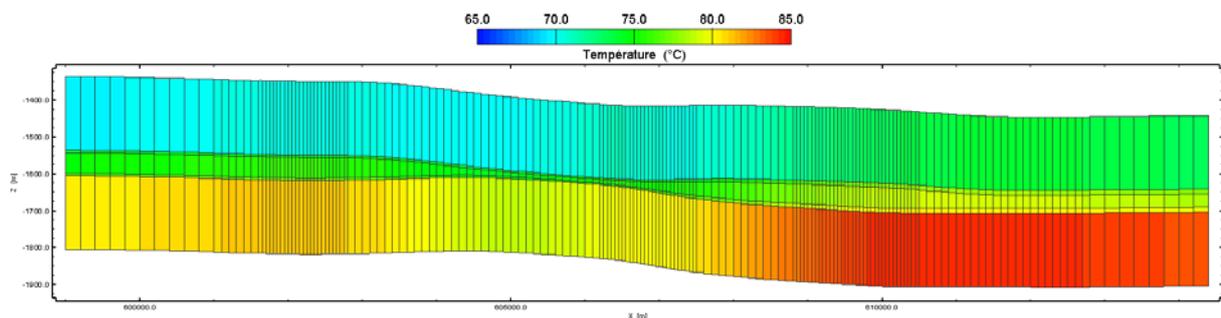


Figure 9 : Champ de température initiale, coupe suivant Y=119655

2 Simulation entre 1984 et 2011

2.1 Chronique de débits et de températures d'injection

Une fois le modèle équilibré, la période d'activité passée des puits est simulée entre 1984 et 2011. Cette simulation se fait à l'aide de la chronique de débits et de températures d'injection relevée au cours de cette période et qui a été fournie par le BRGM. Les valeurs que nous avons reçu sont mensuelles ; afin de simplifier la simulation et de réduire les temps de calcul nous avons choisi de prendre des moyennes saisonnières de débits et températures d'injection. Nous appliquons donc des valeurs d'hivers (d'octobre à mai) et des valeurs d'été (de juin à septembre).

	Alfortville		Bonneuil		Chevilly		Créteil		Ivry		Maisons-Alfort 1		Maisons-Alfort 2		Orly 1		Orly 2		Orly 3		Thiais		Villeneuve St G		
	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	
janv.-84									115,0	25,0					117,0	50,9									
juin.-84									115,0	25,0					91,8	65,4									
oct.-84									115,0	25,0					120,5	50,7									
juin.-85									115,0	25,0	0,0	0,0			91,8	65,4									
juil.-85					0,0	0,0	0,0	0,0	115,0	25,0	120,1	64,6			91,8	65,4									
oct.-85					253,9	45,4	250,8	48,2	115,0	25,0	243,8	52,1			120,5	50,7									
juin.-86					116,0	55,1	120,0	72,9	115,0	25,0	119,4	64,8			91,8	65,4					0,0	0,0			
juil.-86					116,0	55,1	120,0	72,9	115,0	25,0	119,4	64,8	0,0	0,0	91,8	65,4					66,7	58,8			
oct.-86			0,0	0,0	253,9	45,4	250,8	48,2	115,0	25,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	0,0	0,0			210,9	44,7			
janv.-87			221,7	53,1	253,9	45,4	250,8	48,2	115,0	25,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	217,8	46,4			210,9	44,7			
juin.-87	0,0	0,0	133,3	67,7	116,0	55,1	120,0	72,9	115,0	25,0	119,4	64,8	88,7	67,0	91,8	65,4	244,4	69,7			71,2	59,0	0,0	0,0	
oct.-87	225,5	44,4	220,8	53,5	253,9	45,4	250,8	48,2	115,0	25,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	222,4	46,8			210,9	44,7	236,1	50,9	
janv.-88	225,5	44,4	220,8	53,5	253,9	45,4	250,8	48,2	49,0	10,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	222,4	46,8			210,9	44,7	236,1	50,9	
juin.-88	93,6	59,0	133,3	67,7	116,0	55,1	120,0	72,9	49,0	10,0	119,4	64,8	88,7	67,0	91,8	65,4	244,4	69,7			71,2	59,0	93,6	65,2	
oct.-88	218,1	45,6	220,8	53,5	253,9	45,4	250,8	48,2	49,0	10,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	222,4	46,8			210,9	44,7	236,1	50,9	
juin.-89	93,6	59,0	133,3	67,7	116,0	55,1	120,0	72,9	49,0	10,0	119,4	64,8	88,7	67,0	91,8	65,4	244,4	69,7			71,2	59,0	93,6	65,2	
oct.-89	218,1	45,6	220,8	53,5	253,9	45,4	250,8	48,2	49,0	10,0	243,8	52,1	207,3	48,1	120,5	50,7	222,4	46,8			210,9	44,7	227,3	52,7	
juin.-90	93,6	59,0	133,3	67,7	116,0	55,1	120,0	72,9	49,0	10,0	119,4	64,8	88,7	67,0	91,8	65,4	244,4	69,7			71,2	59,0	85,9	64,2	
oct.-90	218,1	45,6	208,3	52,6	254,6	43,5	250,8	48,2	49,0	10,0	259,2	51,1	207,3	48,1	122,6	49,4	222,4	46,8			210,9	44,7	223,1	51,4	
juin.-91	93,6	59,0	123,4	68,5	116,0	55,1	130,7	73,2	49,0	10,0	117,8	63,3	105,9	66,9	105,7	67,7	172,2	69,6			71,2	59,0	93,6	65,2	
oct.-91	218,1	45,6	201,0	52,6	256,4	46,7	233,3	46,0	49,0	10,0	238,3	53,0	173,0	49,3	113,5	43,1	217,7	49,4			210,9	44,7	225,9	45,0	
juin.-92	93,6	59,0	132,7	65,8	116,3	66,9	79,8	70,6	49,0	10,0	117,8	63,3	73,4	66,6	105,7	67,7	175,4	69,9			71,2	59,0	101,1	20,1	
oct.-92	218,1	45,6	212,9	52,2	267,8	44,6	233,3	46,0	49,0	10,0	221,6	54,2	173,0	49,3	109,5	44,1	209,5	50,1			210,9	44,7	236,1	50,9	
juin.-93	93,6	59,0	132,7	65,8	123,0	57,4	79,8	70,6	49,0	10,0	117,8	63,3	73,4	66,6	105,7	67,7	175,4	69,9			71,2	59,0	93,6	65,2	
oct.-93	218,1	45,6	212,9	52,2	257,9	43,2	233,3	46,0	49,0	10,0	222,6	54,2	173,0	49,3	109,7	44,1	205,0	50,0			210,9	44,7	221,6	52,1	
janv.-94	218,1	45,6	212,9	52,2	257,9	43,2	233,3	46,0	0,0	0,0	222,6	54,2	173,0	49,3	109,7	44,1	205,0	50,0			210,9	44,7	221,6	52,1	
juin.-94	93,6	59,0	132,7	65,8	117,5	54,2	79,8	70,6			117,8	63,3	73,4	66,6	105,7	67,7	175,4	69,9			71,2	59,0	93,6	65,2	
oct.-94	218,1	45,6	212,9	52,2	289,5	41,6	227,6	46,9			226,9	53,3	185,5	46,8	111,4	44,6	191,0	51,1			210,9	44,7	241,0	50,7	
juin.-95	93,6	59,0	132,7	65,8	173,0	58,6	79,8	70,6			128,0	60,7	73,4	66,6	105,7	67,7	186,3	65,7			71,2	59,0	95,9	64,8	
oct.-95	218,1	45,6	212,9	52,2	256,3	47,4	227,6	46,9			218,0	52,3	225,8	49,3	110,7	44,5	189,8	52,5			210,9	44,7	265,8	51,5	
juin.-96	93,6	59,0	132,7	65,8	87,0	62,7	79,8	70,6			128,2	61,1	262,0	71,7	105,7	67,7	186,3	65,7			71,2	59,0	97,2	65,5	
oct.-96	218,1	45,6	212,9	52,2	258,4	42,7	227,6	46,9			199,5	52,4	151,4	52,6	112,1	44,9	147,1	46,6			210,9	44,7	279,7	50,8	
juin.-97	93,6	59,0	132,7	65,8	120,0	45,6	132,0	75,0			120,7	62,5	73,4	66,6	105,7	67,7	186,3	65,7			71,2	59,0	94,6	64,0	
oct.-97	218,1	45,6	212,9	52,2	162,6	38,4	174,2	47,5			178,3	53,0	140,0	50,5	110,2	44,6	192,2	45,1			210,9	44,7	290,0	54,1	
juin.-98	93,6	59,0	132,7	65,8	120,0	45,6	131,2	71,0			120,7	62,5	82,3	63,4	105,7	67,7	258,5	74,0			71,2	59,0	140,3	66,3	
oct.-98	218,1	45,6	212,9	52,2	204,9	40,5	203,6	52,6			231,3	56,3	207,7	58,5	77,7	48,8	238,8	47,8			210,9	44,7	241,3	49,2	
juin.-99	93,6	59,0	132,7	65,8	134,0	63,7	131,2	71,0			120,7	62,5	249,0	71,0	35,0	66,0	256,0	73,0			71,2	59,0	94,6	64,0	
oct.-99	218,1	45,6	212,9	52,2	223,3	39,6	174,6	26,9			194,8	52,7	149,5	55,0	62,0	49,6	192,8	46,1			201,6	44,0	261,3	52,7	
juin.-00	93,6	59,0	132,7	65,8	134,0	63,7	143,0	12,9			120,7	62,5	128,9	64,9	35,0	66,0	193,6	63,3			87,3	61,2	105,8	61,7	
oct.-00	218,1	45,6	153,6	44,1	181,3	38,6	215,0	37,6			163,1	48,3	158,0	52,8	71,4	45,9	200,1	50,0			203,4	44,0	132,3	46,8	
juin.-01	93,6	59,0	71,8	59,9	135,0	55,8	99,9	57,2			120,7	62,5	216,3	68,4	84,4	64,1	193,6	63,3			87,3	61,2	128,6	58,1	
oct.-01	218,1	45,6	101,0	40,0	228,9	45,7	155,7	50,9			154,5	49,2	126,2	53,0	75,3	44,0	241,5	42,8			203,4	44,0	176,1	49,8	
juin.-02	93,6	59,0	71,8	59,9	300,0	67,9	99,0	62,0			120,7	62,5	216,3	68,4	75,8	60,8	167,7	60,5			87,3	61,2	105,8	61,7	
oct.-02	218,1	45,6	101,0	40,0	167,4	35,8	147,2	46,4			168,6	49,0	149,4	55,8	81,8	46,1	231,3	42,4			203,4	44,0	149,3	50,7	
juin.-03	93,6	59,0	71,8	59,9	35,2	34,6	99,0	62,0			122,5	62,5	250,0	69,0	75,8	60,8	167,7	60,5			87,3	61,2	76,0	58,0	
oct.-03	228,5	43,8	101,0	40,0	174,5	36,8	170,1	53,5			171,6	48,8	175,2	56,4	75,3	46,2	231,0	40,2			201,2	45,3	126,4	50,9	
juin.-04	122,9	61,2	71,8	59,9	35,2	34,6	215,1	64,0			125,5	62,2	250,0	69,0	75,8	60,8	167,7	60,5			87,3	61,2	83,3	50,8	
oct.-04	239,0	43,2	101,0	40,0	174,5	36,8	171,3	52,2			145,4	47,5	173,3	60,3	82,8	46,9	221,0	47,8			216,6	44,9	217,1	46,7	
juin.-05	122,9	61,2	71,8	59,9	35,2	34,6	192,1	63,0			125,5	62,2	128,9	64,9	75,2	60,3	221,0	47,8			102,7	63,8	83,3	50,8	
oct.-05	239,0	43,2	101,0	40,0	194,4	37,7	176,8	55,3			200,0	47,4	173,0	56,4	70,5	48,4	0,0	0,0			208,2	48,2	127,9	41,8	
juin.-06	122,9	61,2	71,8	59,9	96,3	34,6	192,1	63,0			125,5	62,2	214,3	67,3	51,3	64,3					55,2	59,9	116,0	42,4	
oct.-06	239,0	43,2	101,0	40,0	213,0	40,3	188,8	49,1			218,2	51,2	108,3	52,1	72,8	45,6					113,0	50,7	127,4	41,5	
juin.-07	122,9	61,2	71,8	59,9	96,3	34,6	125,4	62,0			158,6	64,2	114,0	62,0	62,9	65,3					81,8	63,4	74,0	50,0	
oct.-07	239,0	43,2	101,0	40,0	215,3	54,1	158,8	44,8			227,1	49,9	186,7	62,3	72,3	44,1			0,0	0,0	210,9	45,8	208,8	54,5	
janv.-08	239,0	43,2	101,0	40,0	215,3	54,1	158,8	44,8			227,1	49,9	186,7	62,3	72,3	44,1			</						

