

# 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

Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran, et évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines

Rapport d'avancement

25 juillet 2008

Rapport BRGM/RP-56508-FR

Étude réalisée par le Brgm avec le soutien financier de l'ADEME (Convention n°07 74 C 0060)

Coordination technique : Cédric GARNIER, Département Procédés Industriels et Agricoles, ADEME Angers.



# PROJET « SERRE CAPTEUR D'ENERGIE » - APPLICATION DU STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE EN AQUIFERE AU CHAUFFAGE ET AU REFROIDISSEMENT DE SERRES MARAICHERES

## PHASE 1 : ETUDE PREALABLE DES SITES

Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran, et évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines.

Rapport d'avancement

**BRGM/RP-56508-FR**

Juillet 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets de Recherche du BRGM 2007 PDR07LRO02

**N. Courtois, F. Battaglia-Brunet, M. Pettenati**

Avec la collaboration de

**P. Auger, C. Beni, J. Cubizolles, B. Dewandel, P. Le Strat, J. Lions, Y. Noël**

### Vérificateur

Nom : Hervé Lesueur  
Date : 11/08/2008

### Approbateur

Nom : Marc Audibert  
Date : 28/08/2008

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 9001:2000

#### L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

**Copyright** : Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Mots clés : Stockage d'énergie thermique en aquifère, serres maraîchères, chauffage, refroidissement, modélisation numérique, impact sur la qualité des eaux souterraines, physico-chimie, microbiologie.

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

Courtois N., Battaglia-brunet F., Pettenati M., avec la collaboration de P. Auger, C. Beni, J. Cubizolles, B. Dewandel, P. Le Strat, J. Lions, Y. Noël (2008) - Projet « Serre capteur d'énergie » - Application du stockage d'énergie thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraichères. Phase 1 : étude préalable des sites. Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran, et évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-56508-FR, 46 pp., 39 fig., 5 tab., 3 ann.

## Sommaire

1.	Introduction : contexte et objectifs de l'étude.....	1
1.1	Contexte .....	1
1.2	Objectifs.....	1
1.2.1	Objectif du programme de recherche « Serre capteur d'énergie » .....	1
1.2.2	Objectifs de la présente étude.....	2
2.	Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran (Gard).....	3
2.1	Introduction .....	3
2.2	Caractérisation du contexte hydrogéologique du site .....	3
2.2.1	Quelques notions d'hydrogéologie.....	3
2.2.2	Caractéristiques de l'aquifère du Ctifl de Balandran.....	7
2.2.3	Carte piézométrique.....	9
2.2.4	Essais de pompage.....	11
2.2.5	Conclusions .....	12
2.3	Modélisation numérique de l'écoulement et des transferts thermiques .....	14
2.3.1	Paramètres et configurations utilisés .....	14
2.3.2	Résultats.....	19
2.4	Conclusions .....	22
3.	Evaluation des impacts potentiels du stockage d'énergie thermique en aquifère sur la qualité des eaux souterraines .....	24
3.1	Introduction .....	24
3.1.1	Rapide état de l'art.....	24
3.1.2	Intérêts, objectifs et limites de l'étude proposée.....	24
3.2	Evaluation des impacts potentiels liés à la microflore.....	25
3.2.1	Contexte .....	25
3.2.2	Méthodologie .....	25
3.2.3	Résultats.....	27
3.3	Evaluation des impacts potentiels sur la qualité physico-chimique .....	34
3.3.1	Méthodologie .....	34
3.3.2	Spéciation de l'état initial des eaux de nappe de la Crau et du Ctifl de Balandran .....	34
3.3.3	Simulation de la variation de température sur la stabilité des minéraux : sites de la Crau et du Ctifl de Balandran .....	36
3.3.4	Conclusions .....	41
4.	Conclusions et perspectives .....	41
5.	Bibliographie .....	41

## Liste des figures :

Figure 1 - Principe du stockage inter-saisonnier d'énergie thermique en aquifère .....	1
Figure 2 - Différents types de nappe .....	4
Figure 3 - Exemple de carte piézométrique .....	5
Figure 4 - Localisation du site du Ctifl de Balandran .....	7
Figure 5 - Suivi piézométrique sur le puits n°09656X0066/6N49 du Ctifl de Balandran (historique incomplet portant sur 33 années) .....	8
Figure 6 - Localisation des 9 ouvrages réalisés sur le site du Ctifl de Balandran en août 2007.....	8
Figure 7 - Réalisation de forage sur le site du Ctifl de Balandran .....	9
Figure 8 - Carte piézométrique du site de Balandran établie le 8 octobre 2007 .....	10
Figure 9 - Essai par paliers de débits réalisé au forage n°9 .....	11
Figure 10 - Interprétation de l'essai de pompage par paliers de débits.....	12
Figure 11 - Simulation des rabattements au forage de pompage n°9 et au piézomètre d'observation n°8 ; modèle analytique choisi : Theis, logiciel d'interprétation : WinLSAPE (Brgm) .....	13
Figure 12 - Vue du modèle en coupe verticale.....	15
Figure 13 - Emplacement de la future serre expérimentale sur le site du Ctifl .....	17
Figure 14 - Configurations possibles sur le site du Ctifl de Balandran .....	18
Figure 15 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : températures.....	20
Figure 16 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : bilans thermiques au puits chaud .....	21
Figure 17 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : bilans thermiques au puits froid .....	22
Figure 18 - Températures simulées aux piézomètres de contrôle - Exemple en aval du puits froid, configuration n°1.....	23
Figure 19 - Flacons pénicilline de 50 ml remplis d'eaux prélevées sur les sites de la Crau et du Ctifl, incubés à 30°C .....	26
Figure 20 - Observation en épifluorescence sur filtre des bactéries colorées par la méthode DAPI. A : site du Ctifl, B : site de la Crau .....	28
Figure 21 - Particules isolées observées dans l'eau du Ctifl, à l'état initial.....	28

Figure 22 - Particule isolée d'oxyde de fer typiquement produit par la bactérie <i>Gallionella</i> , présente dans l'eau du Ctifl à l'état initial.....	29
Figure 23 - Observation et analyse au MEB des particules présentes dans l'eau de la Crau à l'état initial. A : observation générale du filtre (barre = 50 µm). B : cartographie de la silice. C : cartographie du calcium. ....	29
Figure 24 - Eau du Ctifl filtrée à 0,22µm puis incubée à A : 10°C et B : 30°C pendant 3 mois. Observation au MEB (barre = 200 µm). ....	30
Figure 25 - Eau de la Crau filtrée à 0,22µm puis incubée à A : 10°C et B : 30°C pendant 3 mois. Observation au MEB (barre = 200 µm).....	30
Figure 26 - Eau du Ctifl brute, incubée à 10°C. A : barre = 200 µm, B : barre = 20 µm.....	31
Figure 27 - Eau du Ctifl brute, incubée à 30°C. A : barre = 200 µm, B : barre = 10 µm.....	31
Figure 28 - Eau de la Crau brute, incubée à 10°C. A : barre = 200 µm ; B : barre = 50 µm.....	32
Figure 29 - Eau de la Crau brute, incubée à 10°C. Oxyde de fer produit par <i>Gallionella</i> . Barre = 5 µm.....	32
Figure 30 - Eau de la Crau brute, incubée à 30°C. A : barre = 200 µm ; B et C : barre = 20 µm. ....	33
Figure 31 - IS issus des spéciations des eaux de la Crau et de Balandran.....	35
Figure 32 - Impact de l'augmentation de la température sur la stabilité des minéraux et sur le pH des eaux de l'aquifère de la Crau et de Balandran.....	36
Figure 33 - Impact de la diminution de la température sur la stabilité des minéraux et sur le pH des eaux de l'aquifère de la Crau et de Balandran. ....	37
Figure 34 - Chemin réactionnel thermique : IS des carbonates et pH pour la solution de la CRAU avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	38
Figure 35 - Chemin réactionnel thermique : IS des carbonates et pH pour la solution de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	39
Figure 36 - Chemin réactionnel thermique : IS des silicates pour la solution de la Crau avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	40
Figure 37 - Chemin réactionnel thermique : IS des silicates pour la solution de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	40
Figure 38 - Chemin réactionnel thermique : Concentration en Calcium et en Silice des eaux de la Crau avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	40
Figure 39 - Chemin réactionnel thermique : Concentration en Calcium et en Silice des eaux de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C. ....	41

### Liste des tableaux :

Tableau 1 - Paramètres de modélisation utilisés.....	15
Tableau 2 - Analyse des paramètres microbiologiques effectuée par le laboratoire ip santé, environnement durables Méditerranée sur les eaux prélevées le 28/02/2008 .....	27
Tableau 3 - Dénombrement des germes totaux par la méthode de coloration DAPI.....	27
Tableau 4 - Valeurs d'alcalinités et de pH sur site et en fin d'incubation.....	33
Tableau 5 - Composition des solutions de la Crau et de Balandran .....	35

### Liste des annexes :

Annexe 1 Analyses géochimiques initiales de l'eau des deux sites (Ctifl et Crau) .....	41
Annexe 2 Mesures de terrain effectuées le 28/02/2008 .....	41
Annexe 3 Méthode de coloration au DAPI (Di Aminido Phenyl Indol) .....	41

## Résumé

L'étude dont le présent document constitue le premier rapport d'avancement, est intégrée dans la première phase intitulée « Etude préalable des sites » du projet « Serre capteur d'énergie ». L'objectif est d'évaluer la faisabilité du stockage d'énergie thermique en aquifère pour le chauffage et le refroidissement de serres maraîchères en vue de dimensionner des installations sur une serre expérimentale située en région Languedoc-Roussillon (Ctifl de Balandran), et deux serres pilotes situées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Crau et Aubignan).

La présente étude comporte trois parties, dont seules les deux premières sont abordées dans ce rapport d'avancement (la troisième sera intégrée dans le rapport final).

La **première partie** concerne l'acquisition de données nécessaires au dimensionnement du système de stockage thermique en aquifère qui sera installé sur le site du Ctifl de Balandran. Un jeu de simulations numériques des écoulements et des transferts thermiques, est ensuite effectué avec le logiciel MARTHE du Brgm.

Les simulations numériques pour le site du Ctifl de Balandran confirment les difficultés pour atteindre une efficacité intéressante du stockage thermique, en particulier avec des forages en fonctionnement réversible. Une configuration différente, avec des forages de pompage et d'injection séparés, montre néanmoins qu'une implantation étudiée des forages pourrait permettre d'améliorer les taux de récupération de l'énergie ; cela étant possible en essayant de compenser (au moins en partie) le déplacement des panaches thermiques dans l'écoulement, sous réserve que celui-ci ne soit pas trop important.

Les objectifs scientifiques du projet « Serre capteur d'énergie » sur le site de Balandran sont principalement axés sur l'instrumentation d'une serre expérimentale afin d'étudier le comportement des plantes, le climat, l'aéraulique de la serre, l'économie d'énergie et le gain de production. De plus, l'expérimentation servira aussi à comptabiliser l'énergie en sortie de serre qui pourra être stockée dans l'aquifère et qui serait théoriquement récupérable (avec des conditions de stockage meilleures). L'obtention d'un fort taux de récupération énergétique n'est donc pas primordiale dans ce cas particulier de la serre expérimentale.

Toutefois, ces tests en vraie grandeur sur la serre expérimentale sont justifiés par les faibles épaisseur et profondeur de l'aquifère qui autorisent cette recherche avec des coûts de forages relativement modérés (et des surcoûts admissibles pour des forages réversibles même si, à terme, ils ne servent que dans un seul sens). L'objet du système de stockage thermique sur ce site sera, a priori dans des conditions difficiles, de suivre in situ les évolutions des « panaches » thermiques créés par le stockage, et ainsi, de contribuer à affiner le paramétrage des modèles de simulations. Un suivi scientifique sera adapté en conséquence pour permettre de retirer un maximum d'informations de cette expérimentation.

La **deuxième partie** constitue une première évaluation des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité des eaux souterraines sur deux aspects : qualité physico-chimique et qualité microbiologique. En effet, les modifications de températures aux alentours des puits « chaud » et « froid » peuvent engendrer des modifications des équilibres chimiques, et des développements microbiologiques (microflore et bactéries).

En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux souterraines, les premiers résultats sont conformes aux tendances générales attendues et citées dans la bibliographie, en particulier une précipitation de carbonates au puits chaud et de silicates au puits froid.

Un impact des modifications de température sur la microflore a également été mis en évidence, en particulier dans le cas d'eaux chargées en éléments nutritifs (eau de la Crau). Il confirme l'intérêt de suivre son développement dans le cadre d'une installation.

## Glossaire

**Aquifère** : Du latin *aqua*, eau - et *fer* -, qui porte sur soi, apporte, produit. Corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée, suffisamment conducteur d'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Un aquifère peut comporter une zone non saturée.

**Autotrophie** : Désigne la capacité de certains organismes vivants à produire de la matière organique en procédant à la réduction de matière inorganique, par exemple le carbone (le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>) ou encore l'azote (sous forme de NO<sub>3</sub> ou de N<sub>2</sub>). Cela s'accompagne d'un prélèvement de sels minéraux dans le milieu (ions nitrate, phosphate, ...). Les organismes autotrophes au carbone sont donc capables de se développer dans un milieu ne contenant que du carbone minéral, contrairement à un organisme **hétérotrophe** qui devra se procurer des molécules organiques (idem pour l'azote).

**Coefficient d'emmagasinement** : Rapport du volume d'eau libérée (ou emmagasinée) par unité de surface d'un aquifère, à la variation de charge hydraulique correspondante. Il est généralement noté **S**, et est sans dimension. Dans un aquifère captif, ce paramètre est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et du milieu aquifère. Dans une nappe libre, il équivaut en pratique à la porosité efficace.

**Essai de pompage** : Opération qui consiste à pomper à débit(s) connu(s) pendant un temps donné dans un forage, et à mesurer l'influence de ce pompage sur le niveau piézométrique dans ce forage et dans des ouvrages voisins (piézomètres). L'interprétation du pompage d'essai permet ensuite de déduire les caractéristiques de l'aquifère en appliquant des formules appropriées sur les rabattements mesurés.

**Gradient hydraulique** : Différence de charge hydraulique entre deux points d'un aquifère, par unité de distance selon une direction donnée. Il s'exprime en m/m, ou plus fréquemment en m/km (%).

**Isopièze** : Courbe joignant, sur une carte, les points d'égale hauteur piézométrique d'une nappe d'eau souterraine.

**Nappe d'eau** (au sens de nappe d'eau souterraine) : Ensemble de l'eau présente dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

**Nappe captive** : Nappe, ou partie d'une nappe, sans surface libre, donc soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère, à couverture moins perméable, qui la contient.

