

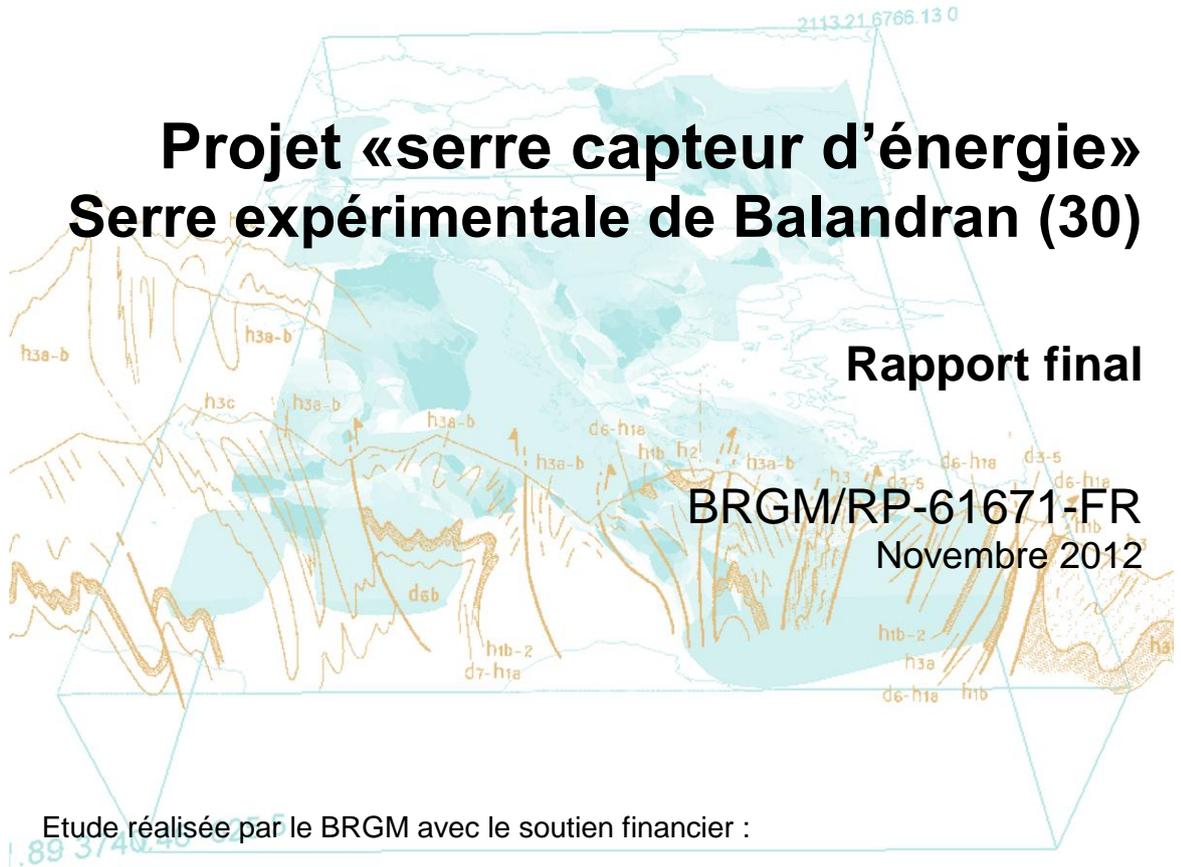


Document public

Projet «serre capteur d'énergie» Serre expérimentale de Balandran (30)

Rapport final

BRGM/RP-61671-FR
Novembre 2012



Etude réalisée par le BRGM avec le soutien financier :

- de la Direction Générale des Entreprises du Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi (Convention n°07 2 90 6104), désormais Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services
- de l'Union Européenne (Convention FEDER n°DGA5/DE/FEDER/2009-n°123)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Projet «serre capteur d'énergie»

Serre expérimentale de Balandran (Gard)

Rapport final

BRGM/RP-61671-FR

Novembre 2012

Étude réalisée dans le cadre du projet 2007
de Recherche du BRGM PDR07LRO02

S. Lanini, F. Battaglia, H. Bessière, M. Bouzit, F. Garnier



Vérificateur :

Nom : P. Vigouroux

Date : 19/11/2012

Signature :

Approbateur :

Nom : M. Audibert

Date : 23/11/2012

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 : Stockage d'énergie thermique en aquifère, serres maraîchères, chauffage, refroidissement, Balandran, Languedoc-Roussillon

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

S. Lanini, F. Battaglia, H. Bessière, M. Bouzit, F. Garnier (2012). Projet « Serre Capteur d'énergie », Serre expérimentale de Balandran (30), Rapport final. Rapport BRGM/RP-61671-FR. 97 p., 51 ill., 1 Ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet « Serre capteur d'énergie » a débuté en 2007 avec pour objectif d'évaluer la faisabilité du stockage intersaisonnier d'énergie thermique en aquifère pour le chauffage et le refroidissement de serres maraîchères. Malgré des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère sous-jacent a priori défavorables au stockage thermique (vitesse d'écoulement importante), une serre expérimentale équipée d'un dispositif de chauffage/refroidissement par la nappe a été construite et instrumentée sur le site du CTIFL à Balandran. La dernière phase du projet (2010-2012) a consisté en la conduite de deux campagnes annuelles de culture de tomates dans cette serre. Les paramètres hydrogéologiques et thermiques de l'aquifère ont été suivis au cours de cette période par le BRGM. Leur interprétation fait l'objet du présent rapport, qui comprend également une évaluation énergétique et économique du dispositif. Après un premier chapitre rappelant le dispositif expérimental, le second chapitre présente les évolutions piézométriques et thermiques observées, alors que le troisième s'intéresse à la qualité de l'eau (chimique et bactériologique). Le dernier chapitre présente une évaluation technico-économique de la solution géothermique pour chauffer et refroidir une serre maraîchère.

Le site expérimental de Balandran se situe sur une formation aquifère constituée de sables du Pliocène marin située à une dizaine de mètres de profondeur. Les cartes piézométriques qui ont été établies au cours du projet révèlent un **gradient hydraulique moyen de 0.5%**. La vitesse de l'écoulement (Darcy) dans l'aquifère est estimée entre 1,3 et 2,8 m/j. L'analyse de chroniques de températures mesurées en différents points de l'aquifère a d'abord permis de montrer que les variations annuelles sont essentiellement liées aux transferts conductifs de chaleur depuis la surface. Cependant, pour les points situés dans les couches les plus hydrauliquement conductrices, les transferts convectifs de chaleur ne sont pas négligeables et augmentent la diffusivité thermique apparente. **Le décalage temporel** de l'ordre de 3 mois entre les extrema saisonniers de la température de l'air et de la température naturelle de la nappe **est favorable à l'utilisation de la géothermie** pour le chauffage ou la climatisation.

Les injections d'eau chaude dans l'aquifère impactent rapidement sa température à l'aval hydraulique immédiat. L'existence d'une **couche plus conductrice, comprise entre 11 et 17m de profondeur**, a été mise en évidence. Dans tous les cas, après une injection d'eau chaude, **la température de la nappe revient à sa valeur initiale en moins d'une heure**, indiquant un stockage de chaleur à court terme inexistant. **A plus long terme**, après plus de deux ans de suivi, **aucune élévation durable de la température de la nappe** n'a pu être observée. Une modélisation numérique basée sur un modèle maillé simplifié a ensuite été proposée pour simuler la propagation dans l'aquifère d'une bulle d'eau chaude injectée au puits chaud. Bien qu'il soit trop optimiste (car trop inertiel), **le modèle confirme le fait qu'une bulle d'eau chaude injectée au puits chaud a un impact très local et se dissipe très rapidement**. Une campagne de mesures dédiée à la caractérisation des propriétés et conditions limites thermiques de l'aquifère permettrait certainement d'améliorer le calage des modèles

analytiques ou numériques afin de mieux rendre compte de la dynamique des transferts de chaleur.

Il faut toutefois noter que, même si les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère avaient été favorables au stockage thermique, **le fonctionnement du dispositif de chauffage/climatisation piloté uniquement par les besoins de la serre et se traduisant par un fonctionnement très discontinu, ne fournit pas des conditions d'injection optimales qui permettraient d'optimiser le stockage** et de minimiser la dissipation de l'énergie injectée.

Les analyses géochimiques des prélèvements d'eau réalisés régulièrement dans l'aquifère et leurs interprétations reposant sur des calculs de spéciation et d'indices de saturation vis-à-vis des principales phases minérales, ont montré **qu'aucune variation significative des propriétés chimiques de l'eau n'est décelée dans la gamme de température** rencontrée sur le site au cours du fonctionnement de l'installation de chauffage/climatisation. Les prélèvements effectués sur site ont également fait l'objet d'un suivi microbiologique. Les tests statistiques réalisés sur les résultats obtenus ne montrent **aucune différence significative entre la quantité de biomasse présente dans la zone impactée par les rejets thermiques et dans la zone non impactée**. Par ailleurs, les analyses montrent une bonne qualité microbiologique des eaux souterraines, avec une diversité bactérienne élevée. L'augmentation modérée et ponctuelle de température du côté chaud de l'aquifère n'a **pas entraîné de prolifération d'un groupe dominant**. Le suivi de l'installation n'a donc pas mis en évidence d'impact chimique ou biologique sur l'aquifère exploité.

L'évaluation technico-économique a mis en évidence une **économie d'énergie de l'ordre de 25%** pour la serre capteur, mais un **surcoût global annuel (investissement, entretien et énergie) de 56%** par rapport à la serre témoin. Cependant, les **bénéfices énergétiques, environnementaux et agronomiques** de la serre capteur sont évalués à 12.4€/m² par an. Finalement, le calcul de quelques indicateurs de rentabilité économique montre que l'opération de conversion d'une serre classique en serre semi-fermée chauffée et climatisée à l'aide d'une PAC sur nappe (dans des conditions équivalentes à celles du projet expérimental) est économiquement acceptable, avec une **Valeur Actuelle Nette estimée à 78.8 k€ sur 25 ans (82 €/m²), un Taux de Rentabilité Interne de 14.2% et un Temps de Retour sur Investissement évalué à 9 ans**. Ces indicateurs sont toutefois **particulièrement sensibles au prix de l'énergie**, les augmentations du prix de l'électricité étant défavorables à la solution géothermique, alors que celles du gaz lui sont favorables.

Les deux ans et demi de suivi du site expérimental ont certes confirmé l'impossibilité de stocker de la chaleur sur plusieurs mois dans l'aquifère, compte-tenu de ses propriétés hydrogéologiques, mais ont aussi **permis l'acquisition de nombreuses données inédites**. Des éléments ont été recueillis pour **promouvoir le rafraîchissement de serres semi-fermées et/ou le chauffage en utilisant une PAC sur nappe (doublet non réversible)** moyennant un bilan économique et environnemental favorable.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Présentation du dispositif expérimental.....	13
2.1. PRESENTATION GENERALE	13
2.2. FONCTIONNEMENT DU CHAUFFAGE ET DU REFROIDISSEMENT	14
2.2.1. Le chauffage des serres	14
a) Serre Témoin	14
b) Serre Capteur.....	15
2.2.2. Le refroidissement des serres	16
a) Serre Témoin	16
b) Serre Capteur.....	16
2.3. PRINCIPAUX EQUIPEMENTS DE LA SERRE CAPTEUR	17
2.3.1. Forages et équipements des forages	17
2.3.2. CTA et annexes	18
2.3.3. Pompe à Chaleur (PAC).....	18
2.3.4. Ballons de stockage journalier.....	19
2.3.5. Echangeurs thermiques à plaques	19
3. Evolution thermique de l'aquifère.....	21
3.1. L'AQUIFERE	21
3.2. DISPOSITIF DE SUIVI DE L'AQUIFERE.....	24
3.3. EVOLUTION NATURELLE DE LA TEMPERATURE DE L'AQUIFERE	27
3.3.1. Analyse des variations saisonnières de température et de piézométrie..	27
3.3.2. Relation entre la température extérieure et la température de la nappe .	28
3.4. ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AQUIFERE AU COURS DES CYCLES D'INJECTION/POMPAGE	34
3.4.1. Modes de fonctionnement pendant les deux années de suivi.....	35
3.4.2. Evolution générale des températures dans l'aquifère au cours des deux années de fonctionnement	36
3.4.3. Impact sur la température de l'aquifère d'une journée de climatisation (juin 2011).....	38
3.4.4. Impact sur la température de l'aquifère d'une journée de climatisation (juillet 2011).....	40

3.5. MODELISATION NUMERIQUE DES TRANSFERTS THERMIQUES DANS L'AQUIFERE	42
3.5.1. Construction du modèle.....	42
3.5.2. Conditions imposées pour simuler l'impact d'une injection d'eau chaude	44
3.5.3. Résultats des simulations	44
3.6. SYNTHÈSE SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES DANS L'AQUIFERE ...	47
4. Etude chimique et microbiologique de l'aquifère	49
4.1. CARACTERISATIONS MINÉRALOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DES FORMATIONS HÔTES SEDIMENTAIRES.....	49
4.2. ÉVOLUTION DE LA CHIMIE DES EAUX AU DROIT DU SITE.....	50
4.2.1. Méthodologie de prélèvement et d'analyses	50
4.2.2. Calcul de spéciation aqueuse	51
4.2.3. Calcul des indices de saturation	52
4.2.4. Potentiel d'oxydo-réduction	58
4.3. ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES MICROBIOLOGIQUES	60
4.3.1. Suivi de la biomasse bactérienne totale.....	60
4.3.2. Suivi de la diversité bactérienne	63
4.3.3. Mesure d'activité	68
5. Évaluation technico-économique.....	71
6. Bilan du projet	91
7. Références.....	93

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de situation du site de Balandran.....	11
Illustration 2 : Schéma de la serre Témoin en mode chauffage (source : CTIFL).....	15
Illustration 3 : Schéma de la serre Capteur en mode chauffage (source : CTIFL).....	16
Illustration 4 : Schéma conceptuel de la serre Capteur en mode refroidissement (source : CTIFL).....	17
Illustration 5 : Réseaux hydrauliques et aérauliques de la serre capteur (source : Powaga, 2010)	18
Illustration 6 : Carte piézométrique (19/12/2011)	21
Illustration 7 : Géologie au droit du site d'étude et points de contraintes traduisant la remontée des marnes	22

Illustration 8 : Modèle géologique (coupes)	23
Illustration 9 : Température mesurée aux puits lors d'une journée alternant pompage et injection	25
Illustration 10 : Schéma d'implantation de l'instrumentation de suivi de la nappe.....	26
Illustration 11 : Température et piézométrie relevées en SP3 (déc.2009 - fév.2012)	27
Illustration 12 : Températures de la nappe et température extérieure (données filtrées au pas de temps journalier)	29
Illustration 13 : Corrélogrammes croisés température extérieure – température de la nappe à différentes profondeurs en SP2 et SP3.....	30
Illustration 14 : Amplitudes de variation annuelle de la température de la nappe et déphasages des extrema (en jours) avec ceux de la température extérieure.....	31
Illustration 15 : Approximation de la température extérieure par une courbe sinusoïdale	32
Illustration 16 : Comparaison des températures observées et calculées en SP2 et SP3	33
Illustration 17 : Comparaison des températures observées et calculées en F1 et F2.....	34
Illustration 18 : Piézométrie au puits chaud mettant en évidence les modes de fonctionnement du dispositif de chauffage/climatisation de la serre expérimentale de 2009 à 2012.....	35
Illustration 19 : Piézométrie au puits chaud mettant en évidence le fonctionnement du dispositif en mode climatisation au cours de l'été 2011	36
Illustration 20 : Température de la nappe à différentes profondeurs en amont (SP1) et en aval (SP2 et SP3) du puits chaud de 2009 à 2012	37
Illustration 21 : Caractéristiques des injections successives au puits chaud du 16 au 17/06/11	38
Illustration 22 : Evolution de la température de la nappe en amont et aval du puits d'injection à 11 m de profondeur du 16 au 17/06/11	39
Illustration 23 : Evolution de la température de la nappe en amont et aval du puits d'injection à 11m de profondeur du 15 au 17/07/11	40
Illustration 24 : Evolution de la température de la nappe au piézomètre SP2 à différentes profondeurs du 15 au 17/07/11	41
Illustration 25 : Extension du modèle d'écoulement (carré noir).....	43
Illustration 26 : Représentation du maillage à 50 m avec un gigogne à 10 m autour du site	43
Illustration 27 : Rabattement simulé pour l'événement du 16/06/2011	45
Illustration 28 : Température simulée et observée à SP2 pour l'événement du 16/06/2011	46
Illustration 29 : Reconstitution de l'assemblage minéralogique du site de Balandran.....	50
Illustration 30 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite en fonction du pH	53
Illustration 31 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la dolomite en fonction du pH	53

Illustration 32 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite en fonction de la température de prélèvement	55
Illustration 33 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la dolomite en fonction de la température de prélèvement	56
Illustration 34 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des formes minérales siliceuses, cristallines ou amorphe.....	57
Illustration 35 : Diagramme de Pourbaix simplifié	59
Illustration 36 : Observations en microscopie en épifluorescence sur membranes de filtration des bactéries, après marquage à l'acridine orange	61
Illustration 37 : Evolution du nombre totale de bactéries et des températures de prélèvements correspondantes sur les différentes campagnes de prélèvements.....	62
Illustration 38 : Proportion des grands groupes bactériens marqués par les sondes FISH pour les piézomètres SP7, coté Puits « froid » (A) et SP2, coté Puits « chaud » (B).	65
Illustration 39 : Mesure d'activité en fonction de la température	69
Illustration 40 : Energie calorifique fournies aux serres pendant la campagne 2011-2012	73
Illustration 41 : Puissances maximales appelées pour la campagne 2011-2012.....	73
Illustration 42 : Consommations énergétiques des serres capteur et témoin - Campagne 2011-2012	74
Illustration 43 : Coût d'investissement estimatif du système de chauffage/ refroidissement de la serre capteur	77
Illustration 44 : Coût d'investissement estimatif du système de chauffage de la serre témoin	78
Illustration 45 : Comparaison du coût annuel global pour les deux solutions énergétiques	81
Illustration 46 : Bilan des émissions de CO ₂ pour les deux serres.....	83
Illustration 47 : Bilan des performances agro-économiques de la serre capteur d'énergie par rapport à la serre témoin.....	85
Illustration 48 : Bilan économique annuel de la serre capteur.....	86
Illustration 49 : Evaluation de la VAN et du TdR	87
Illustration 50 : Evolution de la VAN en fonction de l'augmentation du prix de l'énergie	88
Illustration 51 : Evolution du TdR en fonction de l'augmentation du prix de l'énergie.....	88

Liste des Annexes

Annexe 1 Données pour les modèles géologiques et hydrogéologiques	95
---	----

1. Introduction

L'objectif du projet « Serre capteur d'énergie » était d'évaluer la faisabilité du stockage intersaisonnier d'énergie thermique en aquifère pour le chauffage et le refroidissement de serres maraîchères, grâce à la mise en œuvre d'une serre expérimentale située en région Languedoc-Roussillon (Balandran, Gard), et, si possible, l'équipement de deux serres pilotes situées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Crau et Aubignan). Le projet a comporté 3 phases :

- Phase I : Etude préalable des sites
- Phase II : Conception et équipement de la serre expérimentale du CTIFL (Balandran)
- Phase III : Expérimentations sur le site de Balandran

Le projet démarré en mars 2007 a duré 5 ans et réuni 9 partenaires publics et privés, dont le CTIFL¹ (coordinateur du projet) et le BRGM. La contribution du BRGM à ce projet a été cofinancée par le Fond de Compétitivité des Entreprises (FCE) de la Direction Générale des Entreprises (Ministère de l'Economie, de l'Industrie et de l'Emploi), ainsi que par l'ADEME et le Conseil Régional Languedoc-Roussillon pour la phase I, et par l'Union Européenne via le Conseil Régional Languedoc-Roussillon (FEDER) pour les phases II et III.

La contribution du BRGM à la première phase du projet concernait la caractérisation hydrogéologique des 3 sites envisagés et le dimensionnement d'un éventuel dispositif de stockage d'énergie en nappe aquifère (rapport BRGM/RP-56641-FR, 2008). Dans chacun des cas, des simulations numériques ont été mises en œuvre afin d'évaluer les possibilités de stockage thermique en fonction du contexte hydrogéologique.

Sur le site du **CTIFL de Balandran**, les résultats ont mis en évidence la difficulté d'atteindre une efficacité intéressante du stockage thermique, en raison de la forte vitesse d'écoulement de la nappe (de l'ordre du mètre par jour). Cependant, l'obtention d'un fort taux de récupération énergétique n'était pas déterminant dans le cas particulier de la serre expérimentale, pour laquelle d'autres objectifs scientifiques étaient visés (axés sur l'étude du comportement des plantes, du climat de la serre, des économies d'énergie et gains de production en serre semi-fermée, bilan thermique de la serre). Il a donc été décidé de tester le stockage thermique sur l'un des trois compartiments de 1000 m² de la serre expérimentale. Ces tests en vraie grandeur sont également justifiés par la faible épaisseur et profondeur de l'aquifère qui autorisent cette recherche avec des coûts de forages relativement modérés.

Sur le **site pilote de la Crau**, cette phase a permis de proposer des emplacements ainsi qu'un dimensionnement d'ouvrages (4 forages réversibles de 50 m³/h) en vue de

¹ Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

réaliser un site pilote. Toutefois, face aux incertitudes subsistant sur le taux de récupération effectif de l'énergie thermique stockée (dues en particulier à la complexité des écoulements de la nappe induits par les pompages et les surplus d'irrigation), et sur le temps de retour sur investissement, l'exploitant a fait part de sa volonté d'attendre les résultats du test sur la serre expérimentale de Balandran avant d'engager des travaux sur son propre site.

Sur le **site pilote d'Aubignan**, des questions techniques concernant la faisabilité du stockage thermique (en particulier la difficulté à réinjecter) se sont posées, que seules des investigations complémentaires assez lourdes auraient permis de lever. Le site n'a donc pas été retenu pour tester en pilote le stockage thermique intersaisonnier en aquifère.

Parallèlement à l'étude hydrogéologique des sites, une évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité des eaux souterraines a été réalisée. En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux souterraines, les premiers résultats obtenus étaient conformes aux tendances générales citées dans la bibliographie, à savoir une précipitation de carbonates au puits chaud et de silicates au puits froid. L'impact potentiel sur la microflore de la modification de température de l'eau dans l'aquifère a également été mis en évidence, en particulier dans le cas d'eaux chargées en éléments nutritifs (eau de la Crau). Des phénomènes de bio-précipitations ont également été signalés (carbonates sur le site de la Crau et hydroxydes de fer sur le site du CTIFL). Ces éléments ont confirmé l'intérêt de suivre le développement de la microflore dans le cadre d'une installation de stockage thermique en aquifère.

La seconde phase du projet (2008-2009) a consisté en la construction et l'aménagement de la serre expérimentale sur le site du CTIFL à Balandran. Le BRGM était en charge du dimensionnement des ouvrages souterrains, du suivi des travaux de foration, de la mise en œuvre et de l'interprétation des essais de pompage et d'injection, et du suivi scientifique de la partie souterraine de l'installation. Le rapport BRGM/RP-59521-FR (2011) décrit les ouvrages réalisés, les coupes géologiques associées, et les résultats et interprétations des essais de pompage qui ont été mis en œuvre sur les forages côtés chaud et froid. Il présente également l'instrumentation et le suivi qui ont été mis en place sur ces ouvrages afin d'observer l'évolution de la piézométrie, de la température et de la qualité de l'eau de la nappe.

La dernière phase du projet (2010-2012) a consisté à la conduite de deux campagnes annuelles de tomates dans la serre expérimentale en ayant recours au dispositif de chauffage/refroidissement par la nappe. Les paramètres liés à l'aquifère ont été suivis et interprétés par le BRGM et font l'objet du présent rapport. Le premier chapitre fait un rappel succinct du dispositif expérimental. Le second chapitre concerne les évolutions piézométriques et thermiques alors que le troisième s'intéresse aux aspects liés à la qualité de l'eau (chimique et bactériologique). Enfin, un dernier chapitre vient

compléter² cette étude en présentant une évaluation technico-économique de la serre capteur en s'appuyant sur les bilans énergétique et agronomique établis par le CTIFL.

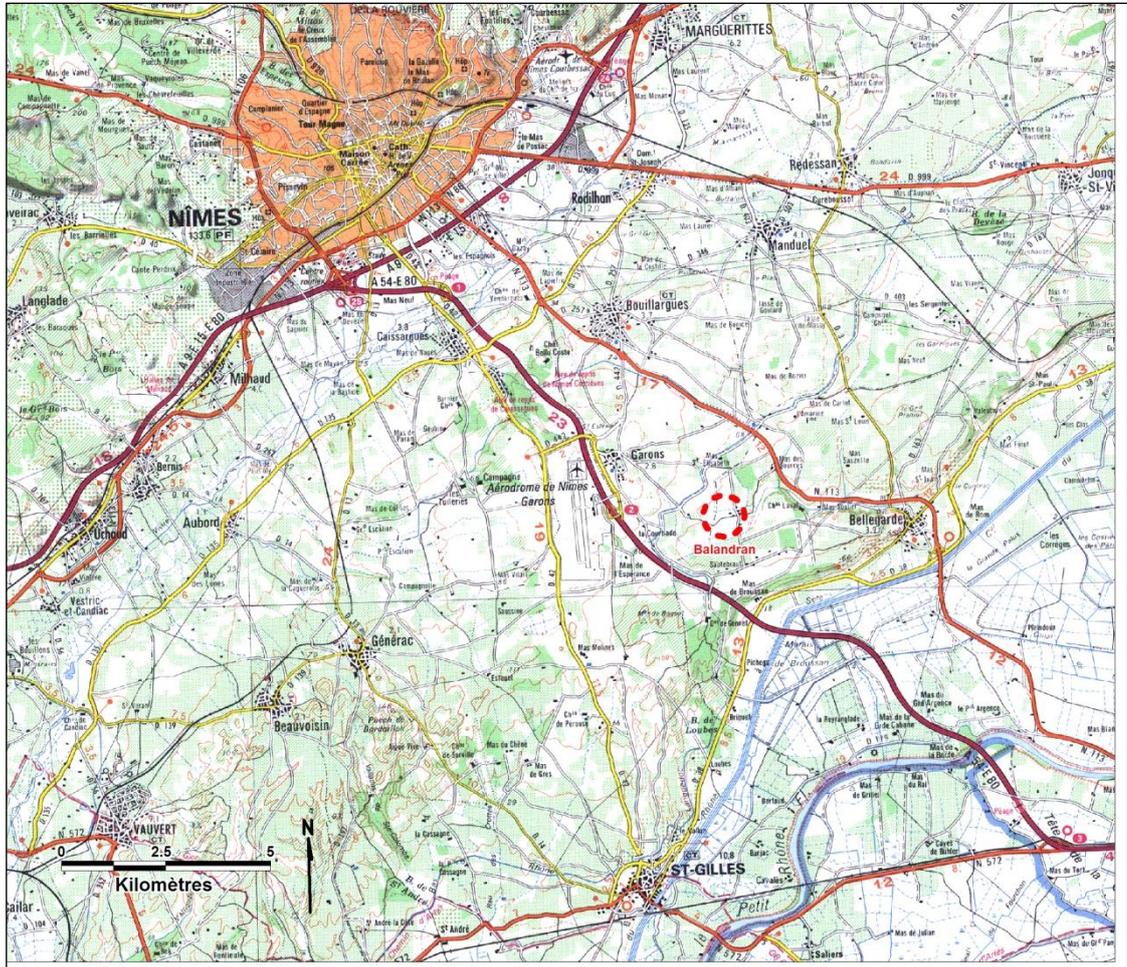


Illustration 1 : Carte de situation du site de Balandran

² Ce chapitre n'est pas présent dans le rapport BRGM/RP-60768-FR qui constitue la contribution du BRGM au rapport final du projet coordonné par le CTIFL.

2. Présentation du dispositif expérimental

Ce chapitre vise à fournir au lecteur les éléments essentiels pour comprendre le fonctionnement du dispositif expérimental dans son ensemble (serres et système de chauffage et climatisation). Ces informations permettent également d'éclairer les interprétations des données expérimentales de suivi de la nappe qui sont proposées dans les chapitres suivants. Elles sont pour la plupart issues du rapport CTIFL de E.Powaga (2010).

2.1. PRESENTATION GENERALE

L'installation expérimentale du centre CTIFL de Balandran est composée de trois serres identiques de 960 m² de surface utile chacune :

- une « **Serre Capteur** » en verre, qui permet de tester le chauffage/la climatisation par géothermie avec stockage thermique en aquifère par doublet de forages ;
- une « **Serre Témoin** » identique à la serre capteur, mais avec un réseau de chauffage différent et alimenté par une chaudière à gaz, fournissant une référence à l'expérimentation ;
- une « **Serre F-Clean®** » en double paroi plastique, destinée à tester un nouveau matériau remplaçant le verre.

Les principales caractéristiques techniques des serres **capteur et témoin** sont :

- longueur : 40 m, largeur 24 m, Hauteur 6.3 m sous chéneaux,
- superficie de la serre 960 m² dont 128 m² de zone technique,
- poteaux et poutres treillis laqués blancs,
- double tube de végétation,
- gouttières suspendues,
- vitrage : simple vitrage, largeur maximale 1,32 m,
- parties ouvrantes en continu ≈ 43 % surface au sol,
- écrans thermiques en paroi (type PHL 55) et double écran (thermique PH 77 et d'ombrage PH 44) en toiture afin de limiter les déperditions thermiques,
- automatisme : Hoogendoorn (installé en zone technique),
- volume moyen climatisé de la serre de culture : 6048 m³,

L'expérimentation culturale est identique dans les deux serres :

- surface de culture : 816 m²,
- rangées de cultures : 16 rangées dont 14 équipées de gaine de ventilation,
- variété principale : tomates Climberley (S&G) greffées sur Maxifort (De Ruiter),

- culture sur gouttière suspendue : Hauteur /sol = 85 cm,
- substrat : Coco Monagri,
- densité : 2.4 à 3 plantes / m²

Dans les deux serres, les consignes de régulation des températures sont :

- une température minimale en hiver de +15°C (sur la base d'une température extérieure minimale de -4°C),
- une température maximale de +30°C à la tête des plantes avec une hygrométrie maximale de 80% (sur la base d'une température extérieure maximale de 35°C).

2.2. FONCTIONNEMENT DU CHAUFFAGE ET DU REFROIDISSEMENT

2.2.1. Le chauffage des serres

Les deux serres sont équipées du même dispositif de chauffage thermosiphon Haute Température (HT) et Basse Température (BT). Ces deux types de réseaux de chauffage sont couramment utilisés pour le chauffage des serres d'exploitation, car ils permettent une meilleure homogénéité de chauffage que d'autres solutions techniques existantes (ex. aérothermes) :

- le réseau Haute Température (HT) est constitué de tubes métalliques déposés au sol, dans lesquels circule de l'eau à une température comprise entre 70 et 90 °C. Il sert aussi de rails pour les chariots d'exploitation. Dans la serre Capteur, le réseau HT est uniquement utilisé en solution de secours ;
- le réseau Basse Température (BT) est constitué de doubles tubes métalliques, passant dans chaque rang de végétation, où circule de l'eau tiède entre 40 et 60°C.

a) Serre Témoin

Les réseaux HT et BT sont alimentés par de l'eau chaude provenant de la chaudière à gaz naturel (Illustration 2).