2.2 Résultats

La simulation donne la cinétique de refroidissement du puits producteur d'Alfortville, cette courbe peut-être superposée aux données fournies par le BRGM (voir Figure 11).

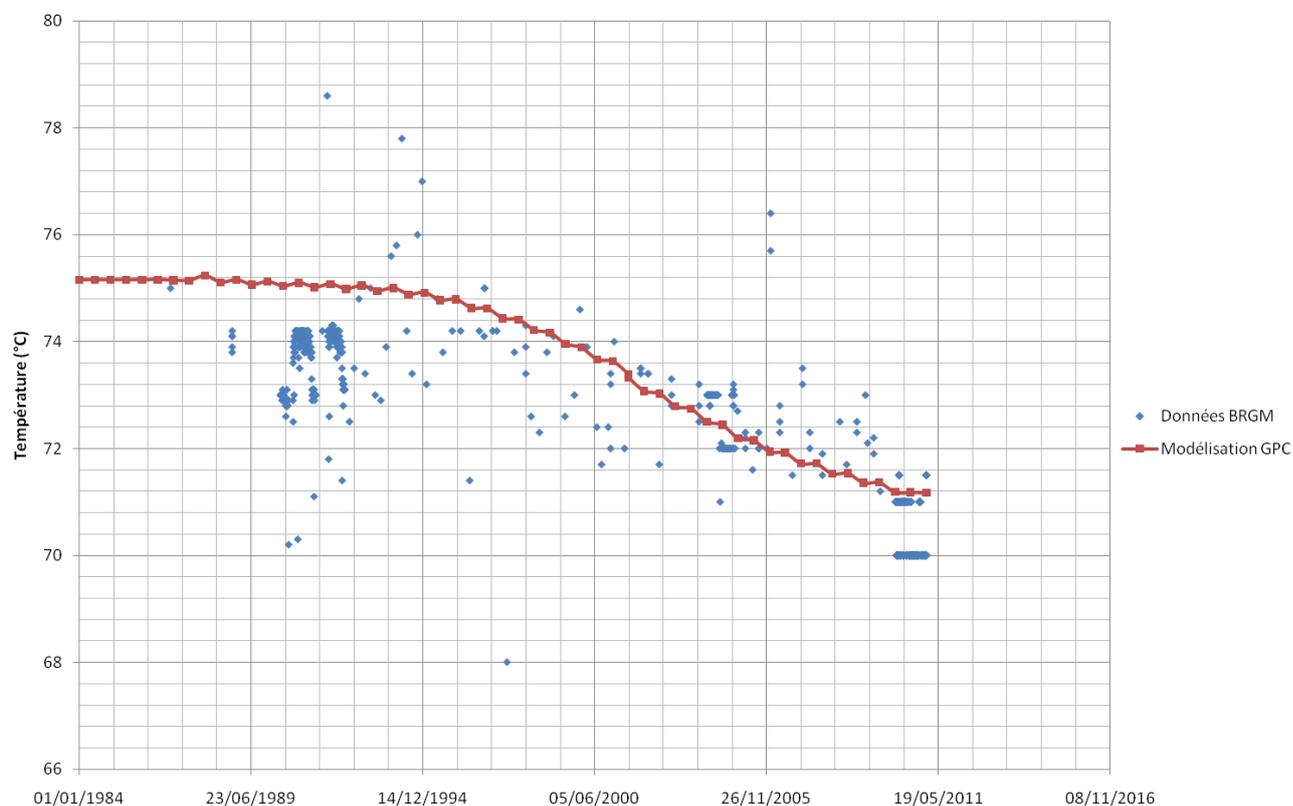


Figure 11 : Cinétique de refroidissement comparée entre les données BRGM et la simulation GPC IP

D'après la simulation, la température de production d'Alfortville a chuté de 3,9°C en un peu plus de 23 ans (octobre 1987 – janvier 2011).