**Nappe d'eau souterraine** : Ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

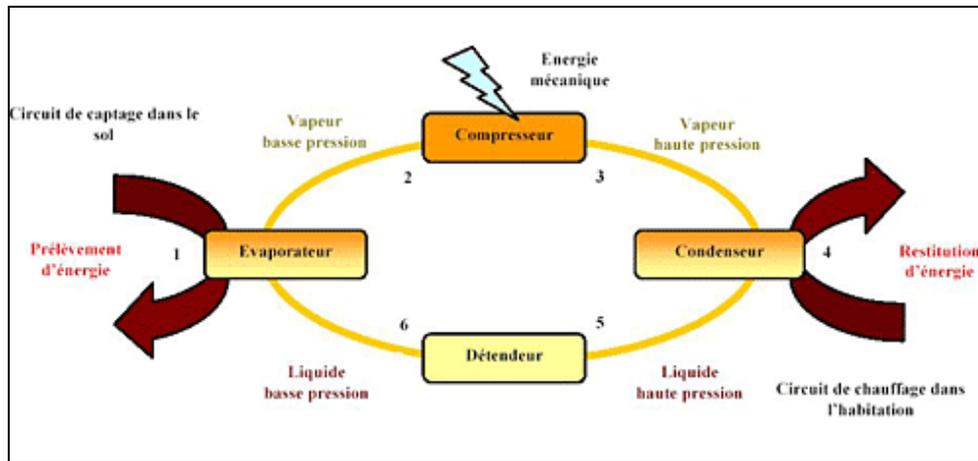
**Nappe libre** : Nappe à surface libre, comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée. Par opposition à la nappe captive, la nappe libre est soumise en tous points à la pression atmosphérique, et la surface piézométrique est inférieure au toit de l'aquifère.

**Niveau piézométrique** : Niveau libre de l'eau observé dans un forage rapporté à un niveau de référence (Nivellement Général de la France, niveau par rapport au sol, à la tête d'ouvrage, etc.).

**Perméabilité** : Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un champ de potentiel. Elle s'exprime pour l'eau par le coefficient de perméabilité au sens de Darcy, noté **K**. L'unité est le mètre par seconde.

**Piézomètre** : Dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un aquifère.

**Pompe à chaleur (PAC)** : Une pompe à chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie (chaleur) d'un milieu à basse température vers un milieu à plus haute température. Ce transfert nécessite un apport d'énergie, généralement électrique. L'intérêt du système réside dans le fait que l'énergie transférée pour les besoins de chauffage est supérieure à l'énergie nécessaire pour faire fonctionner le dispositif. Les pompes à chaleur disponibles sur le marché les plus courantes sont les pompes Eau/Eau, Air/Air, Eau/Air et Air/Eau. Cette opération nécessite de l'énergie électrique pour alimenter le compresseur et l'utilisation d'un fluide frigorigène dont le changement d'état (vapeur ou liquide) permet de transférer les calories (chaleur) captées dans le milieu extérieur vers l'intérieur. Les pompes à chaleur peuvent, à l'inverse, servir pour le refroidissement ou la climatisation, en inversant le circuit de fonctionnement.



© BRGM-im@gé

Source : <http://www.geothermie-perspectives.fr>

Schéma de fonctionnement d'une PAC à compression (cas de la production de chaleur)

**Porosité** : Propriété d'un milieu à comporter des vides, interconnectés ou non, exprimée par le rapport du volume des ces vides au volume total du milieu. Dans le milieu saturé, elle équivaut à la teneur en eau volumique. Nombre sans dimension, qui s'exprime généralement en pourcentage.

**Porosité efficace** : Rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet, à son volume total. Nombre sans dimension, qui s'exprime généralement en pourcentage.

**Rabattement** : Diminution de charge hydraulique déterminée en un point donné sous l'effet d'un prélèvement d'eau. Elle se traduit en pratique par l'abaissement du niveau piézométrique par rapport au niveau naturel, et s'exprime en mètres. Sa valeur sera fonction du type d'aquifère, du débit prélevé, de la distance au point de prélèvement, du temps écoulé depuis le début du pompage.

**Surface piézométrique** : Lieu des niveaux piézométriques, surface qui représente la distribution des charges hydrauliques d'une nappe. Du point de vue cartographique (carte piézométrique), elle est figurée par un ensemble de lignes équipotentielles, construites par interpolation de mesures ponctuelles, selon des valeurs de charges hydraulique équidistantes (isopièzes). Elle permet de définir les directions d'écoulement, qui sont perpendiculaires aux isopièzes.

**Transmissivité** : Paramètre qui régit le débit d'eau s'écoulant par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère, et par unité de gradient hydraulique. Produit du coefficient de perméabilité ( $K$ , en m/s), et de l'épaisseur aquifère (en m). Il est généralement noté  $T$ , et s'exprime en  $m^2/s$ .

**Zone non saturée** : Zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. Dans la zone non saturée, l'eau n'occupe qu'une partie des vides, et sa pression est inférieure à la pression atmosphérique.

**Zone saturée** : Zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices de roches, formant, dans un aquifère une nappe d'eau souterraine.

# 1. Introduction : contexte et objectifs de l'étude

## 1.1 Contexte

Cette étude dont le présent document constitue le premier rapport d'avancement est intégrée dans la première phase intitulée « Etude préalable des sites » du projet « Serre capteur d'énergie ». Ce projet, qui a démarré en mars 2007 pour une durée de 4 ans, est cofinancé 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), l'ADEME, et VINIFLHOR. Le Conseil Régional Languedoc-Roussillon apporte également un cofinancement pour cette première phase du projet, pour la partie concernant le dimensionnement du dispositif sur le site du Ctifl de Balandran.

## 1.2 Objectifs

### 1.2.1 Objectif du programme de recherche « Serre capteur d'énergie »

L'objectif du programme de recherche « Serre capteur d'énergie » est d'évaluer la faisabilité du stockage d'énergie thermique en aquifère pour le chauffage et le refroidissement de serres maraîchères, et de dimensionner les installations sur une serre expérimentale située en région LR (Ctifl de Balandran), et, si possible, deux serres pilotes situées en région PACA (Crau et Aubignan).

En effet, le secteur des serres agricoles est fort consommateur d'énergie fossile (gaz, etc.) dont les prix augmentent régulièrement et dont l'approvisionnement n'est pas garanti.

Avec ce projet, il s'agit, à terme, de proposer une énergie d'origine renouvelable qui permettra également de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de mieux maîtriser le climat dans les serres avec la possibilité de les maintenir fermées ou semi-fermées l'été grâce au refroidissement ; cette énergie de rafraîchissement étant stockée pour une réutilisation ultérieure.

Dans le cadre de ce projet, l'idée retenue est d'utiliser le principe du stockage intersaisonnier d'énergie thermique en aquifère, déjà en application dans d'autres pays, et en particulier aux Pays-Bas, où des serres de grande surface (plusieurs hectares) fonctionnent sur ce principe (Themato, Van der Lans, etc.).

Le principe du stockage intersaisonnier d'énergie thermique en aquifère est le suivant (Figure 1) :

- en été, l'eau souterraine est pompée dans un premier forage (appelé « puits froid »), refroidit la serre en se réchauffant (elle emmagasine ainsi la chaleur piégée dans la serre pendant cette période estivale), et est réinjectée dans le même aquifère via le deuxième forage (appelé « puits chaud ») ;
- pendant la période hivernale, le système s'inverse pour tirer profit de cette chaleur emmagasinée l'été précédent : l'eau est pompée au « puits chaud », réchauffe la serre en se refroidissant, et est réinjectée dans l'aquifère pour être réutilisée l'été suivant.

Les températures en jeu sont de l'ordre de 10°C au « puits froid », et de 28°C au « puits chaud ». On reste donc dans le domaine de la **géothermie très basse énergie** ( $T < 30^\circ\text{C}$ ).

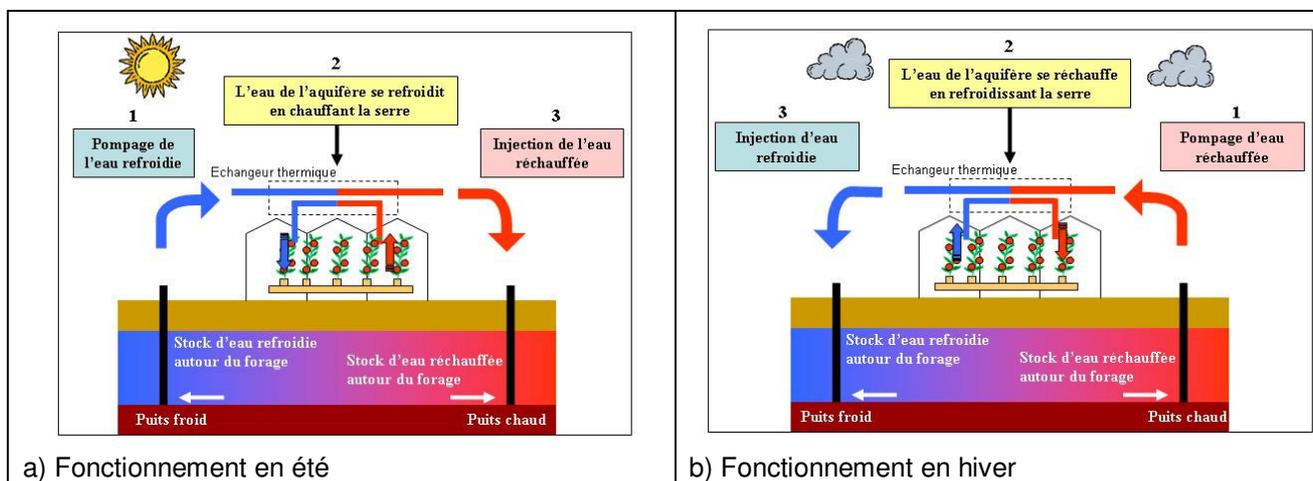


Figure 1 - Principe du stockage inter-saisonnier d'énergie thermique en aquifère

## 1.2.2 Objectifs de la présente étude

La présente étude comporte trois parties :

### Première partie : Dimensionnement du dispositif de Balandran

La première partie concerne une contribution au dimensionnement du système de stockage thermique en aquifère qui sera installé sur le site du Ctifl de Balandran ; ce site présentant des conditions a priori défavorables.

Ce dimensionnement nécessite la compréhension du contexte géologique et hydrogéologique, notamment à partir des données historiques et découlant des piézomètres et forages implantés en 2007, et des jeux de simulations numériques des écoulements et des transferts thermiques, effectuées avec le logiciel MARTHE du Brgm.

L'intérêt du système de stockage thermique qui sera implanté sur ce site réside essentiellement dans les possibilités qu'il offrira de suivre in situ les évolutions des « panaches » thermiques créés par le stockage ; ce qui contribuera à affiner le paramétrage des modèles numériques de simulations.

Un suivi scientifique sera adapté en conséquence pour permettre de retirer un maximum d'informations de cette expérimentation grandeur nature.

### Deuxième partie : Première évaluation des impacts du stockage thermique

La deuxième partie porte sur une première évaluation des impacts potentiels d'un stockage thermique en aquifère sur la qualité des eaux souterraines sur deux aspects : qualité physico-chimique et qualité microbiologique.

En effet, les modifications de températures aux alentours des puits « chaud » et « froid » peuvent engendrer des modifications des équilibres physico-chimiques ; ce qui peut influencer sur la microflore et les développements bactériens.

### Troisième partie (hors présent rapport) : Hiérarchisation des sites en région Languedoc-Roussillon

La troisième et dernière partie concernera la hiérarchisation des sites de serres de la région Languedoc-Roussillon potentiellement favorables à l'installation d'un système de stockage thermique en aquifère.

Il s'agira de proposer des critères d'identification d'autres sites expérimentaux favorables ; cela alors qu'aucun des trois sites pilotes étudiés dans le cadre du projet « Serre capteur d'énergie » ne dispose, a priori, d'aptitude particulière pour un système de stockage thermique en aquifère.

Cette troisième partie n'est pas abordée dans ce rapport d'avancement. Elle sera intégrée dans le rapport final.

## 2. Dimensionnement du site du Ctifl de Balandran (Gard)

### 2.1 Introduction

Le Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (Ctifl) de Balandran envisage de construire une serre expérimentale dans le cadre du projet de recherche « Serre capteur d'énergie », pour y tester le système de chauffage et de refroidissement par stockage thermique intersaisonnier en aquifère.

Dans la phase 1 du projet de recherche, il s'agit, pour le Brgm et le Ctifl, de dimensionner conjointement les futures installations sur le site (forages, échangeurs, pompes à chaleur, équipements de surface, etc.) en fonction :

- des caractéristiques hydrogéologiques du site à l'échelle locale qui conditionnent notamment la taille de l'exploitation et l'efficacité thermique du stockage ;
- des objectifs de recherche fixés pour cette serre expérimentale ;
- des montants d'investissements qui y seront dédiés.

### 2.2 Caractérisation du contexte hydrogéologique du site

#### 2.2.1 Quelques notions d'hydrogéologie

##### 2.2.1.1 La notion d'aquifère

Le terme « aquifère » vient de l'association de deux mots d'origine latine, *aqua* - eau, et *fer* - qui porte sur soi, apporte, produit. En pratique, ce terme désigne des terrains (couches, massifs) suffisamment conducteurs d'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine écoulement, et le captage de quantités d'eau non négligeables par des ouvrages (puits, forages). Un aquifère est donc à la fois un **réservoir** et un **conducteur** d'eau.

Le comportement des eaux souterraines contenues dans les aquifères sera très variable selon les caractéristiques physiques et structurales des terrains. Les aquifères se caractérisent principalement par :

- leur lithologie, c'est-à-dire le type de roches qui composent les terrains : roches sédimentaires (calcaires, craie, grès), cristallines (granites, etc.), volcaniques (basalte, etc.) ;
- leur structure (épaisseur, morphologie des couches, plissements, fracturation, etc.) ;
- leur porosité efficace ;
- leur perméabilité.

##### ▪ Porosité efficace

Pratiquement toutes les roches présentent des vides : pores des agrégats de minéraux qui les constituent, fissures plus ou moins ouvertes qui les affectent, ou les deux à la fois. Le rapport du volume de ces vides sur le volume total de roches est appelé porosité totale, notée  $\epsilon_t$ , nombre sans dimension, exprimé le plus souvent en pourcentage. Elle peut être très variable, de moins de 1% à 50% environ. La porosité efficace, notée  $\epsilon$ , représente le volume d'eau qu'un milieu peut contenir en état de saturation et libérer sous l'effet d'un drainage gravitaire, rapporté à son volume total. Elle caractérise la capacité du terrain à stocker ou libérer de l'eau (à ne pas confondre avec la perméabilité  $K$ , qui est son aptitude à laisser l'eau s'écouler, et que nous verrons juste après) de façon gravitaire. Dans les roches à gros grains, ou fissures ouvertes et bien connectées, la porosité efficace est quasiment équivalente à la porosité totale. Dans les argiles à pores microscopiques, la porosité efficace est quasi nulle, toute l'eau restant liée par capillarité et ne pouvant pas être déstockée par gravité.