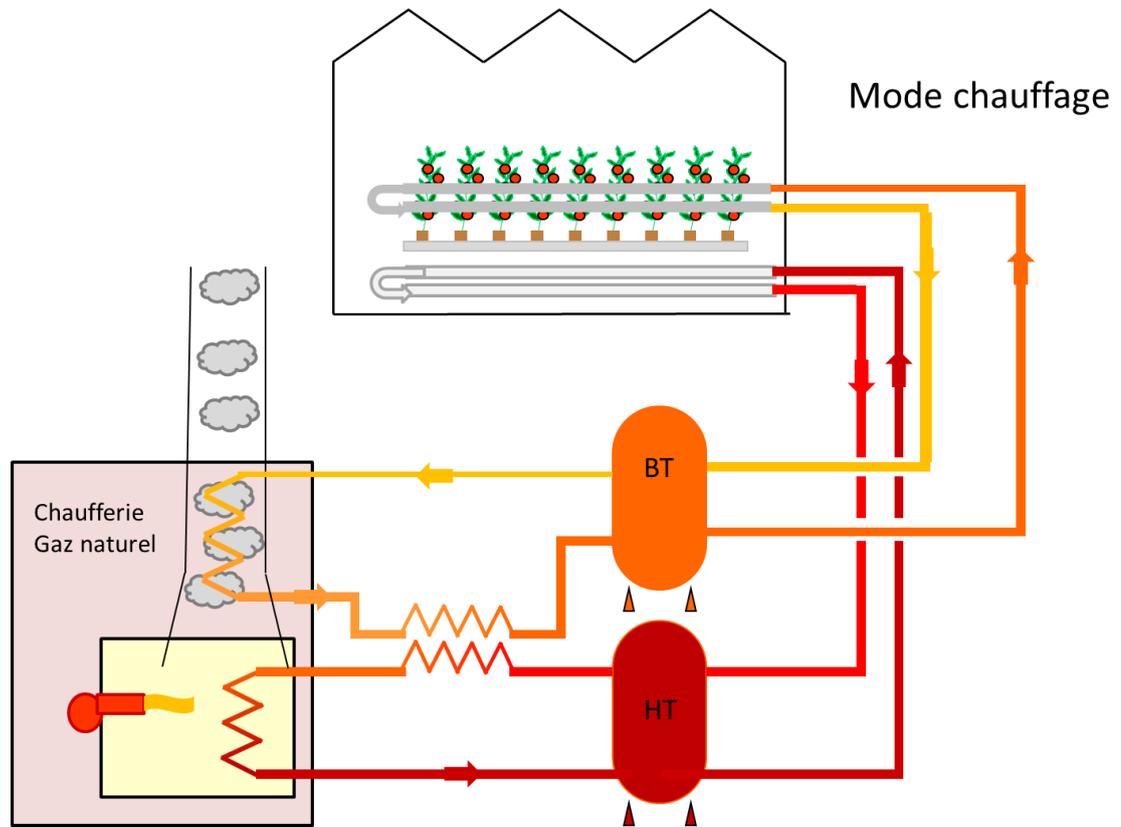


Illustration 2 : Schéma de la serre Témoin en mode chauffage (source : CTIFL)

b) Serre Capteur

Le réseau BT est alimenté par de l'eau provenant du puits chaud et/ou de la PAC eau-eau réversible fonctionnant sur les ballons de stockage. En hiver, le dispositif de géothermie sur aquifère sert à chauffer la serre. Idéalement, de l'eau autour de 25°C est pompée dans le puits chaud, réchauffe la serre, et est réinjectée autour de 10°C dans le puits froid. En pratique, cette utilisation directe n'a pas été possible au cours des deux années de fonctionnement, car l'eau de l'aquifère au puits chaud est restée à une température trop faible (autour de 16°C). Le système a donc fonctionné avec la **PAC fournissant de l'eau à environ 40°C pour chauffer la serre, et rejetant une eau froide à 6°C vers les ballons froids** (eau froide évacuée vers le puits froid).

Le réseau HT n'est pas utilisé pour le chauffage dans la serre capteur (hors secours). Le chauffage est assuré par l'air chaud soufflé dans les gaines textiles par les CTA (Illustration 3).

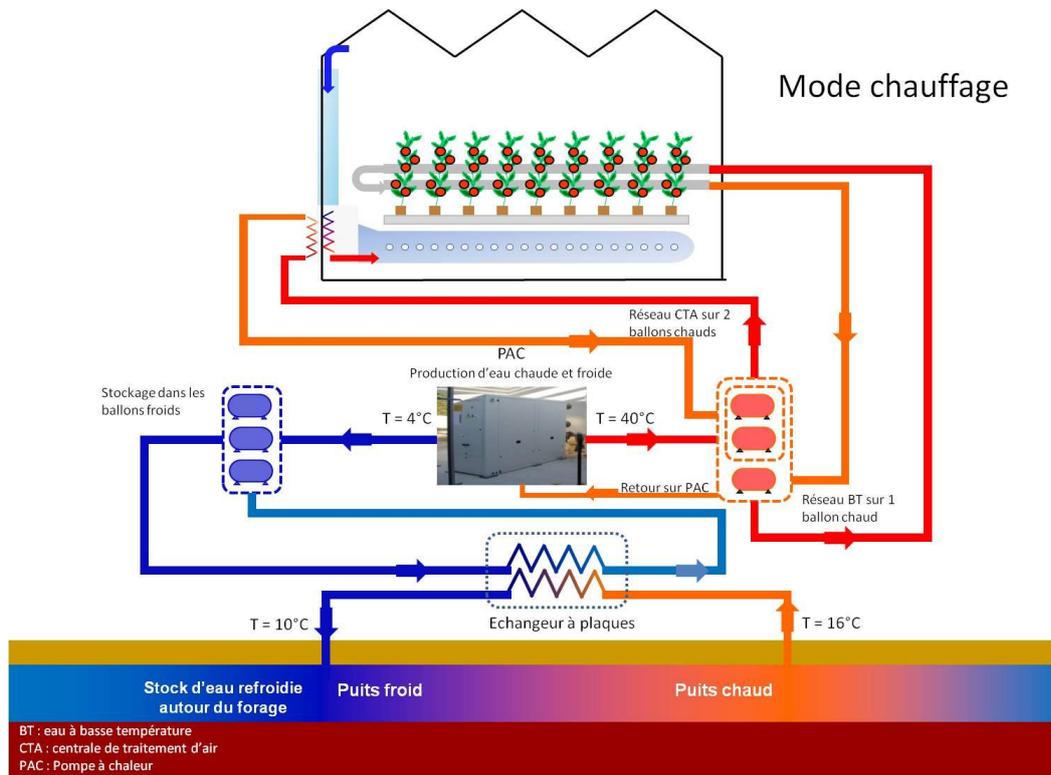


Illustration 3 : Schéma de la serre Capteur en mode chauffage (source : CTIFL)

2.2.2. Le refroidissement des serres

a) Serre Témoin

La serre Témoin est refroidie uniquement par aération (ouverture du toit de la serre).

b) Serre Capteur

En été, le dispositif de géothermie sur aquifère sert à refroidir la serre. Malheureusement, les performances des CTA s'étant révélées en pratique moindre que celles annoncées par le constructeur, cette utilisation « directe » de l'eau de l'aquifère pour rafraîchir la serre a été peu utilisée. **En pratique, la PAC a été utilisée pour refroidir les ballons froids entre 6 et 12°C, rejetant simultanément de l'eau autour de 30°C au puits chaud.**

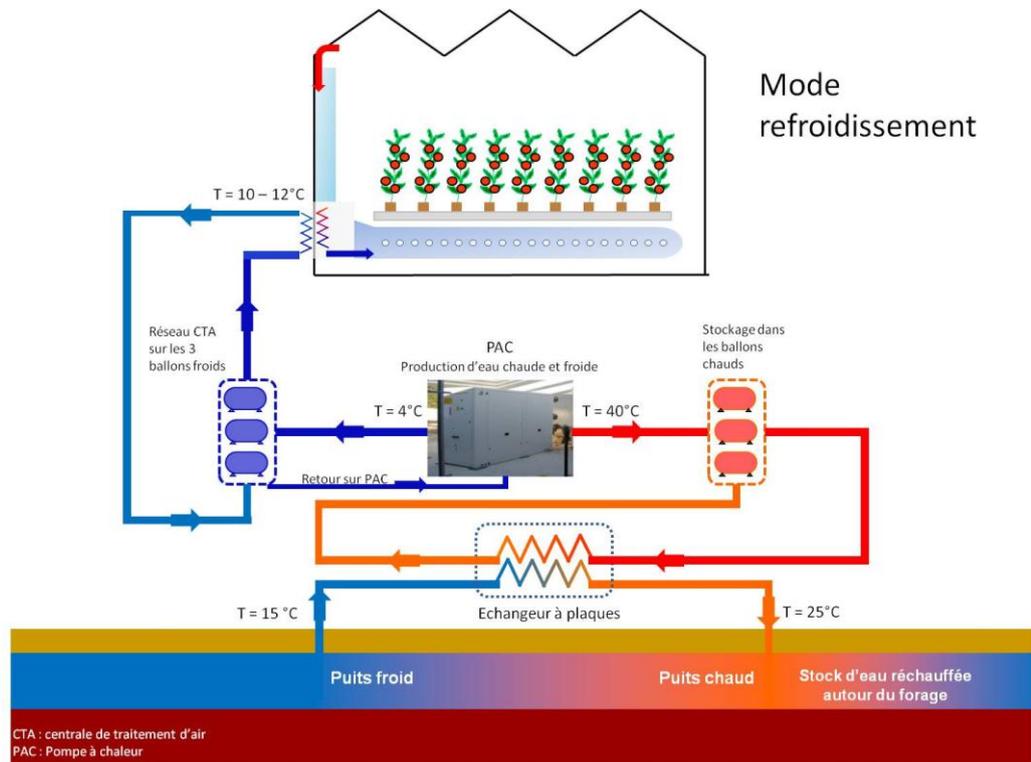


Illustration 4 : Schéma conceptuel de la serre Capteur en mode refroidissement (source : CTIFL)

2.3. PRINCIPAUX EQUIPEMENTS DE LA SERRE CAPTEUR

Les principaux équipements de la Serre Capteur sont :

- 2 Forages équipés de pompes réversibles,
- 14 Centrales de Traitement d'Air (CTA) + gaines textiles,
- 1 Pompe à Chaleur (PAC) eau/eau,
- 6 ballons de stockage de 30m³ chacun,
- 2 échangeurs thermiques à plaques,
- 1 automate climatique (HOOGENDOORN).

2.3.1. Forages et équipements des forages

L'installation comprend 2 forages réversibles (pompage et réinjection) de diamètre 432mm, d'une capacité nominale de 50 m³/h. Le forage chaud (F1) d'une profondeur de 23m est crépiné de -15 à -21m. Le forage froid (F2), d'une profondeur de 17m est crépiné de -7 à -13m.

2.3.2. CTA et annexes

Les deux serres sont équipées de 14 centrales de traitement d'air WESPER installées à l'intérieur des serres (côté façade Sud) qui permettent :

- le chauffage et le refroidissement de la serre par échange de chaleur entre le réseau hydraulique thermiquement régulé par l'aquifère (ou la PAC) et le réseau aéraulique traversant la serre (gainés textiles) ;
- la ventilation (ou l'aération) ;
- la déshumidification (régulation de l'humidité de l'air de la serre) ;
- l'apport d'air neuf (prise d'air extérieur).

Sous 14 des 16 rangées de culture sont installées des gaines textiles suspendues sous la gouttière pour permettre la circulation de l'air réchauffé/refroidi par les CTA.

Avec une alimentation en eau de nappe à 15°C et un débit nominal de 70 m³/h, les 14 petites CTA auraient dû fournir une puissance froid théorique de 305 kW (avec un air à la reprise de 30°C à 80% d'humidité relative).

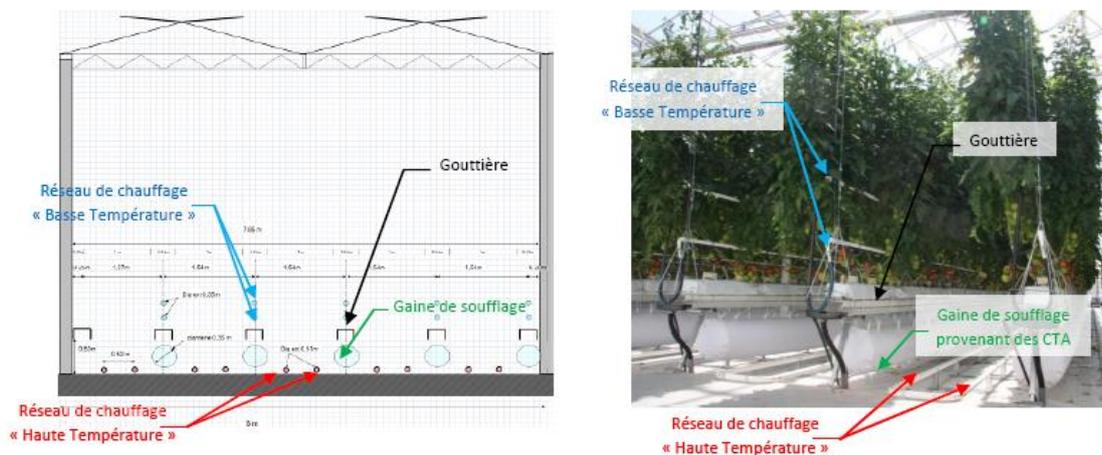


Illustration 5 : Réseaux hydrauliques et aérauliques de la serre capteur (source : Powaga, 2010)

2.3.3. Pompe à Chaleur (PAC)

Une pompe à chaleur eau-eau d'une puissance de 237 kW froid (287 kW chaud) assure le complément de refroidissement et de chauffage de la serre avec un COP³ théorique supérieur à 5.

³ COP = COefficient de Performance, nombre de kWh (chaleur) produit par kWh (électrique) consommé.

2.3.4. Ballons de stockage journalier

L'installation comprend 6 ballons de stockage intermédiaire journalier qui servent de réservoirs tampons (90 m³ pour le côté chaud, et 90 m³ pour le côté froid).

2.3.5. Echangeurs thermiques à plaques

Deux échangeurs de séparation à plaques (inox 304) avec joints d'une puissance d'échange de 310kW, permettent un isolement du circuit des forages avec le circuit fermé sous pression. Le pincement est de 1°C, c'est à dire que l'écart de température entre l'eau du circuit primaire (aquifère) et l'eau du circuit secondaire (ballons – PAC – CTA) est seulement de 1°C.

3. Evolution thermique de l'aquifère

3.1. L'AQUIFERE

Le site expérimental de Balandran se situe sur la nappe des cailloutis des Costières (alluvions quaternaires et villafranchiennes) qui s'écoule vers le Sud-est. La formation aquifère captée par les ouvrages de production est constituée de sables du Pliocène marin. Elle se situe à une dizaine de mètres de profondeur et présente une puissance de 5 à 20 mètres. Grâce aux relevés piézométriques effectués régulièrement dans les ouvrages situés aux alentours du site, en complément des mesures automatisées sur le site lui-même, des cartes piézométriques ont pu être établies (Illustration 6). On observe un **gradient hydraulique moyen de 0.5%**.

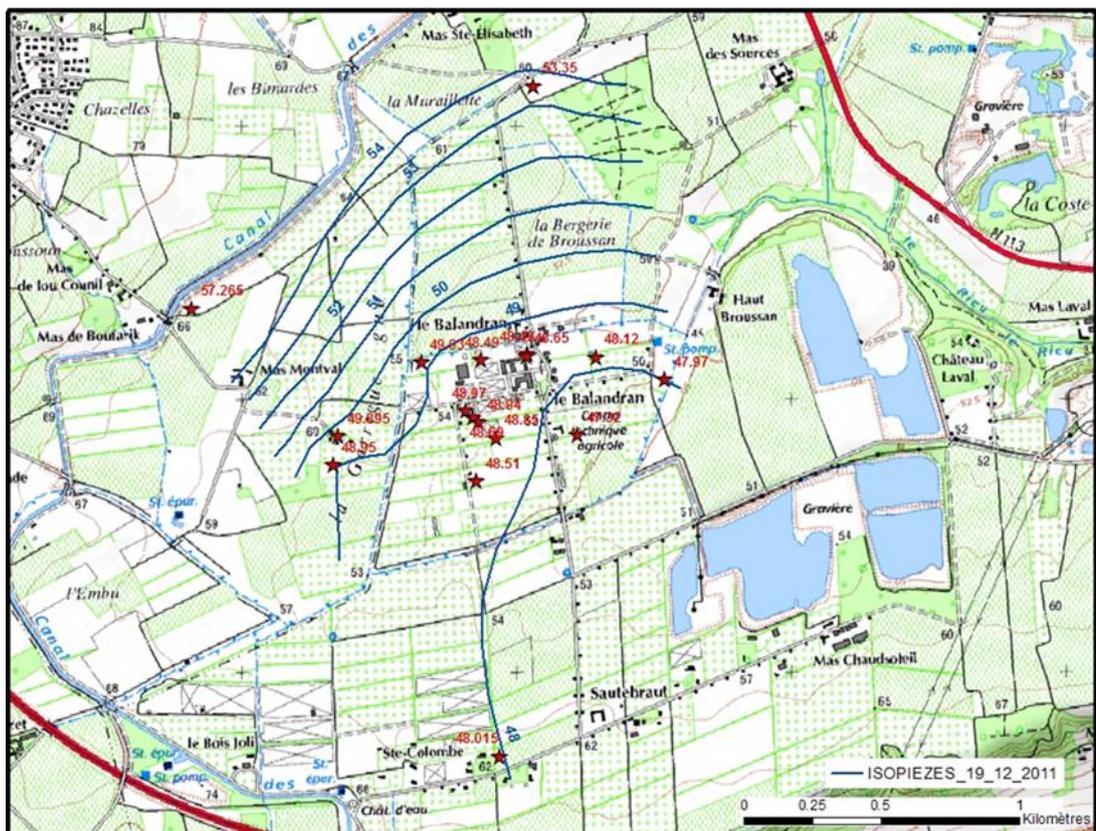


Illustration 6 : Carte piézométrique (19/12/2011)

Ce site a fait l'objet d'une modélisation géologique 3D à l'aide du logiciel GDM©. Les données utilisées proviennent des investigations réalisées dans le cadre du projet et de bases de données préexistantes (BSS, carte géologique...) :

- modèle numérique de terrain (grille de l'IGN au pas 50 m),

- coupes techniques et coupes géologiques interprétées des huit ouvrages de reconnaissance réalisés sur le site de Balandran (voir rapport BRGM/RP-59521-FR),
- lithologie plus ou moins détaillée enregistrée en BSS pour 7 ouvrages situés aux alentours de la zone d'étude (voir annexe 1),
- carte géologique, points de contrainte correspondant à la remontée des marnes et coupes schématiques réalisées au droit du site d'étude suite à l'interprétation des essais de pompage (Illustration 7).

Le modèle géologique comprend trois couches : les conglomérats (représentés en orange), les sables (en jaune) qui constituent la couche aquifère, et les marnes (en bleu) qui forment un substratum imperméable. Des coupes successives du Sud-Ouest vers le Nord-Est (a, b, c et d), puis du Nord-Ouest au Sud-Est (e, f, g) mettent en évidence la géométrie « en cuvette » de la formation aquifère des sables du pliocène marin (Illustration 8).



Illustration 7 : Géologie au droit du site d'étude et points de contraintes traduisant la remontée des marnes

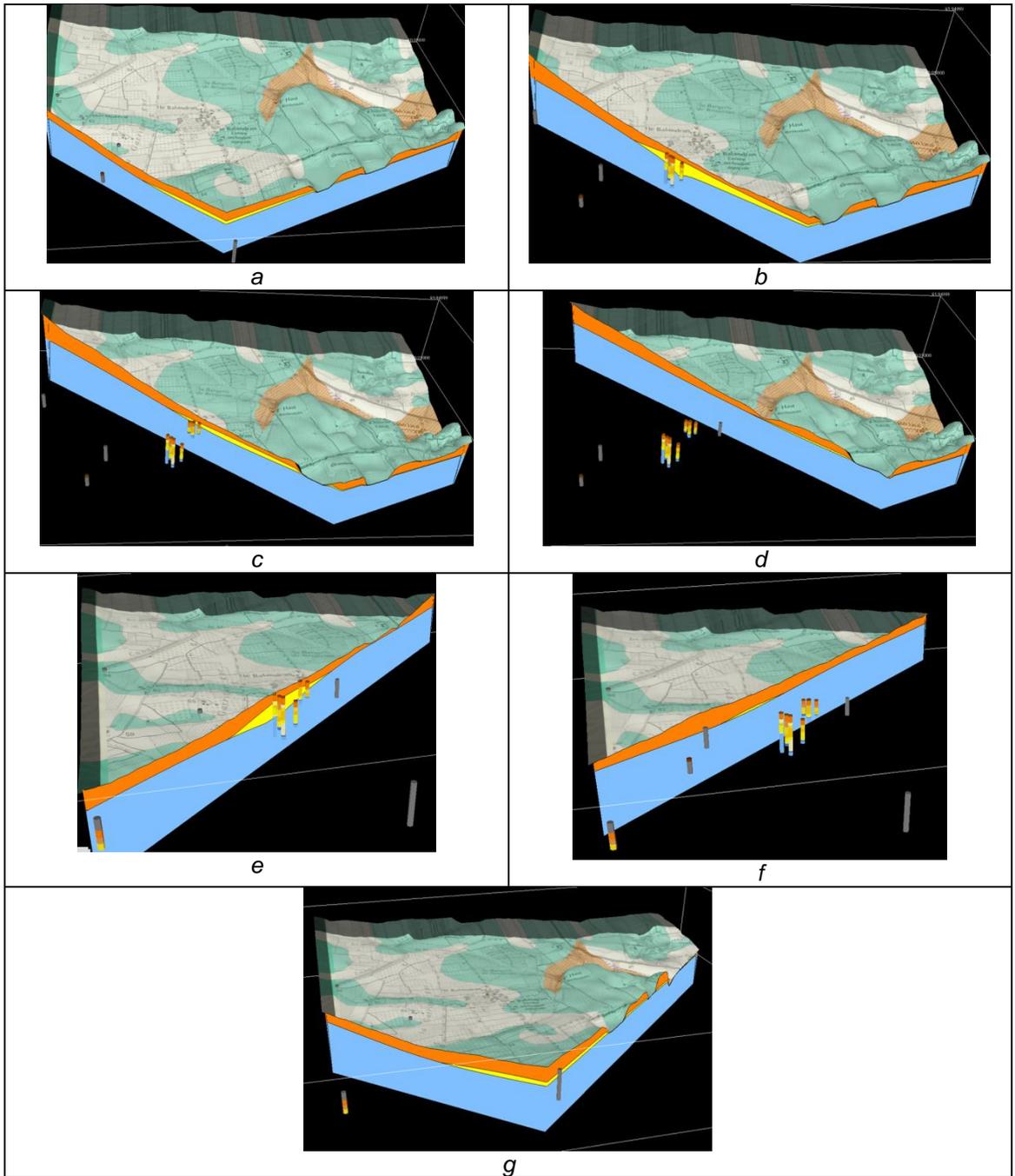


Illustration 8 : Modèle géologique (coupes)

3.2. DISPOSITIF DE SUIVI DE L'AQUIFERE

Le dispositif de suivi des propriétés physiques et thermiques de l'aquifère au cours de l'expérimentation a été décrit dans le rapport BRGM/RP-59521-FR. On en rappelle ici seulement les grandes lignes.

Le niveau de la nappe est mesuré toutes les 15 minutes dans les 2 forages exploités (puits chaud F1 et puits froid F2) ainsi que dans les piézomètres de suivi (SP7, SP1, SP2 et SP3) grâce à des sondes de niveau reliées à des centrales d'acquisition. Les températures sont mesurées avec la même fréquence par plusieurs sondes réparties verticalement dans les piézomètres, la première étant positionnée 1 mètre sous le niveau hydrostatique moyen observé, et les suivantes tous les deux mètres environ jusqu'au sommet du tube décanteur (Illustration 10).

Dans les forages exploités (F1 et F2), une sonde de température est placée à hauteur du sommet des crépines (environ 9m de profondeur) pour apprécier l'évolution de la température lors des phases d'arrêt des pompages / injections. Un zoom sur les températures mesurées au puits chaud lors d'une journée alternant injection et pompage est présenté sur l'illustration 9 afin de préciser la nature des mesures de température faites aux puits. Ainsi, sur la période d'observation choisie (16/04/2011 minuit – 17/04/2011 06h00), deux épisodes de pompage au puits chaud (et donc d'injection au puits froid), et un épisode d'injection au puits chaud (et donc de pompage au puits froid) ont eu lieu. Ils sont mis en évidence sur le graphique ci-dessous par les variations de niveaux piézométriques de chaque puits. La température de l'eau injectée au puits chaud est de l'ordre de 25°C (donnée fournie par la sonde située sur le réseau hydraulique en sortie des échangeurs). La température de la nappe mesurée en SP2 est stable autour de 14.5°C. La température mesurée au puits froid est du même ordre. Elle présente des variations brusques de faible amplitude (0.5°C) lors des épisodes d'injection côté froid. Sur la période d'observation, la température extérieure (non représentée) varie entre +6°C et +21°C. La température mesurée au puits chaud hors injection/pompage présente des valeurs élevées, 27 à 29°C, très supérieures à la température de la nappe (voir SP2) et à celle de l'air extérieur. Dès que le puits est utilisé en pompage, la température mesurée chute pour atteindre 20°C après 3 heures de pompage (valeur qui ne correspond pas a priori à la température de l'eau pompée dans la nappe). Elle remonte ensuite petit à petit pour retrouver en une demi-journée sa valeur initiale élevée. **La température fournie par la sonde placée dans le puits chaud ne peut pas être interprétée comme étant celle de l'aquifère lorsque le puits est au repos ou utilisé en pompage.** Le positionnement de la sonde dans le puits est tel que la mesure qu'elle fournit correspond probablement à une température intermédiaire entre la température de la nappe, celle de la dernière eau injectée et celle du tubage (Inox) du puits. En revanche, on a pu vérifier que, dès qu'il y a injection d'eau « chaude » dans le puits chaud, la température qui y est mesurée devient immédiatement égale à la température d'injection. S'il s'avère que l'eau injectée est plus froide que la température mesurée avant injection (comme c'est le cas sur la journée d'observation détaillée ici), l'épisode d'injection au puits chaud se traduit par une baisse de la température mesurée par la sonde placée dans le puits chaud. **Pendant les phases d'injection, la sonde placée dans le puits chaud mesure la température de l'eau injectée.**

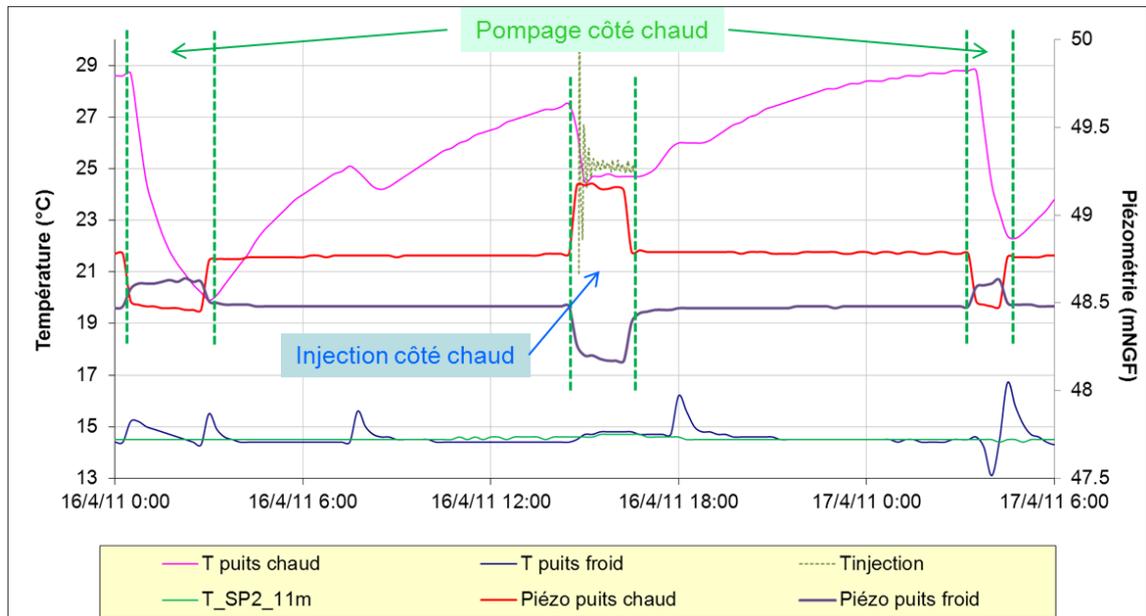


Illustration 9 : Température mesurée aux puits lors d'une journée alternant pompage et injection

Ne disposant pas de la mesure de la température de l'eau injectée côté froid, il n'est pas possible d'interpréter de la même façon les données fournies par la sonde placée dans le puits froid (F2). Néanmoins, au cours des deux ans de suivi, la température fournie par la sonde a rarement dépassé 17°C, et la valeur maximale a été de 19°C. Globalement, en dehors des périodes de chauffage (pendant lesquelles de l'eau froide est rejetée côté froid), la température mesurée au puits froid se situe entre 15 et 17°C. Elle descend jusqu'à 10°C lorsqu'il y a injection d'eau froide. **La température mesurée par la sonde du puits froid semble donc bien correspondre à la température de la nappe en période de repos ou de pompage en ce puits, et à celle de la température de l'eau froide injectée le reste du temps.**

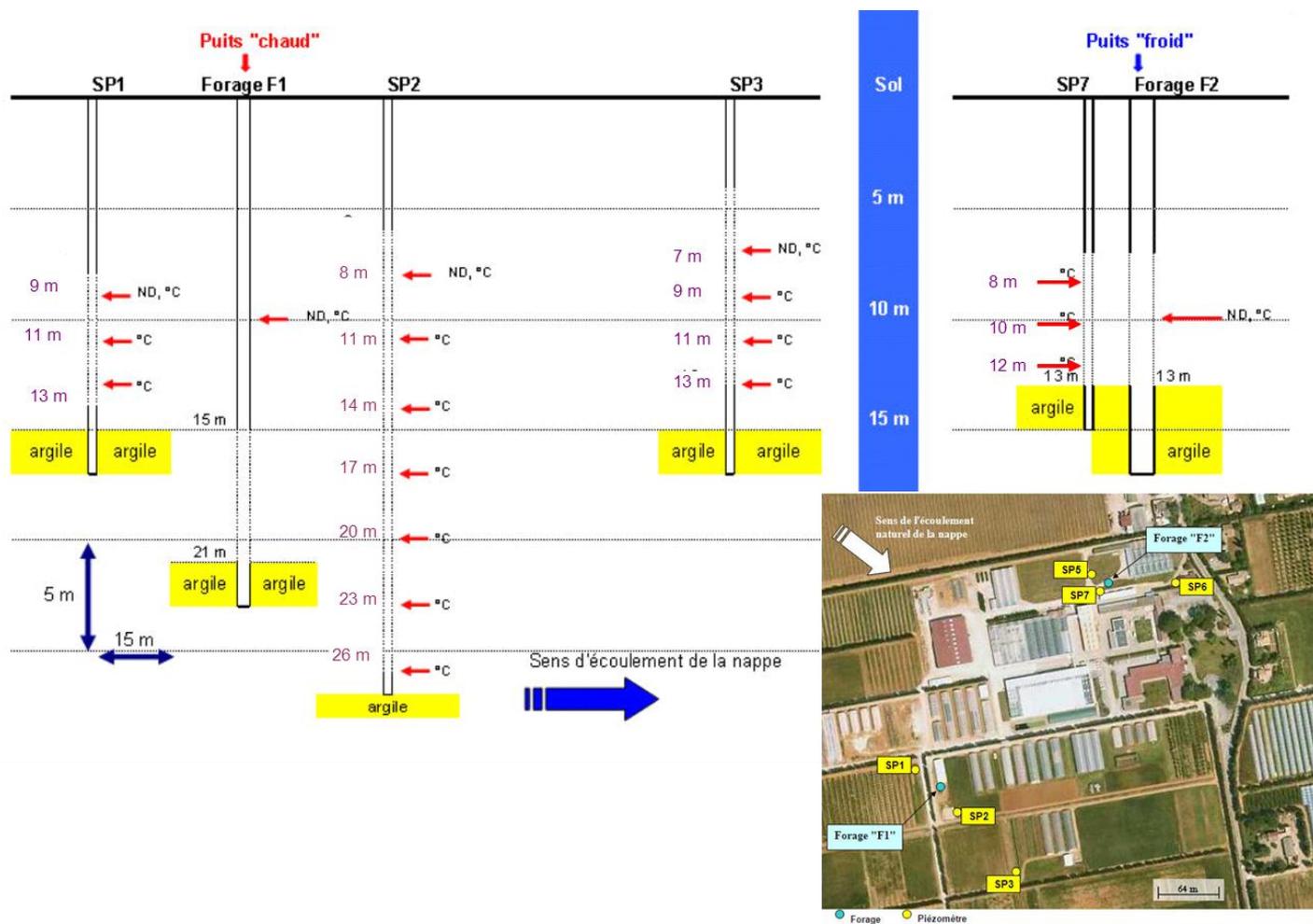


Illustration 10 : Schéma d'implantation de l'instrumentation de suivi de la nappe

3.3. EVOLUTION NATURELLE DE LA TEMPERATURE DE L'AQUIFERE

En dehors même du suivi de l'impact thermique des injections et pompages réalisés dans le cadre du projet, l'instrumentation mise en place a permis de collecter des précieuses données sur l'évolution de la température de l'aquifère en différents points et à différentes profondeurs pendant deux ans. Ce paragraphe présente les informations apportées par l'analyse de ces chroniques.

3.3.1. Analyse des variations saisonnières de température et de piézométrie

Afin de mettre en évidence une éventuelle corrélation à l'échelle de la saison entre la piézométrie et la température de l'aquifère, on a reporté sur un même graphe ces deux paramètres relevés dans le piézomètre SP3 pendant un peu plus de 2 ans (Illustration 11).