Les températures de production des autres puits sont données dans la figure ci-dessous :

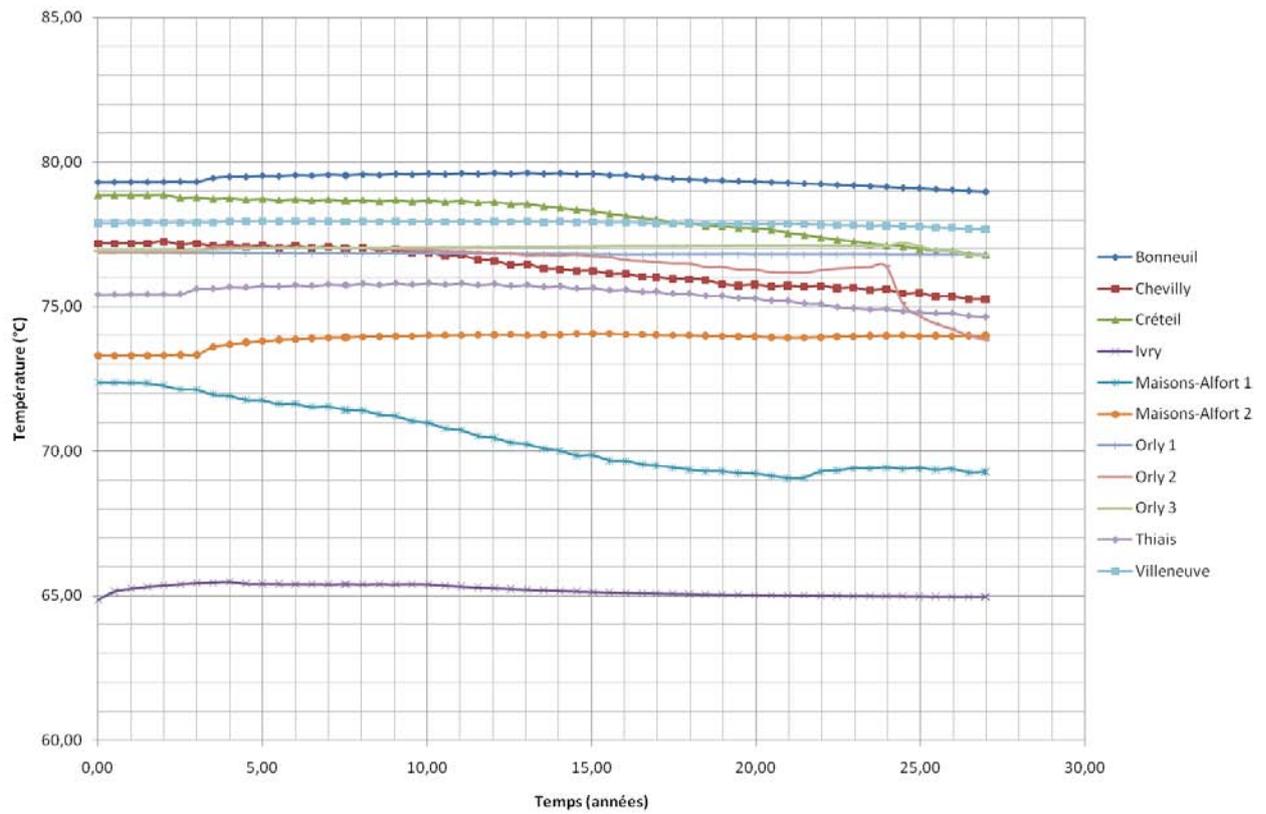


Figure 12 : Cinétique de refroidissement simulée entre 1984 et 2011

Seuls les puits de Chevilly-Larue, Crêteil, Maisons-Alfort 1 et Orly 2 voient leur température de production baisser de plus de 1°C.

Les champs de température et de pression résultants de la simulation sont présentés en annexe 1.

3 Bibliographie

Antics, M., Papachristou, M., and Ungemach, P. (2005): "Sustainable Heat Mining. A Reservoir Engineering Approach." Proc. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, CA, January 31-February 2, 2005.

Earth Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory: TOUGH2 User's guide, version 2.0

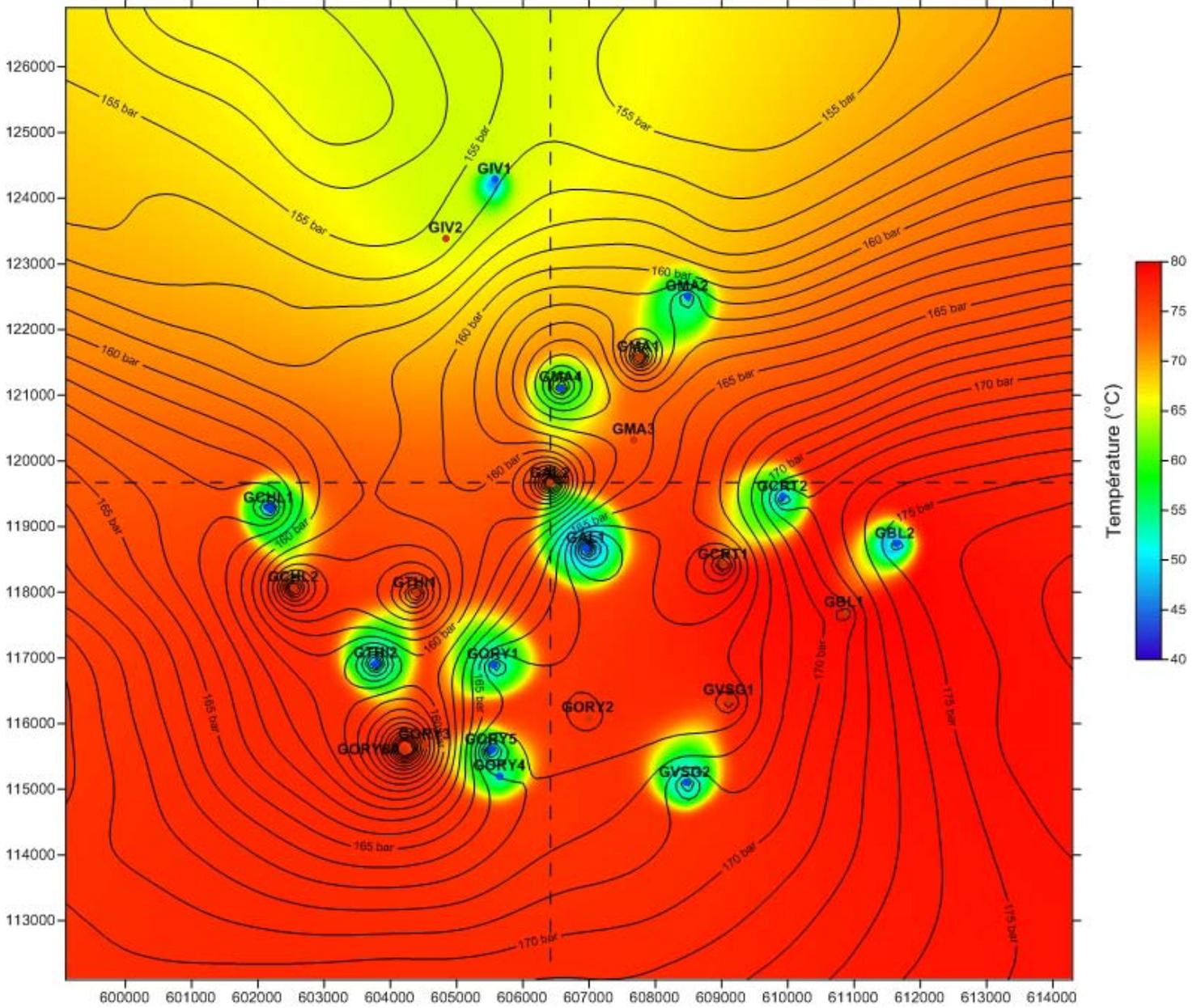
INTERA Engineering Ltd: MVIEW version 4.00 User Manual

Paradigm (2009): GOCAD 2009.1. User guide.