##### ▪ Coefficient de perméabilité (de Darcy)

Le coefficient de perméabilité (au sens de Darcy, cf. §2.2.1.3) est un paramètre qui traduit l'aptitude du milieu aquifère à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de potentiel. Il est généralement noté  $K$ , et s'exprime en m/s. La gamme de perméabilités est très vaste, de  $10^{-2}$  m/s (aquifères très perméables, par exemple alluvions graveleuses), à  $10^{-7}$  m/s (aquifères peu perméables, par exemple grès à grains fins contenant des argiles).

La perméabilité est un paramètre difficile à mesurer sur le terrain. On lui substitue souvent la notion de transmissivité (produit de la perméabilité par la hauteur de l'aquifère située sous le niveau de la nappe), qui

peut être déterminée par essai de pompage sur des puits ou des forages. La transmissivité est souvent notée  $T$ , et s'exprime en  $m^2/s$ .

### 2.2.1.2 Deux types de nappes : nappe libre et nappe captive

La surface piézométrique représente le lieu des niveaux piézométriques. C'est une surface « idéale » qui représente la distribution spatiale des charges hydrauliques d'une nappe. On distingue deux types de nappes en fonction de la position de la surface piézométrique par rapport au toit de la formation aquifère :

- la nappe captive : nappe (ou partie de nappe) « piégée » sous une couverture géologique peu perméable, sans surface libre, donc soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique, et dont la surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère, à couverture peu/moins perméable, qui la contient ;
- la nappe libre : nappe dont le niveau supérieur est à la pression atmosphérique (surface libre). Le niveau de cette nappe peut fluctuer et on distingue ainsi une zone saturée et une zone non saturée. Par opposition à la nappe captive, la nappe libre est soumise en tous points à la pression atmosphérique, et la surface piézométrique est inférieure au toit de l'aquifère.

Un forage ou puits est dit artésien lorsqu'il exploite une nappe captive. L'artésianisme jaillissant en est un cas particulier, l'eau monte plus haut que le niveau du sol et s'écoule spontanément à la surface.

Une nappe peut être libre à un endroit donné, et captive à un autre, en fonction de la configuration des couches de terrain, comme illustré dans l'exemple (Figure 2).

La carte piézométrique est la représentation cartographique de la surface piézométrique de la nappe, par des lignes équipotentielles, construites par interpolation de mesures ponctuelles selon des valeurs de charges hydrauliques équidistantes (lignes isopièzes).

La carte piézométrique se construit à partir de données ponctuelles et de données topographiques (prise en compte de talwegs par exemple). C'est l'un des outils majeurs de l'hydrogéologie pour la connaissance d'un aquifère : elle permet en effet la détermination du gradient hydraulique  $i$  (pente de la nappe), et le tracé des directions (perpendiculaires aux isopièzes) et des sens (des charges élevées aux charges moins élevées) d'écoulement de la nappe. Un exemple de carte piézométrique est donné en page suivante (Figure 3).

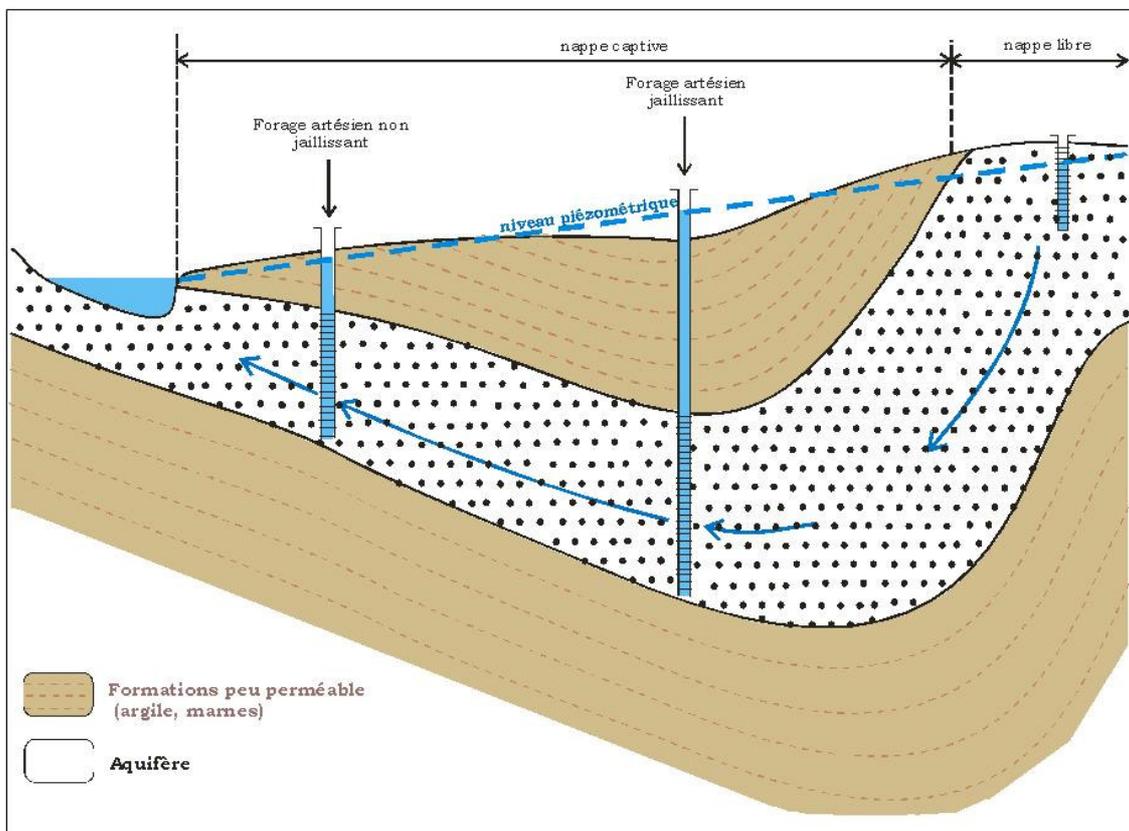


Figure 2 - Différents types de nappe

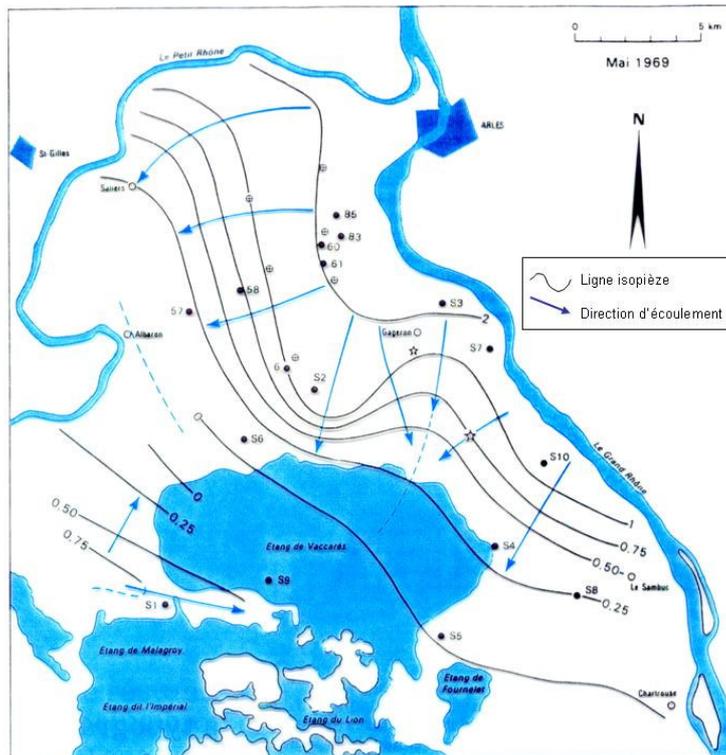


Figure 3 - Exemple de carte piézométrique

### 2.2.1.3 Principales équations de l'hydrodynamique

#### ▪ Perméabilité - Loi de Darcy

Dans un milieu poreux, la charge hydraulique  $H$ , souvent mesurée en cote absolue (cote NGF), est confondue avec la hauteur piézométrique, niveau de l'eau mesuré dans un forage.

La loi de Darcy est une loi fondamentale de l'écoulement dans les milieux poreux, qui relie les flux s'écoulant dans la nappe à la hauteur piézométrique. Elle dit ceci : le débit  $Q$  qui circule à travers une section  $s$  d'aquifère, perpendiculaire à la direction de l'écoulement, est proportionnel à la différence de charge par l'intermédiaire du coefficient de perméabilité  $K$  :

$$Q = -K.s \frac{dH}{dL}$$

D'où le flux, qui transite à travers une section unité, et appelé vitesse (ou flux) de Darcy  $V$  :

$$V = \frac{Q}{s} = -K \frac{dH}{dL} = -K.i$$

avec :

- $V$  : la vitesse (ou flux) de Darcy ;
- $K$  : la perméabilité du milieu aquifère ;
- $dH$  : la différence de charge hydraulique entre deux points distants de  $dL$  ;
- $i$  : le gradient hydraulique de la nappe,  $i = dH/dL$

#### ▪ Porosité efficace - Vitesse réelle d'écoulement de la nappe

Dans un volume de terrain aquifère supposé saturé en eau, la fraction d'eau non liée et donc apte à circuler dans l'espace disponible est appelée porosité efficace  $\epsilon$  (cf. §2.2.1.1). C'est un nombre sans dimension, exprimé le plus souvent en pourcentage.

$$\epsilon = \frac{v_{\text{eau gravitaire}}}{v_{\text{terrain}}}$$

avec :

- $\varepsilon$  : porosité efficace ;
- $v_{\text{eau gravitaire}}$  : volume d'eau non liée disponible dans le volume total de terrain  $v_{\text{terrain}}$  .

A travers une section  $s$  de terrain, seule la partie  $\varepsilon \cdot s$  sera donc réellement traversée par l'eau en mouvement. La vitesse réelle de l'eau à travers les grains sera donc égale au flux par unité de surface (ou vitesse de Darcy  $V$ ) divisée par la porosité efficace :

$$u = \frac{V}{\varepsilon} = -\frac{K}{\varepsilon} \cdot \frac{dH}{dL} = -\frac{K}{\varepsilon} i$$

avec :

- $u$  : vitesse réelle d'écoulement de la nappe ;
- $V$  : vitesse de Darcy ;
- $K$  : perméabilité ;
- $\varepsilon$  : porosité efficace ;
- $i$  : gradient hydraulique de la nappe.

La vitesse réelle d'écoulement de la nappe est donc toujours supérieure à la vitesse dite de Darcy. Par exemple, dans les nappes alluviales où la porosité efficace est généralement comprise entre 5% et 20%, la vitesse réelle est de 5 à 20 fois supérieure au flux de Darcy.

La vitesse réelle d'écoulement de la nappe est un paramètre important dans l'estimation de la faisabilité du stockage thermique sur un site, car elle intervient dans l'entraînement des « bulles » d'eau chaude et d'eau froide. Son estimation sur un site donné est donc primordiale. Le gradient hydraulique de la nappe peut être estimé à partir de cartes piézométriques. La plupart du temps, la connaissance est régionale, à partir de cartes piézométriques disponibles à petite échelle. Cette connaissance peut être suffisante au stade d'une étude de préfaisabilité, mais il sera préférable de l'affiner au stade du dimensionnement par une campagne de mesures piézométriques plus locale pour déterminer à la fois la valeur du gradient hydraulique, sa direction et son sens.

## 2.2.2 Caractéristiques de l'aquifère du Ctifl de Balandran

Le site du Ctifl de Balandran est situé à environ 4 km à l'ouest de Bellegarde, dans le Gard (Figure 4).

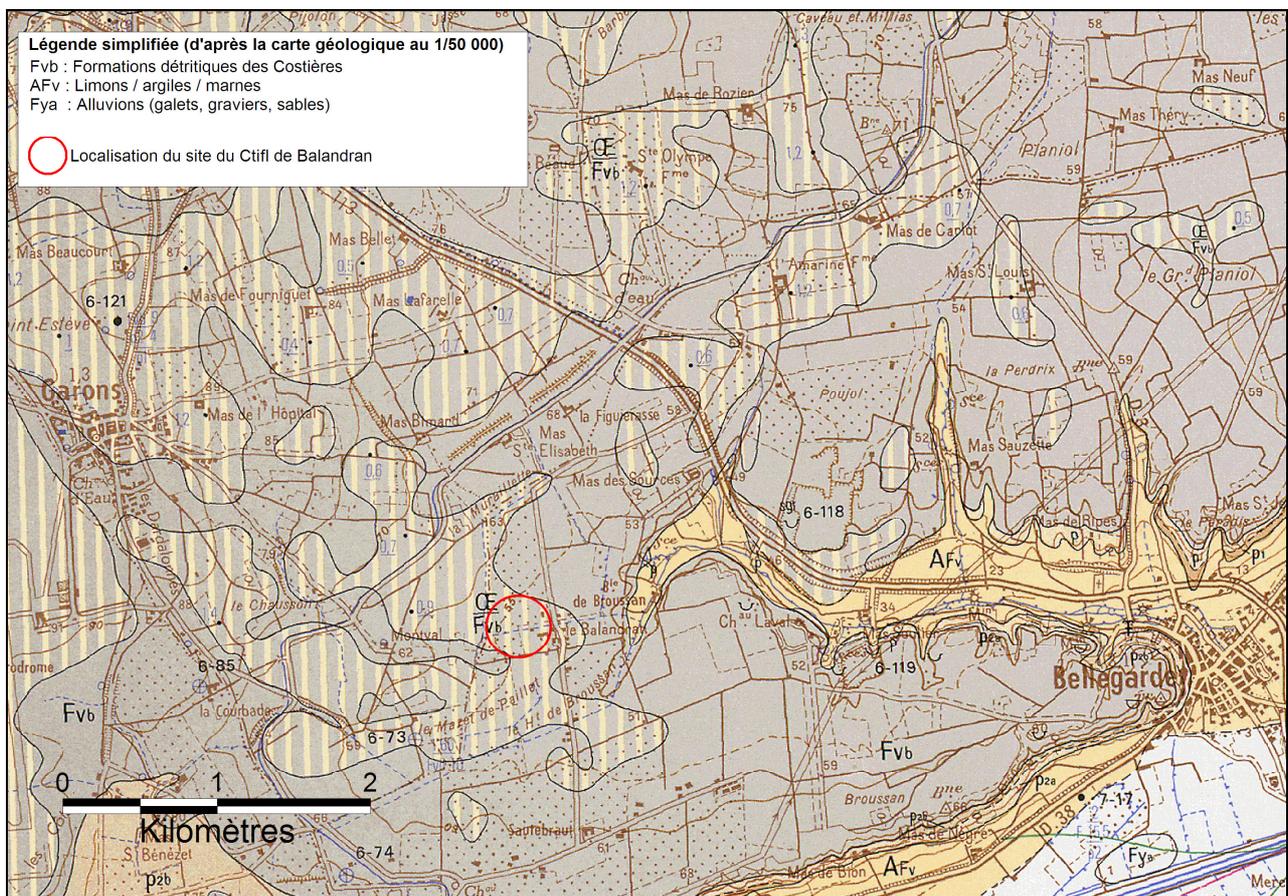


Figure 4 - Localisation du site du Ctifl de Balandran sur fond de carte géologique

L'aquifère concerné par le projet de stockage est celui contenu dans les cailloutis plio-quaternaires. C'est une nappe libre, dont le niveau est relativement proche du sol (profondeur inférieure à 10 m/sol), et peut varier de l'ordre de quelques mètres en fonction des années et des saisons, comme en témoigne le suivi du niveau piézométrique sur l'un des puits du centre (Figure 5).