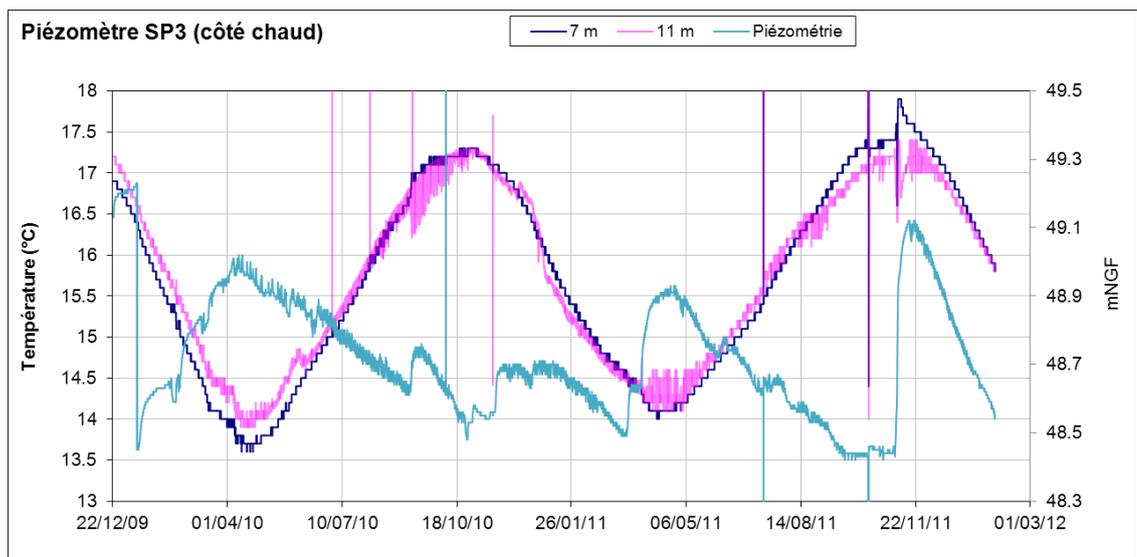


Illustration 11 : Température et piézométrie relevées en SP3 (déc.2009 - fév.2012)

On constate que la température de la nappe est minimale au printemps (avril) alors que le niveau piézométrique est maximal (fin de la période de recharge). A l'inverse, la température est maximale au début de l'automne alors que la piézométrie est minimale.

A l'échelle régionale, le site expérimental se situe en dehors du bassin versant du Vistre, sur la nappe des cailloutis des Costières (alluvions quaternaires et villafranchiennes). Celle-ci s'écoule sur les formations imperméables du Plaisancien et est drainée vers le Sud, vers la nappe des formations pliocènes et villafranchiennes des Costières (Blaise et Marchal, 2006). On peut donc exclure l'influence thermique

d'un cours d'eau alimenté par des eaux froides (venant des Alpes) sur la température de la nappe mesurée au droit du site.

Le suivi inclut un événement pluvieux exceptionnel. La pluviométrie cumulée relevée sur le site de Balandran entre le 1^{er} et le 09 Novembre 2011 est de 230.8mm (dont 175.6mm entre le 03 et le 05/11/11), pour une moyenne annuelle de 750mm (années 2010-2011). Cet épisode pluvieux a entraîné une élévation du niveau piézométrique de 0.7m en 5 jours qui correspond au battement annuel. Les températures de la nappe relevées aux piézomètres SP2 et SP3 ont baissé au cours des deux premiers jours, puis remonté à un niveau supérieur au niveau initial pour les points situés entre 11 et 20m en SP2 et 7 et 11m en SP3. Les valeurs minimales et maximales atteintes dans chaque cas, comprises entre 15.7 et 17.9°C ne semblent pas liées à la température extérieure (valeur moyenne de 16.7°C au cours de cet événement). Les points les plus profonds en SP2 ainsi que tous les points de mesure en SP1 et SP7 n'ont pas enregistré de variation particulière. Au cours de cet épisode exceptionnel, l'infiltration a donc été rapide et abondante et n'a pas entraîné d'impact significatif sur la température de la nappe. Le transport de chaleur par convection de la surface vers la nappe est donc une composante négligeable du bilan thermique de la nappe.

Les variations saisonnières de température observées ne sont pas liées à un transport convectif de chaleur (apports d'eau froide ou chaude) que ce soit par la surface ou par drainage d'un cours d'eau.

3.3.2. Relation entre la température extérieure et la température de la nappe

Classiquement, on observe que les fluctuations journalières de la température de l'air ont un impact sur la température de l'aquifère sur seulement quelques mètres de profondeur. Les fluctuations saisonnières peuvent en revanche influencer la température du sous-sol jusqu'à 20 – 30 mètres de profondeur. Ainsi, sur 320 puits d'observation, Lee et Hahn (2006) constatent des amplitudes de variation annuelle de la température des aquifères comprises entre 0 et 8°C, et un déphasage de 3 à 5 mois entre les extrema de température de l'air et des aquifères.

Dans le cas de Balandran, sur tous les points du suivi expérimental (en dehors des périodes influencées d'injection/pompage pour les puits F1 et F2), on observe **un décalage temporel de l'ordre de 3 mois entre les fluctuations saisonnières de la température de l'air et celles de la température de la nappe** (Illustration 12). Ce décalage traduit l'inertie thermique de la nappe. Il est favorable à l'utilisation de la géothermie pour chauffer ou climatiser les serres au sens où on évite, au moment de faire face à la pointe de besoin de chauffage (respectivement : refroidissement) de la serre, la situation où on serait au minimum (respectivement : maximum) de température naturelle de la nappe : les coefficients de performance de l'installation (pompe à chaleur) s'en trouveront améliorés, notamment par rapport à des solutions aérothermiques.

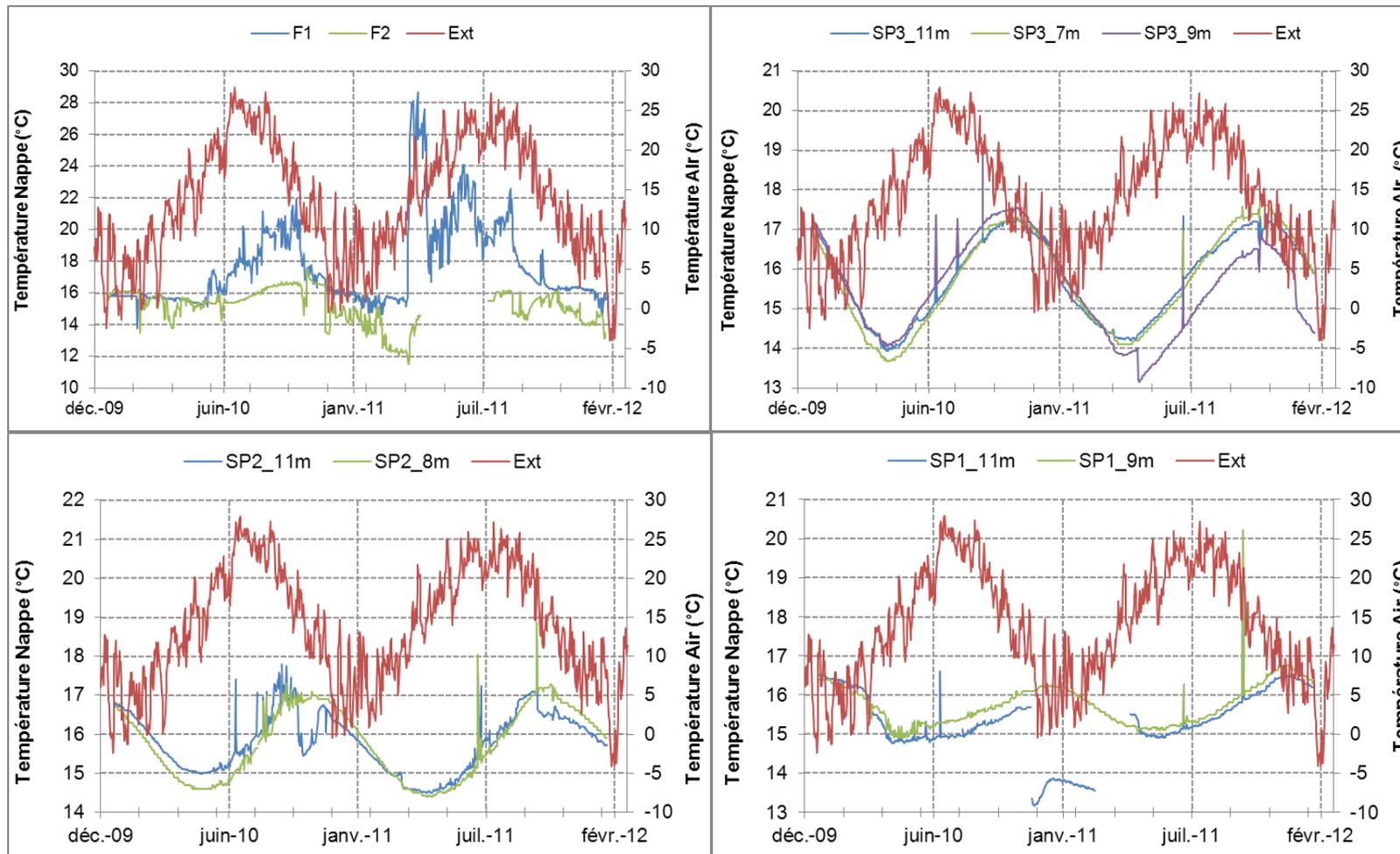


Illustration 12 : Températures de la nappe et température extérieure (données filtrées au pas de temps journalier)

Les corrélogrammes croisés entre la température extérieure et la température de la nappe présentent une allure identique pour toutes les mesures relevées en SP2 et SP3, quelle que soit la profondeur (Illustration 13). Dans chaque cas, la corrélation entre les deux séries temporelles est maximale autour de 90j à 100j. On retrouve cette même information en calculant le déphasage entre les valeurs extrêmes de chaque série et les valeurs extrêmes de la température extérieure (Illustration 14). L'existence d'une relation exponentielle entre les différences d'amplitude et les différences de phase permettrait de montrer que la température de l'aquifère varie uniquement sous l'influence des échanges conductifs de chaleur avec la surface (Bundschuh, 1993). On ne dispose malheureusement pas de chroniques suffisamment longues pour mettre cette relation exponentielle en évidence.

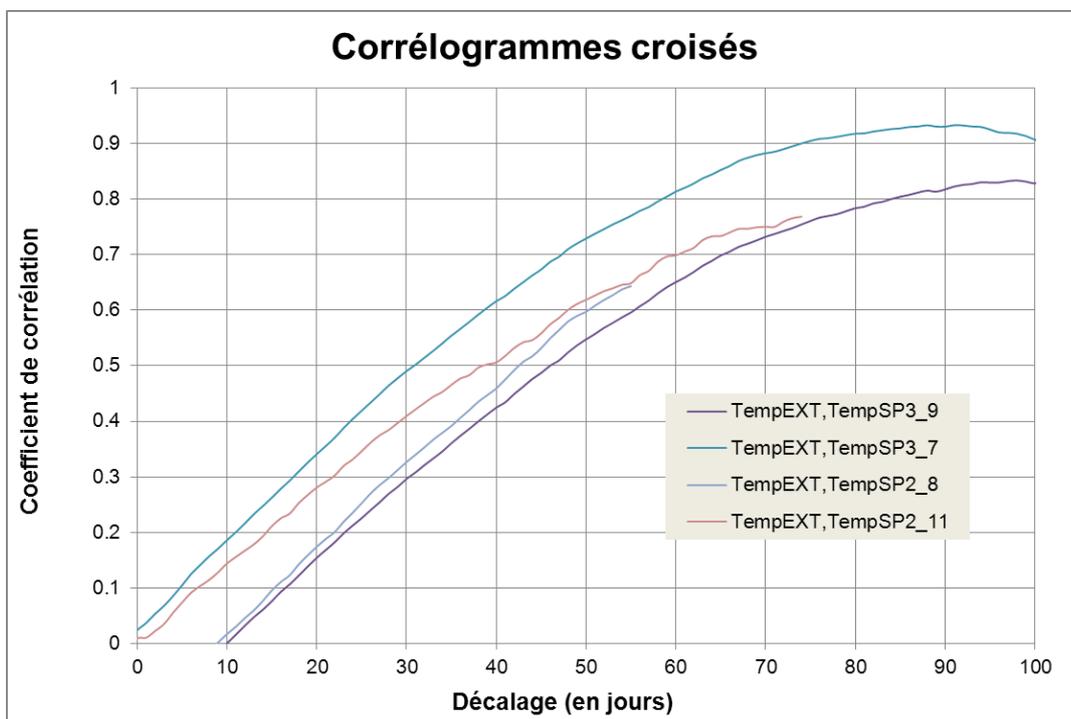


Illustration 13 : Corrélogrammes croisés température extérieure – température de la nappe à différentes profondeurs en SP2 et SP3

		EXT	SP1	SP2	SP3
Année 1	Min	15/01/2010	26/04/2010	06/05/2010	20/04/2010
	Max	15/08/2010	16/12/2010	01/11/2010	01/11/2010
	Amplitude (°C)	24.5	1.45	2.9	3.5
Année 2	Min	01/01/2011	30/04/2011	23/04/2011	15/04/2011
	Max	05/08/2011	15/12/2011	02/11/2011	01/11/2011
	Amplitude (°C)	24.8	1.7	2.4	3.4

	SP1	SP2	SP3
Min année 1	101	111	95
Max année 1	123	78	78
Min année 2	119	112	104
Max année 2	132	89	88
Moyenne (jours)	119	98	91

Illustration 14 : Amplitudes de variation annuelle de la température de la nappe et déphasages des extrema (en jours) avec ceux de la température extérieure

Du coup, pour reproduire les variations de température observées dans la nappe à l'échelle annuelle et conclure quant à leur origine, un modèle de transferts conductifs purs est utilisé. Il s'agit de calculer analytiquement la température en fonction de la profondeur dans un sol soumis à une excitation sinusoïdale en surface. Pour cela, on fait l'hypothèse très simplificatrice que le sous-sol est un milieu semi-infini homogène de température initiale uniforme T_0 . A $t=0$, on impose une température sinusoïdale $T_{surf}(t) = T_m + T_i \cdot \cos(\omega t)$ à la limite supérieure ($z=0$) de ce milieu. Dans l'hypothèse de transferts conductifs purs, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a^*} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

avec les conditions limites suivantes :

$$\begin{cases} T(0, t) = T_m + T_i \cdot \cos(\omega t) \\ T(\infty, t) = T_0 \end{cases}$$

La solution à cette équation est alors (voir par exemple Jeannot, 2011) :

$$T(z, t) = T_0 + T_i \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^*}} \cdot z} \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a^*}} \cdot z\right) \quad [\text{éq. 1}]$$

La chronique de température de l'air relevée à Balandran (01/12/2009 au 29/02/2012) peut être approchée de façon satisfaisante par une fonction sinusoïdale avec les paramètres suivants (Illustration 15) :

$$\begin{aligned} T_m &= 14.6^\circ\text{C} \text{ (température moyenne)} & T_i &= 12^\circ\text{C} \\ \omega &= 2 \cdot \pi / 365 \text{ (période annuelle)} & T=0 & \text{ le 28/07/2010} \end{aligned}$$

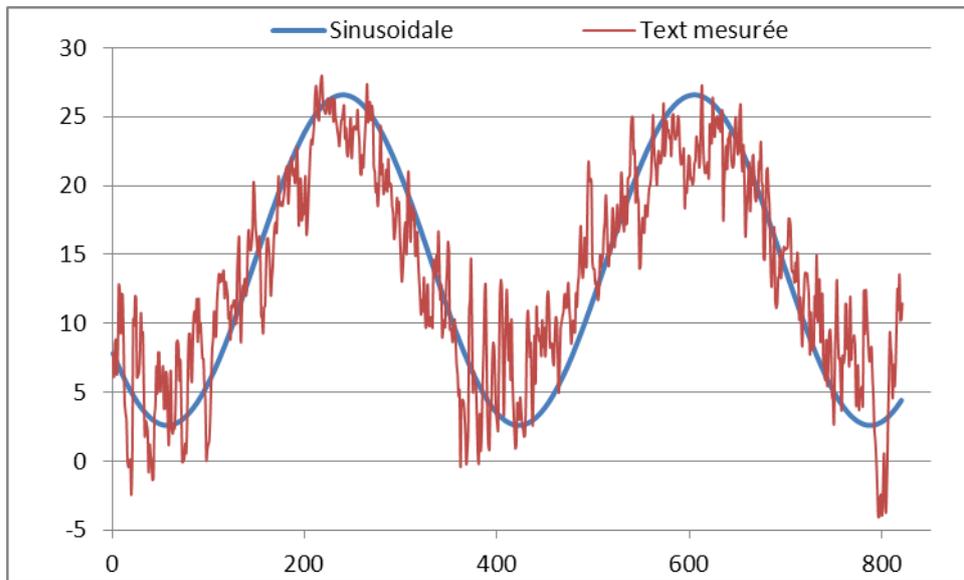


Illustration 15 : Approximation de la température extérieure par une courbe sinusoïdale

Les propriétés thermiques équivalentes de l'aquifère n'ont pas fait l'objet d'évaluation dans le cadre du projet. Des valeurs issues de la bibliographie et réalistes compte-tenu de la nature de la roche ont été proposées par Courtois et al. (2008). Elles fournissent une valeur de $a^*=1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Avec : - $a^*=1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, proche de la valeur indicative proposée par Courtois et al. (2008) pour la diffusivité thermique équivalente de la matrice poreuse saturée en eau,

- $t=0$ le 22/08/2010 (soit un décalage de 25 jours par rapport au t_0 imposé pour la température extérieure),
- $T_0=15.7^\circ\text{C}$,

on obtient les courbes d'évolution théorique de la température selon l'équation [1] qui sont reportées sur l'illustration 16 pour SP2 ($z=8\text{m}$) et SP3 ($z=7\text{m}$).

On constate que le modèle conductif permet de reproduire de manière très satisfaisante les températures observées aux deux points de SP2 et SP3 qui se situent à la limite supérieure de la formation sableuse aquifère ($z=7$ à 8m). Pour les points de suivi situés à des profondeurs plus grandes, au sein même de l'aquifère siège d'écoulements, le modèle sous-estime fortement l'amplitude des variations annuelles, sauf à augmenter la valeur de la diffusivité thermique (à titre d'exemple, une valeur de $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ permet de reproduire la température observée en SP3 à $z=11\text{m}$ de profondeur).

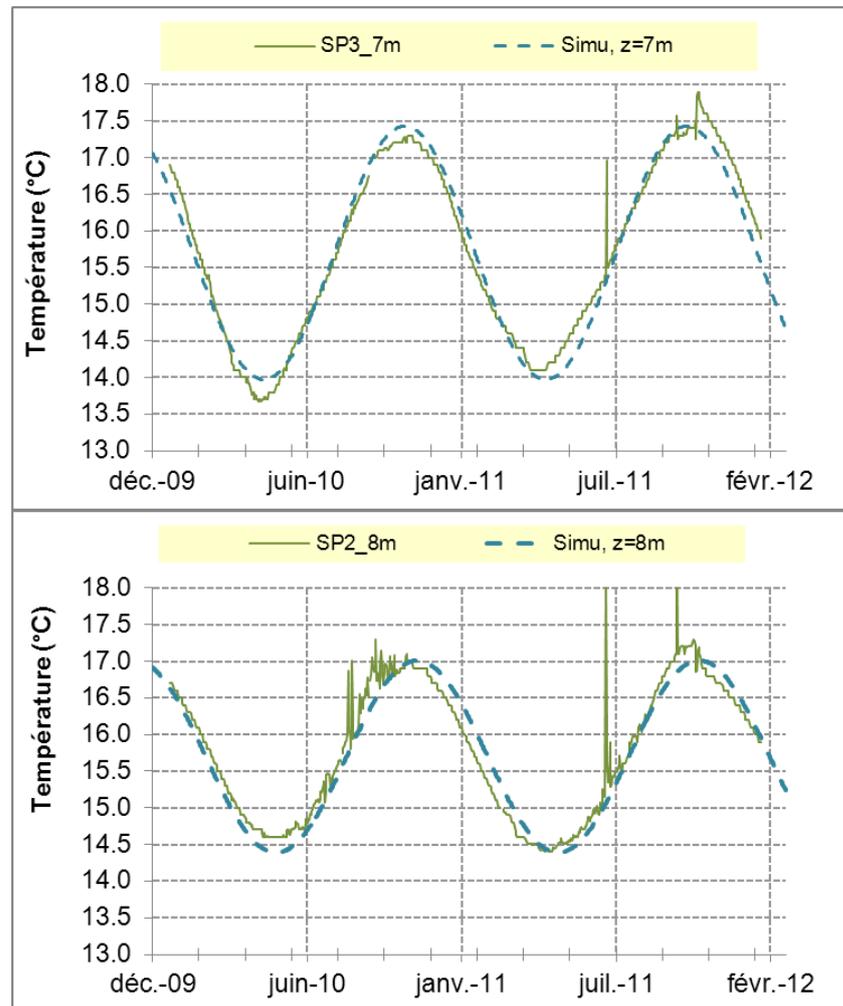


Illustration 16 : Comparaison des températures observées et calculées en SP2 et SP3

La solution analytique pour $z=9\text{m}$ comparée aux températures observées aux puits F1 et F2 (Illustration 17) est calculée avec les mêmes paramètres thermiques que pour SP2 et SP3, mais avec $t=0$ le 26/09/2010. Dans ce cas particulier, il est évident que la température mesurée dans les puits est directement influencée par la température d'injection. On ne considère donc ici que les périodes pendant lesquelles les puits sont principalement utilisés en pompage, soit la période de climatisation de la serre (juin à septembre) pour le puits froid (F2) et la période de chauffage (novembre à février) pour le puits chaud (F1). On constate que le modèle conductif permet également de rendre compte des évolutions de températures observées aux puits hors période d'injection.

Néanmoins, que ce soit pour les points peu profonds de SP2 et SP3, ou pour les puits, il est difficile d'expliquer le décalage de 25 ou 60 jours qu'il est nécessaire d'imposer au modèle pour simuler les données observées.

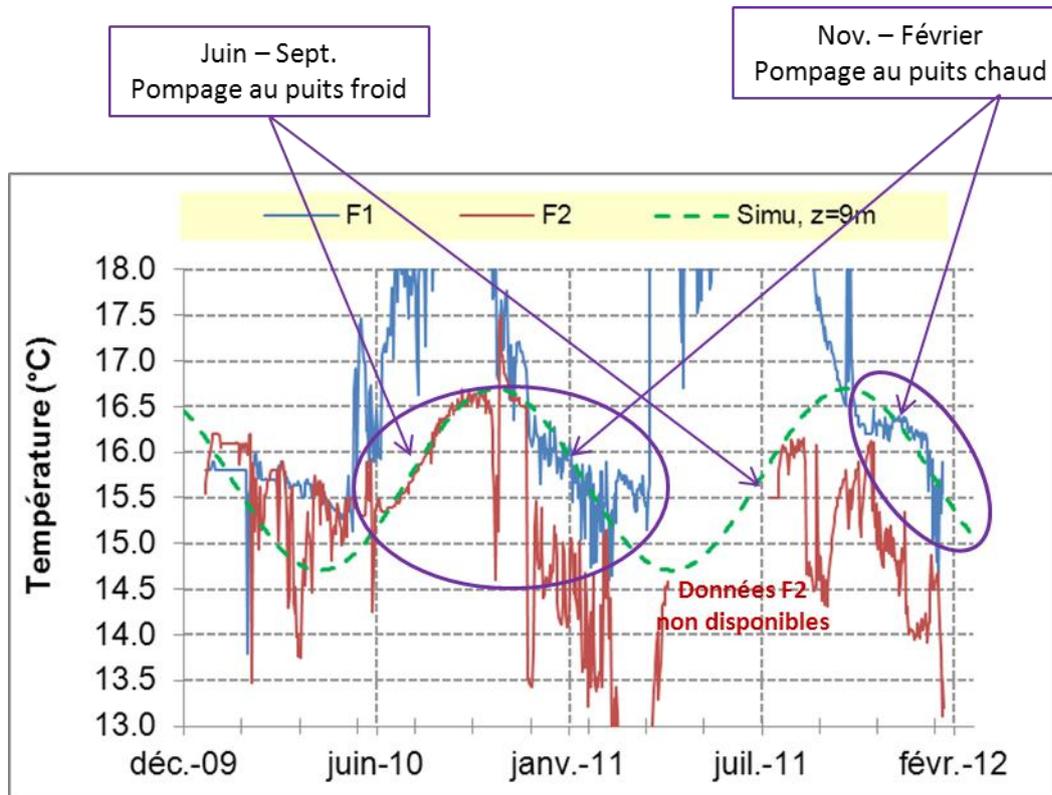


Illustration 17 : Comparaison des températures observées et calculées en F1 et F2

En conclusion, il apparaît que **les variations de température observées à l'échelle annuelle** en tous les points de suivi **sont essentiellement liées aux transferts conductifs de chaleur depuis la surface**. Cependant, pour les points situés dans les couches les plus hydrauliquement conductrices, les transferts convectifs de chaleur ne sont pas négligeables et augmentent la diffusivité thermique apparente. Le décalage temporel (de l'ordre de 3 mois) entre les extrema saisonniers de la température de l'air et de celle de la nappe est favorable à l'utilisation de la géothermie pour chauffer ou climatiser les serres.

3.4. ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AQUIFERE AU COURS DES CYCLES D'INJECTION/POMPAGE

Après une présentation des modes de fonctionnement du dispositif au cours des deux années de suivi, on analyse l'impact sur l'aquifère de deux périodes d'injection d'eau chaude liées à la climatisation de la serre. En raison d'une succession d'incidents techniques (pannes de sondes ou des centrales d'acquisition automatique), on ne dispose pas de suffisamment de données côté froid pour en présenter une interprétation détaillée.

3.4.1. Modes de fonctionnement pendant les deux années de suivi

Pendant la période de fonctionnement suivie (février 2010 – mars 2012), le dispositif de chauffage/climatisation via l'aquifère a été (automatiquement) piloté par les consignes de températures fixées dans la serre expérimentale. Globalement, il a fonctionné en mode chauffage pendant l'hiver (novembre à mars) et en mode climatisation d'avril à septembre.

Ces modes de fonctionnement sont bien mis en évidence par la courbe d'évolution du niveau piézométrique mesuré dans le puits chaud (Illustration 18) : celui-ci augmente d'environ 50cm par rapport à son niveau de référence en période d'injection (climatisation), et diminue d'autant en période de pompage (chauffage). Cependant, aux intersaisons, il arrive que les deux modes de fonctionnement soient alternés au cours d'une période de 24h (chauffage pendant quelques heures la nuit, et climatisation pendant quelques heures l'après-midi).

Au début de l'été, le dispositif se met en route en mode climatisation plusieurs fois pendant la journée (entre 08h et 21h30), chaque période d'injection au puits chaud étant relativement courte (1 à 2h) (Illustration 19). Ensuite, au plus fort de l'été, le dispositif est volontairement modéré au cours de la journée car il ne permet plus de rafraîchir la serre à un coup énergétique raisonnable (la serre est alors simplement ouverte). Il fonctionne en revanche en mode climatisation pendant la nuit, avec des périodes continues d'injection pouvant dépasser 6h.

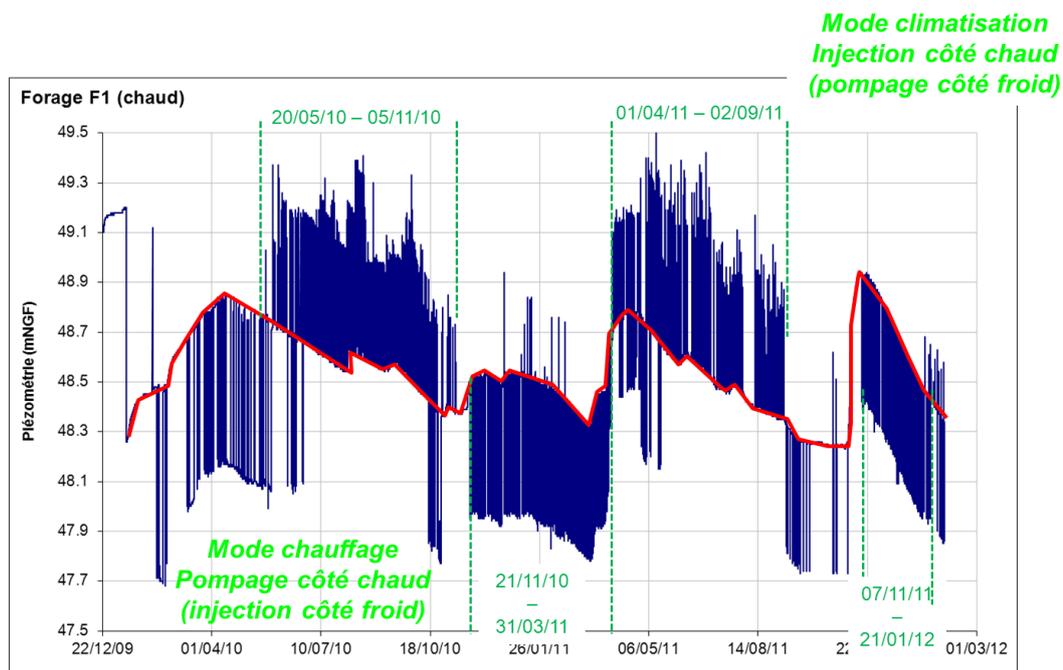


Illustration 18 : Piézométrie au puits chaud mettant en évidence les modes de fonctionnement du dispositif de chauffage/climatisation de la serre expérimentale de 2009 à 2012

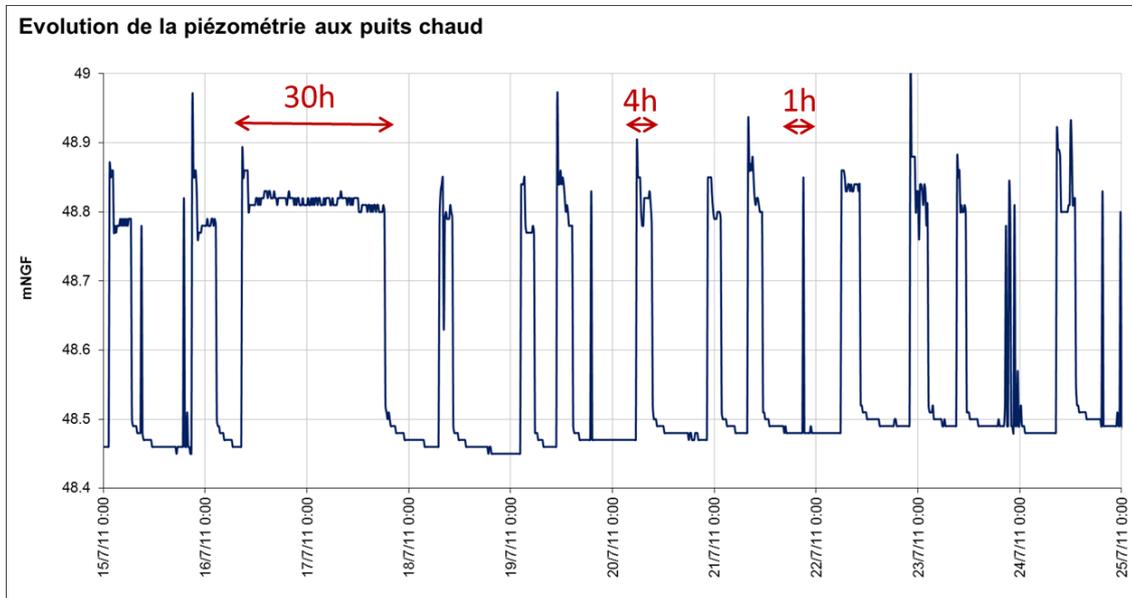


Illustration 19 : Piézométrie au puits chaud mettant en évidence le fonctionnement du dispositif en mode climatisation au cours de l'été 2011

3.4.2. Evolution générale des températures dans l'aquifère au cours des deux années de fonctionnement

Les températures relevées tout au long du suivi expérimental (au pas de temps de 15 minutes) dans chacun des trois piézomètres situés côté chaud sont présentées sur l'illustration 20. Comme déjà indiqué au §3.3, toutes ces chroniques révèlent une variation périodique à l'échelle annuelle.

Des oscillations journalières (période de 24 heures) d'amplitude comprise entre 0.1 et 0.4°C sont également visibles. Enfin, on constate que les injections d'eau chaude au puits chaud pendant les étés 2010 et 2011 impactent ponctuellement la température de la nappe mesurée au piézomètre SP2 (26 mètres en aval hydraulique), très peu celle mesurée en SP3 (111 mètres en aval), et pas du tout en SP1 (38 mètres en amont). Ce phénomène est étudié plus en détail dans les deux paragraphes suivants.