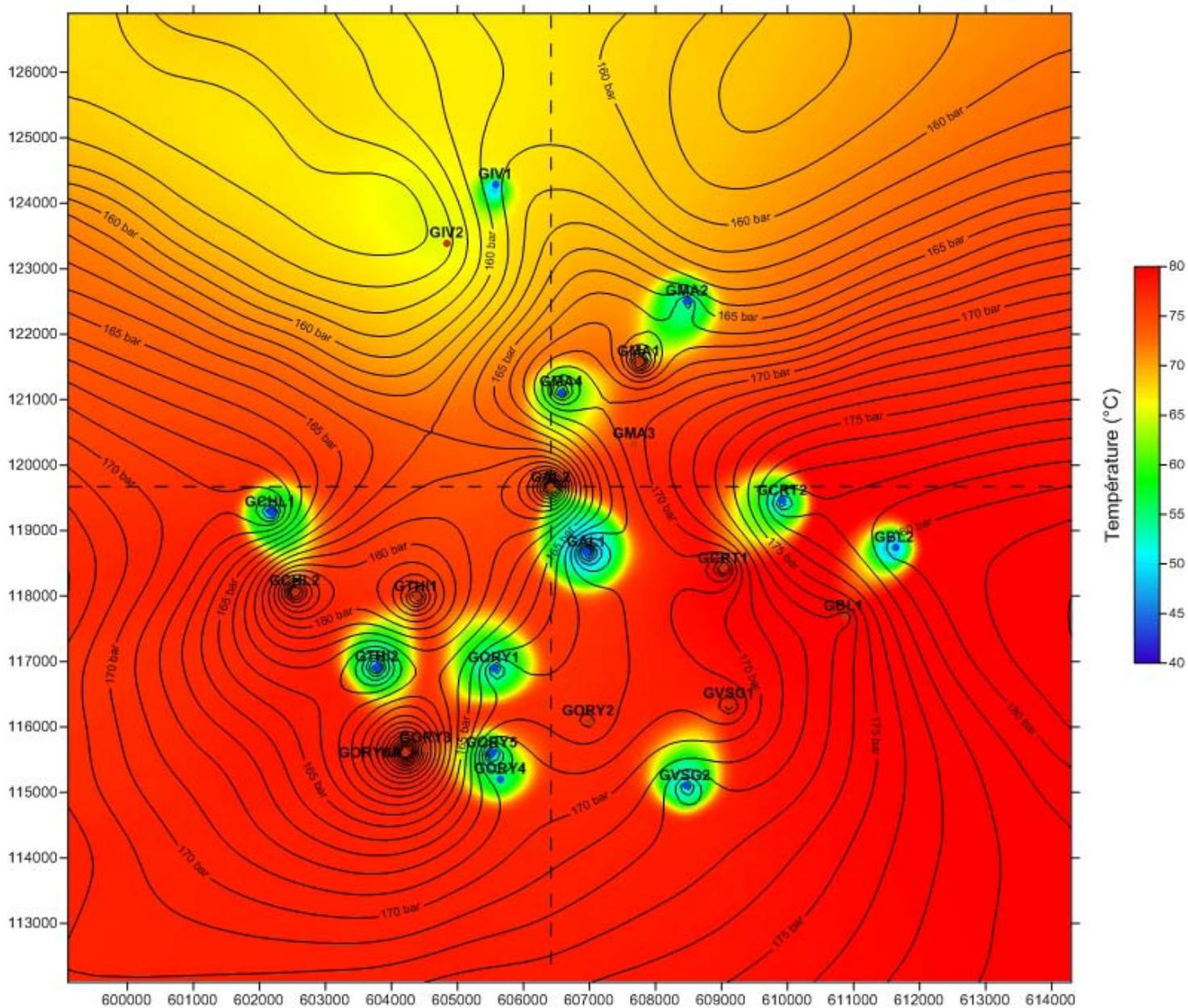
Ungemach, P., Antics, M., and Papachristou, M. (2005): "Sustainable Geothermal Reservoirs Management." Paper 0517. Proc. World Geothermal Congress. WGC 2005. Antalya, Turkey, 15-19 April 2005.

Annexe 1 : état des réservoirs en 2011

Champ de pression et température du 1er réservoir en 2011



Champ de pression et température du 2nd réservoir en 2011



Annexe 5

Rapport technique de Mines ParisTech



ADEME

**Groupe "Modélisation hydraulique et thermique au Dogger
pour la géothermie"**

Projet PSP11GTH20

**Modélisation de la décroissance thermique du doublet
d'Alfortville**

Elisabeth Cordier
Patrick GOBLET

Référence rapport: R111007ECOR
Référence contrat ARMINES :

*Centre de Géosciences
Mines ParisTech, Fontainebleau, France*

Mines ParisTech – Centre de Géosciences
Systèmes Hydrologiques et Réservoirs
35, rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau, France

Tél. 01 64 69 47 38
Fax 01 64 69 47 03

Reference type :

Cordier E., Goblet P. (2011). Groupe "Modélisation hydraulique et thermique au Dogger pour la géothermie – Projet PSP11GTH20 – Modélisation de la décroissance thermique du doublet d'Alfortville ". Technical Rapport Nr R111007ECOR, Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Fontainebleau, France

Cette publication est	confidentielle	publique
Chef d'équipe	nom	visa
	P.Goblet	

TABLE DES MATIERES

1	Introduction	1
2	Domaine modélisé et données utilisées	1
2.1	Domaine modélisé.....	1
2.2	Modélisation du réservoir	2
2.3	Valeurs des paramètres	2
2.3.1	Paramètres du réservoir :	2
2.3.2	Paramètres d'exploitation	4
3	Résultats.....	4
4	Conclusion.....	7
4.1	Remarque 1 :.....	7
4.2	Remarque 2	8

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Domaine modélisé	1
Figure 2 : Zoom du maillage sur une zone de forages	2
Figure 3 : Carte des épaisseurs productives cumulées (m).....	3
Figure 4 : Carte des perméabilités (m/s).....	3
Figure 5 : Température initiale	4
Figure 6 : Evolution de la température de production à Alfortville	5
Figure 7 : Evolution des températures de production des exploitations situées au voisinage d'Alfortville (dispersivité : 20m, 1m).....	6
Figure 8 : Champ de température en fin d'année 2010. Valeur haute de dispersivité (20m ; 1m).....	6
Figure 9 : Doublet d'Alfortville :Température de production diminuée d'1°C et mesures.....	7

1 Introduction

Ce rapport rend compte des calculs de modélisation effectués par le Centre de Géosciences de Mines ParisTech dans le cadre du groupe de travail "Modélisation hydraulique et thermique au Dogger pour la géothermie" mis en place à l'instigation de l'ADEME et coordonné par le BRGM.