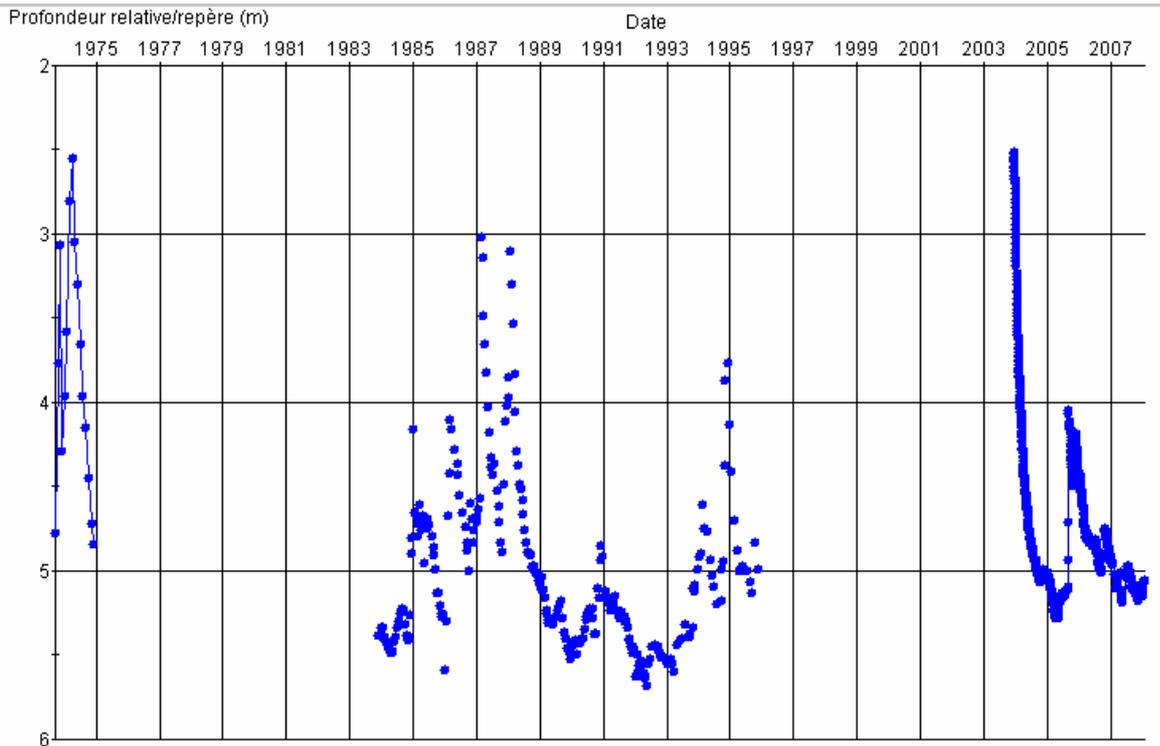


Figure 5 - Suivi piézométrique sur le puits n°09656X0066/6N49 du Ctifl de Balandran (historique incomplet portant sur 33 années)

### 2.2.2.1 Réalisation de 9 nouveaux ouvrages (août 2007)

Pour compléter la connaissance locale de l'aquifère sur le site du Ctifl de Balandran, 9 nouveaux ouvrages (8 piézomètres et 1 forage) ont été réalisés en août 2007 (Figure 6 et Figure 7).

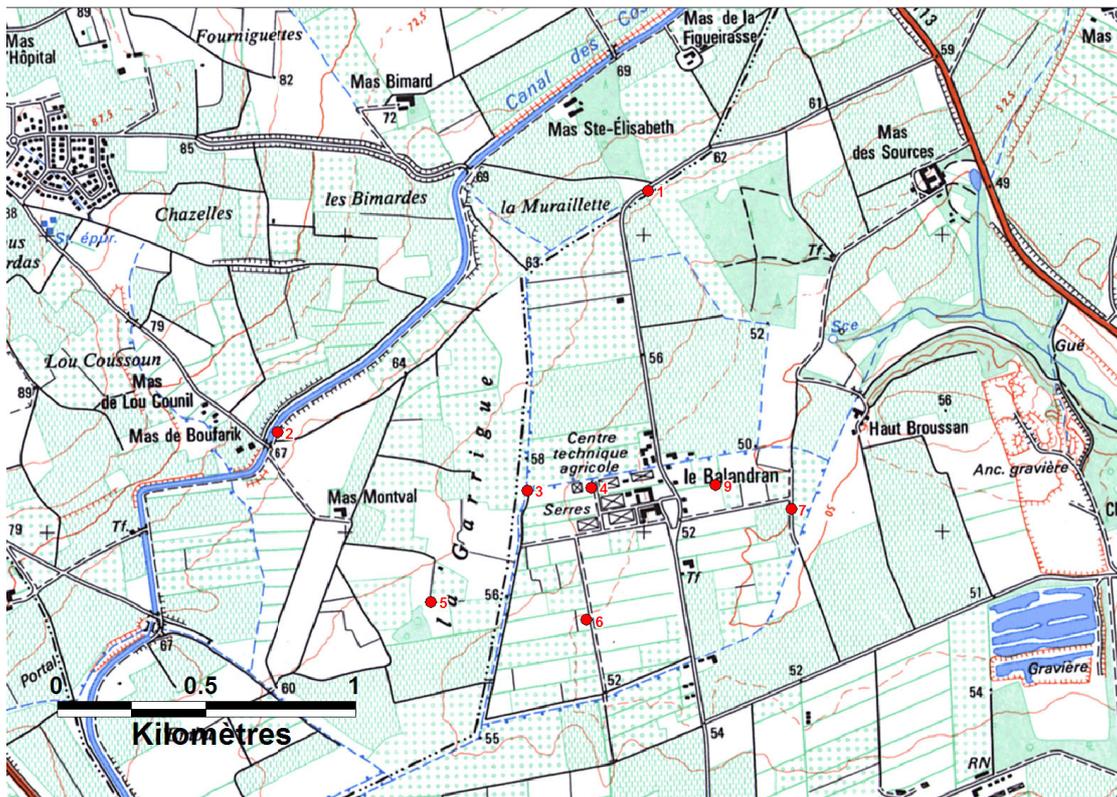


Figure 6 - Localisation des 9 ouvrages réalisés sur le site du Ctifl de Balandran en août 2007

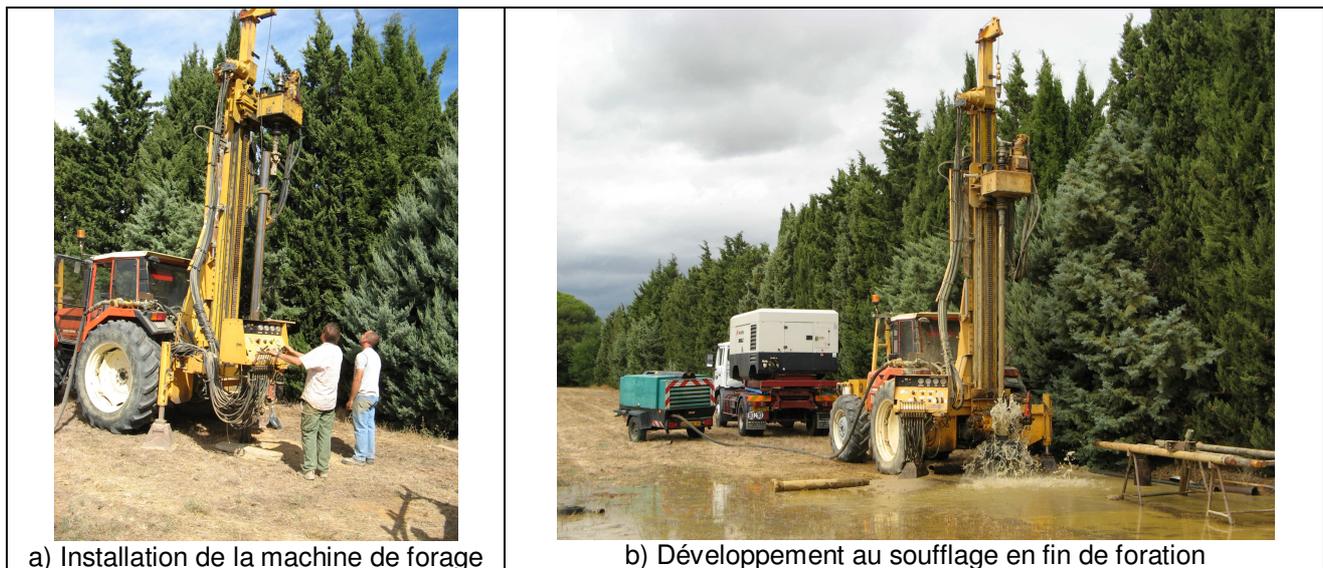


Figure 7 - Réalisation de forage sur le site du Ctifl de Balandran

Ils ont montré une épaisseur maximale de cailloutis de 13 m sur le forage (point n°9), et de plus de 15 m sur l'un des piézomètres (point n°6). Des argiles ont été rencontrées à partir de 13 m sur le forage.

Avec une profondeur du niveau piézométrique à environ 5 à 6 m/sol, l'épaisseur mouillée de l'aquifère maximale serait de l'ordre de la dizaine de mètres, ce qui reste relativement faible.

#### 2.2.2.2 Visite géologique complémentaire

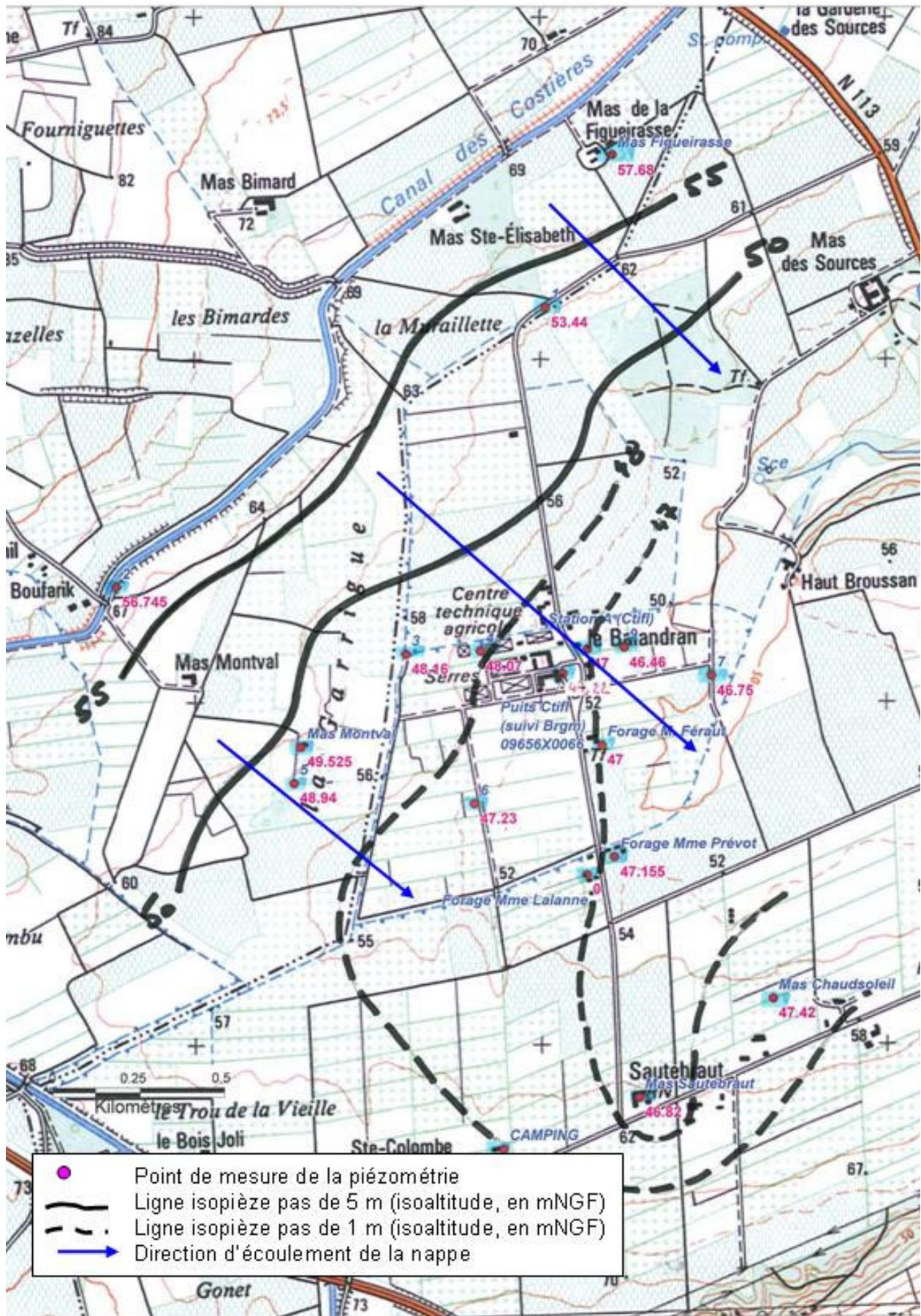
Une visite géologique a été réalisée sur le site du Ctifl et dans les alentours afin d'apporter des informations complémentaires sur la nature et l'épaisseur potentielle de l'aquifère. La visite de carrières à proximité, en particulier, a permis de montrer des épaisseurs de cailloutis plio-quadernaires atteignant la vingtaine de mètres, et même la dépassant à certains endroits pour atteindre la trentaine de mètres dans d'anciens chenaux.

Ainsi, il n'est pas impossible que de telles structures soient présentes sur le site du Ctifl. Si cela était le cas, l'épaisseur des cailloutis pourrait atteindre 20 à 30 mètres. Afin de le vérifier, lors de l'installation des ouvrages d'exploitation définitifs (cf. §2.4), il est proposé de réaliser d'abord un sondage de reconnaissance en petit diamètre afin d'explorer toute l'épaisseur des cailloutis disponibles. Ce sondage de reconnaissance sera ensuite transformé en piézomètre de suivi en aval du forage d'exploitation.

#### 2.2.3 Carte piézométrique

L'écoulement naturel de la nappe étant l'un des facteurs les plus discriminants pour l'efficacité du stockage thermique (cf. Courtois *et al.*, 2007), des cartes piézométriques du secteur ont été établies, sur la base de relevés des niveaux d'eau dans les nouveaux ouvrages réalisés sur le centre, ainsi que sur des puits et forages existants dans le voisinage.

La figure suivante (Figure 8) montre un exemple de carte piézométrique établie en octobre 2007. L'écoulement de la nappe s'effectue globalement du nord-ouest vers le sud-est sur le site. Le gradient hydraulique moyen (pente de la nappe) sur le site varie entre 1 et 2 ‰, valeurs classiques pour une nappe libre.