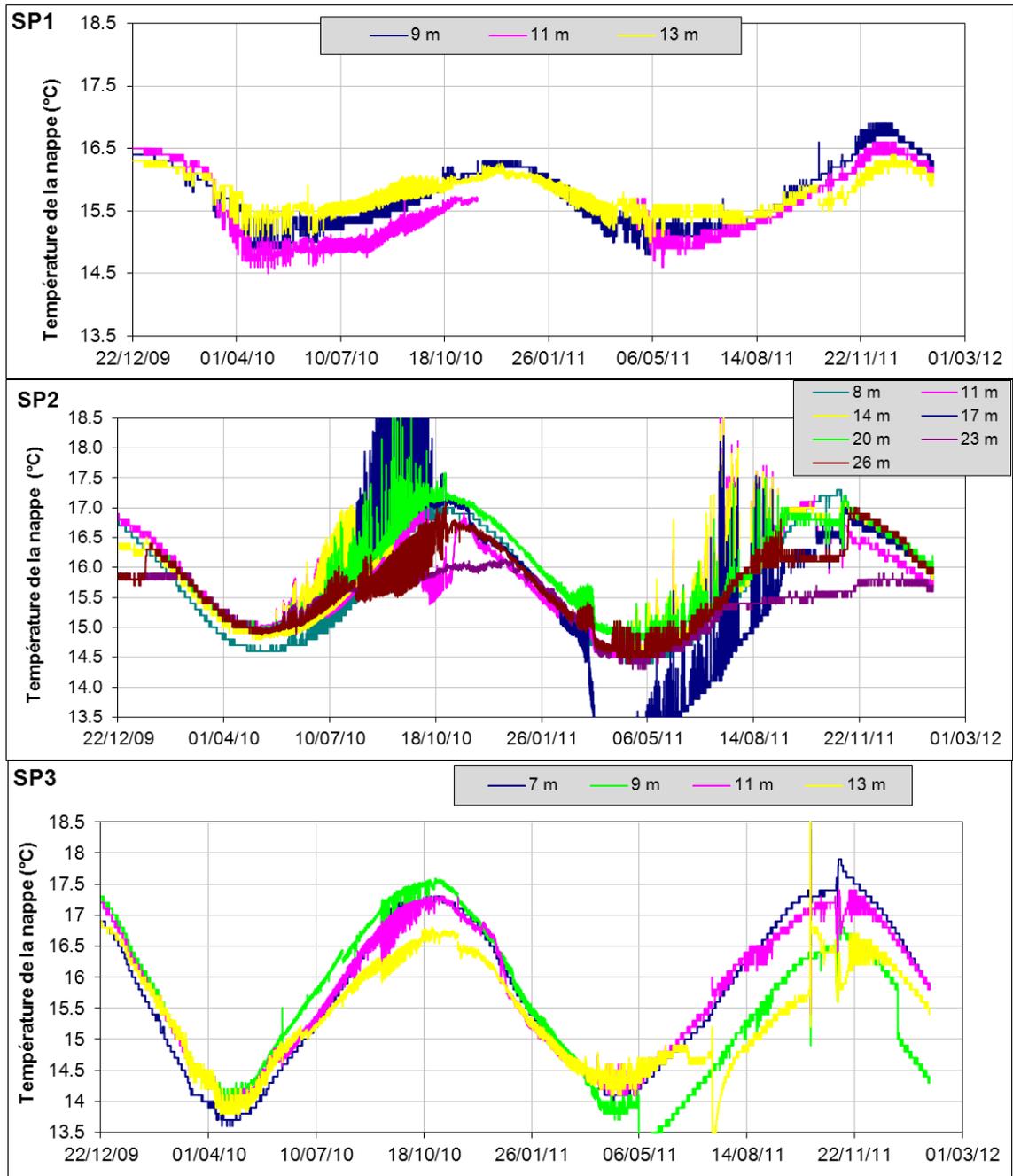


Illustration 20 : Température de la nappe à différentes profondeurs en amont (SP1) et en aval (SP2 et SP3) du puits chaud de 2009 à 2012

3.4.3. Impact sur la température de l'aquifère d'une journée de climatisation (juin 2011)

On observe ici six épisodes d'injection d'eau chaude qui ont eu lieu entre les 16 et 17 juin 2011 (Cf. illustrations 21 et 22).

La température extérieure a varié entre 16 et 28°C, et il n'y a pas eu de pluie sur cette période.

La température moyenne de l'eau injectée au puits chaud est de 24.7°C, le débit d'injection moyen de 56.5m³/h, et la puissance moyenne injectée de 585.2 kW.

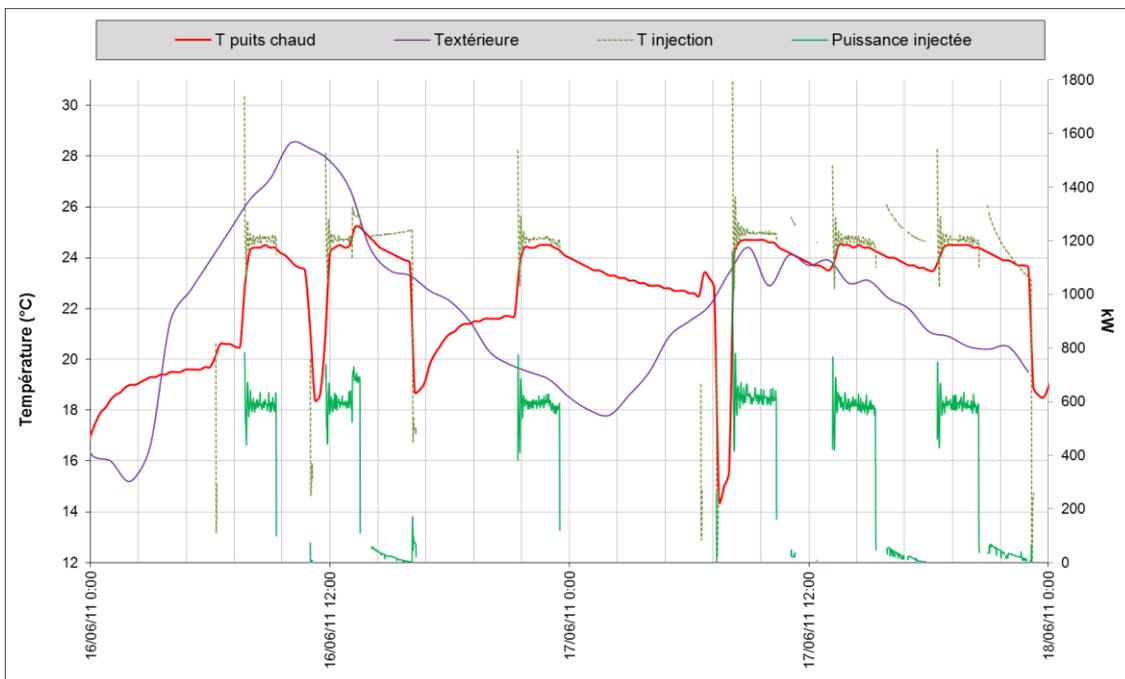


Illustration 21 : Caractéristiques des injections successives au puits chaud du 16 au 17/06/11

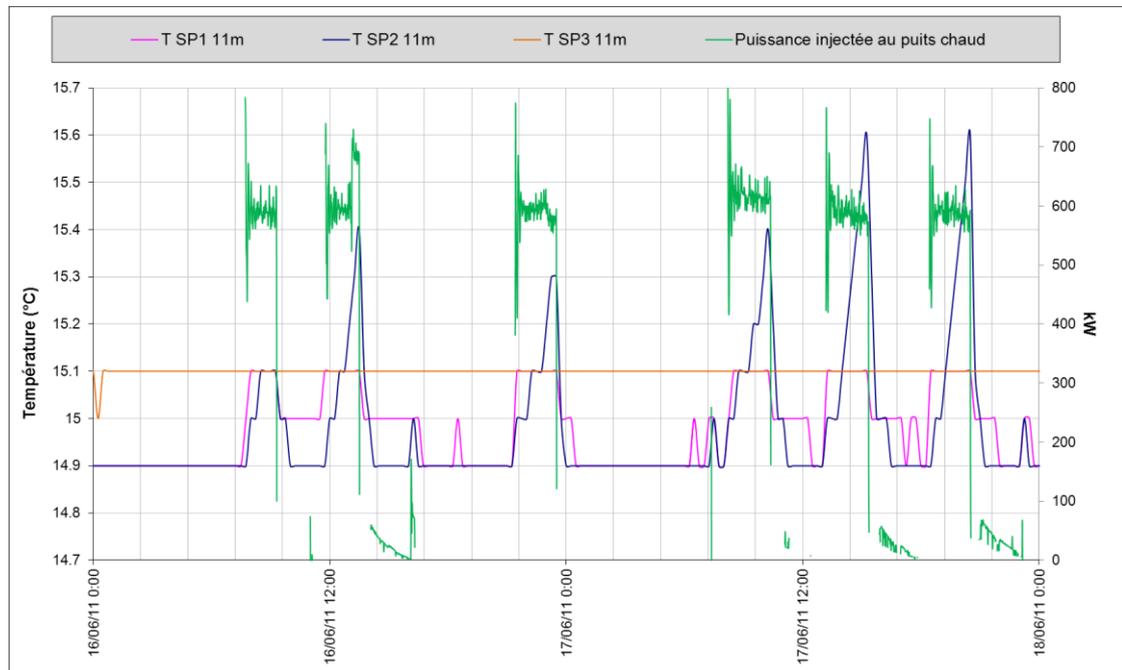


Illustration 22 : Evolution de la température de la nappe en amont et aval du puits d'injection à 11 m de profondeur du 16 au 17/06/11

Le piézomètre SP2 voit passer chaque bulle d'eau chaude très rapidement après son injection au puits chaud. En moyenne, deux heures après le début de l'injection, le pic de température induit en SP2 est maximal. Son amplitude atteint au mieux 0.7°C (à 11, 14 et 17 mètres de profondeur), et 0.4°C aux autres profondeurs mesurées (8, 20, 23 et 26 mètres). **A la fin de l'injection d'eau chaude, la température en SP2 revient à sa valeur initiale en moins d'une heure, excluant de fait toute possibilité de stockage thermique.**

Le piézomètre SP3 ne réagit pas à l'injection d'eau chaude. L'injection entraîne des pics de 0.1 à 0.2°C au piézomètre SP1 situé en amont hydraulique. Cependant, la faible amplitude de ces pics, proche de la précision des mesures (0.1°C), rend difficile leur interprétation.

La vitesse de déplacement du front thermique (V_{th}) est définie par la formule suivante :

$$\frac{V_{th}}{U} = \frac{(\rho C_p)_e}{(\rho C_p)^*}$$

avec $(\rho C_p)_e$ la capacité calorifique volumique de l'eau ($4,18 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) et $(\rho C_p)^*$ celui du milieu poreux équivalent (matrice rocheuse poreuse – eau – air, estimée à $2,07 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), ε la porosité de l'aquifère, et U la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère (vitesse de Darcy). Elle est inférieure à la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'aquifère car l'énergie transportée sert à la fois à réchauffer le fluide en mouvement mais également la matrice poreuse (Gringarten et Sauty, 1976).

Avec un gradient hydraulique moyen de 0.5% (§3.1), une épaisseur aquifère maximale de 20m, une transmissivité hydraulique comprise entre 0.06 et 0.13m²/s (BRGM/RP-59521-FR, 2011), **la vitesse de Darcy** dans l'aquifère est comprise entre **1.3 et 2.8m/j**. Avec une porosité de l'ordre de 15%, l'eau s'écoule donc à une **vitesse réelle comprise entre 8.6 et 18.6 m/j**. **La vitesse théorique de déplacement du front thermique** serait alors **comprise entre 2.6 et 5.7m/j**. Même en tenant compte d'une dispersivité thermique élevée (10m), cette vitesse théorique semble bien inférieure à celle qui est réellement observée. La différence peut sans doute être en partie expliquée par le fait que la vitesse théorique est une vitesse moyenne à l'échelle de la zone d'étude, alors qu'en réalité, le milieu souterrain n'est pas homogène et peut présenter des zones de transferts (d'eau et de chaleur) préférentiels.

3.4.4. Impact sur la température de l'aquifère d'une journée de climatisation (juillet 2011)

On s'intéresse cette fois à une injection continue particulièrement longue : du 16/07/2011 08h45 au 17/07/2011 18h30. La température extérieure durant cette période est reportée sur l'illustration 23 (attention, lecture de la valeur sur l'axe secondaire). Un faible épisode pluvieux (5mm) est à signaler le 17/07/2011. Sur cette période de 34 heures, une puissance moyenne de 242kW a été injectée dans l'aquifère.

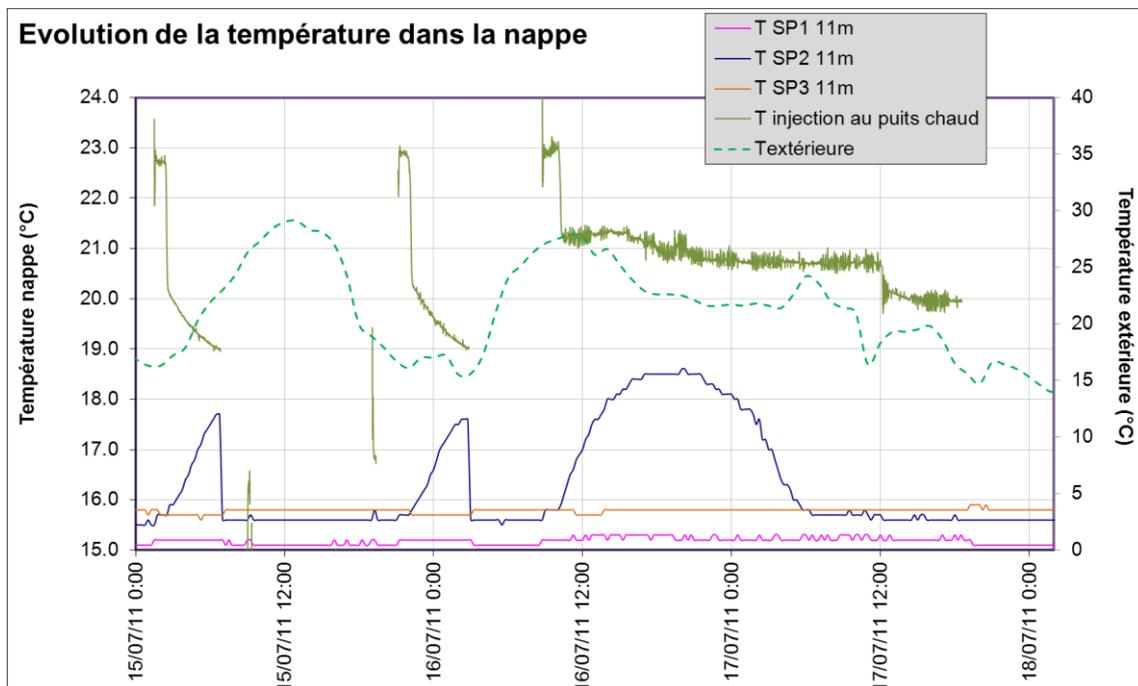


Illustration 23 : Evolution de la température de la nappe en amont et aval du puits d'injection à 11m de profondeur du 15 au 17/07/11

L'impact de cette injection sur les températures relevées en SP1 et SP3 étant de l'ordre de la précision de la mesure (0.1 à 0.2°C), il est ici négligé. En revanche, le passage de la bulle d'eau chaude en SP2 est particulièrement visible.

Deux injections plus courtes (5 ou 6h, nuits des 15 et 16 juillet) sont également représentées sur l'illustration 23. Pour les trois épisodes observés, la température de la nappe en SP2 commence à augmenter environ 1 heure après le début de l'injection. Pour les deux injections courtes, la température de la nappe revient à sa valeur initiale dès la fin de l'injection. Un comportement très particulier est en revanche observé lors de l'injection de longue durée, puisque la température de la nappe décroît lentement au bout de 10 heures d'injection, pour retrouver sa valeur initiale environ 24 heures après le début de l'injection et alors que celle-ci est toujours en cours. Ce phénomène n'a pu être expliqué, et pourrait être lié à l'épisode pluvieux.

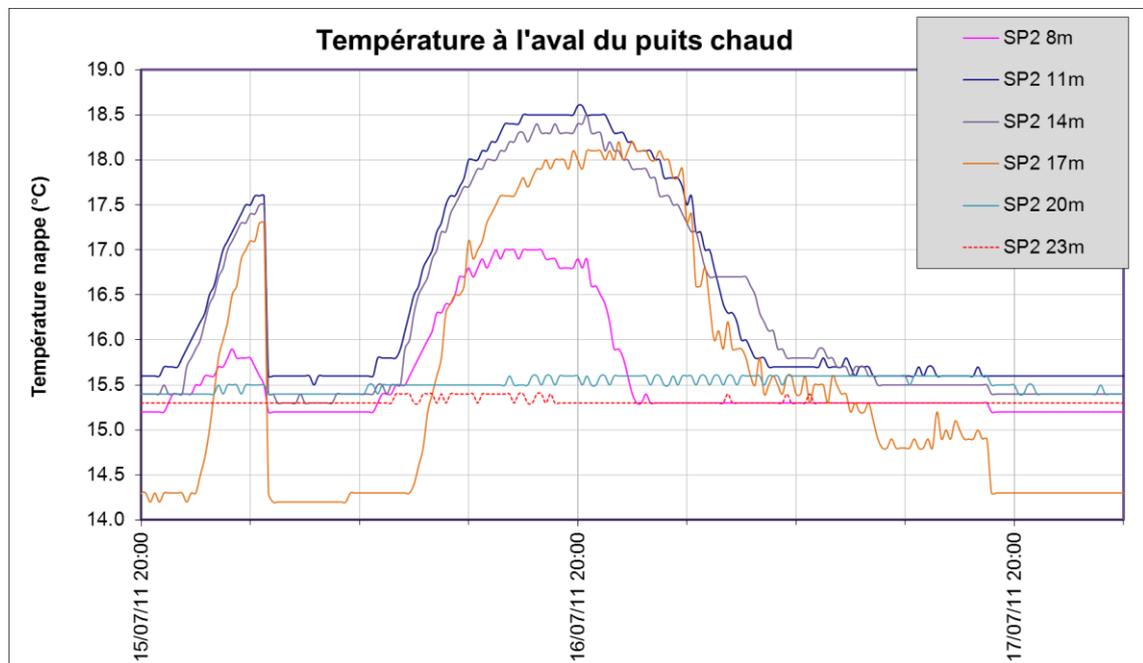


Illustration 24 : Evolution de la température de la nappe au piézomètre SP2 à différentes profondeurs du 15 au 17/07/11

Quel que soit l'épisode d'injection observé, l'amplitude des variations de température observées en SP2 dépend fortement de la profondeur. Ainsi, les sondes situées entre 14 et 17m réagissent fortement (plusieurs °C) au passage de l'eau chaude, alors que la sonde située à 8m, et les sondes situées en dessous de 20m ne semblent pas voir passer cette eau chaude (Illustration 24). On met donc en évidence **l'existence d'une couche plus conductrice, siège d'écoulements préférentiels**, au sein de l'aquifère.

3.5. MODELISATION NUMERIQUE DES TRANSFERTS THERMIQUES DANS L'AQUIFERE

L'objectif de la modélisation relativement simple présentée ici est de simuler la propagation dans l'aquifère d'une bulle de chaleur injectée au puits chaud. Par rapport à l'étude de préfaisabilité, le modèle développé intègre toutes les connaissances sur l'aquifère acquises au cours du projet. La simulation d'injection est également plus réaliste puisqu'elle reproduit une des injections du 16/06/2011 observée et commentée précédemment.

3.5.1. Construction du modèle

L'extension du modèle et ses caractéristiques géométriques et dimensionnelles sont choisies à partir d'une analyse du contexte hydrogéologique guidée par la carte piézométrique (Illustration 6) et par l'analyse de l'évolution des températures à des profondeurs différentes décrite précédemment (§3.4.4). Ainsi, le modèle 3D s'inscrit dans un carré de 2 km x 2 km, délimité par le cadre noir dessiné sur l'illustration 25. Son orientation est telle que deux de ses côtés sont approximativement parallèles à la courbe isopièze 54mNGF. Les deux autres côtés sont par conséquent orientés selon la direction locale d'écoulement NW-SE.

Le logiciel de modélisation utilisé est le logiciel MARTHE™, développé par le BRGM et spécifiquement dédié à la simulation des écoulements souterrains. MARTHE™ est mis en œuvre depuis une trentaine d'années pour les opérations de modélisation couplant hydrodynamique, transport, thermique et chimie. Ce logiciel utilise une méthode de calcul par différences finies, associée à un maillage rectangulaire de type « écossais ».

Le maillage utilisé pour l'étude géothermique de la serre est un maillage gigogne combinant deux maillages emboîtés de définitions différentes. Le maillage de base est constitué de mailles carrées uniformes de 50 m de côté. Au centre du modèle, un carré de 900 m de côté, centré sur la zone de pompage et de rejet, est maillé plus finement avec une grille carrée régulière de pas égal à 10 m (Illustration 26). La distance entre puits de pompage et puits de rejet est égale à 300 m.

L'aquifère des sables du Pliocène marin et la nappe libre qui s'y développe est décomposée en sept couches d'épaisseur uniforme de 4 m.

Des charges hydrauliques sont imposées sur les limites amont (nord-ouest) et aval (sud-est) du modèle de façon à reproduire le gradient hydraulique proche de 5 pour mille, descendant vers le sud-est : charge uniforme de 54 m NGF sur la limite amont, charge uniforme de 43 m NGF sur la limite aval.

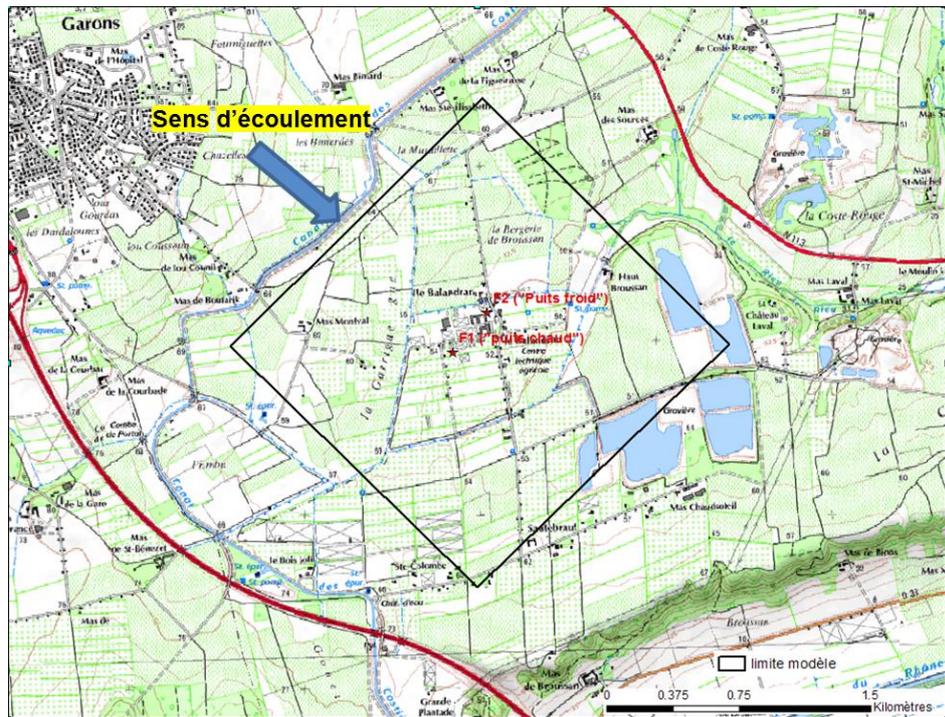


Illustration 25 : Extension du modèle d'écoulement (carré noir)

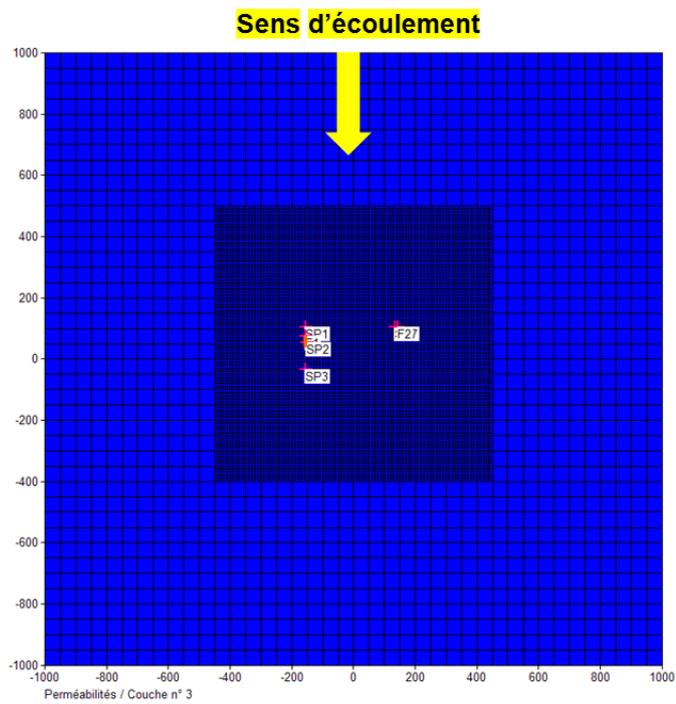


Illustration 26 : Représentation du maillage à 50 m avec un gigogne à 10 m autour du site

3.5.2. Conditions imposées pour simuler l'impact d'une injection d'eau chaude

a) Hypothèses hydrauliques

Une perméabilité uniforme « moyenne » de 10^{-5} m/s est prise en compte sur l'ensemble des couches en dehors de la couche 3, représentative de la strate conductrice, pour laquelle deux perméabilités uniformes de 10^{-1} m/s et $5 \cdot 10^{-1}$ m/s ont été testées. Le coefficient d'emmagasinement libre est égal à 0.02 et 0.1.

Les simulations sont menées en régime transitoire avec un pas de temps d'une minute. L'événement simulé et présenté ici correspond à la période du 16/06/2011 de 21h25 au 17/06/2011 à 06h00 avec un débit de pompage et de réinjection égale à $57 \text{ m}^3/\text{s}$ environ pendant deux heures.

b) Paramètres et conditions limites thermiques

Température « naturelle » de la nappe en amont hydraulique = 15.5°C

Température d'injection à 26°C environ

Conductivité thermique grain matrice = $1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Conductivité thermique de l'eau = $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Chaleur spécifique volumique du minéral = $2.3 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$

Chaleur spécifique de l'eau = $4,185 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$

3.5.3. Résultats des simulations

a) Piézométrie

L'écoulement se fait du Nord-Ouest vers le Sud-Est conformément à la carte piézométrique. Le rabattement simulé (0.04 m) est très inférieur à celui qui est mesuré (0.45 m) dans le puits. Il conviendrait de caler les valeurs de perméabilités imposées dans le modèle et de prendre en compte les pertes de charges quadratiques pour améliorer ce résultat.

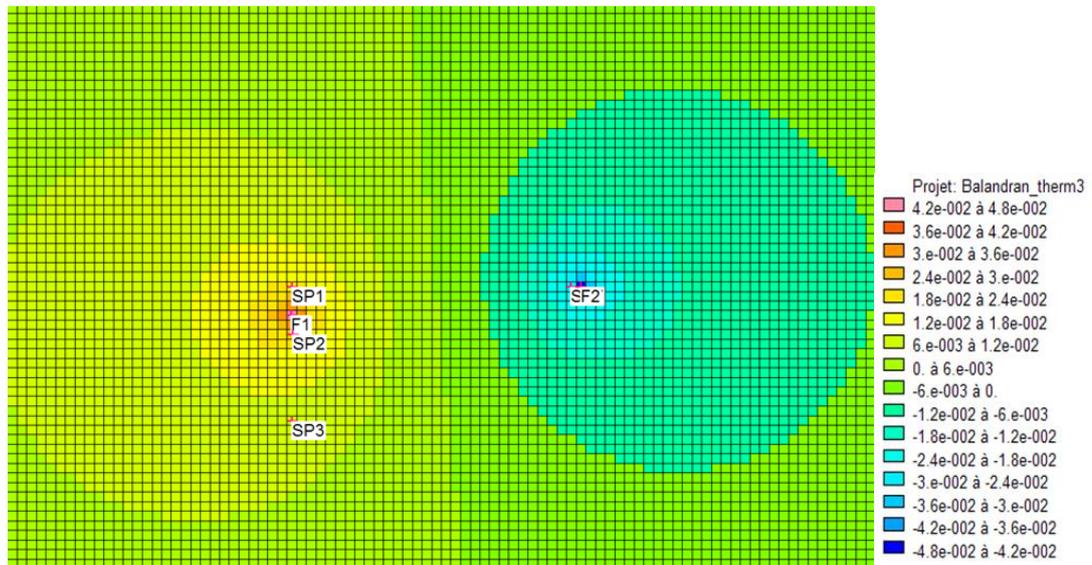


Illustration 27 : Rabattement simulé pour l'événement du 16/06/2011

b) Température

L'évolution de la température au niveau du puits SP2 qui se situe en aval hydraulique du puits d'injection (26m) est reportée sur l'

Illustration 28. Le tracé des trajectoires pour cet événement montre que l'eau injectée en F1 arrive au niveau du piézomètre SP2.

Les écarts de température simulé et mesuré sont proche : $\Delta T = 0.48$ °C pour la simulation et $\Delta T = 0.4$ °C pour l'observation. Par contre la diminution de température est beaucoup plus lente au niveau de la simulation que dans le cas réel où elle revient à la température initiale au bout d'une heure (

Illustration 28a).

Des tests de sensibilité ont montré qu'une augmentation du coefficient d'emmagasinement libre de 2 à 10%, ou une augmentation de la perméabilité de 0.1 à 0.5 m/s pour la couche conductrice (

Illustration 28b), pouvait entraîner une augmentation de température plus importante en SP2, avec une décroissance plus rapide (mais néanmoins plus longue que dans le cas réel).

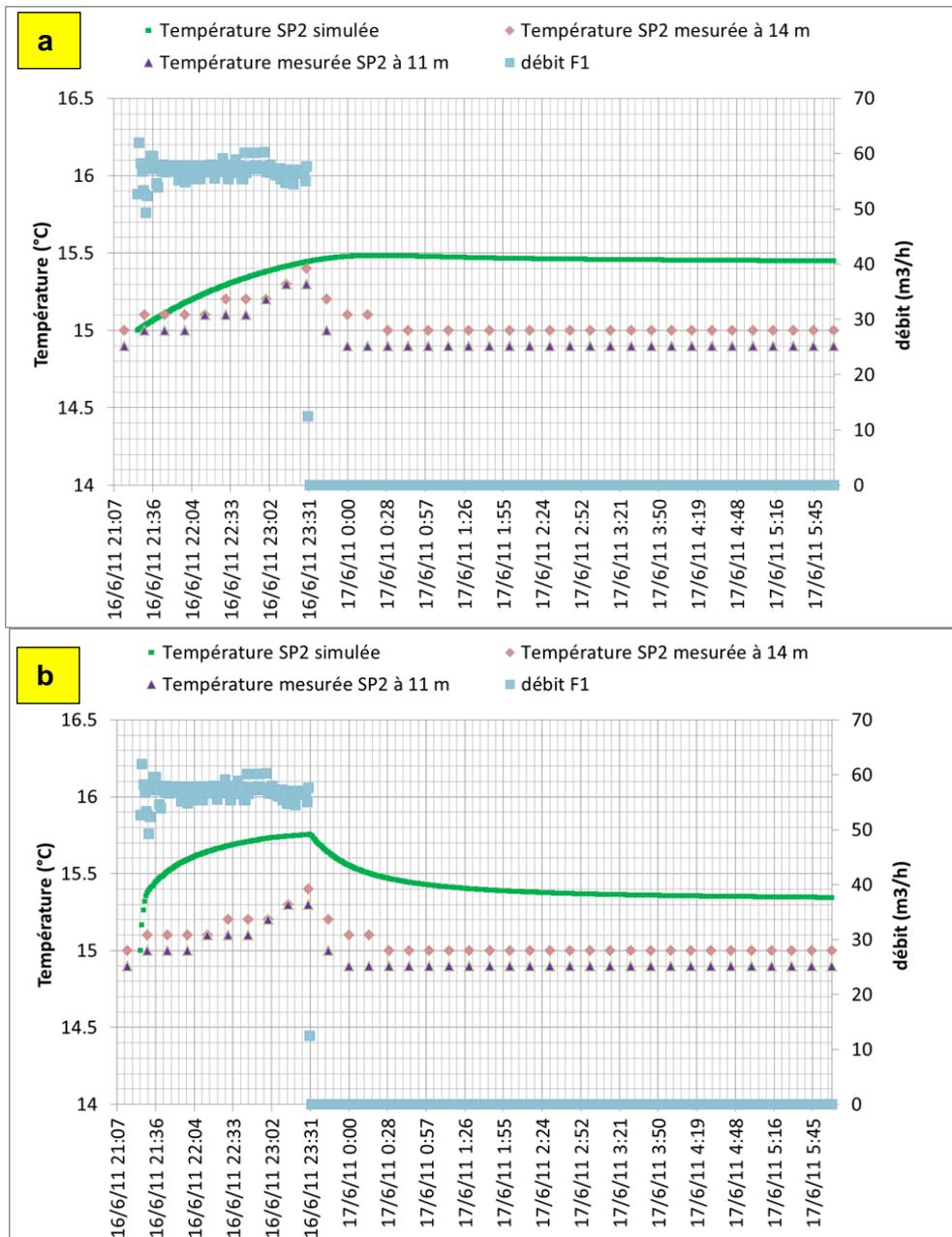


Illustration 28 : Température simulée et observée à SP2 pour l'événement du 16/06/2011

Le calage du modèle pourrait être amélioré pour que les piézométries et les températures simulées se rapprochent des valeurs observées. Néanmoins, le comportement général du système réel est reproduit par le modèle qui confirme le fait que la bulle d'eau chaude injectée au puits chaud a un impact très local et se dissipe très rapidement. **Les propriétés très transmissives de l'aquifère et l'écoulement naturel de celui-ci rendent impossible le stockage de chaleur, y compris pour un stockage interjournalier.**

3.6. SYNTHÈSE SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES DANS L'AQUIFÈRE

Les données de températures de l'aquifère ont d'abord été analysées à l'état naturel hors injection de chaleur. On a montré que les variations observées à l'échelle annuelle en tous les points de suivi sont essentiellement liées aux transferts conductifs de chaleur depuis la surface. Cependant, pour les points situés dans les couches les plus hydrauliquement conductrices, les transferts convectifs de chaleur ne sont pas négligeables et augmentent la diffusivité thermique apparente.