Ce travail s'inscrit dans un programme de tests comparatifs de modélisation associant ANTEA, le BRGM, la CFG, GPC et le Centre de Géosciences de Mines-ParisTech. Les calculs présentés ici constituent la troisième phase d'une série de tests, cette dernière phase portant sur la chute de température actuellement observée au producteur du doublet géothermique d'Alfortville.

2 Domaine modélisé et données utilisées

2.1 Domaine modélisé

Le domaine modélisé, reprenant le maillage utilisé par le Centre de Géosciences pour l'étude du doublet voisin de Thiais, est relativement étendu vers l'ouest et couvre l'ensemble des doublets suivants :

- à l'ouest les exploitations de Cachan Sud, Chevilly-Larue, l'Hay-les-Roses et Fresnes,
- au sud, les exploitations de Thiais, Orly 1 et 2 (aujourd'hui arrêtée), Orly Nouvelet et Villeneuve St Georges
- au nord, les exploitations de Maisons Alfort 1 et 2
- à l'est les exploitations de Créteil et Bonneuil

La figure 1 représente le domaine modélisé.

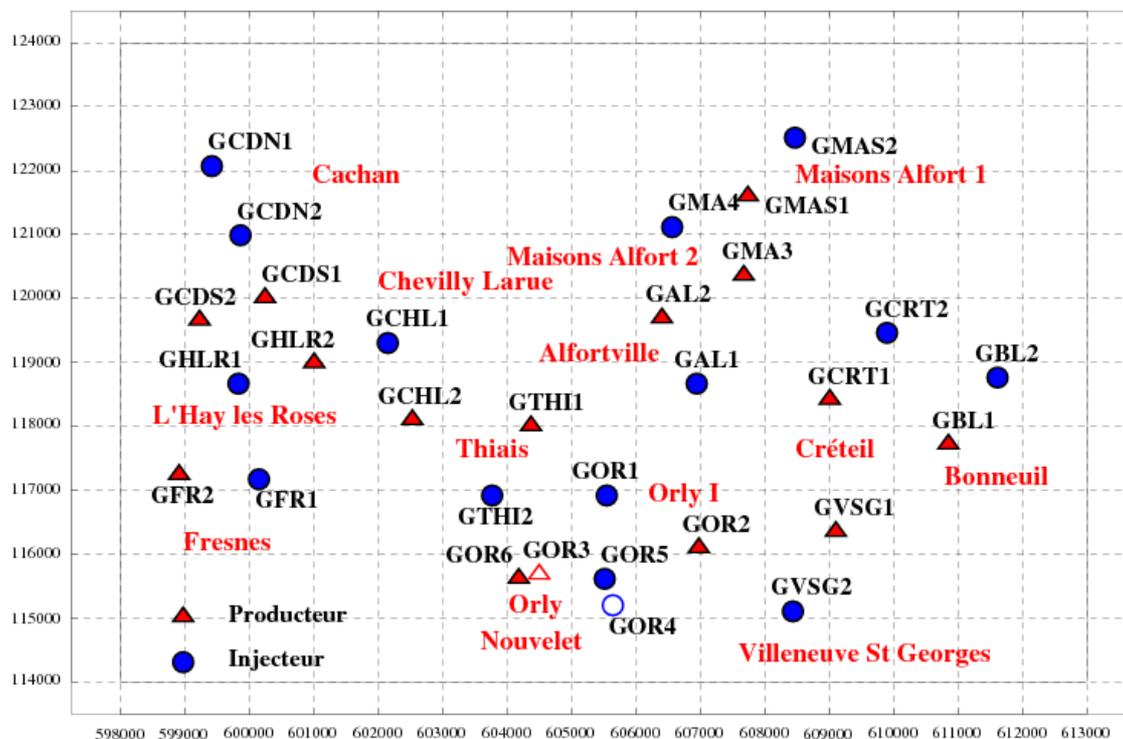


Figure 1 : Domaine modélisé

Le maillage est constitué de 150178 éléments triangulaires (soit 75590 nœuds) variant de 3 m dans les zones des forages à 50 m sur les limites du domaine. Les épontes sont discrétisées en 12 niveaux de taille croissante de 0,1 m à 51,2 m.

La figure 2 représente un zoom local du maillage sur une zone de forages.

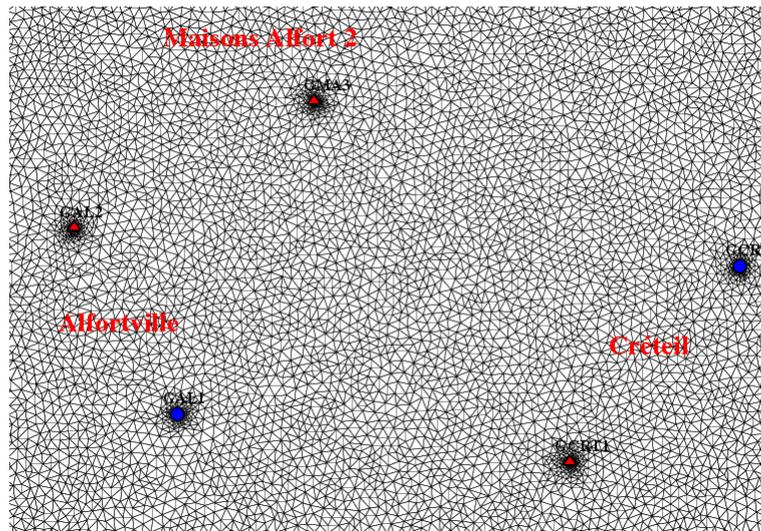


Figure 2 : Zoom du maillage sur une zone de forages

2.2 Modélisation du réservoir

Le principe retenu est basé sur un modèle monocouche équivalent :

Le réservoir est représenté par une seule couche d'épaisseur et de perméabilité hétérogènes. A partir des données fournies aux forages, une carte d'épaisseur et une carte de transmissivité ont été établies par krigeage. Ces deux cartes ont permis de calculer une distribution de perméabilité.

Plusieurs approches concernant l'épaisseur prise en compte ont été testées :

- Epaisseur globale cumulant les couches productrices et les épontes intermédiaires
- Epaisseur raisonnée au cas par cas basée sur l'observation des connections possibles entre les ouvrages
- Epaisseur productrice cumulée

C'est cette dernière approche (épaisseur productrice cumulée) qui conduit au recyclage le plus proche des mesures observées. Sur ce modèle, deux valeurs différentes du tenseur de dispersivité: (2m; 0,5m) et (20m; 1m) ont été testées.

2.3 Valeurs des paramètres

2.3.1 Paramètres du réservoir :

- Epaisseur hétérogène (fig.3) (établie par krigeage des épaisseurs productrices cumulées aux forages)
- Transmissivité hétérogène (établie par krigeage des données aux forages). La figure 4 montre la carte des perméabilités calculées à partir des transmissivités et des épaisseurs
- Température initiale (fig.5) champ hétérogène (établi par krigeage des données aux forages)
- Conductivité thermique de l'aquifère et des épontes : 2,5 W/m/°C
- Dispersivité thermique : 2 valeurs testées : (2m; 0,5m) et (20m; 1m)