CTIFL- Balandran - Piézométrie au 08/10/2007

Figure 8 - Carte piézométrique du site de Balandran établie le 8 octobre 2007

## 2.2.4 Essais de pompage

Le forage n°9 a été mis à profit pour effectuer des essais de pompage avec suivi sur le piézomètre d'observation voisin n°8, qui permettent de caractériser les propriétés hydrodynamiques (transmissivité et porosité efficace) de l'aquifère.

### 2.2.4.1 Estimation des pertes de charge liées au puits et à l'aquifère : essai par paliers de débits

Un essai par paliers de débit a été réalisé le 22/08/07 au forage n°9 ; le niveau piézométrique initial au puits de pompage n°9 avant l'essai est de 5,17 m sous la surface, et de 5,79 m sous la surface au piézomètre d'observation n°8. La mesure des rabattements a été réalisée manuellement et automatiquement (sonde de pression OrphiMini, pas de temps de mesure : 1 sec), seules les mesures de l'automate sont représentées dans les figures qui suivent.

L'essai a consisté en 3 paliers aux débits de 19,2, 41,6 et 63,2 m<sup>3</sup>/h. L'évolution des rabattements a aussi été mesurée au piézomètre d'observation n°8, situé à une distance de 5,3 m du forage de pompage n°9. Le test a été réalisé de la façon suivante : i) pompage de 1 heure et ii) arrêt pendant au moins une heure entre chaque phase de pompage (donc remontée du niveau d'eau de la nappe). Le niveau piézométrique initial a quasiment été ré-atteint au cours des phases de remontée (Figure 9).

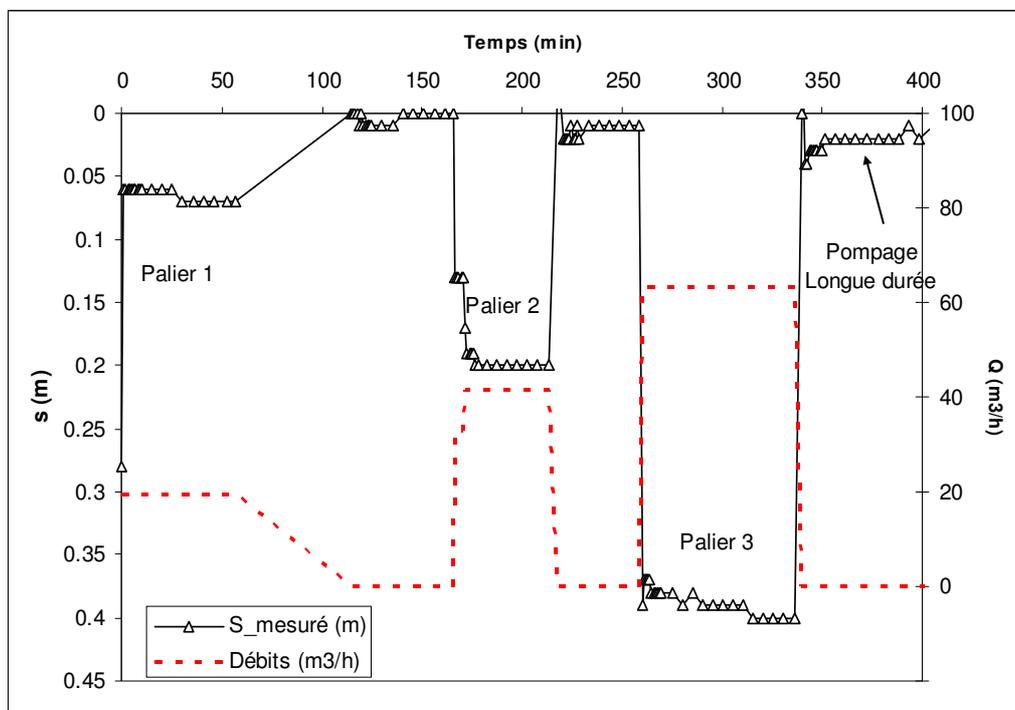


Figure 9 - Essai de pompage par paliers de débits réalisé au forage n°9

Aux données de cet essai a été rajoutée pour l'interprétation, la valeur du rabattement à 60 min durant le pompage de longue durée ( $Q = 50,6$  m<sup>3</sup>/h,  $s = 0,28$  m) ; son introduction a permis de mieux estimer les pertes de charge (Figure 10).

Les pertes de charges ont été estimées suivant la méthode de Jacob :  $s = B.Q + C.Q^2$

où  $B$  est le coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère),  $C$  le coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits),  $s$  le rabattement (en m) et  $Q$  le débit.

L'interprétation de cet essai (Figure 10) permet d'estimer les coefficients  $B = 8,7$  m<sup>-2</sup>.s et  $C = 793,2$  m<sup>-5</sup>.s<sup>2</sup>.

Aucun débouillage ou colmatage du forage n'a été observé durant cet essai.

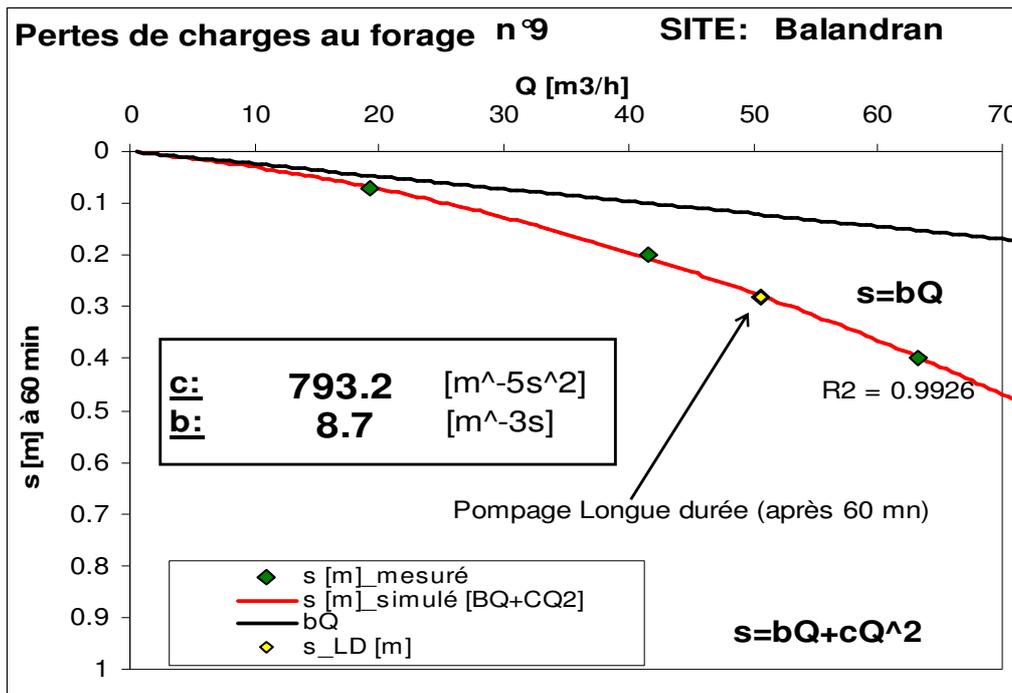


Figure 10 - Interprétation de l'essai de pompage par paliers de débits

#### 2.2.4.2 Estimation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère : essai longue durée

Un pompage « longue durée » de 17 heures environ a été réalisé à la suite de l'essai par paliers de débits entre le 22 et le 23/08/07 au puits de pompage n°9. La remontée des rabattements a été observée pendant 27 heures ce qui a permis de quasiment ré-atteindre le niveau piézométrique initial.

L'ensemble des deux essais a été interprété et modélisé simultanément (essais par paliers et longue durée). Les simulations des évolutions des rabattements en fonction du débit de pompage ont été réalisées à l'aide du Logiciel WinISAPE (Brgm).

La solution analytique répondant le mieux aux données est celle de Theis (aquifère homogène, isotrope et infini), cependant au puits de pompage les effets de capacité et les pertes de charges liées au puits (cf. §2.2.4.1) ont été rajoutés.

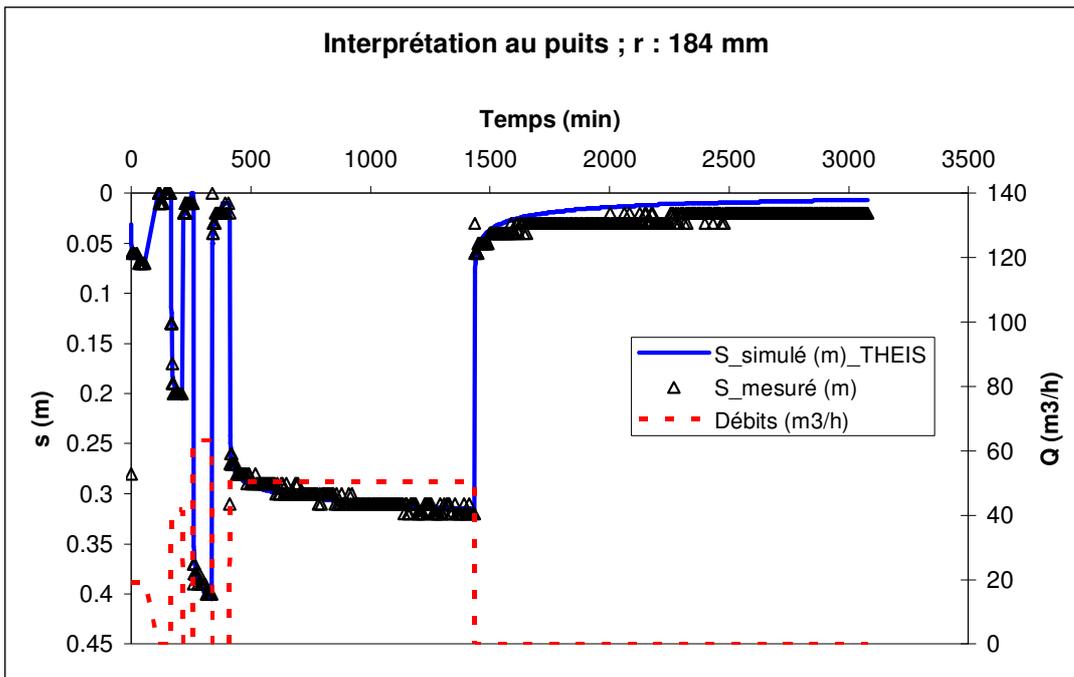
La figure suivante (Figure 11) illustre les résultats au forage de pompage n°9 et au piézomètre d'observation n°8 situé à 5,3 m.

Les simulations sont de bonne qualité et permettent l'estimation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. La transmissivité est de l'ordre de  $T = 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ , ce qui conduit à une perméabilité de  $K = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  pour une épaisseur saturée de 8 m, et le coefficient d'emménagement est ici typique d'une nappe libre, il s'agit donc dans ce cas-ci de la porosité efficace  $\epsilon$  de l'aquifère, elle est de l'ordre de 14 %.

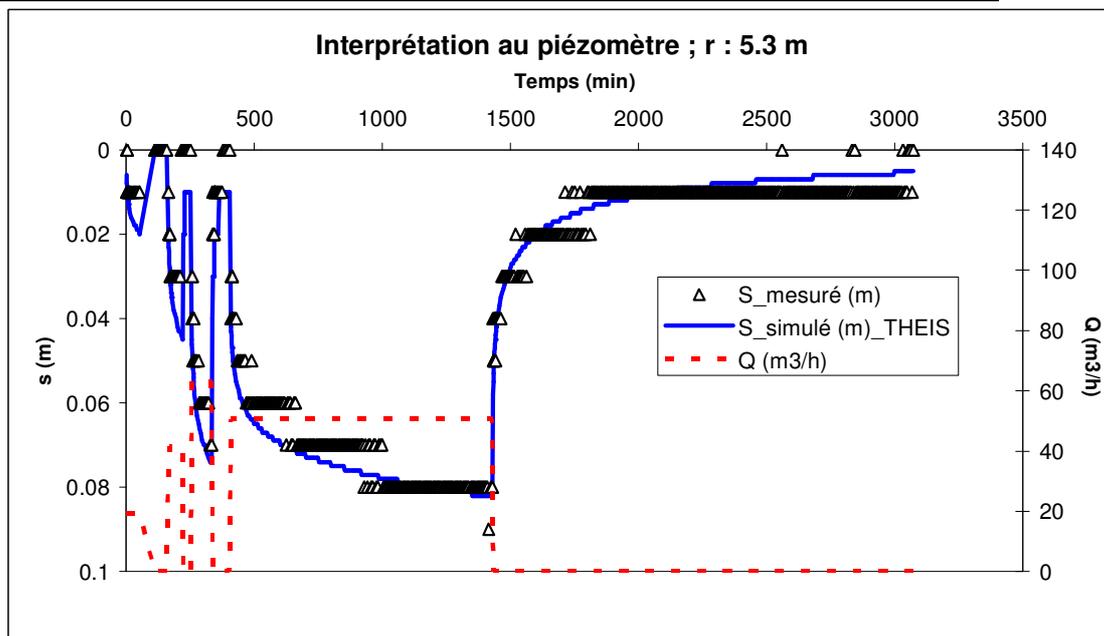
A l'échelle du pompage, soit dans un rayon d'environ 300 m autour du puits, l'aquifère apparaît comme homogène, et dépourvu de limite alimentée ou étanche.

#### 2.2.5 Conclusions

Les paramètres hydrodynamiques déterminés à l'aide de ces essais de pompage montrent un aquifère particulièrement poreux et perméable, avec des rabattements très limités (moins de 40 cm pour un débit de pompage de l'ordre de 60 m<sup>3</sup>/h), éléments favorables pour obtenir des débits de pompage conséquents et des relèvements de niveaux limités en réinjection. En contre partie, les vitesses d'écoulement naturel sont élevées : en reprenant le gradient hydraulique dans la gamme 1 à 2 ‰, la vitesse de Darcy moyenne de l'aquifère serait de l'ordre de 1 à 2 m/j, et la vitesse de déplacement du front thermique de l'ordre de 7 à 15 m/j (avec des valeurs de coefficients thermiques classiques issus de la bibliographie, cf. Courtois *et al.*, 2007). Cette vitesse d'écoulement élevée, associée à la relative proximité du niveau piézométrique par rapport à la surface du sol, sont des éléments qui risquent de fortement compromettre l'efficacité du stockage d'énergie thermique en aquifère sur ce site.



Puits	Méthode	Theis			
	T	9.00E-02	m <sup>2</sup> /s	K	1.13E-02 m/s
	S	5.00E+00	(-)	e sat	8 m
	pd	7.95E+02	s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>		
	Capacité	1.84E+02	mm		



Piezomètre	Méthode	Theis			
	T	1.15E-01	m <sup>2</sup> /s	K	1.44E-02 m/s
	S	1.40E-01	(-)	e sat	8 m

Figure 11 - Simulation des rabattements au forage de pompage n°9 et au piézomètre d'observation n°8 ; modèle analytique choisi : Theis, logiciel d'interprétation : WinISAPE (Brgm)

## 2.3 Modélisation numérique de l'écoulement et des transferts thermiques

Des modélisations numériques de l'écoulement et des transferts thermiques en aquifère sont utilisées afin d'évaluer l'efficacité du stockage d'énergie thermique. Celle-ci est calculée selon la méthode décrite dans l'étude de pré faisabilité<sup>1</sup>, (Courtois *et al.*, 2007), et est rappelée dans l'encart suivant.