En fonctionnement, on a mis en évidence le fait que les injections d'eau chaude dans l'aquifère ont ponctuellement impacté la température de la nappe mesurée en aval hydraulique immédiat (piézomètre SP2). Selon les cas, le piézomètre de suivi voit passer les bulles d'eau chaude de quelques minutes à moins d'une heure après son injection au puits. L'amplitude du pic de température induit varie selon la température et la durée de l'injection, mais également selon la profondeur à laquelle la température de la nappe est mesurée. Ainsi, une élévation de température plus importante entre 11 et 17 mètres de profondeur a été observée. L'existence d'une couche plus conductrice au sein de l'aquifère a ainsi été mise en évidence.

Dans tous les cas, à la fin de l'injection d'eau chaude, la température de la nappe revient à sa valeur initiale très rapidement (en moins d'une heure). Le stockage de chaleur est donc inexistant à court terme. De plus, au bout de deux ans de suivi, aucune élévation de température durable de la température de la nappe n'a pu être observée.

A partir des données acquises au cours du projet, on a pu estimer que la vitesse de l'écoulement dans l'aquifère est comprise entre 1.3 et 2.8m/j (vitesse de Darcy). La vitesse théorique de déplacement du front thermique qui en résulte paraît très inférieure à celle qui résulte des observations, même en tenant compte d'une dispersivité thermique élevée.

Une modélisation numérique basée sur un modèle simplifié a ensuite été proposée pour simuler la propagation dans l'aquifère d'une bulle d'eau chaude injectée au puits chaud. Le modèle calcule des lignes de courant cohérentes avec les observations, mais prévoit un rabattement au puits de pompage très inférieur à celui qui est mesuré. L'augmentation de température dans la nappe liée à l'injection de chaleur est simulée de manière satisfaisante en amplitude, mais la dynamique de relaxation n'est pas reproduite correctement. Néanmoins, bien qu'il soit trop optimiste (trop inertiel), le modèle confirme le fait qu'une bulle d'eau chaude injectée au puits chaud a un impact très local et se dissipe très rapidement.

Il semble que les propriétés et conditions limites thermiques de l'aquifère ne sont pas suffisamment connues pour que les modèles analytiques ou numériques puissent rendre compte correctement de la dynamique des transferts de chaleur dans l'aquifère.

Une campagne de mesures et expérimentations dédiées (mesure de température des cours d'eau et traçage thermique⁴ par exemple) pourrait être utile pour améliorer le modèle conceptuel du réservoir, et donc sa modélisation.

Il faut enfin signaler que, même si les propriétés hydrodynamiques et thermiques de l'aquifère étaient favorables, le mode de fonctionnement du dispositif de chauffage/climatisation de la serre (injections de courte durée, alternance injection/pompage) n'est pas optimisé en vue d'un stockage de longue durée.

⁴ Un traçage thermique a été planifié pendant la période interculturelle d'octobre 2011 mais a dû être annulé pour des raisons météorologiques.

4. Etude chimique et microbiologique de l'aquifère

4.1. CARACTERISATIONS MINERALOGIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES DES FORMATIONS HOTES SEDIMENTAIRES

Des échantillons de la formation ont été collectés au cours des opérations de foration qui se sont déroulées lors de la mise en place du dispositif (fin 2008).

La caractérisation chimique globale préliminaire montre que le sédiment apparaît, sur la base des seuils de détection analytique, comme exempt de toute pollution par des éléments traces inorganiques (Pb, Cu, Cr, As,...). De plus, aucun produit volatil n'a été détecté après chauffage à 450°C (< 0.05%), suggérant que le sédiment ne possède qu'une fraction très limitée de matière organique, la majorité du carbone devant se trouver sous forme inorganique.

Une reconstitution quantitative probable et cohérente de l'assemblage minéralogique du site a été effectuée au moyen d'un code spécifique développé au BRGM (MINEV) permettant de concilier les différentes informations obtenues (Blanc et al., 2006, 2007, 2010). Le principe général de cet outil consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les compositions chimiques globales calculées et mesurées, en ajustant les proportions des différentes phases minérales, préalablement identifiées au niveau des spectres DRX (phases majoritaires) ou supposées être présentes dans la roche afin de satisfaire la répartition de chaque élément dans une forme minérale.

Les masses d'éléments mesurées par analyse chimiques élémentaires sont ainsi réparties de la façon suivante :

- **Si** : majoritairement sous forme de quartz, le restant étant inclus dans les aluminosilicates (feldspaths et phyllosilicates) ;
- **Ca** : principalement sous forme de calcite et accessoirement sous forme d'illite et dolomite ;
- **Al** : sous forme de feldspaths (alcalins et potassiques) et de phyllosilicates ;
- **K, Na** : essentiellement sous forme de feldspaths et inclus en trace dans des minéraux accessoires (Micas, illite) ;
- **Mg** : sous forme d'illite et dolomite ;
- **Fe** : hormis l'illite, aucun minéral source potentiel de Fe n'a été identifié. Dans le but de ne pas surestimer la proportion d'illite dans l'assemblage minéralogique, il a été choisi arbitrairement d'inclure de la goethite au modèle;
- **P, Ti, Mn, Ba, Sr** : aucune information qualitative n'a pu être obtenue en ce qui concerne les formes minéralogiques incluant ces éléments. Il a donc été convenu, à partir de la base de données thermodynamique, de sélectionner l'hydroxyapatite, l'anatase, la rhodochrosite, la barite ainsi que la strontianite comme sources potentielles de ces éléments (P, Ti, Mn, Ba et Sr respectivement).

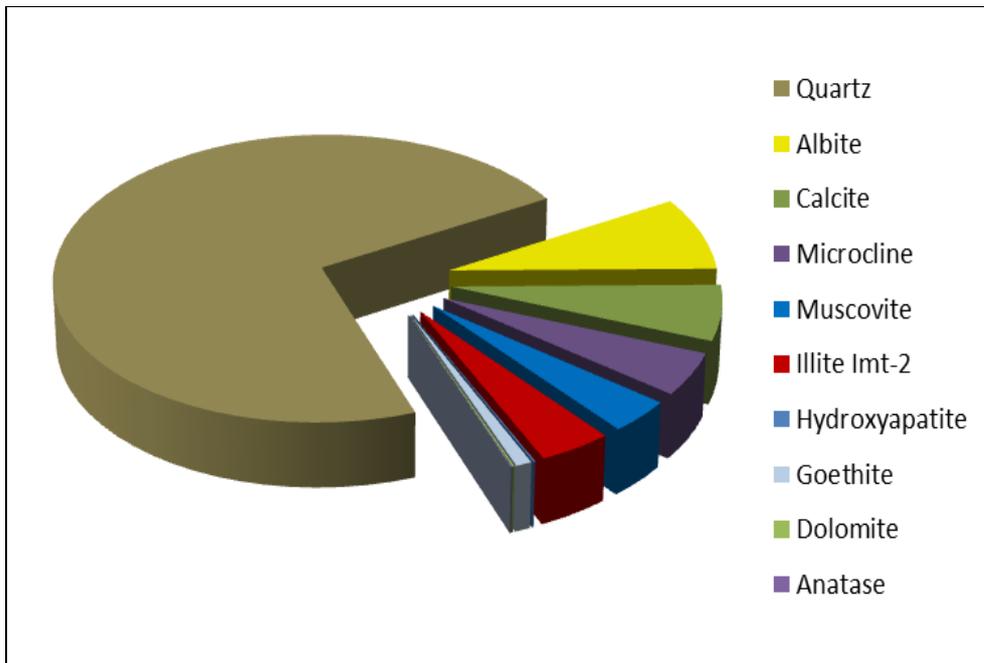


Illustration 29 : Reconstitution de l'assemblage minéralogique du site de Balandran

Les résultats obtenus, et en particulier la forte proportion de quartz, coïncident avec les descriptions lithologiques des formations sédimentaires hébergeant la nappe, composées de formations gravelo-sableuse à sablo-graveleuse avec des niveaux plus ou moins argileux.

4.2. EVOLUTION DE LA CHIMIE DES EAUX AU DROIT DU SITE

4.2.1. Méthodologie de prélèvement et d'analyses

Les différentes campagnes de prélèvements, effectuées dans le cadre du programme expérimental opéré sur site, se déclinent en différentes phases :

- avant la mise en place des équipements (pompe d'exhaure et colonne de réinjection) : Une première campagne d'échantillonnage a été effectuée en 2009 afin de constituer un « état initial » du site avant mise en route de l'installation ;
- depuis la mise en route de l'installation: les investigations ont été menées sur deux cycles annuels de fonctionnement du doublet géothermique (2010 et 2011) et ont été ajustées à son régime de fonctionnement. Les différentes interventions sur site ont ainsi été concentrées durant la période estivale de climatisation.

Les différents points d'échantillonnages ciblés par le programme de surveillance sont localisés :

- côté « puits chaud », au niveau des piézomètres de suivi implantés de part et d'autre du puits : SP1, SP2, SP3 ;
- côté « puits froid », au niveau du piézomètre de suivi SP7 et/ou au niveau de la tête de puits de l'ouvrage F1 (mise en place d'un système de piquage) ;
- au niveau du local technique, en aval des échangeurs à plaques, offrant ainsi la possibilité de suivre l'évolution du fluide du circuit primaire de surface au cours de son transit à travers les échangeurs thermiques.

Les échantillons d'eaux souterraines ont été collectés, au niveau des différents points d'accès à la nappe décrits précédemment, selon les prescriptions fournies par les normes AFNOR FD T90-523-3 et FD X31-615.

Les analyses réalisées sur ces échantillons sont les suivantes :

- paramètres non conservatifs (pH, Eh, température, oxygène dissous, conductivité, réserve alcaline) directement sur site lors du prélèvement ;
- espèces chimiques majeures et traces ainsi que carbone organique total : analyses en laboratoire après conditionnement des échantillons sur site conforme aux préconisations analytiques (filtration, acidification).

4.2.2. Calcul de spéciation aqueuse

Le calcul de la spéciation chimique d'une solution est un calcul d'équilibre thermodynamique permettant d'appréhender la distribution des différentes formes chimiques sous lesquelles vont se trouver les différents éléments. Cette modélisation s'appuie sur les données expérimentales acquises sur le terrain (mesure des paramètres non conservatifs) et en laboratoire (paramètres conservatifs : majeurs et traces) et permet par la suite d'en déduire par exemple l'état de saturation de l'eau vis-à-vis de minéraux potentiels (indices de saturations), les équilibres avec la phase gazeuse, l'état d'oxydoréduction de la solution.

A cette fin, le code de calcul géochimique PHREEQC (Parkhurst & Appello, 1999) associé à la base de données thermodynamique THERMODDEM (www.thermoddem.brgm.fr) du BRGM ont été utilisés pour effectuer les calculs de spéciation aqueuse à partir des différentes données collectées sur l'ensemble des campagnes de prélèvement (32 points d'échantillonnage). Les mesures de carbones organiques total et dissous (COT, COD) n'ont pas été exploitées dans le cadre de cette modélisation, puisque que leurs impacts sur la distribution des différentes espèces chimiques en solution ont été considérés comme négligeables.

Une fois les calculs de spéciation effectués, l'analyse de l'électroneutralité de la solution permet de fournir une indication sur la cohérence de l'ensemble des données. Les solutions étant en effet électriquement neutres (la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives), l'écart relatif sert de critère principal pour l'évaluation de la qualité des résultats de l'analyse permettant ainsi d'écarter toute erreur d'interprétation.

Elle est exprimée à l'aide de la formule de balance électrique ionique $E \pm$ (%) suivante :

$$E \pm (\%) = \frac{\left| \sum z_i [C_i^{z_i^+}] - \sum z_j [A_j^{z_j^-}] \right|}{\left| \sum z_i [C_i^{z_i^+}] + \sum z_j [A_j^{z_j^-}] \right|} \times 100$$

avec : C : Cations ; A : Anions ; z_i^+ et z_j^- : charges positives et négatives respectivement.

On considère généralement qu'une balance électrique ionique supérieure à 5% indique un déséquilibre important et, de ce fait, remet en cause la cohérence des données. Or, sur l'ensemble des spéciations calculées, aucune erreur dépassant 5% n'a été enregistrée. Les échantillons affichent pour la plupart (~75%) d'excellents résultats avec une balance inférieure à 2%. Seule une analyse présente une erreur avoisinant les 4%.

Ces résultats préliminaires révèlent la bonne cohérence des mesures et analyses déterminées à la fois sur le terrain et au laboratoire et permettent l'exploitation de ces résultats en toute fiabilité, notamment par inter-comparaison.

4.2.3. Calcul des indices de saturation

Le calcul des indices de saturation permet d'apprécier l'état de saturation de la solution vis-à-vis de certaines phases minérales, présentant un intérêt dans le cadre de cette étude (équilibre de dissolution/précipitation par exemple). Pour chaque spéciation, l'indice de saturation (IS) d'un minéral est calculé par la relation suivante :

$$IS = \log \frac{\prod a_i}{K}$$

Avec K , la constante de solubilité du minéral renseignée dans les bases de données thermodynamique (ou calculée pour une température donnée) et $\prod a_i$, le produit de l'activité ionique de l'espèce chimique aqueuse i telle que calculée par la spéciation. Pour la calcite par exemple, on obtient :

$$IS_{calcite} = \log \frac{a_{CO_3^{2-}} \cdot a_{Ca^{2+}}}{K_{calcite}}$$

Lorsque l'IS d'un minéral est nul, l'eau est à l'équilibre avec ce minéral. Lorsque l'IS d'un minéral est positif, l'eau est sursaturée vis-à-vis de ce minéral et sa précipitation est thermodynamiquement possible.

Les figures ci-dessous illustrent les IS des eaux prélevées vis-à-vis de quelques minéraux carbonatés (calcite, dolomite), dans le cadre des différentes campagnes de suivi menées sur site, en fonction des valeurs de pH de l'aquifère.

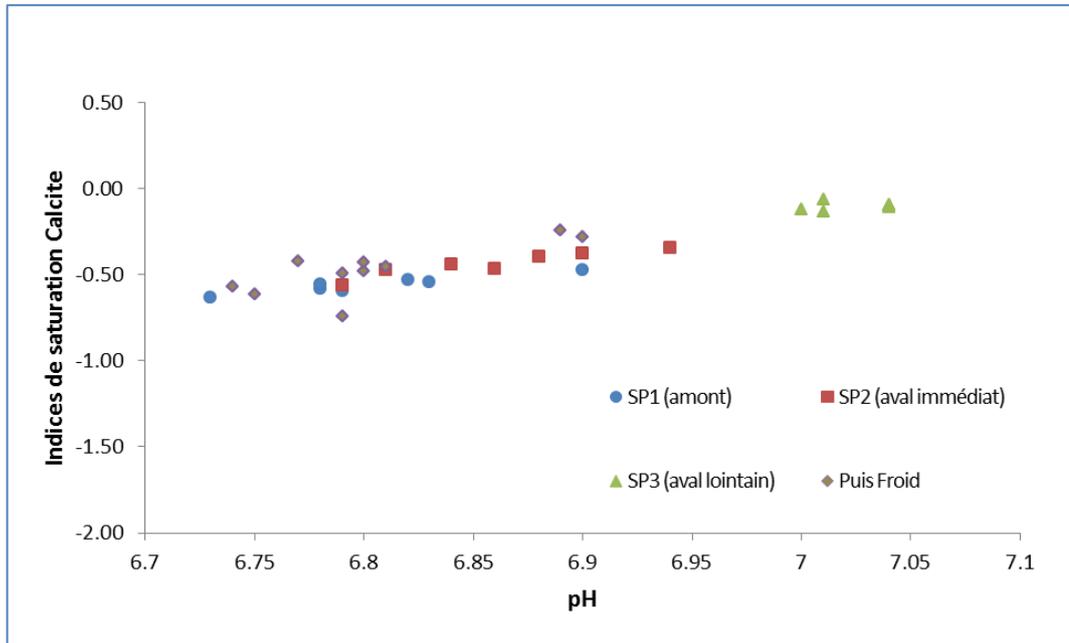


Illustration 30 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite en fonction du pH

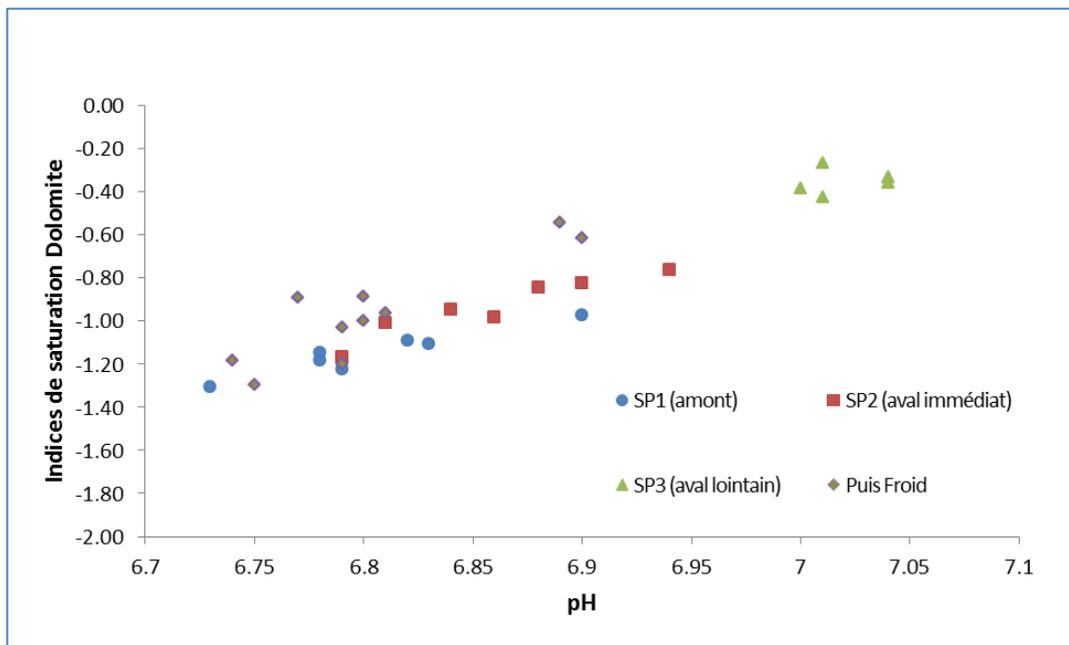


Illustration 31 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la dolomite en fonction du pH

L'eau de la nappe apparaît ainsi légèrement sous-saturée vis-à-vis de ces minéraux carbonatés pour l'ensemble des points de prélèvements. Cet état d'équilibre est étroitement lié aux valeurs de pH mesurées (de 6.72 à 7.04), particulièrement remarquable pour le piézomètre SP3, qui affiche un état d'équilibre proche de la saturation en raison de ses valeurs de pH plus élevées que le reste des points d'échantillonnage.

On peut donc considérer que les carbonates sont essentiellement sous forme de calcite, avec une faible proportion de dolomite, même si ce minéral n'a pas été détecté par les analyses DRX (LQ ~ 5 %). La présence de Mg dans la phase solide laisse à penser que ce minéral figure parmi les minéraux accessoires de l'assemblage minéralogique.

Ces différents calculs de spéciation nous permettent de déduire un **équilibre de l'aquifère avec une phase gazeuse, comprenant 2 à 3 % de CO₂**, c'est à dire nettement plus riche que l'atmosphère (environ 50 à 80 fois plus concentré).

Les IS vis-à-vis de ces minéraux carbonatés en fonction des températures de prélèvement, coté « Puits chaud » (piézomètres de suivi SP1, SP2, SP3) et coté « Puits froid » (Forage F2) sont reportés ci-après. Pour l'ensemble des points de prélèvements, l'examen de ces IS montre que l'état d'équilibre ne varie pas avec la température des eaux (maintien du système dans un état de sous-saturation)

Ces indices sont sensiblement identiques coté « puits chaud » et coté « puits froid », excepté toutefois pour le piézomètre SP3 qui présente un état d'équilibre thermodynamique plus proche de la saturation. Cette « singularité » à l'échelle du site s'explique principalement par des valeurs de pH plus élevées que le reste des points d'accès à la nappe.

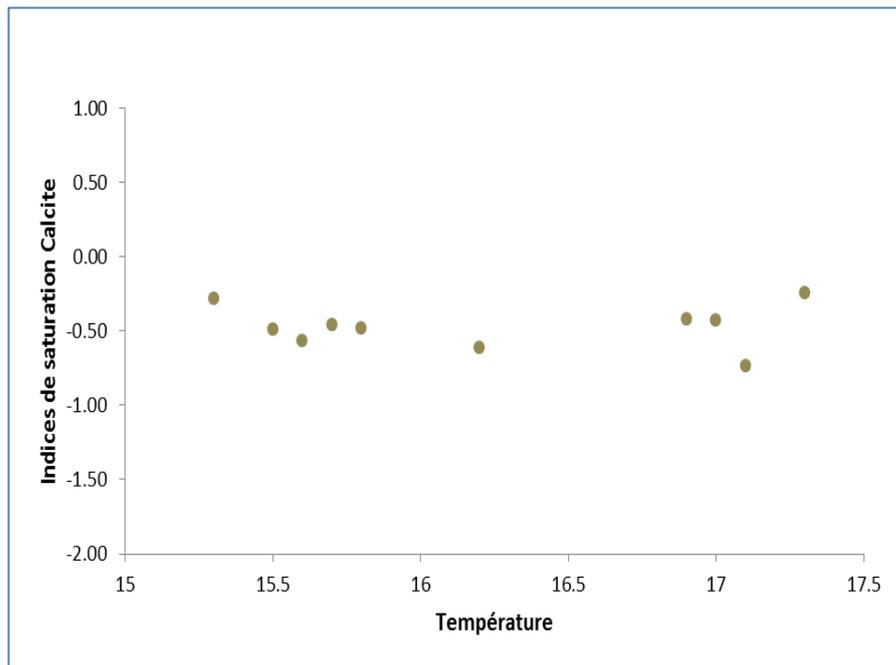
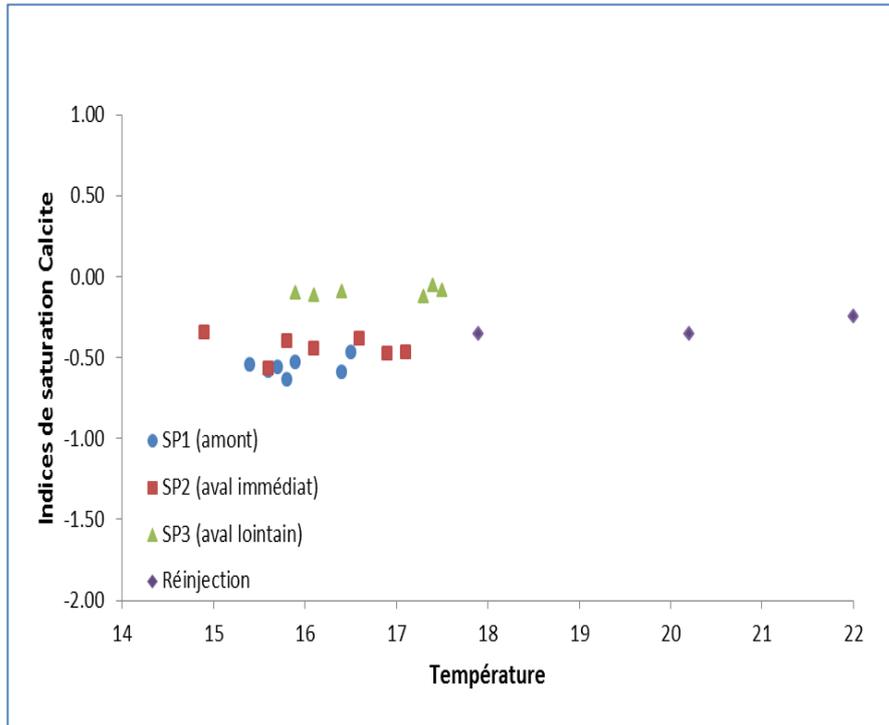


Illustration 32 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la calcite en fonction de la température de prélèvement

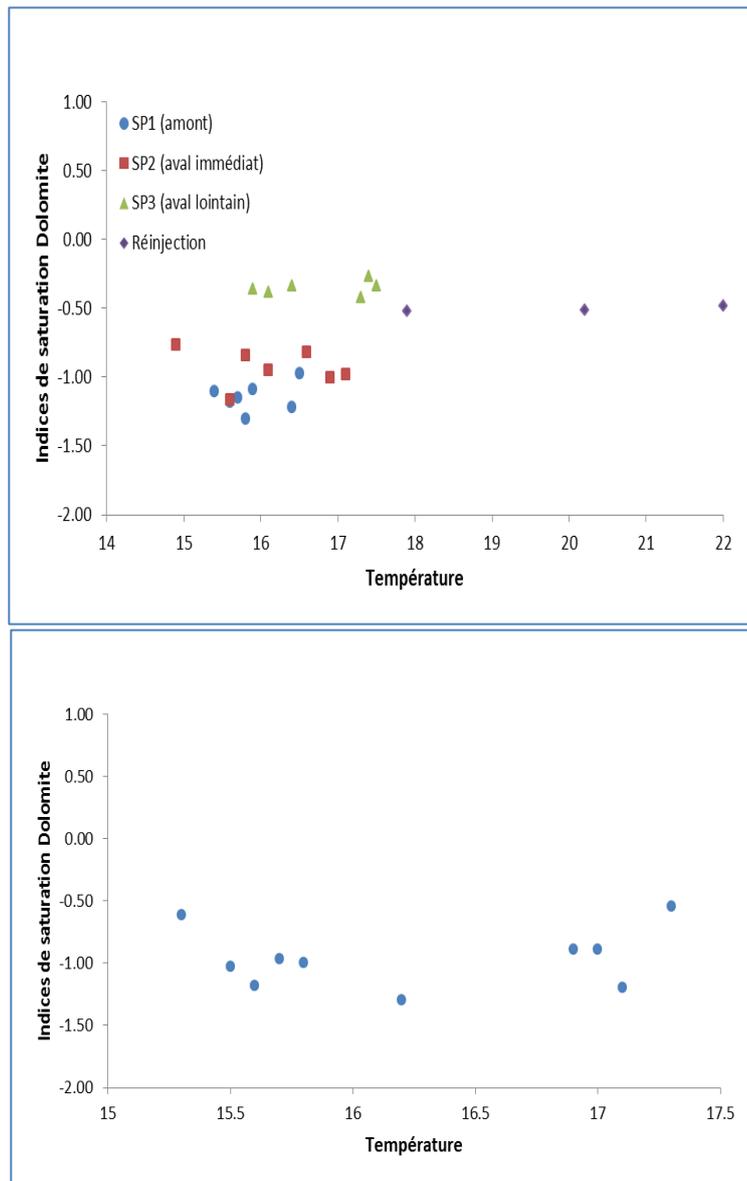


Illustration 33 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis de la dolomite en fonction de la température de prélèvement

En ce qui concerne les phases siliceuses, les analyses de la matrice sédimentaire ont tout d'abord permis de mettre en évidence une forte proportion de silice, conformément à la nature lithologique des formations (sables, graviers). L'état d'équilibre des eaux prélevées vis-à-vis des formes naturelles de dioxyde de silicium (SiO_2) plus ou moins cristallines, est illustré ci-dessous (Illustration 34) en fonction de la température. Les résultats montrent tout d'abord un équilibre intermédiaire entre 2 formes cristallines le quartz et la calcédoine (cryptocristalline), et une sous-saturation importante vis-à-vis d'une forme de silice amorphe. Aucune variation significative des degrés de saturation n'est décelée dans la gamme de température rencontrée sur site.

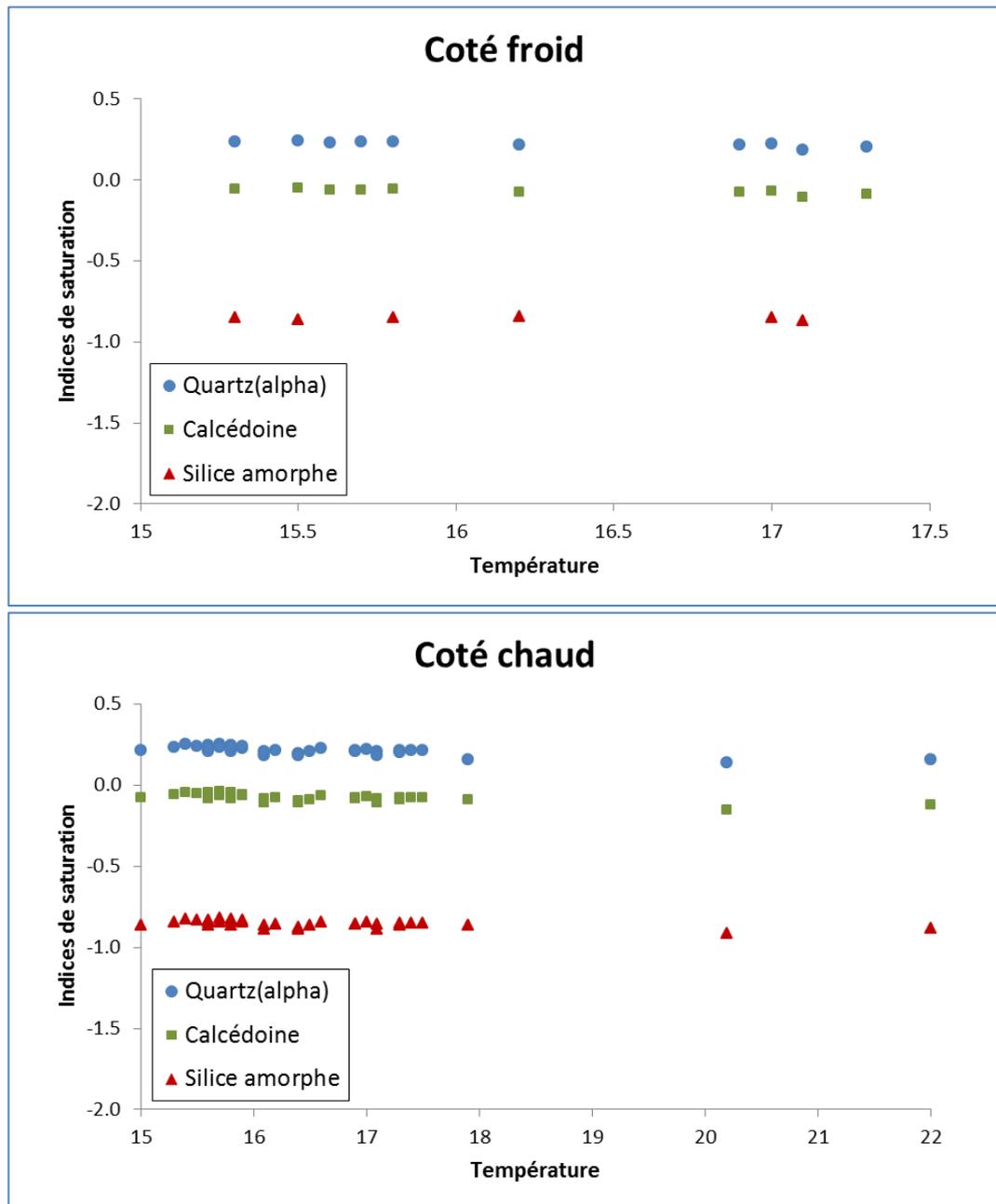


Illustration 34 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des formes minérales siliceuses, cristallines ou amorphe

L'eau est également légèrement sous-saturée vis-à-vis des feldspaths sodiques, représenté par l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et saturée, voire sursaturée, vis-à-vis du pôle potassique de la famille des feldspaths, représentés par le microcline (KAlSi_3O_8).

L'évaluation des états d'équilibre thermodynamiques vis-à-vis des phases minérales porteuses de fer (muscovite, illite) ne peut être analysée avec pertinence compte tenu du fait que la concentration de fer en solution est inférieure à la limite de quantification et ce, pour la plupart des mesures.

Les eaux présentent également une nette sursaturation vis-à-vis de la kaolinite, ($IS > 4$), considérée comme un minéral secondaire susceptible de précipiter dans le système.

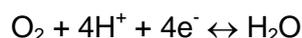
4.2.4. Potentiel d'oxydo-réduction

A partir des calculs de spéciation calés grâce aux mesures des paramètres non conservatifs *in-situ*, il est possible d'évaluer l'état redox global du système et d'identifier certains mécanismes réactionnels responsables de la composition de la solution (par exemple les principaux couples électroactifs).

L'expression du potentiel d'oxydoréduction d'un couple redox Ox/réd (relié par la demi-réaction d'oxydoréduction $Ox + ne^- \leftrightarrow Red$) est donnée par l'expression suivante, dérivé de l'équation de Nernst :

$$pe = pe^0 + \frac{1}{n} \log \frac{a_{oxydant}}{a_{réducteur}}$$

Avec pe^0 : le potentiel redox à l'état standard du couple ; a_{ox} et a_{red} : les activités des espèces oxydante et réductrice considérées et, n : le nombre d'électrons échangés lors de la demi-réaction d'oxydoréduction. Pour le couple O_2/H_2O , on obtient par exemple :



$$pe_{O_2/H_2O} = pe_{O_2/H_2O}^0 + \frac{1}{4} \log \frac{p_{O_2} \cdot a_{H^+}^4}{a_{H_2O}}$$

Les couples redox identifiés à l'issue des différentes campagnes de prélèvements et d'analyses sont les suivants :

- couple O_2/H_2O : en présence sur l'ensemble des points de prélèvements au cours de la période d'investigation ;
- couple NO_3^-/NO_2^- : en présence sur un nombre très restreint d'échantillons d'eau (2 au total), le reste de mesures ne faisant apparaître que l'espèce nitrate, le nitrite étant en dessous de la limite de quantification.