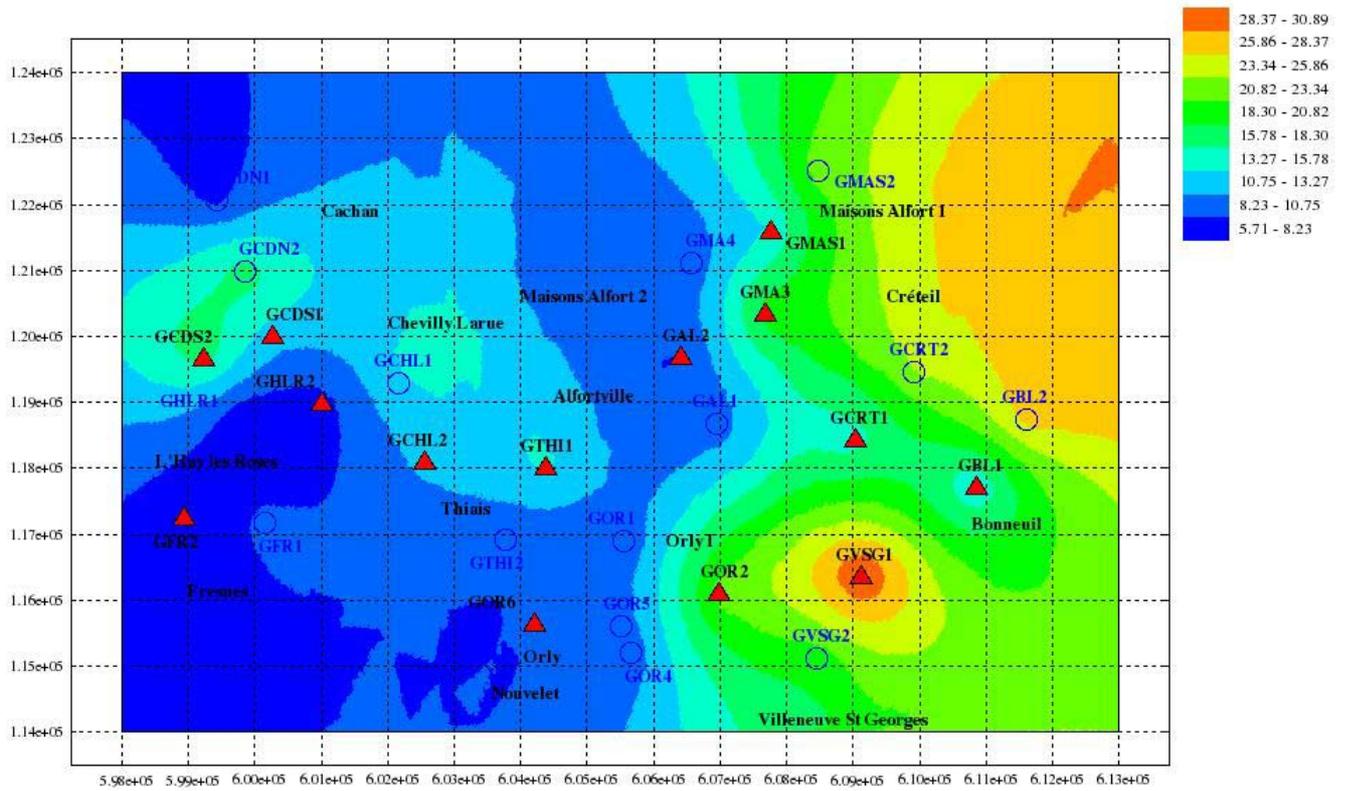


Figure 3 : Carte des épaisseurs productives cumulées (m)

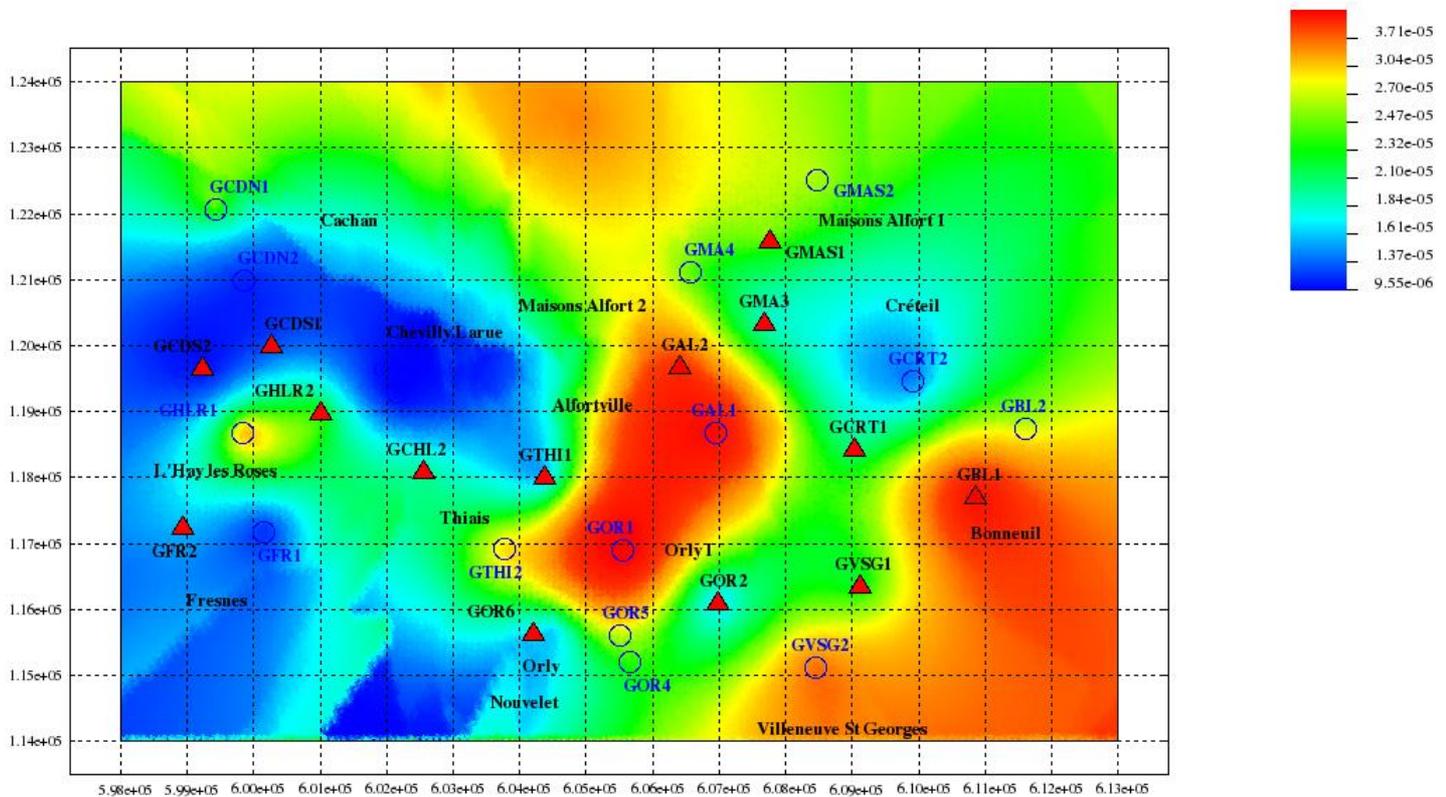


Figure 4 : Carte des perméabilités (m/s)