La **puissance thermique « globale »** instantanée ( $P_g$  en W) fournie par l'eau s'exprime sous la forme suivante :

$$P_g = \gamma_f \cdot Q \cdot T$$

avec :

- $\gamma_f$  : capacité calorifique volumique de l'eau,
- $Q$  : débit de pompage/réinjection,
- $T$  : température des eaux injectées/pompées.

Dans le cas particulier du stockage thermique en aquifère, l'efficacité se mesure par l'écart de température des eaux stockées et pompées par rapport à la température initiale des eaux de la nappe. On introduit donc la notion de **puissance thermique « utile »** ( $P_u$  en W). Elle correspond au surplus de puissance obtenu par stockage par rapport à une « simple » exploitation des eaux de l'aquifère (à température constante) sans stockage.

$$P_u = \gamma_f \cdot Q \cdot |T - T_{aquifère}^0| = P_g \cdot \frac{|T - T_{aquifère}^0|}{T}$$

La **quantité d'énergie** est calculée par intégration de la puissance thermique instantanée. On définit de la même manière une énergie « globale » et une énergie « utile » par rapport à l'aquifère.

$$\omega_u = \int_0^{4 \text{ mois}} P_u(t) \cdot dt$$

avec :

- $\omega_u$  : énergie « utile » injectée / pompée sur un cycle de 4 mois (en Joules) ;
- $P_u$  : puissance thermique « utile » (en W).

Il est alors possible de calculer un **taux de récupération de l'énergie stockée**  $\tau_r$ , pour chaque puits, en divisant la quantité d'énergie « utile » pompée sur un cycle de 4 mois, par la quantité d'énergie « utile » injectée sur le cycle de 4 mois de la saison précédente.

$$\tau_r = \frac{\omega_u^{pompée}}{\omega_u^{injectée}} = \frac{\int_0^{4 \text{ mois}} P_u^{pompée}(t) \cdot dt}{\int_0^{4 \text{ mois}} P_u^{injectée}(t) \cdot dt}$$

Dans les simulations, ce taux de récupération (exprimé en pourcentage) est calculé pour la 15<sup>ème</sup> année d'exploitation.

### 2.3.1 Paramètres et configurations utilisés

#### 2.3.1.1 Paramètres

De premiers jeux de simulations pour le site du Ctifl de Balandran avaient été réalisés et présentés dans l'étude de pré faisabilité (Courtois *et al.*, 2007). Les hypothèses utilisées pour les simulations étaient alors : débit d'exploitation de 50 m<sup>3</sup>/h, perméabilité de 5.10<sup>-3</sup> m/s, porosité efficace de 15 %, et gradient hydraulique variant entre 0,4 et 2 ‰. Les conclusions avaient été que l'efficacité du stockage thermique était très faible (taux de récupération inférieur à 40 %) dans l'hypothèse du gradient à 0,4 ‰, et quasi nulle (taux de récupération inférieur à 5 %) dans l'hypothèse du gradient à 2 ‰.

<sup>1</sup> Le rapport de synthèse de cette étude de pré faisabilité, rapport BRGM/RP-55481-FR, est téléchargeable gratuitement depuis le site Internet de l'ADEME : <http://www2.ademe.fr> ou du Brgm : <http://www.brgm.fr/publication/rapportpublic.jsp>

Avec les nouveaux ouvrages et essais de pompage réalisés, les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ont été affinés, et de nouveaux jeux de simulations plus « réalistes » ont été lancés, avec une perméabilité de  $1,25 \cdot 10^{-2}$  m/s (soit supérieure d'un facteur 2,5), une porosité efficace de 14 %, et un gradient hydraulique de 1 ‰. Les paramètres de modélisation utilisés sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Le maillage est demeuré le même que pour l'étude de préfaisabilité (Courtois *et al.*, 2007), avec la température de l'air à Nîmes imposée sur la première couche (Figure 12).

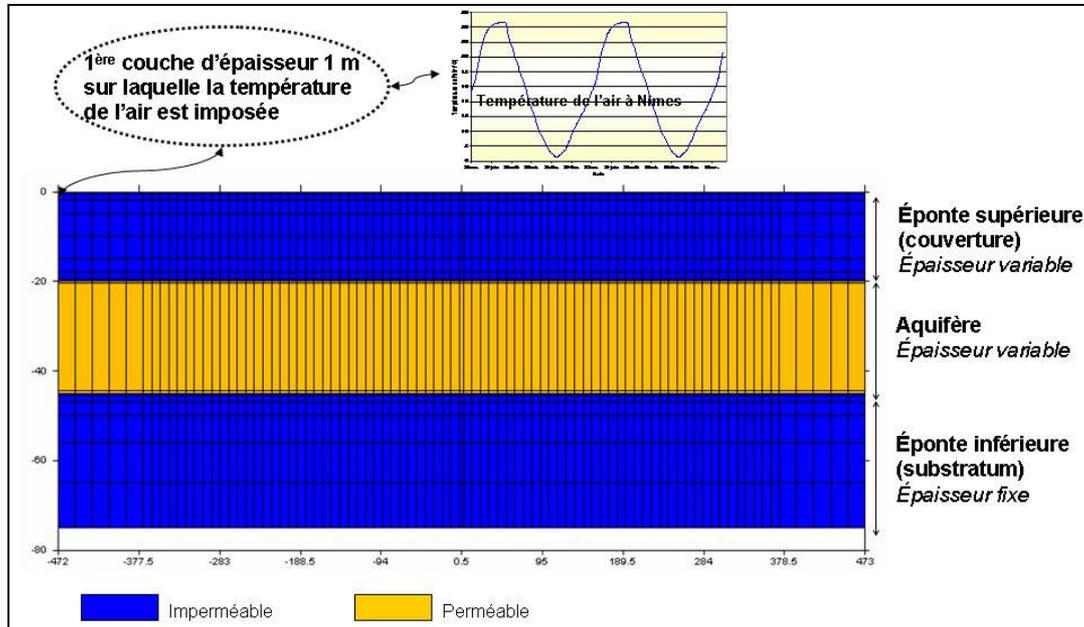


Figure 12 - Vue du modèle en coupe verticale

Tableau 1 - Paramètres de modélisation utilisés

	Paramètre	Sigle	Unité	Valeur
Caractéristiques hydrodynamiques et thermiques	Épaisseur de la couverture	$E_c$	m	5
	Épaisseur de l'aquifère	$E_a$	m	10
	Épaisseur du substratum	$E_s$	m	30
	Perméabilité	$K$	m/s	$1,25 \cdot 10^{-2}$
	Porosité efficace de l'aquifère	$\varepsilon$	%	14
	Gradient hydraulique d'écoulement, $i = dH/dL$	$i$	‰	1
	Vitesse de Darcy de l'aquifère : $V = K \cdot i$	$V$	m/j	1,08
	Vitesse réelle de l'aquifère : $u = V/\varepsilon$	$u$	m/j	7,71
	Vitesse de front thermique : $V_{th} = V \cdot \gamma/\gamma_a$	$V_{th}$	m/j	2,19
	Déplacement du front thermique en 6 mois	$D_{th}$	m	394
	Rayon thermique après 4 mois d'injection	$R_{th}$	m	114
	Dispersivité longitudinale	$\alpha_L$	m	7,5
	Dispersivité transversale	$\alpha_T$	m	2,5
	Capacité calorifique volumique de l'eau	$\gamma_f$	MJ/m <sup>3</sup> /°C	4,185
	Conductivité thermique de l'eau	$\lambda_f$	W/m/°C	0,6
	Capacité calorifique volumique du terrain sec	$\gamma_s$	MJ/m <sup>3</sup> /°C	1,72
	Conductivité thermique du terrain sec	$\lambda_s$	W/m/°C	2,35
	Capacité calorifique volumique de l'aquifère	$\gamma_a$	MJ/m <sup>3</sup> /°C	2,07
	Conductivité thermique de l'aquifère	$\lambda_a$	W/m/°C	2,11
	Température moyenne de la nappe	$T_a$	°C	14,5
Exploitation	Distance entre puits froid et puits chaud	$L$	m	300
	Débit de pompage / réinjection	$Q$	m <sup>3</sup> /h	70
	Température d'injection au puits chaud	$T_c$	°C	28
	Température d'injection au puits froid	$T_f$	°C	10

En l'absence de données nouvelles, le calendrier de pompage/réinjection est resté le même :

- juin à septembre (4 mois d'été) : refroidissement à l'eau pompée et réinjection de l'eau réchauffée ;
- octobre et novembre (2 mois d'automne) : pas (peu) de recours à l'aquifère ;
- décembre à mars (4 mois d'hiver) : réchauffage à l'eau pompée et réinjection de l'eau refroidie ;
- avril et mai (2 mois de printemps) : pas (peu) de recours à l'aquifère.

Les températures de réinjection sont de **10 °C** et **28 °C** respectivement aux puits froid(s) et chaud(s).

Suite aux résultats encourageants de l'essai de pompage sur le forage n°9 (cf. §2.2.4), et avec le dimensionnement thermique de la future serre expérimentale effectué par le Ctifl (surface totale de serres de l'ordre de 3000 m<sup>2</sup> dont un compartiment de 1000 m<sup>2</sup> équipé en test avec le système de refroidissement et de chauffage sur aquifère), le débit d'exploitation prévisionnel a été fixé à **70 m<sup>3</sup>/h** au lieu de 50 m<sup>3</sup>/h.

Dans le tableau récapitulatif des paramètres de modélisation utilisés (Tableau 1) sont également présentés les résultats de calcul de la vitesse de déplacement du front thermique **V<sub>th</sub>** et du rayon thermique **R<sub>th</sub>**. Ces deux paramètres, définis ci-après, permettent de donner des ordres de grandeur du déplacement dans le sens d'écoulement de la nappe, et de la largeur des panaches thermiques, et ainsi d'aider à évaluer les distances à respecter entre forages.

#### ▪ Vitesse de déplacement du front thermique

$$V_{th} = V \cdot \frac{\gamma_f}{\gamma_a}$$

avec :

- $V_{th}$  : vitesse de propagation du front thermique ;
- $V$  : vitesse de Darcy de l'aquifère ;
- $\gamma_f$  : capacité calorifique volumique du fluide ;
- $\gamma_a$  : capacité calorifique volumique résultante pour l'aquifère saturé en eau.

Avec les paramètres retenus (Tableau 1), le déplacement du front thermique dans le sens d'écoulement de la nappe au bout de 6 mois serait de l'ordre de 400 m.

#### ▪ Rayon thermique

$$R_{th} = \sqrt{\frac{\gamma_f}{\gamma_a} \cdot \frac{v}{\pi e}}$$

avec :

- $R_{th}$  : rayon thermique ;
- $v$  : volume d'eau injecté au cours d'un cycle (dans le cas du présent calendrier = 4 mois) ;
- $e$  : épaisseur de l'aquifère saturée en eau ;

Le calcul du rayon thermique permet de donner un ordre de grandeur du « volume » aquifère influencé par le stockage thermique à la fin d'un cycle d'injection (4 mois dans le calendrier retenu). Avec les paramètres retenus (Tableau 1), il serait de l'ordre de 110 m après 4 mois d'injection au débit de 70 m<sup>3</sup>/h.

### 2.3.1.2 Configurations des doublets

Le futur doublet « puits chaud » / « puits froid » est positionné perpendiculairement à l'écoulement naturel de la nappe, dans une zone a priori favorable de l'aquifère : épaisseur plus importante et moins d'argiles qu'à proximité du canal d'irrigation à l'ouest du centre.

La distance entre les deux puits chaud et froid obéit à des contraintes d'espace et de logistique (proximité d'installations électriques, limitation des coûts de conduites, etc.). Elle est a priori très supérieure au rayon thermique (> 200 m) pour limiter les interférences entre les « stocks » chaud et froid (Figure 13).



Figure 13 - Emplacement de la future serre expérimentale sur le site du Ctifl

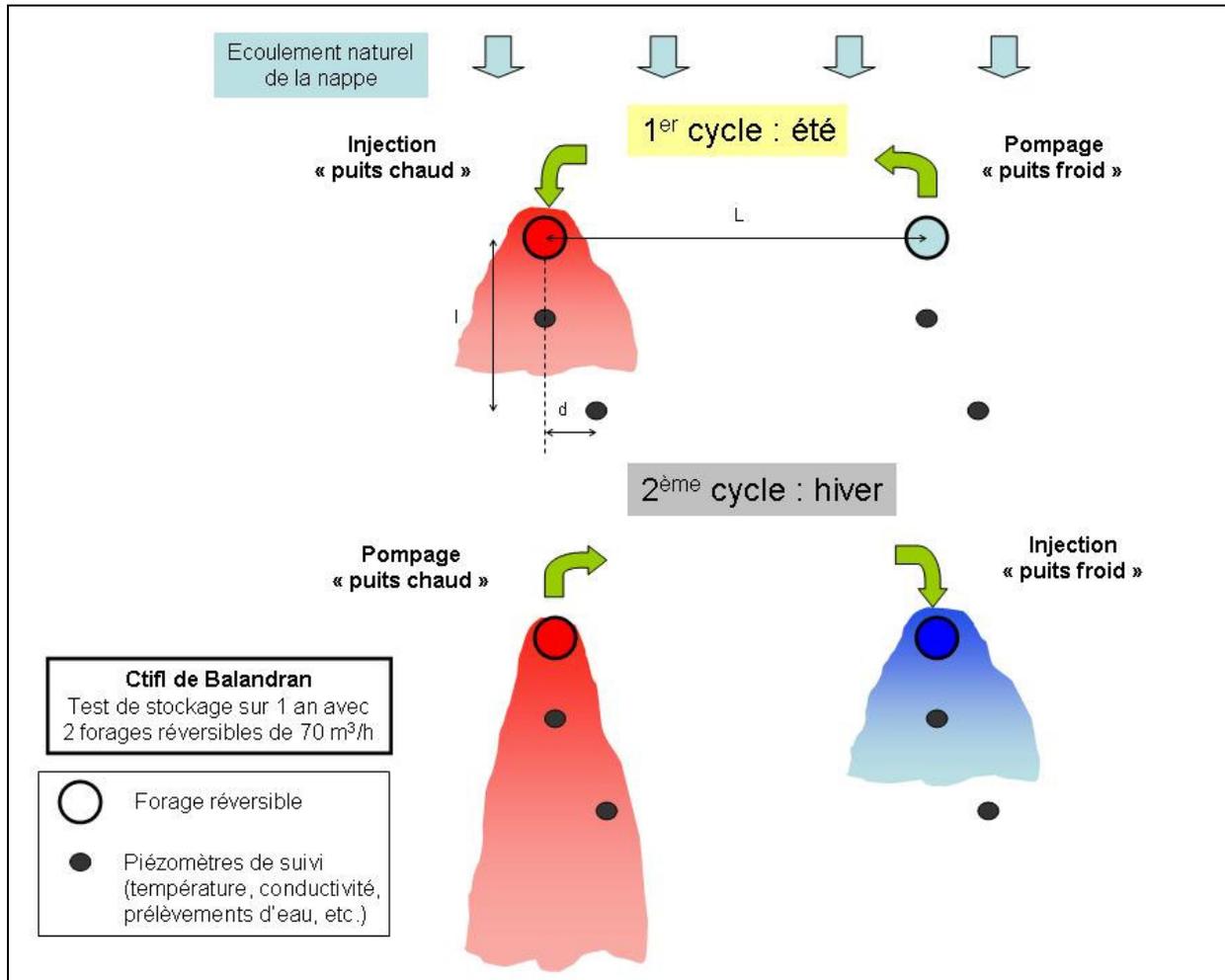
Le parti est pris sur le Ctifl de Balandran de tester le fonctionnement du stockage d'énergie thermique avec l'hypothèse d'un « puits chaud » et d'un « puits froid » utilisés de façon **réversible**, c'est-à-dire alternativement en pompage et en injection en fonction de la saison (Configuration 1 : Figure 14a).