Aucune autre spéciation redox n'a pu être mise en évidence compte tenu de l'indisponibilité d'un des membres du couple. Les résultats obtenus sont illustrés sur le diagramme de Pourbaix ci-dessous (Illustration 35) sur lequel ont été reportées les valeurs de potentiel redox mesurées sur le terrain.

On constate que les valeurs de potentiel redox mesuré oscillent relativement peu au cours des différentes campagnes de prélèvements ($8.5 < pe < 11.5$), montrant ainsi une relative stabilité du système au cours de la période d'investigation.

Par ailleurs, les valeurs du potentiel redox mesurées sont largement inférieures à celles du couple O_2/H_2O , majoritairement présent dans le système. Lorsque les deux termes des deux couples redox sont présents (2 points de mesures), le pe mesuré semble davantage se rapprocher du potentiel du couple NO_3^-/NO_2^- . Cependant, dans

ces cas de figure, le couple de l'azote est en concentration beaucoup trop faible pour constituer un bon couple redox.

Ce désaccord avec la valeur mesurée à l'électrode indique que les réactions d'oxydoréduction ne sont pas à l'équilibre dans le milieu et que, par conséquent, la mesure du potentiel redox ne constitue pas, en toute rigueur, une mesure probante de l'état d'oxydo-réduction du milieu. Un tel déséquilibre a largement mis en évidence depuis de longue date dans les eaux naturelles (Lindberg and Runnels, 1984 ; Michard, 2002 ; Washington et al., 2004).

Les principales causes de cet écart à l'équilibre sont principalement liées à des contraintes cinétiques : certaines réactions d'oxydo-réduction peuvent être en effet très lentes, d'autant plus lentes que l'un des membres du couple est en concentration faible ou lorsque l'évolution du système est proche du potentiel d'équilibre, ce qui est particulièrement le cas du couple O_2/H_2O dans cette étude.

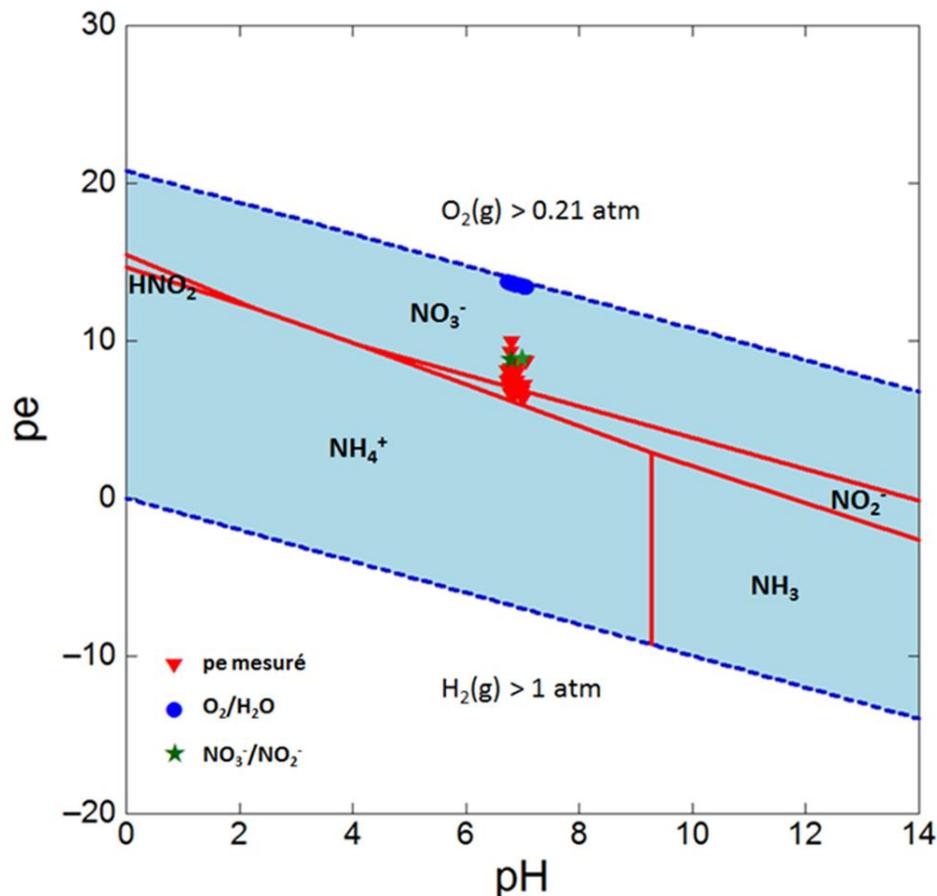


Illustration 35 : Diagramme de Pourbaix simplifié

Cette étude de l'état redox ne se limite pas à la mise en évidence du déséquilibre des eaux, mais permet de prédire les réactions susceptibles de se produire dans le milieu lors d'un apport d'énergie, sous forme de matière organique, laquelle consommera progressivement l'oxygène présent.

L'évolution de la solution correspondra donc à une succession d'étapes catalysées, car les microorganismes, mettant en œuvre un accepteur d'électrons particulier, du plus énergétique au moins énergétique (O_2 puis NO_3^- , ...).

Par ailleurs, aucun effet significatif de la température n'a été mis en évidence sur l'état redox du système, dans la gamme de variation de température rencontrée sur site.

4.3. EVOLUTION DES PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

4.3.1. Suivi de la biomasse bactérienne totale

Le nombre de bactéries totales est évalué par dénombrement en épifluorescence après filtration sur membrane et marquage à l'acridine orange (1% p/v dans tampon citrate-phosphate pH 6,6, 0,1M), fluorochrome possédant la propriété de réagir spécifiquement avec les acides nucléiques (ADN et ARN) des cellules bactériennes. Pour chaque campagne de prélèvement et pour chaque point d'échantillonnage, deux numérations indépendantes, sur une dizaine de champs, ont été systématiquement accomplies.

La recherche de germes pathogènes et d'indicateurs de contaminations fécales, dont le développement pourrait être stimulé par le réchauffement des eaux, a été confié au laboratoire d'analyses IPL santé, environnement durables Méditerranée.

a) Evolution saisonnière de la quantité de germes totaux

Le nombre de bactéries varie, sur la période de temps considérée et selon les ouvrages, entre 5.8×10^3 et 5.7×10^5 par mL d'eau souterraine. Cette quantité de bactéries est tout-à-fait conforme à celle trouvée dans la littérature pour les nappes d'eaux superficielles ne présentant pas de pollution (Goldscheider et al., 2005 ; Griebler et Lueders, 2009). L'illustration ci-dessous présente, à titre indicatif, l'aspect des cellules bactériennes en microscopie à épifluorescence (Illustration 36).

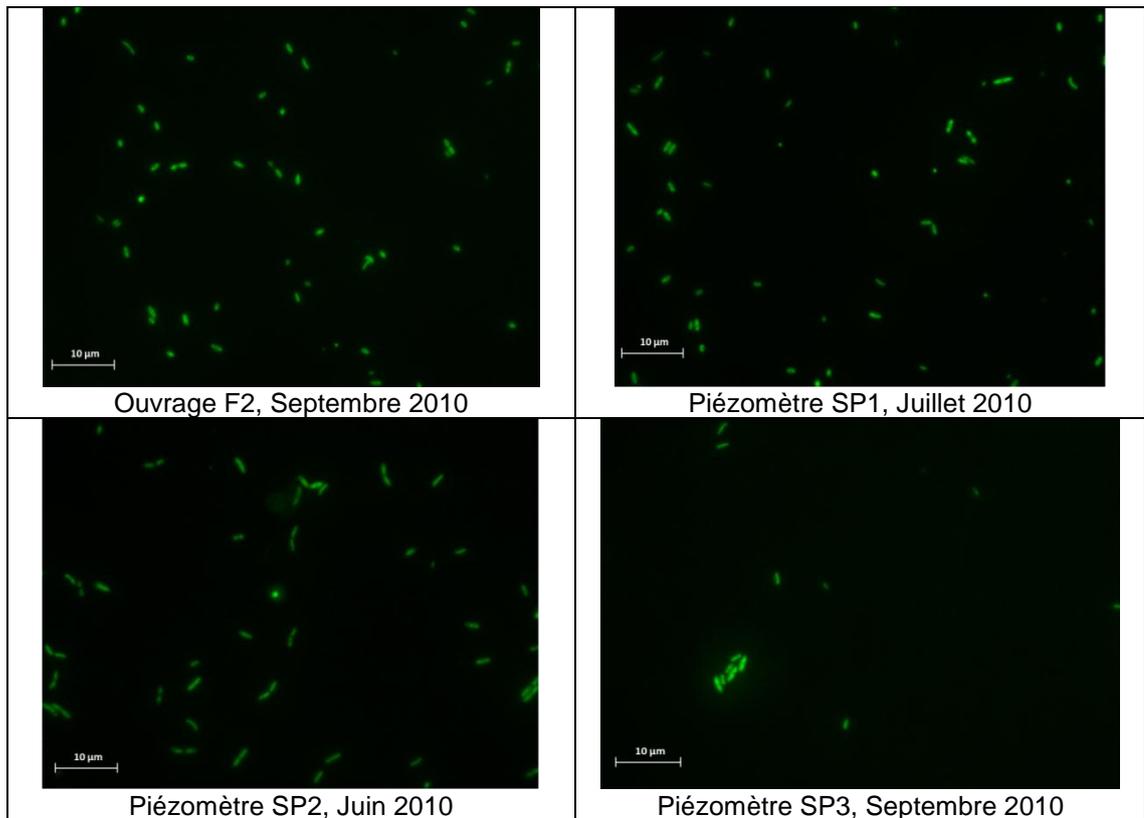


Illustration 36 : Observations en microscopie en épifluorescence sur membranes de filtration des bactéries, après marquage à l'acridine orange

Les résultats obtenus sur l'ensemble de la période d'étude et en fonction des différents points d'échantillonnages sont reportés sur ci-dessous. Ils montrent que le nombre de bactéries demeure relativement constant au cours du temps, avec cependant certaines périodes durant laquelle le nombre de bactéries est nettement plus important. Il s'agit, par exemple, des dénombrements effectués au cours du mois d'Aout 2010, qui affiche des valeurs de biomasse totale supérieure à 10^5 bactéries par mL.

Afin d'évaluer s'il existe une différence significative entre la quantité de biomasse présente entre la zone impactée (coté « Puits chaud ») par les rejets thermiques et la zone non impactée (coté « Puits froid »), des tests statistiques de Mann & Whitney sur les rangs des valeurs ont été mis en œuvre. Les résultats obtenus ne montrent aucune différence significative entre les deux zones d'études, au seuil usuel de 5%.

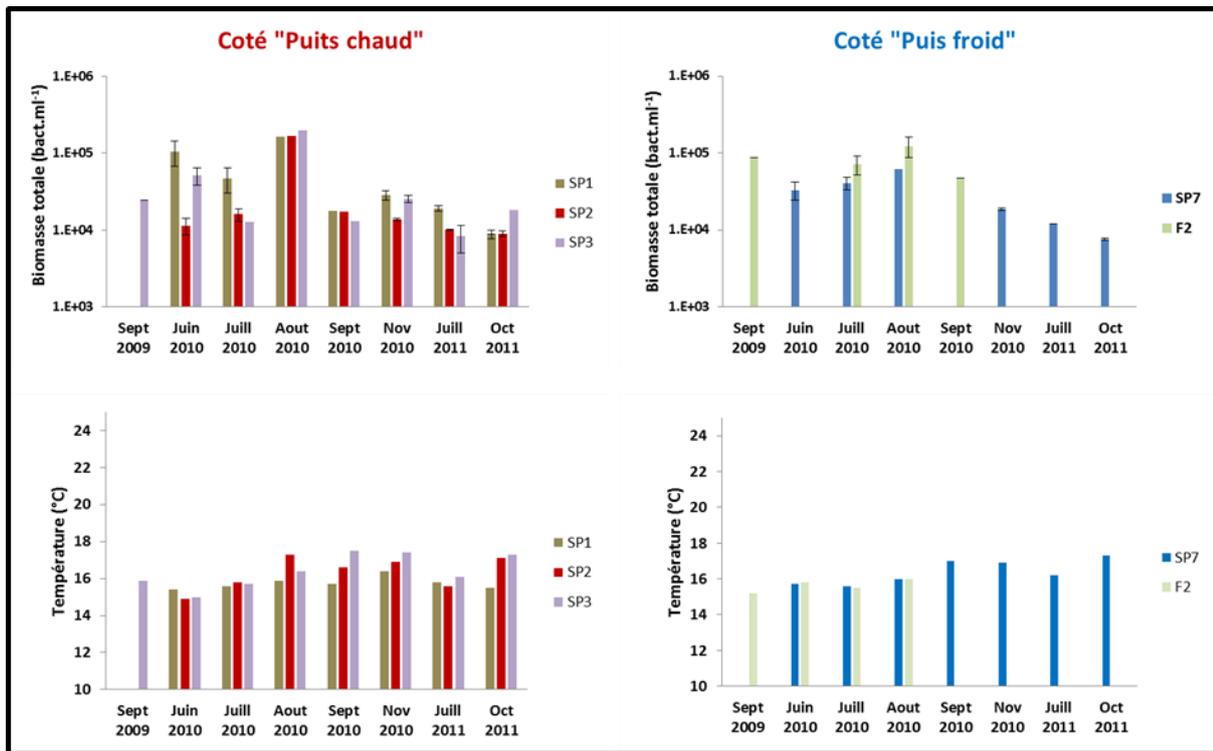


Illustration 37 : Evolution du nombre totale de bactéries et des températures de prélèvements correspondantes sur les différentes campagnes de prélèvements

Par ailleurs, aucune correspondance significative n'a pu être mise en évidence entre les niveaux de température relevés sur site et entre le nombre de bactéries totales.

b) Germes d'intérêt sanitaire

L'examen des résultats au cours de deux années de suivi du fonctionnement de l'installation montre une bonne qualité microbiologique des eaux souterraines. Les résultats d'analyses affichent tous des résultats négatifs, excepté pour le piézomètre SP7 qui présente ponctuellement une contamination par des coliformes, incluant E.Coli. En conséquence, aucune conclusion ne peut pour l'heure être émise quant à l'éventuelle incidence des rejets thermiques sur le développement d'agents infectieux compte tenu du fait que les eaux de la nappe semblent présenter une qualité considérée en moyenne comme « satisfaisante » sur la base de ces critères. A noter que cette formation aquifère représente la principale ressource souterraine pour l'AEP locale.

Un certain nombre de travaux reportent une augmentation significative de l'inactivation de microorganismes lors d'une hausse de température des eaux souterraines. Cependant les données sont très clairsemées, spécifiques de chaque type de microorganismes et des conditions expérimentales.

De plus, pour un bon nombre d'agents pathogènes, on ne dispose pas de suffisamment de références pour déterminer leur comportement vis-à-vis de la température. Toutefois dans l'immense majorité des cas, l'expérience montre qu'ils sont détruits après des temps de survie plus ou moins courts et que des phénomènes d'ordre biologique (prédation, compétition vis-à-vis de la microflore indigène) semblent expliquer ce déclin.

4.3.2. Suivi de la diversité bactérienne

Deux approches complémentaires ont été mise en œuvre dans le cadre de cette étude (FISH et CE-SSCP) qui permettent d'évaluer la diversité bactérienne en s'affranchissant des étapes de mises en culture des bactéries, réputées pour leurs manques de représentativité dans les matrices environnementales. Seuls les résultats fournis par la méthode FISH sont présentés ici.

L'analyse par FISH est basée sur l'hybridation de sondes d'acides nucléiques marquées avec un fluorochrome sur des régions cibles de l'ARNr 16S bactériens. Suivant la séquence ciblée, il est possible d'être spécifique de groupes, sous-groupes voire d'espèces bactériennes. L'observation au microscope des bactéries, fixées puis marquées avec des sondes fluorescentes, permet d'évaluer la diversité bactérienne de façon « directe », c'est-à-dire sans les biais possibles induits par une amplification de gènes par PCR. La FISH a déjà été employée pour suivre la biodiversité dans des aquifères souterrains pollués (Watanabe et al., 2000), riches en arsenic (Weldon and MacRae, 2006), ou impactés par un stockage de CO₂ (Morozova et al., 2010).

La méthode FISH ne permet de détecter que les bactéries contenant des ribosomes, c'est-à-dire actives métaboliquement. Les bactéries totales (actives, inactives et mortes) sont observées après marquage avec une sonde se fixant de façon non spécifique à l'ADN (acridine orange ou DAPI, par exemple).

Les résultats obtenus doivent être considérés comme **semi-quantitatifs et indicatifs** uniquement, pour les raisons suivantes :

- les concentrations bactériennes étaient trop faibles sur les filtres (en moyenne 5 à 9 cellules par champ, souvent une seule, alors qu'il faudrait en compter une vingtaine), et il était impossible de recommencer, car le travail a été effectué sur la dernière campagne de prélèvements ;
- il serait souhaitable d'avoir des témoins positifs pour vérifier que chaque sonde a bien fonctionné, or de tels témoins n'étaient pas disponibles quand les analyses ont été effectuées ;
- tous les groupes bactériens ne sont pas représentés (les ϵ et δ -protéobactéries par exemple n'ont pas été recherchées).

Dénombrements totaux

La concentration en bactéries totales, quantifiée par marquage au DAPI, s'élève à 1×10^4 cellules/mL pour le piézomètre SP7, et 2.3×10^4 cellules/mL dans l'eau du piézomètre SP2. Au moment du prélèvement, la température était voisine de 17°C pour les deux ouvrages (17.1 et 17.3 pour le piézomètre SP7 et SP2 respectivement).

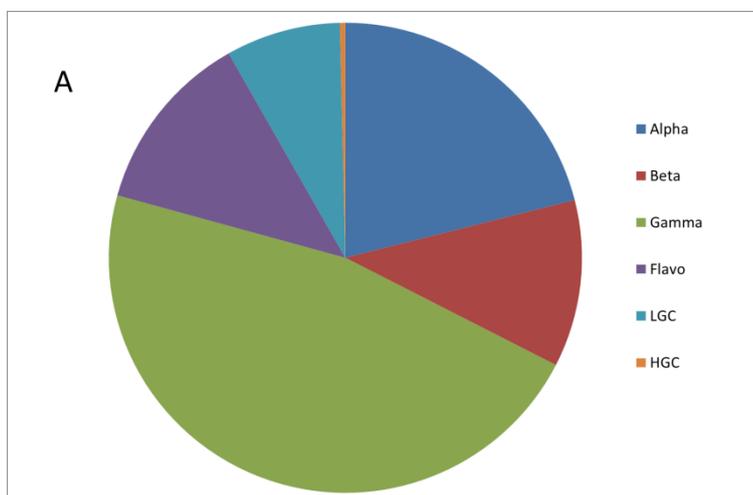
La concentration en bactéries totales est sensiblement du même ordre de grandeur dans les deux piézomètres, compte tenu des incertitudes analytiques.

La concentration en eubactéries actives, correspondant au total des bactéries marquées en FISH par les sondes EUB, s'élève à 6×10^3 pour SP7 et 3.2×10^3 pour SP2. Comme pour les bactéries totales, les concentrations en Eubactéries actives sont du même ordre dans les deux piézomètres. La différence entre SP7 et SP2 n'est pas significative, car l'écart-type sur le nombre de cellules dénombrées par champ est égal ou supérieur à la moyenne.

Dénombrements spécifiques

Les proportions de chacun des groupes bactériens marqués, par rapport aux eubactéries, sont données sur l'illustration 38. Les archéobactéries n'ont pas été représentées, car il n'a pas été possible d'en observer de façon certaine. Pour les deux piézomètres, le groupe le plus représenté est celui des γ -protéobactéries. Les groupes α - et α -protéobactéries représentent 10 à 20% des eubactéries observées, suivies par le groupe « Flavobactéries, Bacteroidetes, Sphingobactéries » (environ 10%), les bactéries Gram(+) à faible GC (environ 10%), puis les bactéries Gram(+) à haut GC (0,4 à 6%).

La diversité bactérienne semble élevée, et l'augmentation modérée de température entre SP7 et SP2 n'a pas entraîné la prolifération d'un groupe dominant.



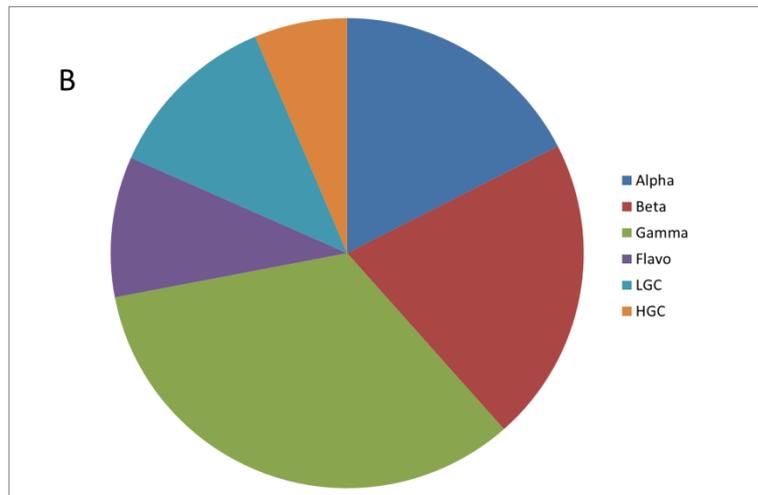


Illustration 38 : Proportion des grands groupes bactériens marqués par les sondes FISH pour les piézomètres SP7, coté Puits « froid » (A) et SP2, coté Puits « chaud » (B).

Le groupe des γ -protéobactéries, qui semble majoritaire dans les deux piézomètres étudiés, comprend les genres *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Moraxella* qui sont trouvés dans des eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009).

Le groupe des β -protéobactéries compte les genres *Acidovorax*, *Variovorax*, *Polaromonas*, *Sphaerotilus*, *Zoogloea*, *Achromobacter*, *Thiobacillus* et *Gallionella* précédemment isolés d'eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009).

La structure de la communauté bactérienne d'une eau souterraine de Sologne non perturbée (ressource en eau potable) a récemment été étudiée à travers un inventaire de gènes codant l'ADN 16S (Locatelli, 2009). Toutes les unités taxonomiques opérationnelles (OTU) trouvées dans cet environnement appartenaient aux groupes des γ -proteobactéries et des β -protéobactéries, et la banque de clones était dominée par des bactéries appartenant au genre *Pseudomonas* (γ -protéobactéries, 44% des clones). La présence majoritaire de γ -protéobactéries et importante de β -protéobactéries dans les piézomètres SP7 et SP2 est en accord avec les données précédemment publiées sur la diversité bactérienne d'aquifères non perturbés.

Le groupe des α -protéobactéries comprend les genres *Methylocystis*, *Brevundimonas*, *Caulobacter*, *Hyphomicrobium* et *Sphingomonas*, détectés dans des eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009).

Le groupe des Flavobactéries, Bacteroidetes, Sphingobactéries comprend des bactéries appartenant aux genres *Cytophaga* et *Flavobacterium*, isolés d'eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009).

Les bactéries Gram(+) comptent deux groupes marqués spécifiquement par des sondes FISH : le groupe à bas GC% (pourcentage des bases guanine et cytosine dans leur ADN) et le groupe à haut GC%. Afin d'optimiser le résultat de la coloration par des sondes FISH de bactéries Gram(+), il est conseillé de fixer ces organismes à l'éthanol, et non au formaldéhyde (Roller et al., 1994 ; Meier et al., 1999).

Il aurait donc été souhaitable de faire des filtres à part, fixés à l'éthanol, pour la détection de ces groupes. Cependant, les bactéries fixées à l'éthanol ne se conservent qu'une semaine, il faut donc procéder à l'hybridation FISH très rapidement. Dans le cas présent, une seule fixation au formaldéhyde a été réalisée, car l'hybridation ne pouvait pas être effectuée dans les jours suivant le prélèvement. La coloration était donc moins intense pour les cellules appartenant à ce groupe, dont l'importance a pu être sous-estimée. Cependant, des cellules marquées avec les sondes Gram(+) ont été observées.

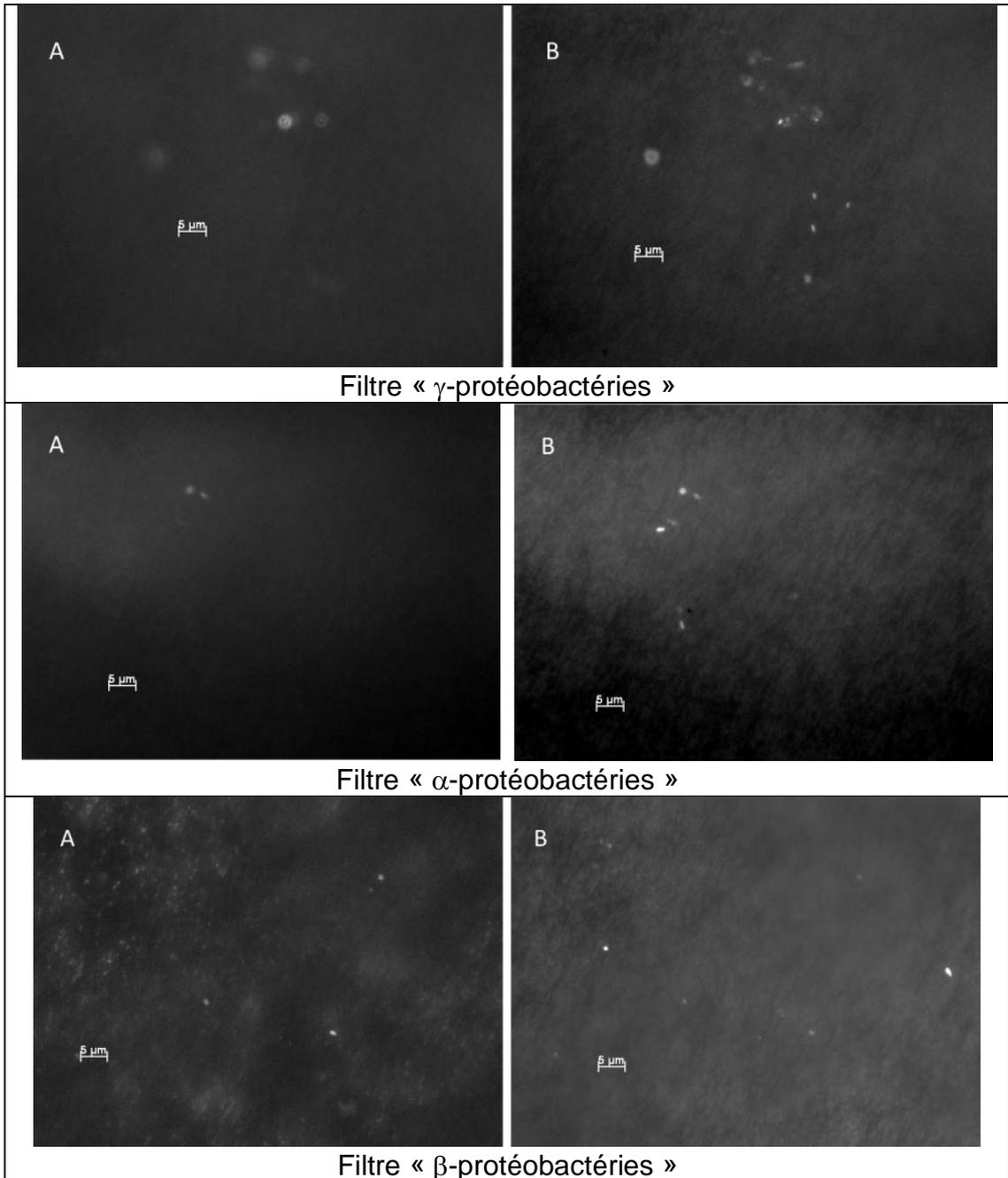
Le groupe des bactéries Gram(+) à faible GC comprend des bactéries appartenant aux genres *Bacillus* et *Staphylococcus* précédemment isolées d'eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009). Il compte également des organismes anaérobies stricts détectés dans des aquifères peu ou pas oxygénés, tels que *Desulfosporosinus*, *Desulfotomaculum*, *Clostridium* et *Acetobacterium*, dont la présence sur le site de Balandran est peu probable.

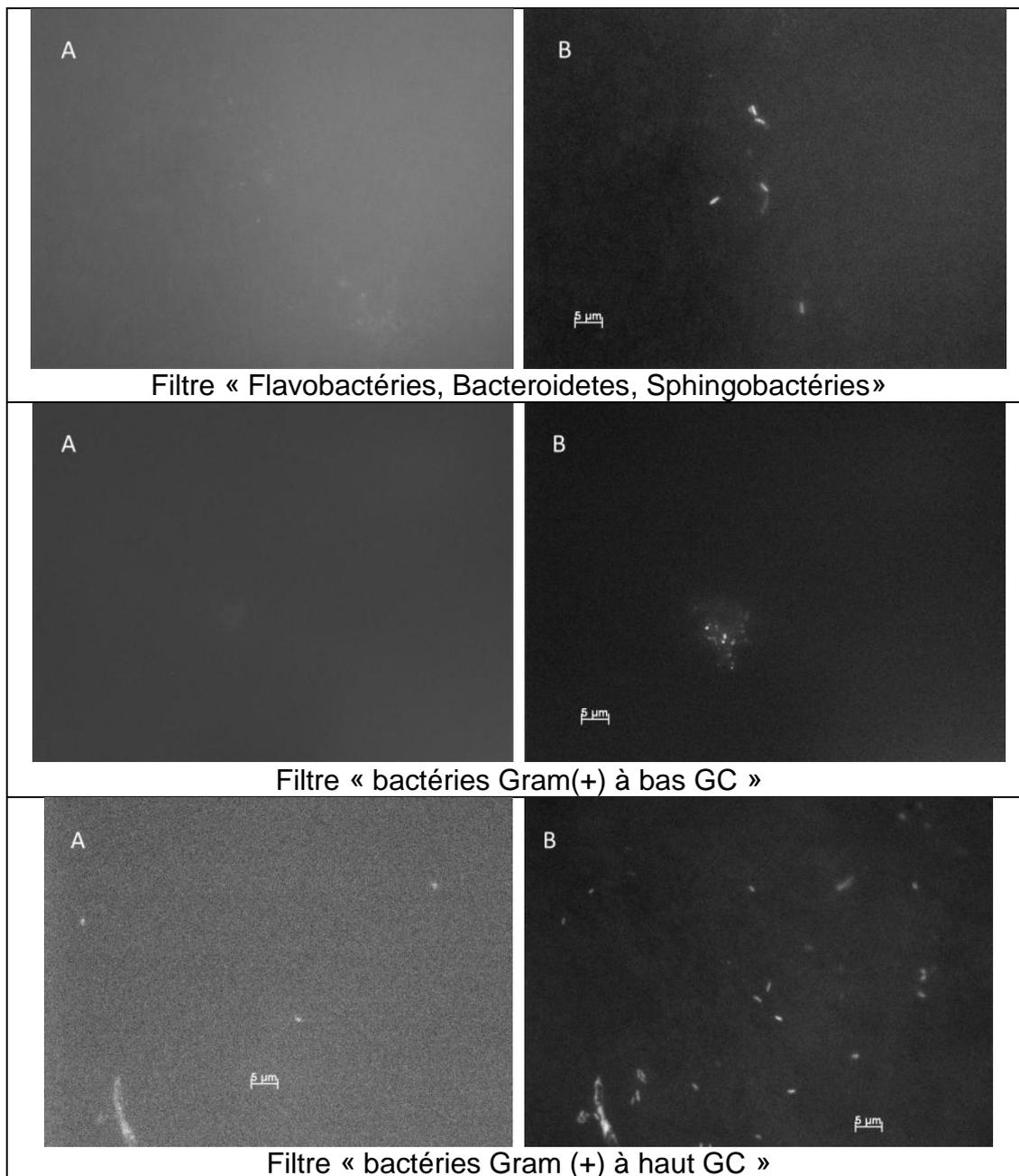
Le groupe des bactéries Gram(+) à haut GC% comprend des organismes nommés « Actinobacteria » apparentés à *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Cellulomonas*, *Nocardia* et *Rhodococcus*, précédemment isolés d'eaux souterraines, tous aérobies stricts ou facultatifs (Griebler et Lueders, 2009).

Le groupe des ϵ -protéobactéries, qui n'a pas été recherché dans la présente étude, comprend des organismes trouvés dans des environnements généralement anaérobies, eux sulfureuses (Engel et al., 2003) et eux souterraines polluées par des hydrocarbures (Watanabe et al., 2000). Leur présence en quantité abondante dans les eaux riches en O₂ de Balandran est peu probable.

Le groupe des δ -proteobactéries n'a pas non plus été recherché au cours de la présente étude. Il comprend des bactéries appartenant aux genres *Geobacter*, *Desulfuromonas*, *Pelobacter*, et *Desulfocapsa*, précédemment isolées d'eaux souterraines (Griebler et Lueders, 2009) certainement anaérobies, car tous ces organismes le sont. Leur présence en abondance dans l'aquifère de Balandran est donc improbable.