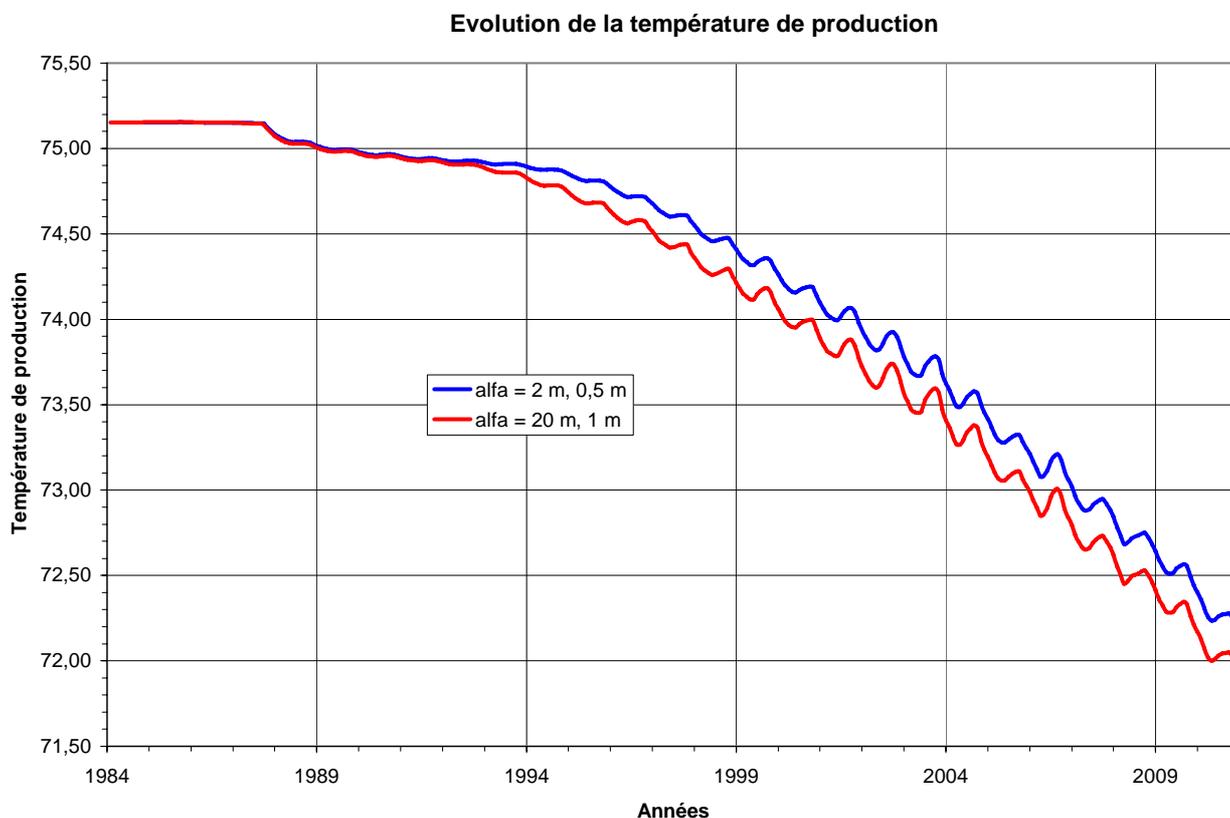


Figure 6 : Evolution de la température de production à Alfortville

La figure 7 représente l'évolution des températures de production des doublets exploitant le Dogger dans le voisinage immédiat d'Alfortville. Ces calculs correspondent à la valeur haute de dispersivité (20 m ; 1m). On remarque que la simulation fait apparaître un recyclage de l'ordre de 1°C aux doublets de Créteil et de Bonneuil, (écart qui serait probablement peu détectable dans les mesures) et de plus de 2,5 °C au producteur de Maisons Alfort 1. La simulation montre également que le doublet de Maisons Alfort 2, directement connecté hydrauliquement au doublet d'Alfortville, ne subit aucune chute de température de production significative. Il serait intéressant de comparer ces résultats aux mesures observées.

La figure 8 représente le champ de température à la fin de l'année 2010.

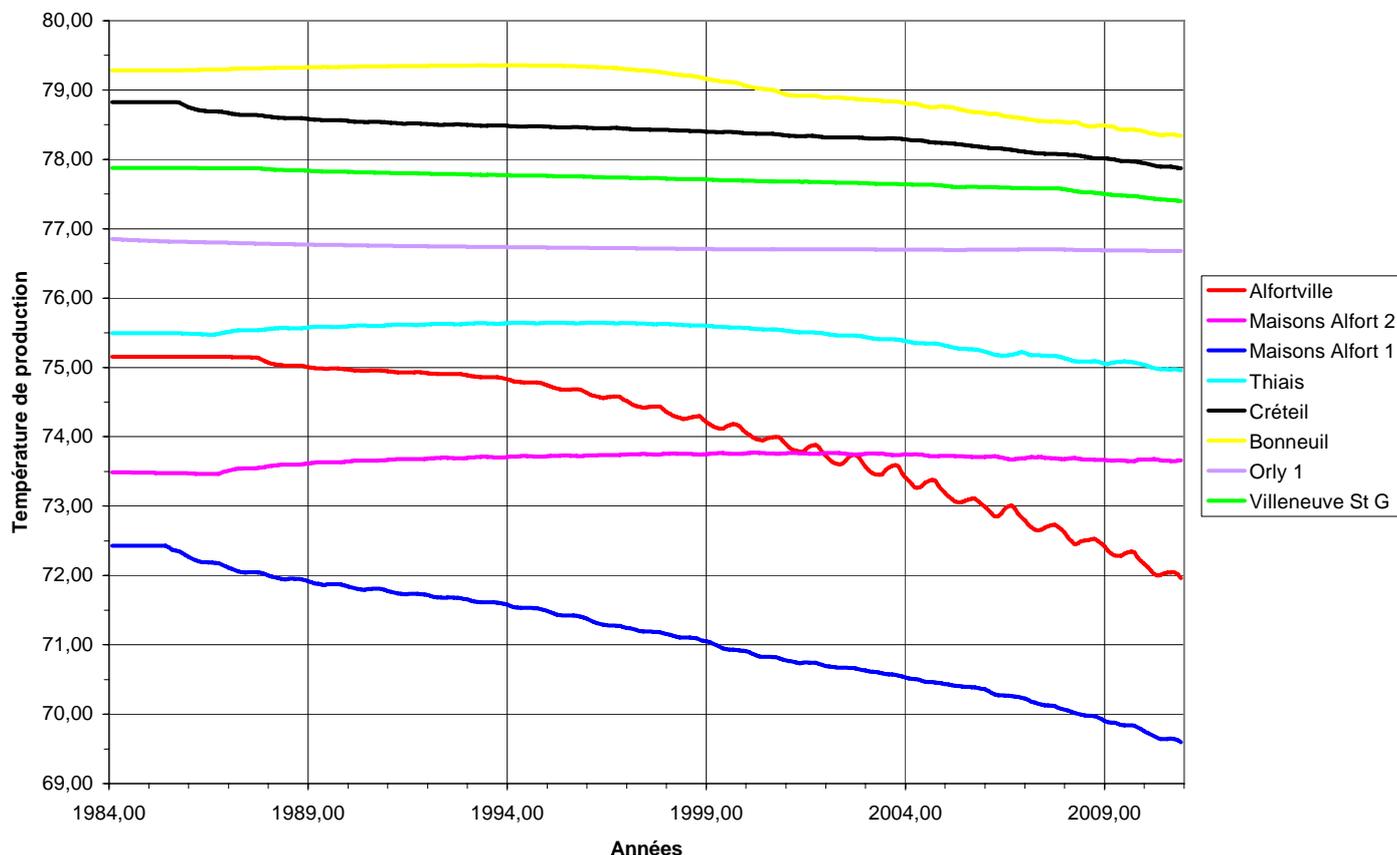


Figure 7 : Evolution des températures de production des exploitations situées au voisinage d'Alfortville (dispersivité : 20m, 1m)