L'idée est de suivre le fonctionnement sur une première année, grâce notamment à des piézomètres de contrôle positionnés en aval des forages d'exploitation, qui permettront d'effectuer des profils verticaux de températures et ainsi de suivre le déplacement et la dispersion des panaches thermiques. Pour ce faire, ils seront positionnés dans l'axe et perpendiculairement à l'axe de l'écoulement naturel de la nappe. L'intérêt du suivi des températures sur ces piézomètres sera d'améliorer à la fois la connaissance de la direction et de la valeur de l'écoulement de la nappe, et de permettre le calage des simulations numériques.

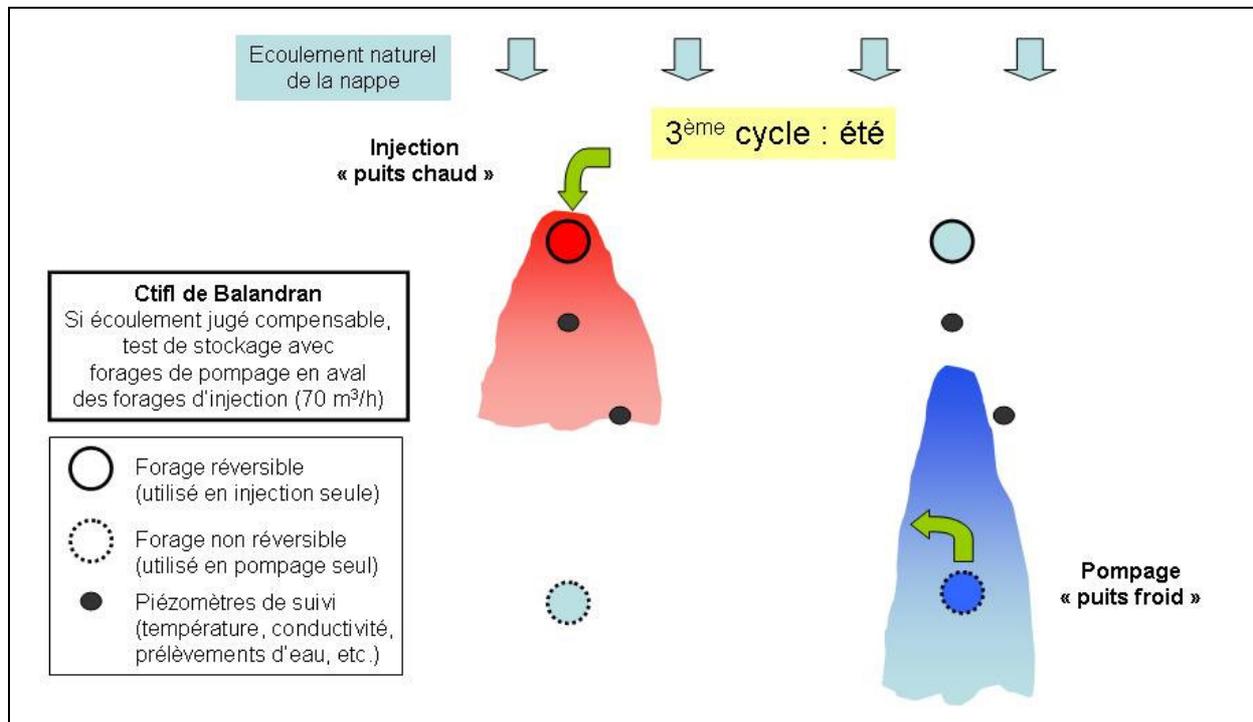
En fonction des résultats de cette première année d'exploitation, la décision pourra être prise entre :

- (1) poursuivre l'exploitation avec ces 2 forages réversibles si l'efficacité du stockage thermique est jugée suffisante (Figure 14a)
- (2) si l'écoulement de la nappe reste gérable, réaliser à terme deux nouveaux forages de pompage en aval pour compenser, au moins en partie, le déplacement des panaches (Configuration 2 : Figure 14b)

Si un écoulement trop important de la nappe compromet tout stockage, il reste la possibilité d'utiliser les deux forages initiaux, l'un en pompage, l'autre en injection, avec une pompe à chaleur.



a) Configuration 1 : test de stockage avec deux forages réversibles - 1<sup>ère</sup> année



b) Configuration 2 : test de stockage avec forages de pompage en aval des forages d'injection (Si écoulement acceptable)

Figure 14 - Configurations possibles sur le site du Ctiff de Balandran

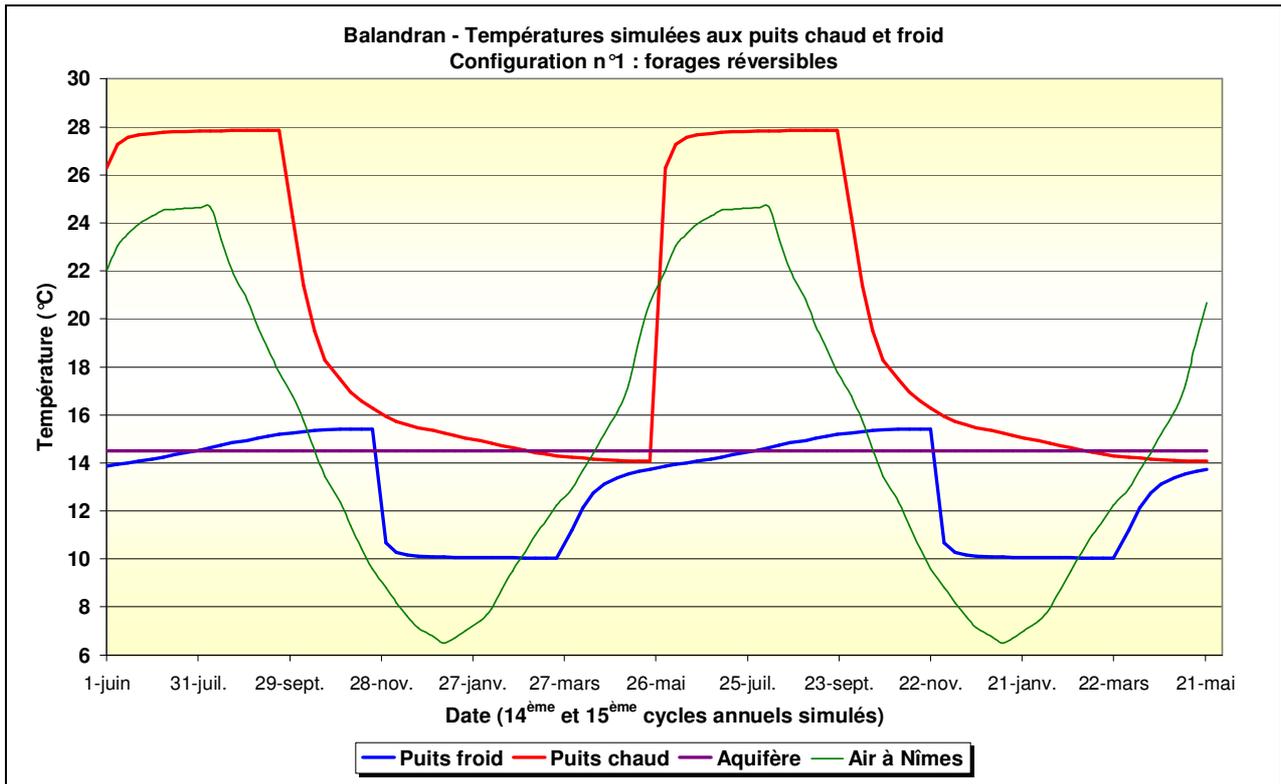
### 2.3.2 Résultats

Des jeux de simulations numériques sont lancés avec ces deux configurations. Dans les exemples montrés ci-après, l'écartement entre les forages amont et aval (configuration n°2) est de 100 m pour compenser en partie le déplacement du front thermique sur 6 mois.

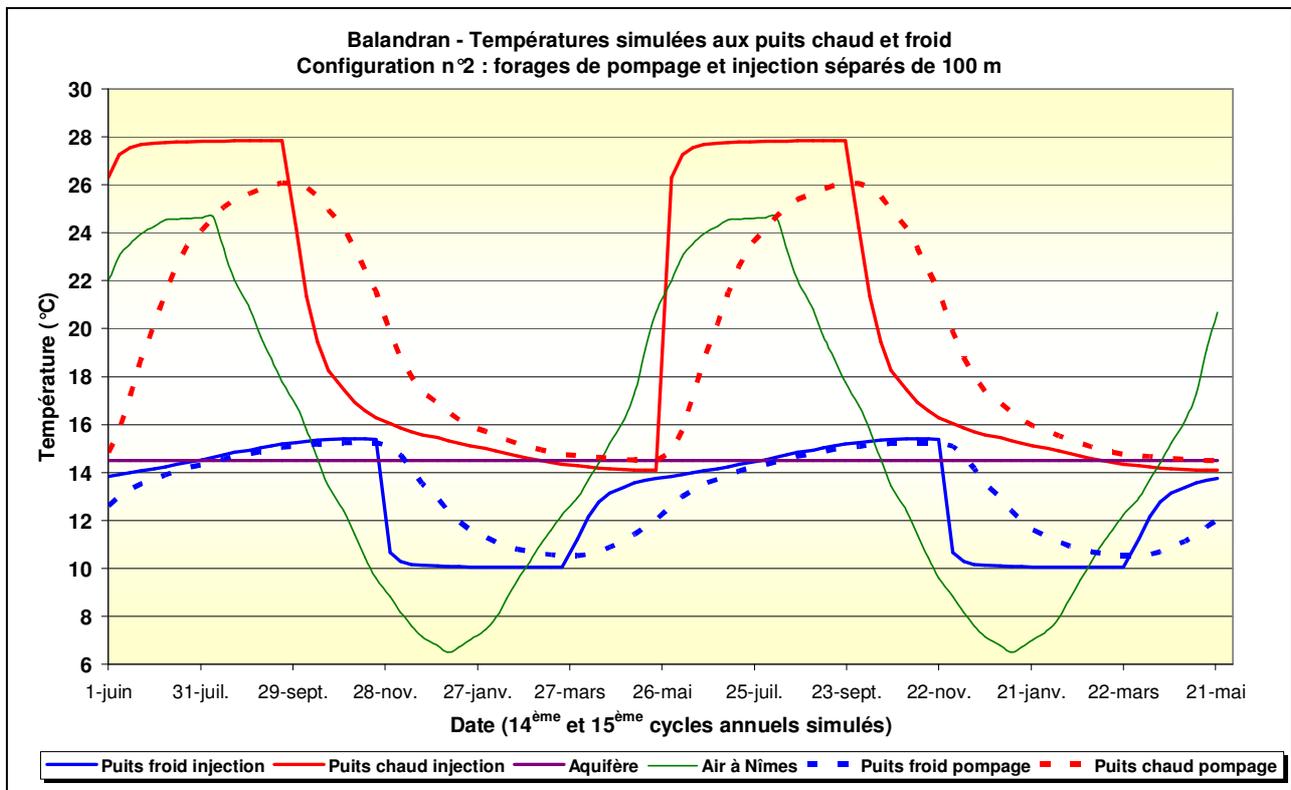
Les températures simulées (Figure 15) montrent que dans la configuration n°2, les températures aux forages de pompage apparaissent plus lissées, mais avec une inertie plus grande pour le retour à la température naturelle de l'aquifère.

Dans les figures présentant les bilans thermiques (Figure 16 et Figure 17), a été représentée pour comparaison la puissance thermique qui serait obtenue dans le cas d'un simple pompage dans l'aquifère (sans stockage) avec un débit de 70 m<sup>3</sup>/h et la nappe à sa température naturelle (supposée constante) de 14,5°C. Ceci correspondrait à une puissance thermique constante de 1 179 kW.

La configuration n°2 permettrait une légère amélioration du bilan thermique du stockage : pour la récupération de chaleur par exemple (Figure 16), le taux de récupération de l'énergie stockée passerait ainsi de 4 % à 13 %. En ce qui concerne le côté froid (Figure 17), le taux de récupération de l'énergie stockée passe de 0 à 2 %.