Quelques photographies (un champ pour chaque groupe spécifique) prises au cours de cette étude sont données à titre d'exemple ci-dessous.





A : sonde spécifique, B : Eubactéries

4.3.3. Mesure d'activité

L'activité déshydrogénase (ou activité respiratoire) a été évaluée via l'utilisation du 2 (p-iodo-phenyl)-3-(p-nitrophenyl)-5-phenyl tetrazolium chloride (INT). 100 ml d'eau souterraine ont été concentré sur une membrane de nylon (0,22 μm , Whatman) puis le filtre a été incubé dans l'eau souterraine filtrée à 0,02% d'INT durant 24h à différentes températures et à l'obscurité.

Le pH a été ajusté à 7 avec de l'HCl 0,1M. La même expérience a été menée en ajoutant 10 ppm d'extrait de levure à la solution. A l'issue de la période d'incubation, les tubes ont été centrifugés (5', 4 000tr.min⁻¹) afin d'éliminer le surnageant puis l'INT-formazan insoluble a été extrait en ajoutant 5 mL d'acétone et en laissant reposer 4 h à l'obscurité (agitation ponctuelle toutes les heures). L'absorbance a été ensuite mesurée à 465 nm et la quantité d'INT réduit a été déduite d'une courbe de calibration. Toutes les expériences ont été conduites en triplicats.

Les mesures d'activités aux différentes températures d'incubation sont reportées sur l'illustration 39.

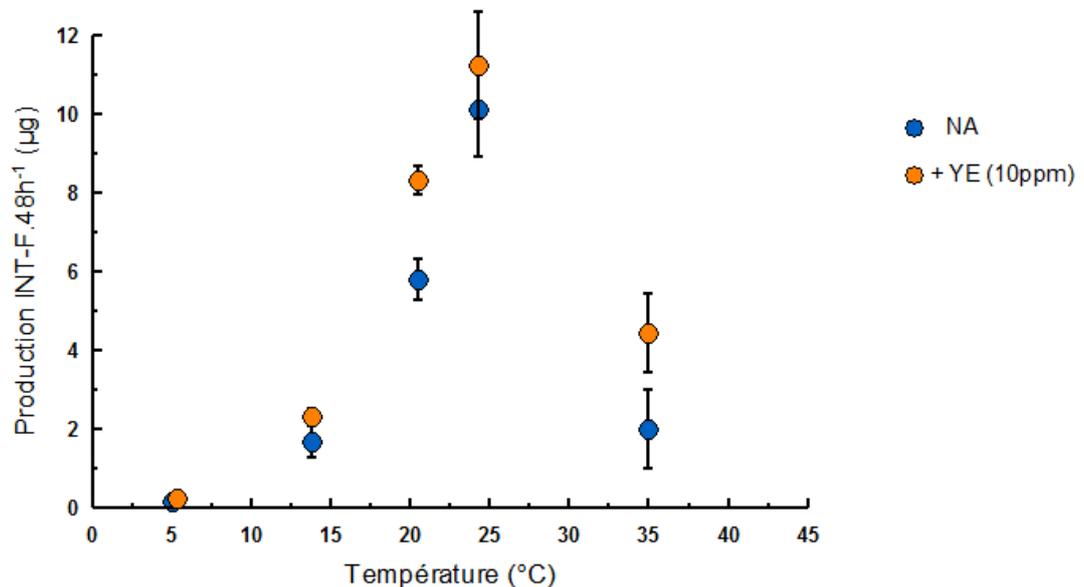


Illustration 39 : Mesure d'activité en fonction de la température

Légende : NA : Non amendé (eau brute) et +YE : Ajout d'extrait de levure (10 mg/l)

On constate tout d'abord que les basses températures restreignent considérablement l'activité des cellules en comparaison avec les mesures effectuées aux températures proches de celle rencontrées sur site (15°C). Les mesures d'activités à 5 °C affichent en effet des valeurs proches de la limite de détection de la méthode. Au-delà de 5°C, l'accroissement de la température se traduit par une hausse de l'activité respiratoire des bactéries jusqu'à une valeur critique, voisine de 26-27°C, au-delà de laquelle l'activité chute brutalement.

La traduction physiologique de cette hausse de l'activité est parfaitement décrite dans la littérature. Elle correspond en effet à l'augmentation de l'interaction entre l'enzyme et son substrat à plus forte température. La baisse sensible de la vitesse de la réaction enzymatique est quant à elle induite par la dénaturation progressive des protéines (enzymes) qui perdent progressivement leur activité jusqu'à atteindre une valeur nulle.

On peut estimer le facteur d'augmentation de l'activité en fonction de la température. Cette valeur est donnée par le Q_{10} , qui représente la relation entre la vitesse d'un processus physiologique et la température et qui est obtenu à l'aide de la relation suivante :

$$Q_{10} = \left(\frac{A_{T_2}}{A_{T_1}} \right)^{\left(\frac{10}{T_2 - T_1} \right)}$$

Où A_{T_1} et A_{T_2} représentent les mesures d'activité effectuées aux températures T_1 et T_2 respectivement.

Ainsi la valeur de Q_{10} obtenue dans la gamme de température comprise entre 14 et 26°C est de 2.9 pour les mesures effectuées sur les eaux brutes et de 2.7 pour les eaux amendées en extrait de levures. Ces valeurs sont tous à fait conformes à celles figurant dans la littérature : les vitesses de réactions biologiques augmentent en effet habituellement, au sein de la gamme physiologique, d'un facteur 2 à 3 par tranche de 10°C pour les processus de respiration. (Thamdrup et al. 1998).

5. Evaluation technico-économique

Ce chapitre vise à réaliser une analyse succincte de l'intérêt énergétique, économique, environnemental et agronomique de l'opération de géothermie basse énergie sur nappe, appliquée au projet de serre capteur d'énergie de Balandran. Elle complète l'analyse déjà réalisée par le Ctifl (Ctifl, 2012) par une estimation détaillée des composantes du coût global de l'opération ainsi que par une évaluation monétaire des bénéfices de la serre capteur d'énergie.

- l'analyse de l'intérêt énergétique porte sur l'évaluation de l'efficacité énergétique de la solution géothermique en comparaison avec la solution de référence (serre témoin avec chauffage au gaz naturel et refroidissement par aération). Il s'agit d'évaluer les économies d'énergie potentielles réalisées grâce à l'utilisation de l'aquifère pour le chauffage et la climatisation de la serre ;
- l'intérêt environnemental de la géothermie consiste à comparer les émissions de gaz à effet de serre (émissions de CO₂ dues à la consommation énergétique) des deux solutions énergétiques ;
- l'analyse de l'intérêt agronomique cherche à évaluer le gain de rendement cultural de la serre ;
- enfin, l'analyse économique vise à estimer la rentabilité économique de la solution de géothermie sur nappe, sur la base d'indicateurs tels que la valeur actuelle nette et le temps de retour sur investissement.

S'agissant d'une installation pilote, cette évaluation a priori vise essentiellement à fournir des ordres de grandeurs en termes de coûts et bénéfices.

L'approche méthodologique d'évaluation technico-économique de dispositif géothermique est décrite en détail dans Courtois et al. (2007). Elle rejoint les recommandations de l'ADEME (2012) et peut être résumée en quatre étapes principales :

1. Description des solutions et installations énergétiques à étudier, y compris la solution de référence. Il s'agit de comparer la serre capteur avec stockage en aquifère et la serre témoin (solution de référence avec chaudière à gaz) ;
2. Evaluation des besoins énergétiques et des puissances nécessaires au fonctionnement d'une serre ;
3. Bilan énergétique, environnemental et économique pour évaluer l'intérêt de la solution de géothermie par rapport à la solution de référence ;
4. Analyse de sensibilité pour tester l'impact de quelques variantes des hypothèses considérées.

L'étape 1 a fait l'objet du chapitre 2 de ce rapport. Les autres étapes sont présentées dans le présent chapitre.

5.1. BILAN ENERGETIQUE DES SERRES

5.1.1. Energie et puissances fournies

Les besoins et puissances énergétiques (chaud et froid) sont déterminés en fonction des caractéristiques de la serre expérimentale. **Il s'agit des besoins énergétiques nécessaires pour maintenir la serre à une température intérieure comprise entre 27°C et 30°C en production maraîchère.** Ces besoins dépendent du climat (température et lumière extérieure) et de la croissance de la plante.

Dans ce rapport, la période de référence retenue est la campagne d'essai 2011-2012. Les campagnes des deux années précédentes ont permis au Ctifl d'optimiser le fonctionnement de l'installation de la serre capteur d'énergie, en particulier pour la sollicitation de l'aquifère durant la période d'été. Pour la campagne de référence, les périodes de fonctionnement ont été les suivantes :

- mode chauffage : mi-novembre 2011 (période de plantation) à fin mars 2012 ;
- mode refroidissement : début avril 2012 à début septembre 2012.

A ces deux modes, il faut ajouter le fonctionnement en mode déshumidification qui intervient principalement en hiver (de décembre à avril).

L'énergie nécessaire pour maintenir la température intérieure de la serre à la température de consigne est connue grâce aux compteurs à calories installés dans les serres. Une analyse détaillée du bilan énergétique (mois par mois) est présentée dans le rapport final du Ctifl (Ctifl, 2012). L'illustration 40 récapitule l'énergie fournie à chacune des serres au cours de la campagne 2011-2012 (rapportée au m² de serre) :

- pour la serre capteur, l'énergie fournie est de 125 kWh/m² en mode chauffage et de 303 kWh/m² en mode refroidissement, déshumidification incluse⁵ ;
- pour la serre témoin, l'énergie fournie est de 218 kWh/m² en mode chauffage. La serre est refroidie par l'ouverture du toit (air extérieur).

⁵ Pour mémoire, 1 Wh = 3600 J (énergie)

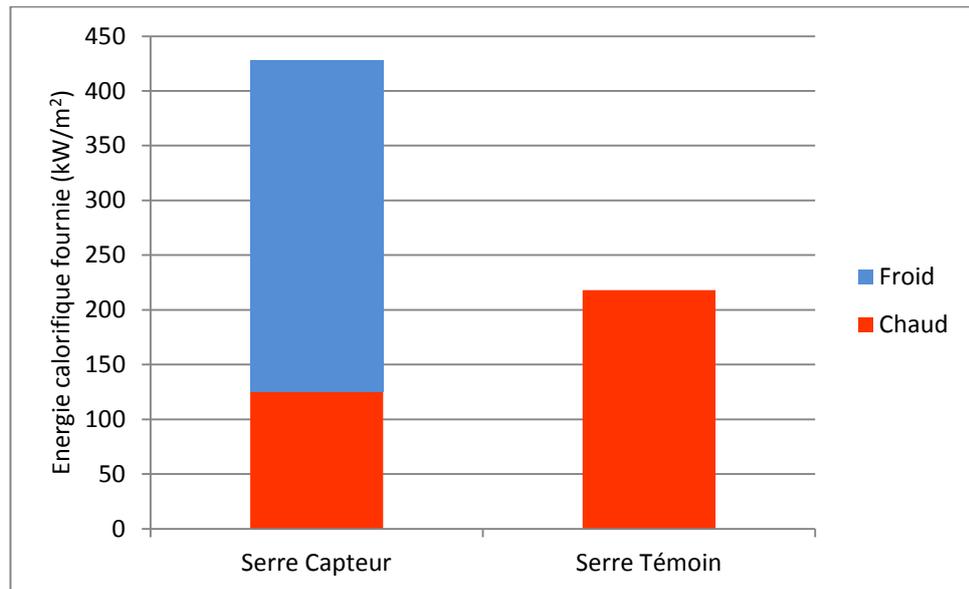


Illustration 40 : Energie calorifique fournies aux serres pendant la campagne 2011-2012

L'illustration 41 présente les puissances maximales appelées durant les deux périodes de la campagne 2011-2012. **Le mode refroidissement est dimensionnant dans le cas de la serre capteur (environ 554 W/m²)**. La puissance⁶ maximale appelée pour chauffer la serre témoin est d'environ 187 W/m². Elle est couverte en totalité par la chaudière à gaz.

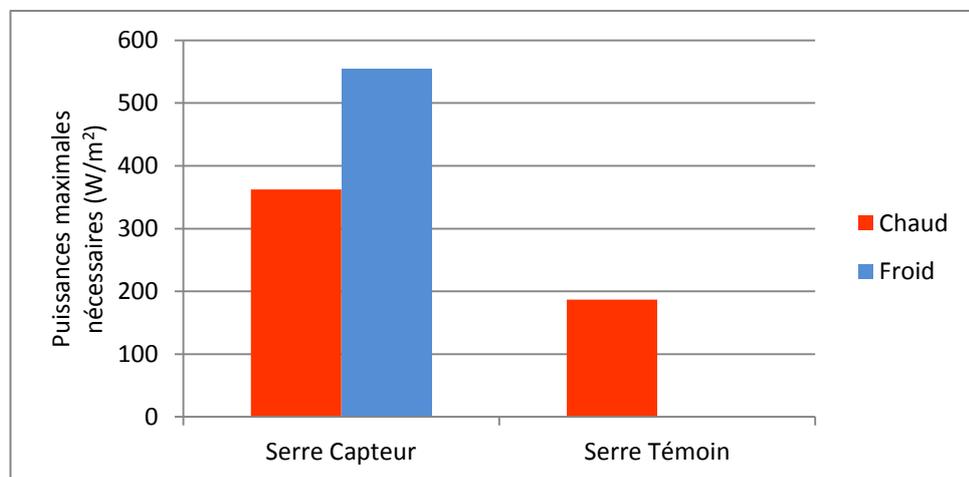


Illustration 41 : Puissances maximales appelées pour la campagne 2011-2012

⁶ Pour mémoire, 1 W = 1 J/s (puissance)

Pour la serre capteur, le temps de fonctionnement est de 2897 heures en mode chauffage et de 2439 heures en mode refroidissement sur l'ensemble de la campagne. Ce paramètre peut être très variable et influencera fortement la viabilité de la solution énergétique.

Par la suite, les puissances mesurées sont utilisées pour redimensionner les puissances maximales nécessaires au plus près, pour l'estimation des coûts d'investissement de la PAC (serre capteur) et de la chaudière à gaz (serre témoin).

5.1.2. Consommations énergétiques

Le dispositif expérimental de la serre capteur d'énergie, comprend plusieurs compteurs électriques et calorifiques afin de mesurer les consommations électriques au niveau des pompes de forages (froid et chaud), des pompes de circulation (réseaux HT et BT), de la PAC et des ventilateurs des CTA. Les consommations en eau chaude ont aussi été enregistrées pour la serre témoin pour en déduire la consommation énergétique au niveau de la chaudière à gaz. Cette dernière a aussi été utilisée en chauffage d'appoint (démarrage) de la serre capteur. Ces mesures ont été effectuées quotidiennement de manière automatique. Le bilan des consommations énergétiques des différents éléments du système de chauffage et refroidissement est présenté dans le tableau ci-dessous :

Consommations énergétiques unitaires	Serre Capteur		Serre Témoin	
	Chaud	Froid	Chaud	Froid
Consommation Electricité				
Pompes puits	4.2	7.5		
Réseaux HT et BT (pompes process)	32.3	-	10.1	
PAC	75.0	-		
CTA (ventilateurs)	22.0	24.8		
Total conso. électrique (kWh/m²)	133.5	32.3	10.1	
Electricité : consommation totale et annuelle (kWh/m²/an)	165.9		10.1	
Consommation Gaz naturel				
Chauffage - Serre témoin			218	
Appoint chauffage HT - Serre capteur	5.0	-		
Gaz : consommation totale et annuelle (kWh/m²/an)	5.0		218.0	

Illustration 42 : Consommations énergétiques des serres capteur et témoin - Campagne 2011-2012

Au total, la consommation énergétique de la serre capteur est de 171 kWh/m²/an (164 MWh/an) contre 228 kWh/m²/an (219 MWh/an) pour la serre témoin (chauffage uniquement). L'énergie électrique pour la serre capteur alimente respectivement la PAC (75 kWh/m²) et la CTA (22 et 24.8 kWh/m²) et permet de transférer les calories (chaleur ou froid) captées dans l'aquifère vers la serre. Ce transfert permet ainsi de satisfaire les besoins énergiques de la serre semi-fermée (tels que décrits sur

l'illustration 40) en apportant les puissances maximales requises (Illustration 41). La consommation énergétique nécessaire au refroidissement de la serre capteur représente moins de 20% de sa consommation totale annuelle.

En termes de bilan énergétique, **la solution de chauffage/climatisation ayant recours à la géothermie sur aquifère permet une économie d'énergie annuelle d'environ 25%**, soit 57.2 kWh/m² (-55 MWh/an) pour la campagne d'expérimentation 2011-2012.

5.2. ESTIMATION DES COÛTS

Dans cette section sont décrites les différentes hypothèses utilisées pour l'estimation du coût global des serres témoin et capteur d'énergie. Il comprend les coûts d'investissement, les coûts de maintenance et de renouvellement et les coûts énergétiques.

5.2.1. Coûts d'investissement

Les deux serres expérimentales sont construites et équipées de la même manière. Elles diffèrent uniquement par leurs systèmes de chauffage/ refroidissement (cf. chapitre 2). Dans ce cas, seuls les coûts associés aux systèmes de production de chaleur ou de froid (pour la serre capteur) sont pris en compte dans l'estimation du coût d'investissement⁷. Toute chose égale par ailleurs, les investissements suivants ne sont donc pas pris en compte :

- les structures des modules de serre en verre et écrans thermiques ;
- le système d'irrigation ;
- le système de distribution de chaleur : réseaux HT (rails thermosiphon) et BT (tubes de végétation) ;
- l'automatisme Hoogendoom (ordinateur climatique, logiciels de gestion informatique, ...) ;
- l'ensemble des équipements de mesures expérimentaux et de contrôle (piézomètres, sondes, capteurs, ...) ;
- l'ensemble des équipements d'injection de CO₂.

a) Serre capteur

Pour la serre capteur d'énergie, le coût d'investissement de la solution géothermique est estimé à partir des devis détaillés préétablis par les entreprises partenaires ou prestataires du projet. Les résultats expérimentaux ayant montré que le stockage de

⁷ Le coût d'investissement moyen de construction d'une serre standard est de l'ordre de 120 €/m², équipements compris (expertise Ctifl). Selon l'installation, le surcoût d'investissement du système de chauffage/ refroidissement représente entre 40% et 60% du coût total.

chaleur dans l'aquifère était inefficace compte-tenu du contexte hydrogéologique (voir chapitre 3), on n'évalue ici que le dispositif de géothermie sur nappe (avec une PAC eau/eau et une batterie de CTA) pour chauffer/climatiser la serre. Les surcoûts liés au stockage en aquifère (réversibilité des forages) ne sont pas intégrés dans les calculs. Finalement, les postes d'investissement pris en compte sont :

- deux forages: froid (23 m) et chaud (17 m) et leurs équipements (tubage et pompes) ;
- pompe à chaleur eau/eau (PAC) ;
- échangeurs air/eau de la centrale de traitement d'air (CTA) ;
- trois ballons de stockage journalier (utilisés simultanément en stockage du chaud ou du froid) ;
- raccords hydrauliques et électriques, y compris des forages.

En réalité, certains éléments du système de chauffage sont surdimensionnés car ils ont été prévus pour fonctionner avec les trois serres expérimentales (témoin, capteur et verre). Par exemple, six ballons de stockage sont installés mais seulement trois suffisent pour le fonctionnement optimal de la serre capteur seule. Par ailleurs, les installations de serres professionnelles présentent des superficies de culture beaucoup plus importantes (de l'ordre de 2.5 hectares) que les serres expérimentales et les prix unitaires (rapportés au m²) des différents équipements sont plus compétitifs du fait de l'économie d'échelle. Pour tenir compte de cette réalité, les coûts initiaux des devis ont été ajustés pour correspondre au mieux au dimensionnement de l'installation d'une serre capteur non expérimentale.

Le tableau de l'illustration 43 présente une estimation des coûts d'investissement ajustés pour chacun des postes mentionnés plus haut pour la serre capteur. Ils sont donnés en Euros hors taxes. Le coût d'investissement total du système de chauffage/refroidissement de la serre capteur est estimé à 122 k€ HT (127 €/m²). La part de l'investissement PAC représente près de 42% du coût total, suivi par le coût des CTA (29%). **Le coût des forages et leurs équipements, hors raccords, ne représente au final que 12% du coût d'investissement total.**

Les durées de vie moyenne de tous les composants du système sont supposées identiques et égales à 25 ans. Avec un taux d'actualisation de 4%, le coût d'investissement annuel capitalisé est de 7.8 k€/an HT (ou 8.13 € HT/m²/an).

Postes de coût d'investissement	Coût (€ HT)	Remarques
Etudes préliminaires et ingénierie		
Dossier administratif (ex. autorisation de forage)	p.m.	pour mémoire
Dossier technique (études écoulements/thermiques/impacts)	p.m.	pour mémoire
Total		
Forages et équipements		
2 forages : F1 chaud (23 m) et F2 froid (17 m)	5 000 €	125 €/ml
Equipement des forages F1 et F2	6 000 €	150 €/ml
Pompes immergées (non réversibles)	3 752 €	2 pompes, 1876 €/pompe
Total	14 752 €	
Raccordements électriques et hydrauliques		
Electriques (variateur de vitesse, câbles et coffret, ...)	1 479 €	ajusté à 50% du coût du devis
Hydraulique (tubes PVC, vannes, filtres, divers...)	16 680 €	ajusté à 50% du coût du devis
Total	18 159 €	
PAC et échangeurs		
PAC eau-eau (PAC TRANE CGWN 206 (237 kW/287 kW)	24 257 €	selon devis
Pompes PAC (chaud et froid), pompe "process" et variateurs	5 000 €	2 pompes, 2000 €/pompe
2 échangeurs Barriquad 320 kW	9 345 €	4673 €/échangeur
Divers accessoires PAC	12 536 €	70% du coût total des accessoires
Total	51 138 €	
Ballons de stockage		
3 ballons de stockage acier 30 m3 chacun	1 080 €	12 €/m2
Divers accessoires ballons (isolation, vidange, grutage,...)	900 €	300 €/ballon
Total	1 980 €	
CTA		
14 CTA type WESPACK 2.69 (débit d'air unitaire 2400 m3/h)	12 677 €	ajusté à 50% du coût du devis (1811 €/CTA)
Gaines textiles double diffusion diamètre 350 mm	14 231 €	ajusté à 50% du coût du devis (2033 €/CTA)
Divers accessoires CTA + raccordement CTA sur ballons froid	9 038 €	
Total	35 946 €	
Total coût d'investissement	121 974 €	

Illustration 43 : Coût d'investissement estimatif du système de chauffage/ refroidissement de la serre capteur

b) Serre témoin

Pour la serre témoin, l'investissement du système de chauffage est estimé à partir des coûts unitaires du marché pour une serre classique équivalente (non expérimentale). L'investissement comprend essentiellement l'installation de la chaudière au gaz naturel et des ballons tampon pour les réseaux HT et BT. L'installation actuelle du CTIFL est composée de trois chaudières pour une puissance totale de 3712 kW qui alimentent tout le centre de Balandran, y compris les bâtiments. Pour le besoin de comparaison, la chaudière à gaz est redimensionnée en fonction de la puissance nécessaire pour chauffer la serre témoin uniquement (180 kW pour une superficie à chauffer de 960 m²), avec une hypothèse de rendement de 100%. Le coût d'investissement unitaire moyen d'une nouvelle chaudière à gaz, avec les circulateurs HT et BT, est de l'ordre de 200 €/kW. Le coût unitaire des ballons tampon est d'environ 20 €/m². Le tableau suivant reconstitue le coût d'investissement total du système de chauffage de la serre témoin :

Postes de coût d'investissement	Coût (€ HT)
Etudes préliminaires et ingénierie (à titre indicatif)	
Etudes préalables	p.m.
Chaudière à gaz	
Chaudière à gaz naturel	36 000 €
Circulateurs	5 400 €
Ballons tampons de 13 m ³	260 €
Total	41 660 €
Raccordements gaz et hydrauliques	
Raccordement gaz (indicatif)	8 000 €
Hydraulique (indicatif)	12 000 €
Total	20 000 €
Total coût d'investissement	61 660 €
Coût d'investissement annuel (€/an)	3 947 €

Illustration 44 : Coût d'investissement estimatif du système de chauffage de la serre témoin

Le coût total du système de chauffage de la serre témoin est estimé à 61.7 k€ HT, soit un coût annuel capitalisé d'environ 3.9 k€/an HT sur 25 ans (ou 4.1 €/m² /an). Par simplification, la durée de vie de la chaudière à gaz est supposée ici identique à celle de la PAC.

Les deux tableaux précédents indiquent **que le coût d'investissement du système de chauffage/refroidissement de la serre capteur représente un peu moins du double de celui de la serre témoin**, soit un surcoût d'investissement de 62.8 k€ (+49%). Ce ratio est toutefois indicatif car il n'a pas été possible de distinguer tous les éléments de coût propre à chacune des serres (ex. coût associés aux raccordements hydrauliques).

5.2.2. Coûts d'entretien

Les coûts de maintenance et d'entretien, y compris de renouvellement (gros entretiens) sont estimés moyennant des hypothèses issues des expertises du BRGM et du Ctifl. Pour simplifier le calcul économique, ces coûts sont le plus souvent exprimés en pourcentage des coûts d'investissements des différents éléments du système énergétique :

Doublet de forages

Coût d'entretien : 3% du coût d'investissement, comprend deux visites annuelles et des prestations occasionnelles d'examen endoscopique, de dépose des pompes et des colonnes et éventuellement un détartrage.

Coût de renouvellement : 500 €/forage/an, comprend le renouvellement des pompes tous les 5 ans (durée estimée, variable selon le degré d'usure).

PAC

Coût d'entretien : 2.5% du coût de l'investissement de la PAC (2 à 3 visites annuelles).

Coût de renouvellement : estimé à 10 €/kW/an thermique (pièces et recharge en fluide frigorigène, plus gros entretiens qui interviennent tous les dix ans, soit 2 interventions sur la durée de vie de la PAC).

CTA

Coût d'entretien et de renouvellement : à titre indicatif, ce coût est pris égal à 3% du coût de l'investissement de la CTA (2-3 visites annuelles, plus gros entretiens et remplacement des pompes de circulation).

Chaudière à gaz

Coût d'entretien : 3% du coût d'investissement de la chaudière à gaz (2 à 3 visites par an).

Coût de renouvellement : 10 €/kW/an (changement de brûleur tous les 5 ans). La chaudière est renouvelée au bout de 25 ans.

Ballons et raccordements

L'entretien et le renouvellement des ballons de stockage et des ballons tampon sont estimés à 3% du coût de leurs coûts d'investissement.

Au total, le coût de maintenance et d'entretien s'élève à 7 k€/an (90% du coût d'investissement annualisé) pour la serre capteur d'énergie et 4 k€/an (100% du coût d'investissement annualisé) pour la serre témoin. **Le surcoût d'entretien de la serre capteur est alors d'environ 3 k€/m²/an (+43%).**

5.2.3. Coût de l'énergie

Le coût de l'énergie concerne l'électricité pour la consommation de la PAC ou le pompage d'eau (serre capteur), et le gaz naturel pour la consommation de la chaudière à gaz (serre témoin), de l'appoint gaz pour la serre capteur. Les consommations en électricité et en gaz ont été présentées dans l'illustration 42.

Etant données les puissances maximales sollicitées, les options tarifaires proposées par EDF et GDF-Suez (année 2012) et choisies par le Ctifl pour le site de Balandran sont les suivantes :

Prix d'électricité

Le prix d'électricité correspond au tarif vert réglementé en option EJP. Ce tarif est proposé par EDF aux entreprises grosses consommatrices (puissance souscrite supérieure à 250 kVA) avec des installations alimentées en haute ou moyenne tension. L'option EJP (Effacement des Jours de Pointe) distingue :

- tarif été (avril à octobre inclus), divisé en heures pleines et en heures creuses ;
- tarif hiver (novembre à mars inclus), avec des jours classiques et des jours de pointe mobile, avec un prix particulièrement élevé. Les jours de pointe mobile sont choisis entre novembre et mars de chaque année en fonction des jours de pic de consommation.

La tarification annuelle d'électricité est décomposée en deux parties : (i) une partie fixe dépendant de la puissance de l'installation (en €/kW/an) et de la durée du contrat d'abonnement ; et (ii) une partie variable dépendante de l'électricité effectivement consommée (en c€/kWh). A partir des relevés de l'année 2012, le prix moyens de la consommation électrique (partie fixe et variable) a été estimé à 6.7 c€/kWh HT en tarif d'hiver et 4.9 c€/kWh HT en tarif l'été (5.7 c€/kWh HT par an).

Prix du gaz naturel

Pour le gaz naturel, le prix de l'énergie correspond au Tarif Enlèvement Libre (TEL) avec l'option nuit niveau 1. Ce tarif réglementé est proposé par GDF-Suez aux entreprises ayant un besoin énergétique annuel supérieur à 2 GWh, avec plus de 70% de la consommation journalière réalisée la nuit (entre 20h et 6h). Le tarif annuel du gaz est aussi décomposé en prime fixe dépendante de la puissance souscrite en gaz et d'une partie variable qui est fonction de la consommation effective de la chaudière à gaz. Pour l'année 2012, le coût moyen de la consommation gaz a été estimé à 4.5 c€/kWh en tarif d'hiver et 3.4 c€/kWh en tarif l'été (4.3 c€/kWh HT par an).

En considérant les prix moyens en hiver et en été de l'électricité et du gaz :

- le coût d'énergie de la serre capteur est de 10.8 k€/m²/an, dont 85% est consacré au chauffage (inclus les 2% en chauffage d'appoint gaz) et 15% pour le refroidissement ;
- pour la serre témoin, le coût total de consommation en gaz est de 10.5 k€/m²/an, dont 6% en consommation électrique pour le fonctionnement des réseaux HT et BT.

Le coût de l'énergie est légèrement plus élevé pour la serre capteur que pour la serre témoin (+2%) malgré les 25% d'économie d'énergie de la serre capteur. Ceci s'explique par le prix moyen très élevé de l'électricité en hiver (6.7 c€/kWh) par rapport au prix hiver du gaz. A noter que si l'on utilise les prix moyen annuel du gaz et de l'électricité (sans distinction des tarifs hiver et été), le coût énergétique de la serre capteur (9.7 k€/m²/an) devient plus faible que celui de la serre témoin (10.1 k€/m²/an), soit un gain économique d'environ 4% pour la serre capteur. Au total, cela représente une économie de 351 €/an de la facture énergétique. Ces deux estimations du coût énergétique total montrent que **le tarif d'électricité vert EJP n'est peut-être pas adapté au fonctionnement de la serre capteur dont les pics de consommation peuvent atteindre près de 50 kW/m² durant les mois de janvier et février.**

En général, les serristes ont la possibilité de négocier le contrat d'énergie et de choisir l'option tarifaire la plus intéressante. Par la suite de l'analyse économique, les prix annuel moyen sont appliqués pour rendre compte de l'économie d'énergie réalisée. Une analyse de sensibilité sur les prix d'énergie permettra de connaître les prix minimaux aux delà desquels la géothermie restera économiquement rentable.

5.2.4. Coût global

A partir des hypothèses économiques considérées, **le coût global annuel de la serre capteur d'énergie (investissement, entretien et énergie) est évalué à 41.6 €/m²/an contre seulement de 22.4 €/m²/an pour la serre témoin.** Cette différence de plus de 56% s'explique par le coût d'investissement plus important pour la serre capteur. Les coûts d'entretien et de renouvellement étant plus au moins proportionnels au coût d'investissement, ils sont logiquement aussi plus important pour la solution géothermique. L'illustration suivante montre la répartition du coût global pour chacune des serres.

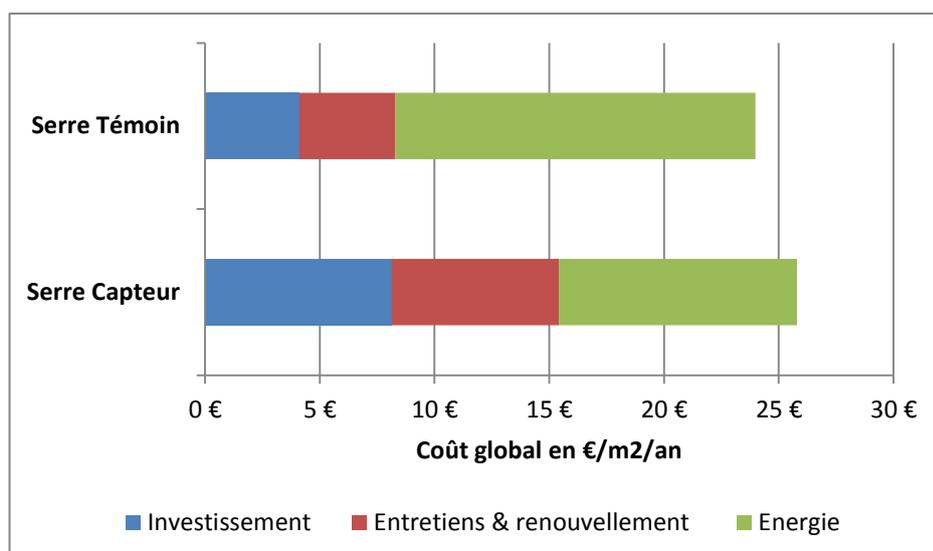


Illustration 45 : Comparaison du coût annuel global pour les deux solutions énergétiques

Le coût de revient de production de la chaleur (hors refroidissement) est de l'ordre de 0.21 €/m²/an pour la serre capteur d'énergie (+0.09 €/m²/an avec le refroidissement), alors que celui de la serre témoin est estimé à seulement 0.06 €/m²/an. **Le coût de revient de la solution géothermique (froid et chaud) est 5 fois plus élevé que la solution classique (chaud uniquement).** Du point de vue du critère du coût de revient de la chaleur (coût global/ kWh produits), la solution géothermique n'est pas intéressante pour le chauffage de la serre. Cependant, ce constat doit être relativisé car le système de chauffage de la serre témoin, équipé en réseau BT et HT, permet déjà de réaliser des économies d'énergie importante par rapport à une installation classique avec un seul réseau. Le chauffage local en double réseaux permet d'atteindre jusqu'à 40% d'économie d'énergie.