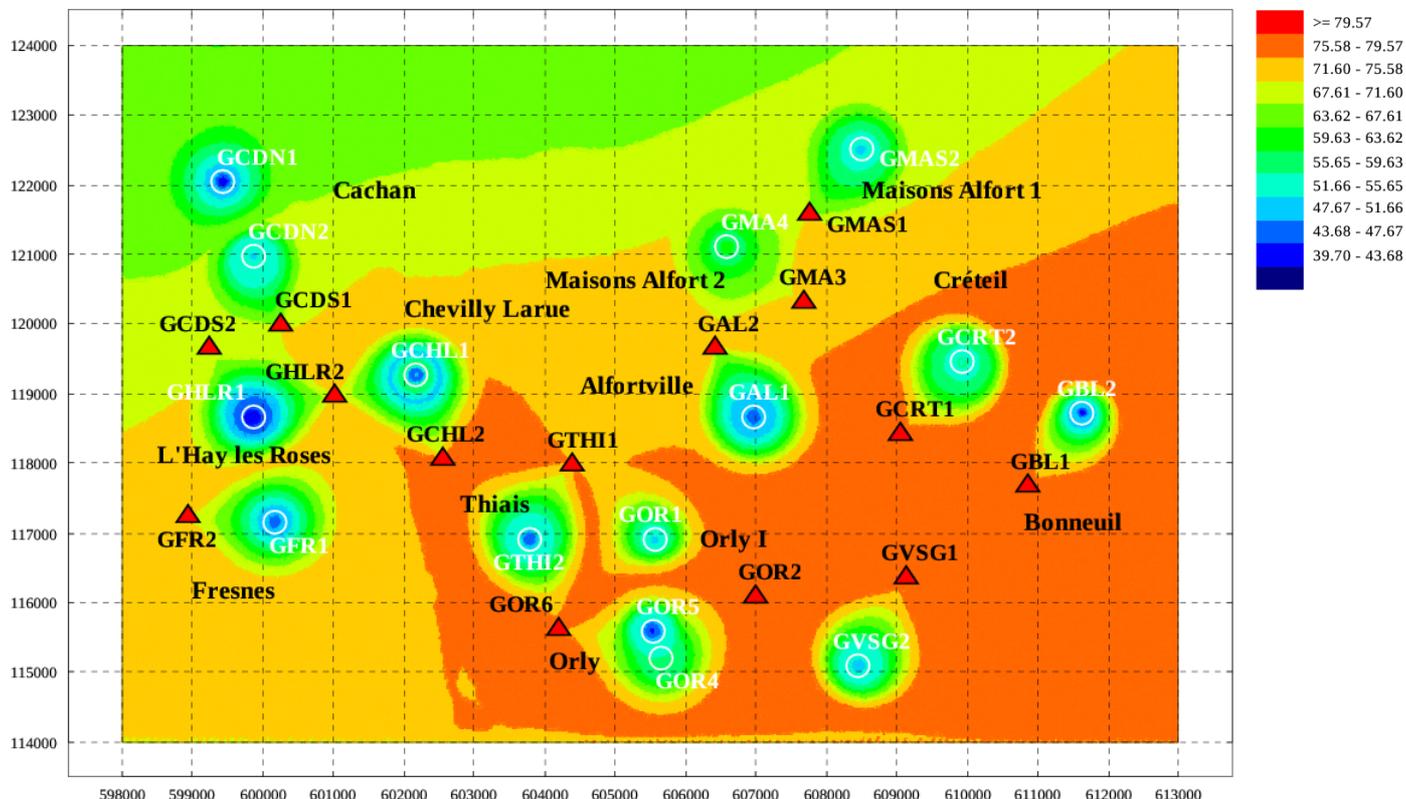


Figure 8 : Champ de température en fin 2010. Valeur haute de dispersivité (20m ; 1m)

4 Conclusion

Etant donné l'amplitude importante constatée sur les points de mesure, on peut considérer que le modèle proposé reproduit une décroissance au producteur relativement proche de celle qui est observée.

Ces résultats appellent cependant deux remarques :

4.1 Remarque 1 :

La simulation fournissant des températures au niveau du réservoir et les mesures étant repérées en tête de puits, il existe obligatoirement un écart thermique entre le calcul et les mesures. Si on se base sur l'écart observé à la mise en service du doublet : 75,2 °C au réservoir, et une température entre 74 et 74,5 °C (données CFG) en tête de puits, on pourrait évaluer cet écart à un ordre de grandeur de 1°C.

La figure 9 représente sur ce principe les résultats de la simulation corrigés dans ce sens (diminution de 1°C) et on remarque dans ce cas un calage relativement satisfaisant de la décroissance de température. Cependant cette correction systématique n'est pas rigoureuse étant donné que la loi corrective est une fonction du débit ; d'autre part, une correction similaire devrait être adoptée du côté de l'injecteur.

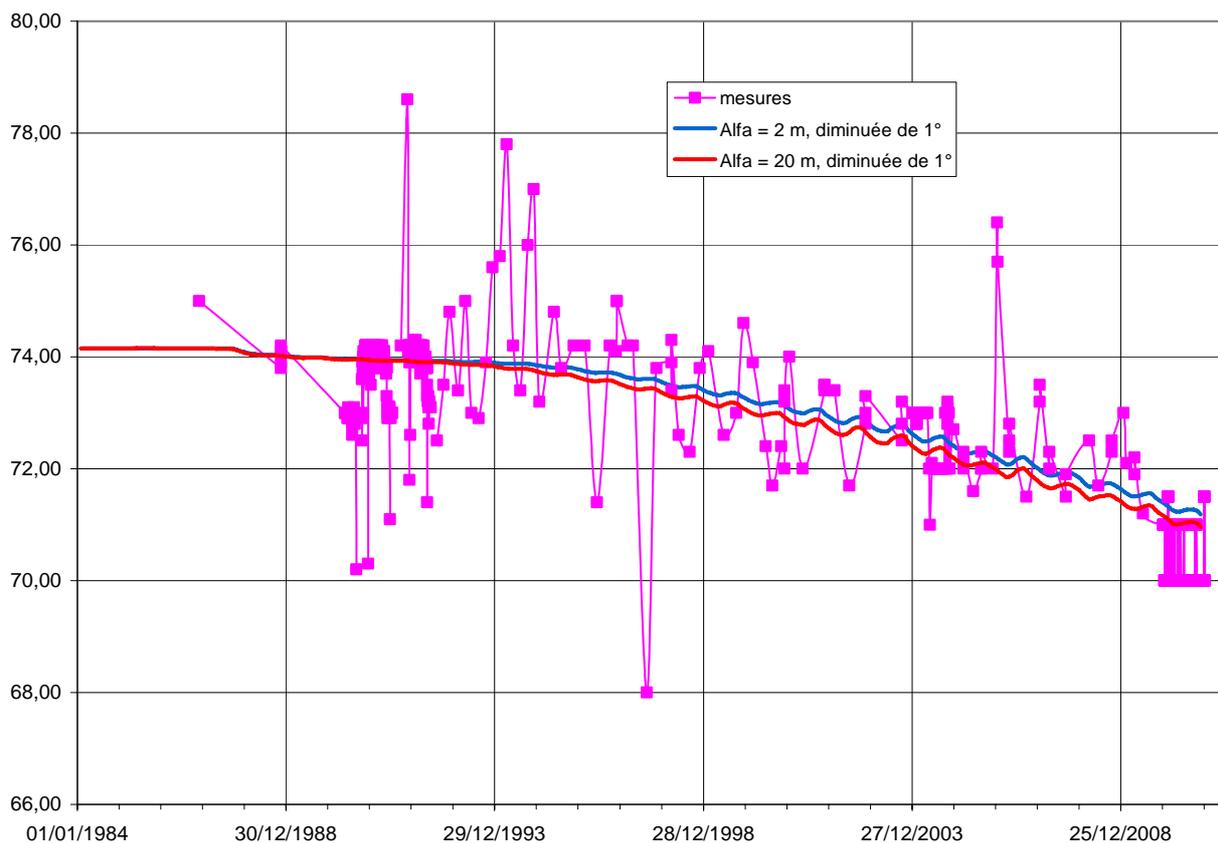


Figure 9 : Doublet d'Alfortville : Température de production diminuée d'1°C et mesures

4.2 Remarque 2

Le doublet d'Alfortville étant fortement connecté aux doublets voisins, un modèle satisfaisant devrait en toute rigueur répondre à la décroissance thermique observée à Alfortville tout en respectant les décroissances ou non-décroissances des exploitations voisines.

En l'occurrence, la simulation retenue pour nos calculs ne fait apparaître aucune décroissance au producteur de Maison Alfort 2, directement connecté à Alfortville, tandis qu'une décroissance significative de plus de 2,5 °C est observé au doublet de Maisons Alfort 1, connecté au précédent.

Il serait intéressant d'une part de connaître les mesures de température sur ces forages pour voir si cette tendance mise en évidence par le calcul est effectivement constatée et, dans le cas inverse, il serait intéressant de contraindre le calage en disposant des températures mesurées aux producteurs voisins afin d'adapter le modèle à une plus large échelle.



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