Par la suite, il est aussi tenu compte des bénéfices environnementaux et agronomiques pour évaluer de la solution géothermique d'un point de vue économique en mobilisant d'autres critères que l'économie d'énergie.

5.3. BILAN ENVIRONMENTAL ET AGRONOMIQUE

5.3.1. Bilan environnemental

Le bilan environnemental consiste à comparer les émissions de gaz à effet de serre (carbone ou CO₂) des deux serres. Deux composantes de l'effet de serre sont prises en compte dans ce bilan :

Effet de serre direct (ESD)

Pour évaluer les émissions directes de CO₂ dues à la consommation énergétique, les facteurs d'émissions préconisés par l'ADEME 2010 (Base Carbone[®] V6)⁸ sont appliqués :

- 0.048 kg équivalent CO₂ par kWh d'électricité
- 0.231 kg équivalent CO₂ par kWh de gaz

La combinaison des facteurs d'émission et des consommations d'électricité et de gaz permet d'estimer les émissions de chaque serre, exprimées en tonne équivalent de CO₂.

Effet de serre direct (ESI)

Il est dû aux fuites de fluide frigorigène de la PAC de la serre capteur. L'impact indirect du fluide sur l'effet de serre dépend du fluide utilisé et de son indice d'impact. Aux pertes de fluide, estimées à 3%, s'ajoute l'impact de sa récupération en fin de vie de la PAC (75% de taux de récupération). L'indice d'impact est estimé à 15.6 kg équivalent CO₂ par kW de puissance PAC.

⁸ Cf. <http://www.basecarbone.fr/>

L'illustration 46 présente le résultat du bilan des émissions de CO₂ pour les deux serres. Ce bilan ne prend pas en compte le CO₂ liquide injecté dans les serres qui est nécessaire à la croissance des plantes. Globalement, la serre capteur engendre des émissions de CO₂ significativement moindre que la serre témoin. **La quantité d'émission évitée grâce à l'économie d'énergie (-55 MWh) de la solution géothermique est de l'ordre de 34.3 tonnes équ. CO₂.**

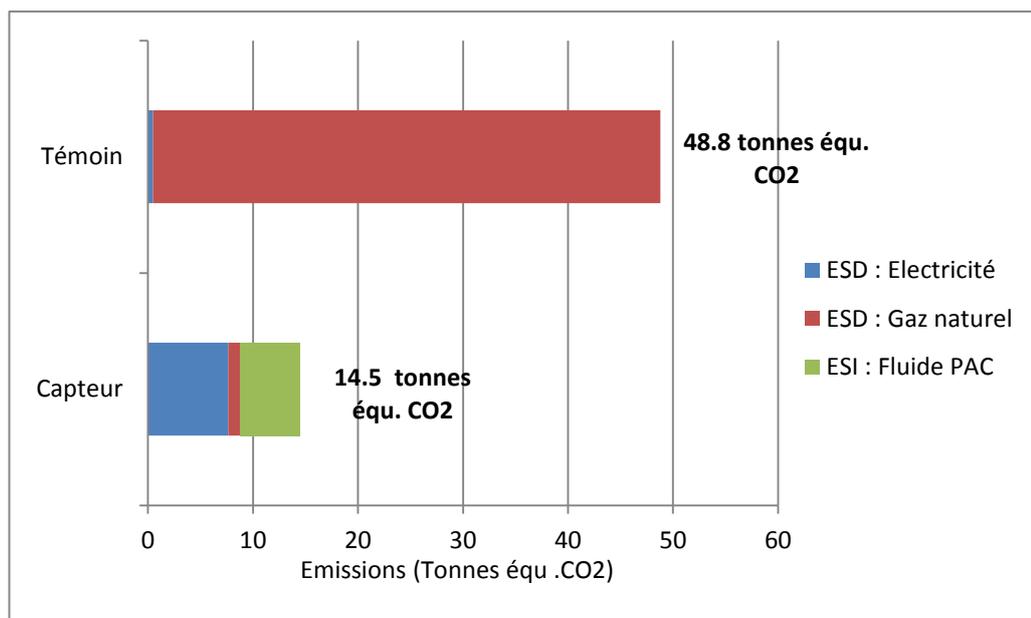


Illustration 46 : Bilan des émissions de CO₂ pour les deux serres

Le bilan environnemental positif de la serre capteur peut être monétarisé en considérant une hypothèse du « prix du CO₂ » en référence au système des quotas en vigueur sur le marché du CO₂. Ce prix est très variable et dépend du volume des transactions effectif sur le marché⁹. Pour les quotas attribués sur la période 2008-2012, le prix moyen observé est de l'ordre de 30 €/tonne de CO₂.

Sous cette hypothèse basse, **l'intérêt environnemental de la conversion d'une serre en énergie géothermique est économiquement évalué à 1030 €/an.**

5.3.2. Bilan agronomique

La culture expérimentale est identique dans les deux serres (tomate variété Climberley®). L'expérimentation conduite par le Ctifl a montré que les performances

⁹ Voir aussi : Conseil Economique pour le Développement durable (2010) Prix du quota de CO₂ et taxe carbone : quelques éléments de cadrage. Références économiques N°12 (2010). <http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

agronomiques de la serre capteur sont meilleures que celles de la serre témoin. Pour la campagne 2011-2012, ces performances sont rappelées ci-dessous :

Rendement agronomique

Le rendement de production de la serre capteur est de 54.8 kg/m² contre 45.7 kg/m² pour la serre témoin, soit une amélioration du rendement de 16.5 %. Avec l'hypothèse d'un prix de la tomate à 1 €/kg, **le gain économique est de 9 €/m²** (8688 € par an sur la totalité de la production).

Ferti-irrigation et récupération des condensats

Le volume d'eau d'irrigation apporté aux plantes dans la serre capteur (1195 m³) est inférieur à celui utilisé pour la serre témoin (1536 m³/an), soit un volume d'eau économisé de 341 m³ (-28.5 %). A cela s'ajoute le volume des condensats récupérés au niveau des CTA et réutilisé pour l'irrigation de la serre capteur. Il est évalué 101 m³. Au total, le dispositif de la serre capteur a permis de réaliser une économie d'eau d'environ 442 m³ sur l'ensemble de l'année culturale. Le prix du mètre cube d'eau d'irrigation dans la région de l'implémentation de la serre expérimentale varie entre 0.036 €/m³ (eau de forage agricole) et 0.20 €/m³ (prix de vente d'eau de BRL). Si l'on considère un prix moyen majoré de 10% pour rendre la qualité de l'eau compatible avec l'irrigation sous serres (faible conductivité) de 0.13 €/m³, **l'économie d'eau est de 57 € (6 c€/m² de culture)**.

Engrais

Les quantités d'engrais apportées aux plantes dans la serre capteur sont aussi inférieures à celles pour la serre témoin. La comptabilisation des principaux éléments d'engrais apportés (N, S Cl, P, P, K, Ca, Mg) durant trois campagnes d'essai a montré une économie d'environ 121 kg d'engrais (-9.9%), tous éléments confondus. Considérant un prix d'engrais moyen de 900 €/tonne, **le gain économique réalisé pour la serre capteur est alors de 109 €**.

Injection CO₂

Les deux serres sont équipées d'un dispositif de contrôle et d'injection de CO₂ liquide. L'enrichissement de serre par le CO₂ est rendu nécessaire pour la photo-respiration des plants de tomates. En raison d'une meilleure gestion du climat dans une serre fermé, les quantités de CO₂ injectées dans la serre capteur (environ 89 tonnes) sont moindres que celles injectées dans la serre témoin (environ 103 tonnes), soit une réduction de 14 tonnes (-15.7%). Avec un prix d'achat du CO₂ liquide à 120 €/tonne, **le gain économique dû la réduction de l'injection de CO₂ est de 1680 € pour l'année 2012**.

Au total, le gain agro-économique de la serre capteur par rapport à la serre témoin est de 10.5 k€, soit 10.9 €/m² (Illustration 47).

Critères de performance agronomiques	Performance			Hypothèse de prix		Gain économique en €/an
	en %	en quantité	unité	Prix	unité	
Rendement agronomique	16.5%	8688	Kg	1	€/kg	8 688 €
Ferti-irrigation et condensats	-28.5%	-442	m3	0.036	€/m3	16 €
Engrais	-9.9%	-121	kg	900	€/tonne	109 €
Injection de CO2	-15.7%	-14	tonnes	120	€/tonne	1 680 €
Total des gains agro-économiques						10 493 €

Illustration 47 : Bilan des performances agro-économiques de la serre capteur d'énergie par rapport à la serre témoin

5.4. BILAN ECONOMIQUE GLOBAL ET ANALYSE DE SENSIBILITE

Le bilan économique global est effectué en comparant les surcoûts d'investissement et d'entretien de la serre capteur avec les gains (ou bénéfices) valorisés monétairement des trois bilans (Illustration 48) :

- énergétique (25% d'économie d'énergie valorisés aux prix moyens d'électricité et de gaz, à 351 €/an) ;
- environnemental (réduction des émissions de 34.3 tonnes équ. CO₂, valorisée au prix de marche du CO₂ à 1030 €/an)
- agronomique (amélioration des performances agro-économiques, valorisée à 10.5 k€/an).

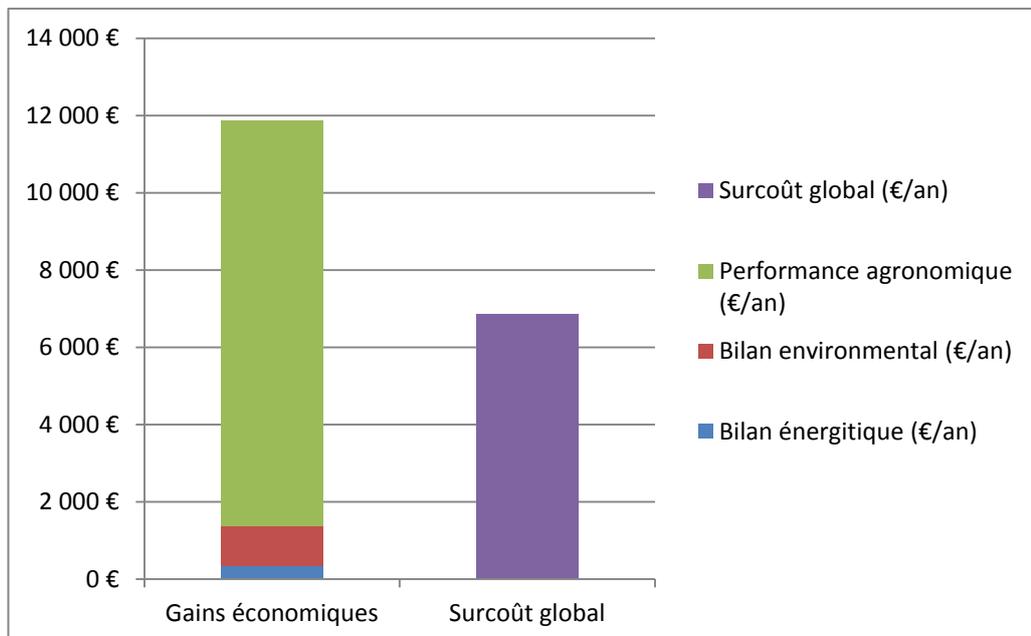


Illustration 48 : Bilan économique annuel de la serre capteur

5.4.1. Indicateurs de rentabilité économique

Pour évaluer l'intérêt économique de la solution géothermique, trois indicateurs économiques usuels sont calculés :

Valeur actuelle nette (VAN)

La VAN mesure la viabilité absolue d'un projet. Elle consiste à calculer le cumul des gains annuels actualisés (noté G_t) sur la durée de vie du projet (25 ans) en soustrayant l'investissement initial (noté I). Si les gains sont constants (gains annuels moyens, G), la VAN est alors déduite de la formule suivante :

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^{25} \frac{G_t}{(1+i)^t} = G \frac{i(1+i)^{25}}{(1+i)^{25} - 1}$$

Taux de rentabilité interne (TRI)

Le taux de rentabilité interne (TRI) est un indicateur intrinsèque d'évaluation de projet. Sa valeur est égale au taux d'actualisation i^* pour lequel la valeur actuelle nette est nulle :

$$TRI = i^* \text{ tel que } VAN = 0$$

Une opération sera économiquement rentable si le TRI est supérieur au taux de rendement des placements financiers (taux de rendement du capital).

Temps de retour sur investissement (TdR)

C'est le nombre d'années nécessaire pour que le cumul des gains annuels actualisés équilibre le surcoût d'investissement et d'entretien. Une opération est d'autant plus avantageuse que son TdR est faible.

La VAN de la serre capteur est strictement positive et égale à 78.8 k€ sur 25 ans pour un taux d'actualisation de 4%. Le TRI est de 14.2% et le TdR actualisé est évalué à 9 ans (Illustration 49). Ces valeurs rendent économiquement acceptable l'opération de conversion d'une serre classique en serre semi-fermée chauffée et climatisée à l'aide d'une PAC sur nappe, dans des conditions équivalentes au projet de la serre expérimentale capteur d'énergie.

Année	Surcoûts (€/an)	Gains moyens (€/an)	Cumul surcoûts actualisés (€)	Cumul gains actualisés (€)
0 (Inv.)	60 314	0	60 314	0
1	2 982	11 875	63 181	11 418
2	2 982	11 875	65 938	22 396
3	2 982	11 875	68 589	32 953
4	2 982	11 875	71 138	43 103
5	2 982	11 875	73 589	52 863
6	2 982	11 875	75 945	62 248
7	2 982	11 875	78 212	71 272
8	2 982	11 875	80 390	79 948
TdR = 9	2 982	11 875	82 485	88 291
10	2 982	11 875	84 500	96 313
11	2 982	11 875	86 437	104 026
12	2 982	11 875	88 299	111 443
13	2 982	11 875	90 090	118 575
14	2 982	11 875	91 812	125 432
15	2 982	11 875	93 468	132 025
16	2 982	11 875	95 060	138 365
17	2 982	11 875	96 591	144 461
18	2 982	11 875	98 063	150 323
19	2 982	11 875	99 478	155 959
20	2 982	11 875	100 839	161 379
21	2 982	11 875	102 148	166 590
22	2 982	11 875	103 406	171 600
23	2 982	11 875	104 616	176 418
24	2 982	11 875	105 779	181 050
25	2 982	11 875	106 898	185 505
			VAN=	78 607 €

Illustration 49 : Evaluation de la VAN et du TdR

5.4.2. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité des indicateurs économiques aux prix de l'énergie (gaz et électricité) est réalisée. Les taux annuels moyens d'accroissement des tarifs énergétiques sont respectivement de 2% pour l'électricité et de 5% pour le gaz naturel. Ces taux d'évolution des prix sont basés sur les hypothèses et tendances observées depuis 2005.

Les illustrations suivantes permettent d'évaluer la sensibilité des indicateurs VAN et TdR à l'évolution des prix de gaz et de l'électricité. Elles montrent clairement que la

rentabilité d'une solution type serre capteur d'énergie est dépendante de l'évolution des tarifs énergétiques mais qu'elle est beaucoup plus influencée par l'évolution du prix du gaz naturel. Ainsi la VAN pourrait être triplée (> 200 k€) si le prix du gaz augmente de 25% (8.65 c€/kWh) et que le prix de l'électricité reste dans une fourchette de 0 à 6% d'augmentation annuelle. Dans ce cas, le TdR est de seulement 4 ans. A l'inverse, la VAN diminue si le prix de l'électricité augmente plus rapidement que celui du gaz. Par exemple, si le prix du gaz reste stable (0% d'augmentation), la VAN diminue (<78.6 k€) dès que le prix de l'électricité augmente. Plus globalement, les augmentations du prix de l'électricité sont défavorables à la solution géothermique, alors que celles du gaz lui sont favorables.

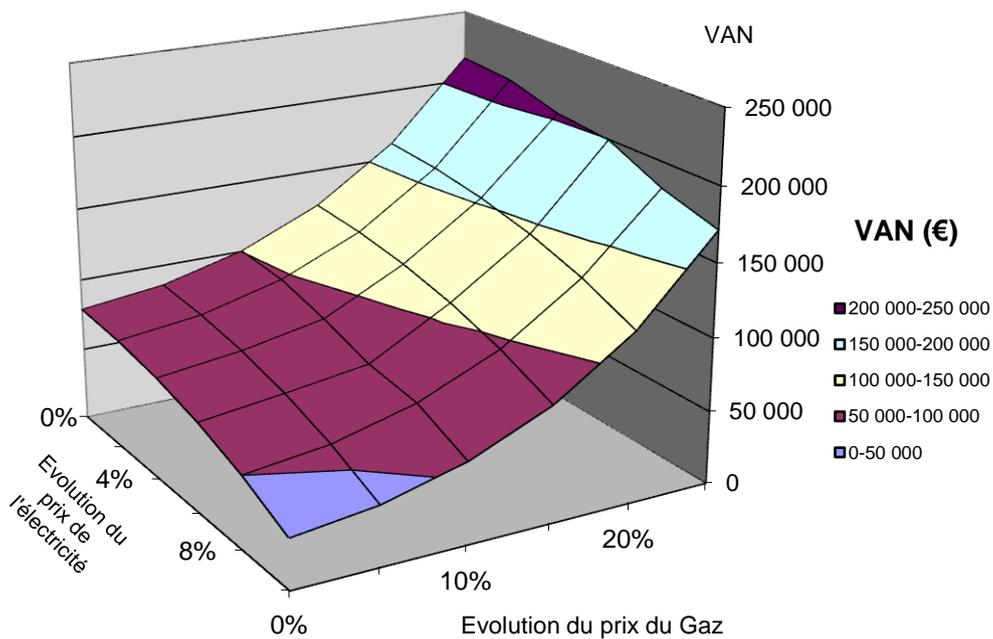


Illustration 50 : Evolution de la VAN en fonction de l'augmentation du prix de l'énergie

Electricité	Gaz					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
0%	9	8	7	6	5	4
2%	9	8	7	6	5	4
4%	9	9	8	7	5	4
6%	10	9	8	7	6	4
8%	11	10	9	8	6	5
10%	13	12	11	9	7	5

Illustration 51 : Evolution du TdR en fonction de l'augmentation du prix de l'énergie

5.5. CONCLUSION SUR L'ÉVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA SERRE CAPTEUR

L'évaluation technico-économique a pour but de fournir des indicateurs pour évaluer l'utilisation d'un dispositif de géothermie sur nappe (comprenant une PAC eau/eau et une batterie de CTA) pour chauffer et climatiser une serre maraichère, en comparaison à une serre classique (chauffée au gaz naturel et refroidie par simple ouverture du toit). Compte-tenu des hypothèses et incertitudes associées aux calculs proposés, les résultats de l'évaluation sont à considérer en termes d'ordre de grandeur plus qu'en valeurs absolues. D'autre part, les résultats expérimentaux ayant montré que le stockage de chaleur dans l'aquifère était inefficace compte-tenu du contexte hydrogéologique (voir chapitre3), seul le dispositif de chauffage/climatisation a été évalué, sans tenir compte des aménagements spécifiques liés au stockage de chaleur en aquifère.

Le dispositif expérimental mis en place sur le site du CTIFL à Balandran a permis de mesurer les besoins énergétiques des deux types de serre (capteur et témoin). Lors de la campagne culturale 2011-2012, l'apport énergétique nécessaire pour maintenir la température intérieure de la serre entre 27 °C et 30°C, s'est ainsi élevé à 125 kWh/m² en mode chauffage et de 303 kWh/m² en mode refroidissement pour la serre capteur, et à 218 kWh/m² pour la serre témoin (chauffage uniquement). La puissance maximale nécessaire pour satisfaire les besoins de la serre était de 554 W/m² (refroidissement) pour la serre capteur contre 187 W/m² pour la serre témoin. La consommation énergétique de la serre capteur est essentiellement (97%) de l'électricité alors que la serre témoin consomme essentiellement du gaz (96%). Les données expérimentales montrent que la solution de chauffage/climatisation ayant recours à la géothermie sur aquifère permet une économie d'énergie annuelle d'environ 25%. Mais, compte-tenu des coûts respectifs du gaz et de l'électricité avec les options tarifaires choisies par le CTIFL, le coût de l'énergie est légèrement plus élevé pour la serre capteur que pour la serre témoin (+2%). Au passage, on constate que le tarif d'électricité vert EJP s'avère peu adapté au fonctionnement de la serre capteur dont les pics de consommation peuvent atteindre près de 50 kW/m² durant les mois de janvier et février.

Le coût d'investissement total du système de chauffage/refroidissement de la serre capteur est estimé à 122 k€ HT. La part de l'investissement PAC représente près de 42% du coût total, suivi par le coût des CTA (29%). Le coût des forages et leurs équipements hors raccordements, ne représente que 12% du coût d'investissement total. Le coût total du système de chauffage de la serre témoin est estimé quant à lui à 61.7 k€ HT. Finalement, le coût d'investissement du système de chauffage/refroidissement de la serre capteur représente un peu plus du double de celui de la serre témoin. Les coûts d'entretien de la serre capteur sont également plus importants (de l'ordre de +43% par rapport à la serre témoin).

A partir des hypothèses économiques considérées, la serre capteur d'énergie (investissement, entretien et énergie) représente un surcoût global annuel de 56% par rapport à la serre témoin. Mais elle présente des bénéfices agronomiques et environnementaux positifs. Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre évitées grâce à l'économie d'énergie sont de l'ordre de 34.3 tonnes équ. CO₂ par an, ce qui valorisé au

prix du marché, représente de l'ordre de 1030 €/an. De plus, la serre capteur est une serre semi-fermée, ce qui est rendu possible grâce à l'existence du dispositif de refroidissement apporté par la géothermie. L'optimisation des pratiques culturales dans la serre semi-fermée par rapport à une serre classique (meilleure contrôle du climat) permet une augmentation du rendement agricole de 16.5%, ainsi qu'une diminution des apports d'eau d'irrigation, d'engrais et de CO₂ liquide. Au total, on estime que le gain agro-économique total de la serre capteur par rapport à la serre témoin est de 10.5 €/m².

Finalement, le calcul de quelques indicateurs de rentabilité économique montre que l'opération de conversion d'une serre classique en serre semi-fermée chauffée et climatisée à l'aide d'une PAC sur nappe (dans des conditions équivalentes à celles du projet expérimental) est économiquement acceptable. En effet, la Valeur Actuelle Nette de la serre capteur est strictement positive et estimée à 78.8 k€ sur 25 ans. Le Taux de Rentabilité Interne est de 14.2% et le Temps de Retour sur Investissement est évalué à 9 ans. Une analyse de sensibilité montre que ces indicateurs sont particulièrement liés au prix de l'énergie, les augmentations du prix de l'électricité étant défavorables à la solution géothermique, alors que celles du gaz lui sont favorables.

6. Bilan du projet

Lors de la première phase du projet, la caractérisation hydrogéologique du site du CTIFL de Balandran avait mis en évidence la difficulté d'atteindre une efficacité intéressante du stockage thermique en raison de la forte vitesse d'écoulement de la nappe. La serre expérimentale, qui visait à répondre à d'autres objectifs scientifiques a cependant été construite et mise en œuvre. Les deux ans et demi de suivi du site expérimental ont certes confirmé l'impossibilité de stocker de la chaleur sur plusieurs mois dans l'aquifère, mais ils ont aussi **permis l'acquisition de nombreuses données inédites**. Ainsi le suivi de l'évolution de la température de l'eau de l'aquifère en différents points et à différentes profondeurs a fourni des données expérimentales qui ont permis :

- l'application d'un modèle théorique de conduction de chaleur de la surface vers le sous-sol en conditions naturelles ;
- la comparaison de résultats numériques à des données réelles qui a mis en évidence les lacunes en termes de caractérisation (ou prise en compte dans la modélisation) des conditions limites et propriétés thermiques de l'aquifère.

De façon plus indirecte, le travail réalisé en laboratoire pour le suivi bactériologique de l'eau de l'aquifère a nécessité un **développement méthodologique pour l'analyse de la diversité bactérienne** (méthode FISH).

Le projet « Serre Capteur d'énergie » a constitué la première expérience française grandeur semi-réelle de chauffage/climatisation d'une serre agricole utilisant un doublet réversible sur nappe avec possibilité de stockage de chaleur. En cela, son retour d'expérience et les connaissances acquises sur la gestion climatique d'une serre en utilisant des échangeurs air/eau sont précieux pour les exploitants serristes qui souhaiteraient adapter leurs dispositifs de chauffage ou climatiser leurs serres en utilisant l'eau souterraine.

Le projet a de plus permis la **constitution de coûts de référence unitaires pour les études de préfaisabilité technique et-économique** de futurs projets opérationnels. Il apparaît que dans tous les cas, une **étude hydrogéologique** permettant d'évaluer les propriétés hydrodynamiques principales de l'aquifère est **indispensable**. L'étude de préfaisabilité peut également s'appuyer sur une modélisation simplifiée des transferts de chaleur dans l'aquifère visant à estimer l'efficacité du stockage. Il est recommandé que cette étude **prenne en compte de façon réaliste les cycles d'injection/pompage de chaleur dans l'aquifère**. En effet, l'expérimentation menée à Balandran a montré que, le dispositif étant piloté par les besoins de régulation thermique de la serre, son fonctionnement est intermittent et très éloigné du cas idéal souvent simulé d'une injection de chaleur continue pendant l'été suivi d'une injection continue de froid pendant l'hiver. Le **suivi minimal** à mettre en place sur le site dépendra fortement de la nature du projet et de son contexte (hydrogéologie, qualité initiale de l'eau, présence de forages à proximité, etc.).

Si l'expérience menée à Balandran n'encourage pas l'utilisation de doublet géothermique réversible pour le chauffage et la climatisation de serres agricoles dans le cas d'écoulements souterrains rapides, elle apporte des éléments intéressants pour **promouvoir le rafraîchissement de serres semi-fermées et/ou le chauffage en utilisant une PAC sur nappe** (doublet géothermique non réversible). Par rapport à des solutions aérothermiques, ce dispositif bénéficie effectivement d'une moindre amplitude thermique intersaisonnière et du déphasage thermique naturel entre l'aquifère et l'air ambiant. Il est de plus sans impact (à court terme au moins) sur les propriétés chimiques et microbiologiques de l'aquifère, puisque la chaleur générée par la climatisation de la serre est rapidement dissipée dans l'aquifère. De plus, le calcul de quelques indicateurs de rentabilité économique a montré que l'opération de conversion d'une serre classique en serre semi-fermée chauffée et climatisée à l'aide d'une PAC sur nappe est économiquement acceptable. Dans un contexte d'évolution croissante des tarifs des énergies fossiles, la solution géothermique pour les serres maraichères présente des avantages spécifiques permettant d'améliorer les performances agronomiques, environnementales et économiques.

7. Références

ADEME (2012). Mise en place de pompe(s) à chaleur géothermique(s) sur aquifère superficiel ou sur champ de sondes : Cahier des charges type étude de faisabilité. ADEME Ile de France Version 1.0 du 01/02/2012 (http://ile-de-france.ademe.fr/IMG/pdf/Cdc_etude_faisa_PAC_v1_01-02-2012.pdf).

Blaise M., Marchal J.P. (2006) – Description des aquifères du département du Gard. Rapport BRGM/RP-54850-FR. 49 p., 1 annexe, 6 ill..

Bundschuh, J., 1993. Modeling annual variations of spring and groundwater temperatures associated with shallow aquifer systems. **J. Hydrol.** **142**, 427–444.

CTIFL (2012) Projet serre capteur d'énergie – Rapport final, nov. 2012.

Courtois N., Baltassat J.M., Battaglia-Brunet F., Dewandel B., Le Strat P., Noël Y., Pettenati M., avec la collaboration de **P. Auger, C. Bény, J. Cubizolles, J.L. Izac, J. Lions, G. Richalet** (2008) - Projet « Serre capteur d'énergie » - Application du stockage d'énergie thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères. Phase 1 : étude préalable des sites. Rapport final. Rapport BRGM/RP-56641-FR, 256 pp., 123 ill. 10 ann.

Courtois N., Marchal JP., Menjot A., Monnot P., Noël Y., Petit V., Thiéry D., Grisey A. (Ctifl), Grasselly D. (Ctifl) (2007) - Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de pré-faisabilité. Rapport BRGM/RP-55481-FR, 288 pp., 94 ill., 8 ann..

Gringarten A.C. et Sauty J.P. (1976) Influence de la réinjection sur la température d'un réservoir géothermique utilisé pour le chauffage urbain. Rapport BRGM 76SGN553GTH.

Jeannot Y. (2011) Transferts Thermiques. Cours de l'Ecole des Mines de Nancy, 2eme année.

Lanini S., Marechal JC, Vigouroux P.(2011). Projet « Serre Capteur d'énergie », Phase II : conception et équipement de la serre expérimentale du CTIFL de Balandran. Rapport BRGM/RP-59521-FR. 65 p., 63 ill.

Lee J.Y., Hahn J.S. (2006) Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: Implications for heat pumps. *Journal of Hydrology* (2006) 329, 514– 526

Powaga E. (2010) Rapport de stage de fin d'études : Suivi d'expérimentation d'une « Serre Capteur d'Energie » Polytech' Marseille / CTIFL.

Annexe 1

Données pour les modèles géologiques et hydrogéologiques

Descriptif des ouvrages BSS aux alentours du site

ID	X	Y	Z	Prof deb	Prof Fin	LITHO
09656X0085	769 009.00	1 863 679.00	80.00	-	8.60	PUITS
09656X0085				8.60	14.00	ARGILE JAUNE MOLLE
09656X0085				14.00	23.00	ARGILE BLEUE
09656X0085				23.00	43.50	NON CAROTTE
09656X0085				43.50	108.00	ARGILE GRISE
09656X0085				108.00	121.85	ARGILE BLEUE TENDRE
09656X0085				121.85	127.55	ARGILE BLEUE TRES DURE
09656X0085				127.55	141.25	ARGILE BLEUE TENDRE
09656X0085				141.25	160.20	ARGILE BLEUE TRES DURE
09656X0085				160.20	160.35	COUCHE EXTREMEMENT DURE
09656X0085				160.35	167.80	ARGILE BLEUE A COUCHES DURES
09656X0085				167.80	176.65	ARGILE BLEU-GRIS A COUCHES TRES DURES
09656X0085				176.65	203.00	TERRAIN TRES ARGILEUX GRIS TENDRE - FORAGE SEC
09656X0074	769 961.00	1 862 508.00	70.00	-	3.00	ARGILE ROUGE AVEC GROS GALETS ENROBES
09656X0074				3.00	5.30	ARGILE ROUGE AVEC GROS GALETS ENROBES NE PERMETTANT PAS LA PRISE D'ECHANTILLONS
09656X0074				5.30	7.10	CONGLOMERAT (GALETS TRES SERRES AVEC SABLE)
09656X0074				7.10	9.00	COUCHES D'ARGILE AVEC COUCHES DE SABLE ET GALETS COMPACTS
09656X0074				9.00	11.80	COUCHES D'ARGILE AVEC COUCHES SABLEUSES PAR INTERMITTENCE
09656X0074				11.80	15.00	SABLE ET GRAVIER TRES COMPACT
09656X0204	770 003.00	1 864 246.00	66.50	-	12.00	Non défini
09656X0204				12.00	12.20	ARGILES ATTEINTES A 12 M
09656X0073	770 391.00	1 863 410.00	51.63	-	1.60	TERRE VEGETALE
09656X0073				1.60	3.10	GRAVIERS ET SABLE ARGILEUX
09656X0073				3.10	10.00	SABLE ET GROS GALETS
09656X0207	770 518.00	1 863 673.00	58.10	-	13.00	GRAVIERS PLUS HOMOGENES
09656X0207				13.00	14.00	GRAVIERS PLUS HOMOGENES
09656X0207				14.00	14.20	ARGILES A 14 M, SOUS LE TUBAGE ACIER
09656X0198	771 333.00	1 862 559.00	63.00	-	3.50	LIMONS ARGILO-CAILLOUTEUX ROUGEATRES
09656X0198				3.50	7.50	ARGILES LIMONEUSES ROUGEATRES
09656X0198				7.50	21.50	GRAVIERS ET GALETS DANS UNE MATRICE SABLEUSE JAUNE
09656X0198				21.50	23.50	ARGILES JAUNES A GRAVIERS
09656X0210	771 473.00	1 864 069.00	51.00	-	13.00	Non défini
09656X0210				13.00	13.20	ARGILES RENCONTREES A 13 M



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

BRGM Languedoc-Roussillon
1039, rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80