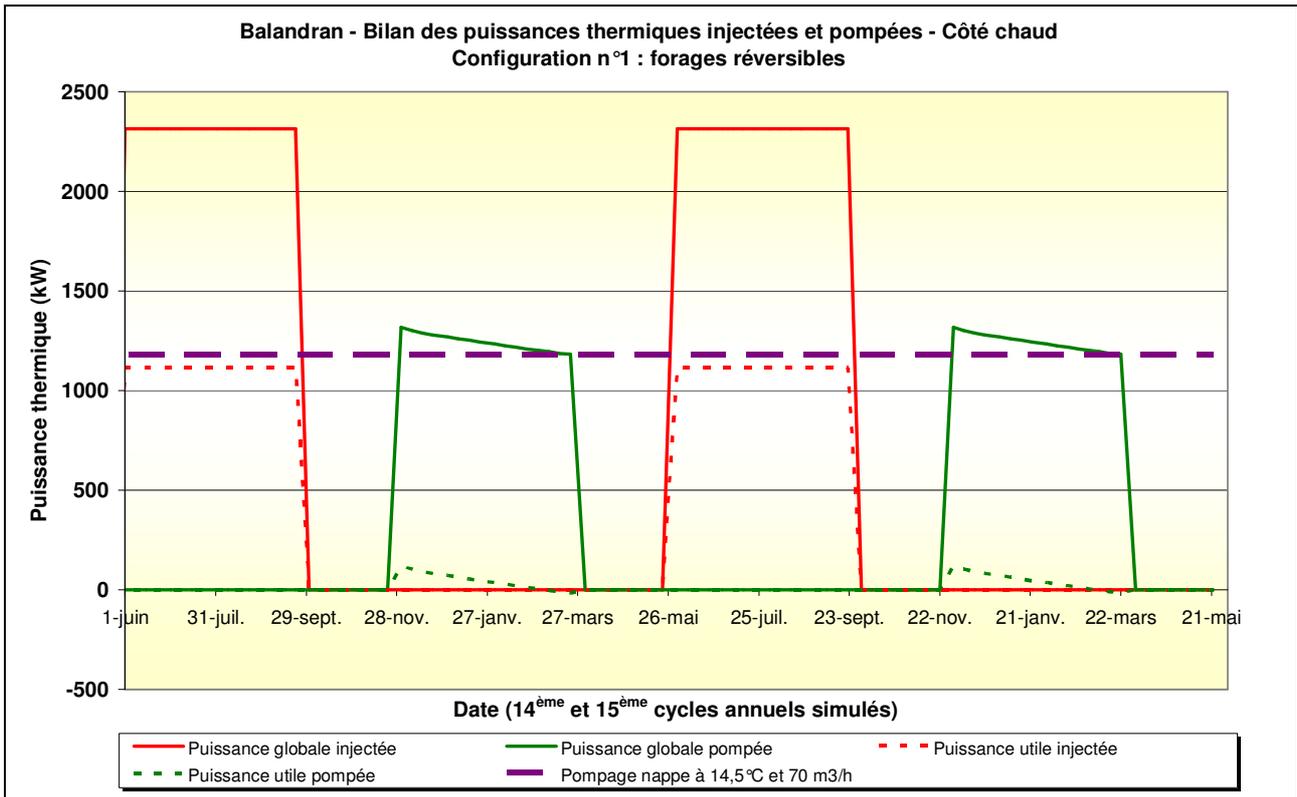


a) Configuration n°1 : forages réversibles

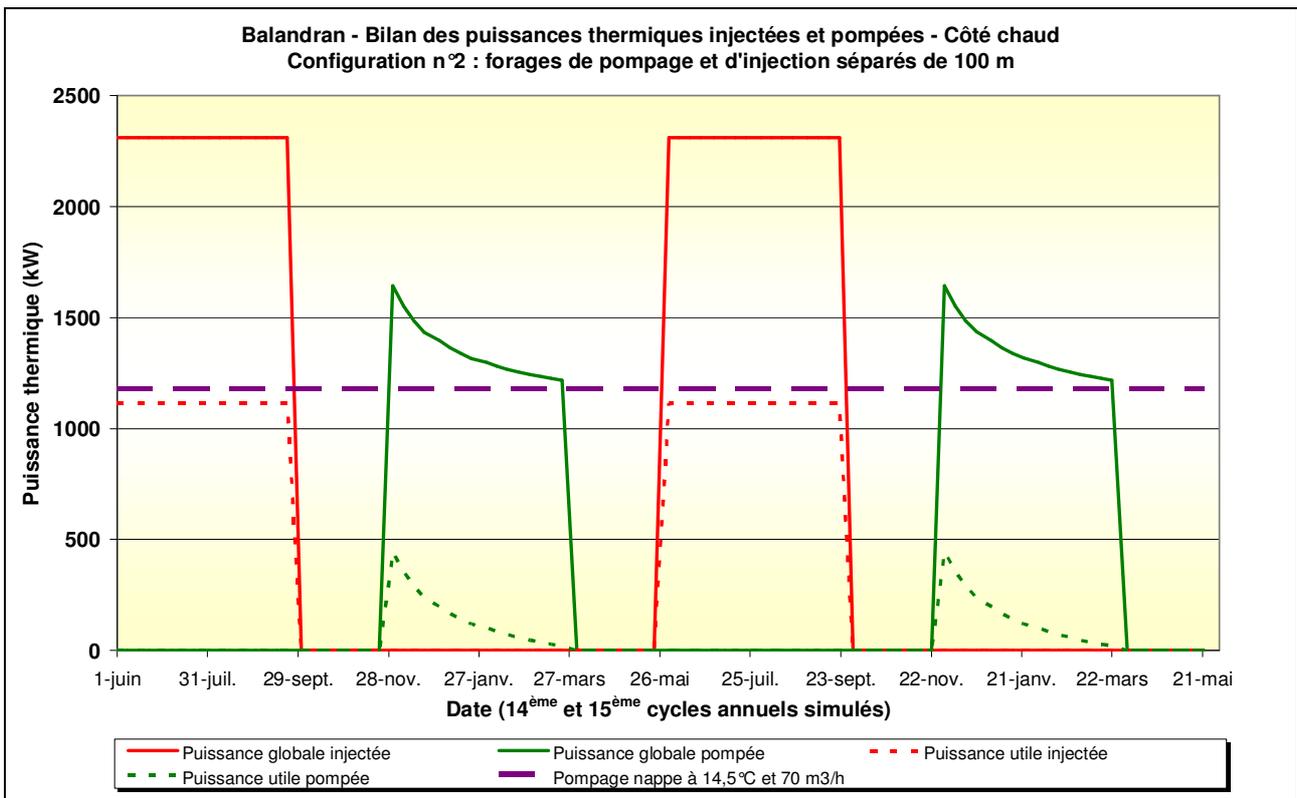


b) Configuration n°2 : forages de pompage en aval des forages d'injection

Figure 15 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : températures

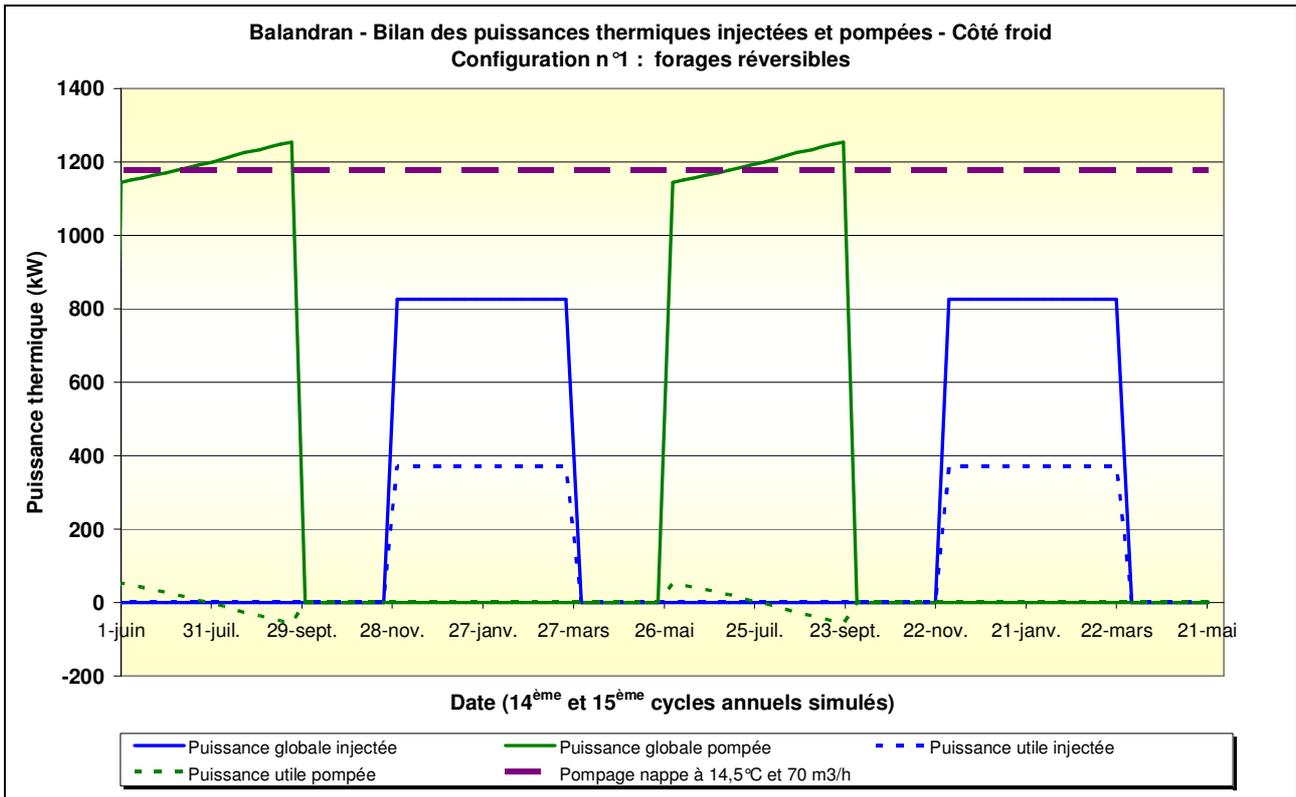


a) Configuration n°1 : forages réversibles

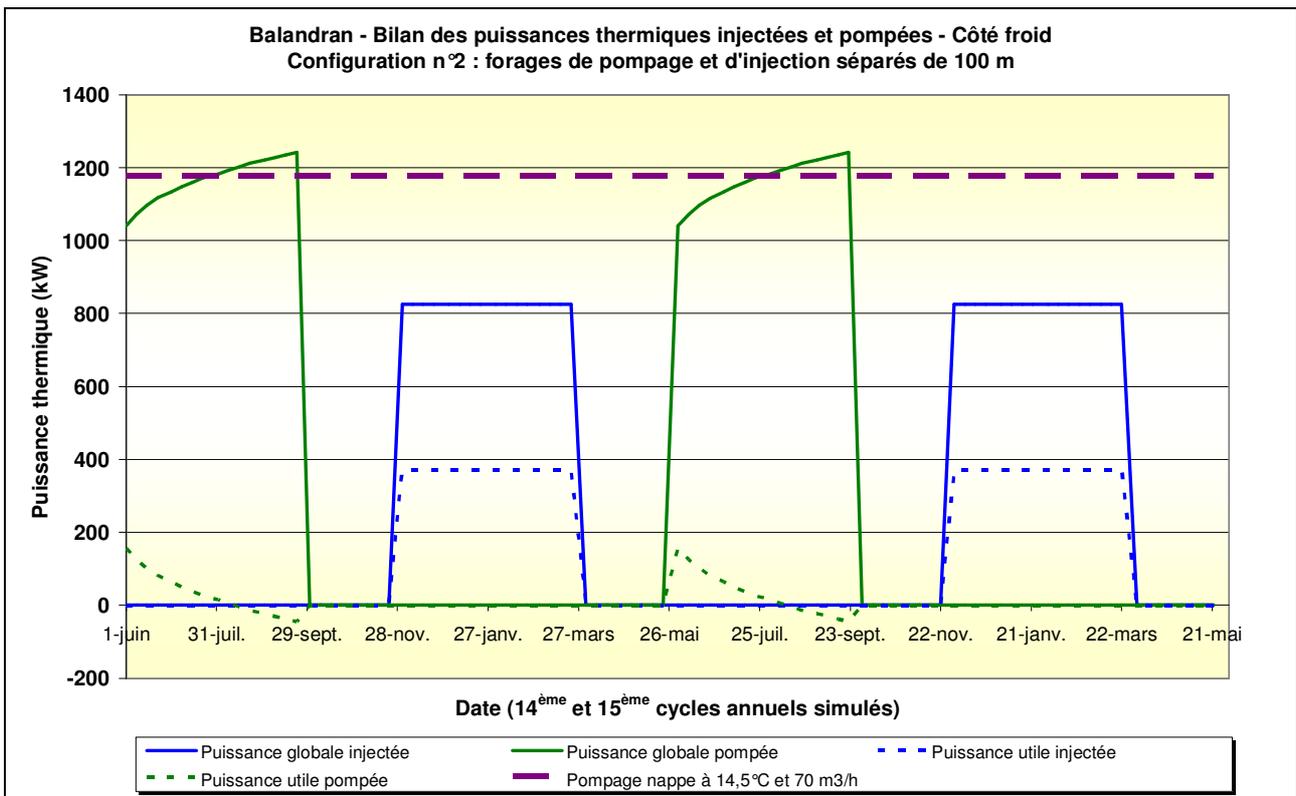


b) Configuration n°2 : forages de pompage en aval des forages d'injection

Figure 16 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : bilans thermiques au puits chaud



a) Configuration n°1 : forages réversibles



b) Configuration n°2 : forages de pompage en aval des forages d'injection

Figure 17 - Résultats de simulations sur le site de Balandran : bilans thermiques au puits froid

## 2.4 Conclusions

Les simulations numériques pour le site du Ctifl de Balandran confirment les difficultés pour atteindre une efficacité intéressante du stockage thermique. La configuration n°2, avec des forages de pompage et

d'injection séparés, montre néanmoins qu'une implantation étudiée des forages pourrait permettre des taux de récupération de l'énergie non négligeables ; cela étant possible en essayant de compenser (au moins en partie) le déplacement des panaches thermiques dans l'écoulement, sous réserve que celui-ci ne soit pas trop important.

Les objectifs scientifiques du projet « Serre capteur d'énergie » sur le site de Balandran sont principalement axés sur l'instrumentation d'une serre expérimentale afin d'étudier le comportement des plantes, le climat, l'aéraulique de la serre, l'économie d'énergie et le gain de production.

Le test du stockage en aquifère a pour premier objectif l'acquisition de connaissances. De plus, l'expérimentation servira aussi à comptabiliser l'énergie en sortie de serre qui pourra être stockée dans l'aquifère et qui serait théoriquement récupérable (avec des conditions de stockage meilleures). L'obtention d'un fort taux de récupération énergétique n'est donc pas primordiale dans ce cas particulier. Toutefois, ces tests en vraie grandeur sur la serre expérimentale sont justifiés par les faibles épaisseur et profondeur de l'aquifère qui autorisent cette recherche avec des coûts de forages relativement modérés (et des surcoûts admissibles pour des forages réversibles même si, à terme, ils ne servent que dans un seul sens).

Les résultats de ces tests en situation réelle seront utilisés pour valider les modèles numériques de simulation du stockage thermique en aquifère. Pour cela, est programmé un suivi scientifique, notamment avec l'implantation de piézomètres de contrôle en aval des forages d'exploitation, pour suivre en continu des températures, des profils verticaux de conductivité et pour effectuer que des prélèvements d'eau pour analyses physico-chimiques et biologiques. Le nombre et la localisation des piézomètres de contrôle sera fonction des caractéristiques de l'aquifère, du débit d'exploitation et des calendriers de pompage/injection qui seront réellement mis en œuvre sur le site, mais aussi de la place disponible et des coûts d'investissement. Deux piézomètres en aval de chacun des forages d'exploitation sont prévus à minima.

A titre d'exemple, la figure suivante (Figure 18) montre les températures simulées pour des piézomètres de contrôle placés en aval du puits froid dans la configuration n°1 (Figure 14a), à des distances  $l$  et  $d$  respectivement dans et perpendiculairement à l'axe du doublet « puits chaud » / « puits froid ». Ces résultats reflètent à la fois le déplacement (dans l'axe de l'écoulement) et la dispersion du panache thermique. A  $l = 80$  m en aval, et  $d = 60$  m, on constate déjà un fort lissage des variations de températures.

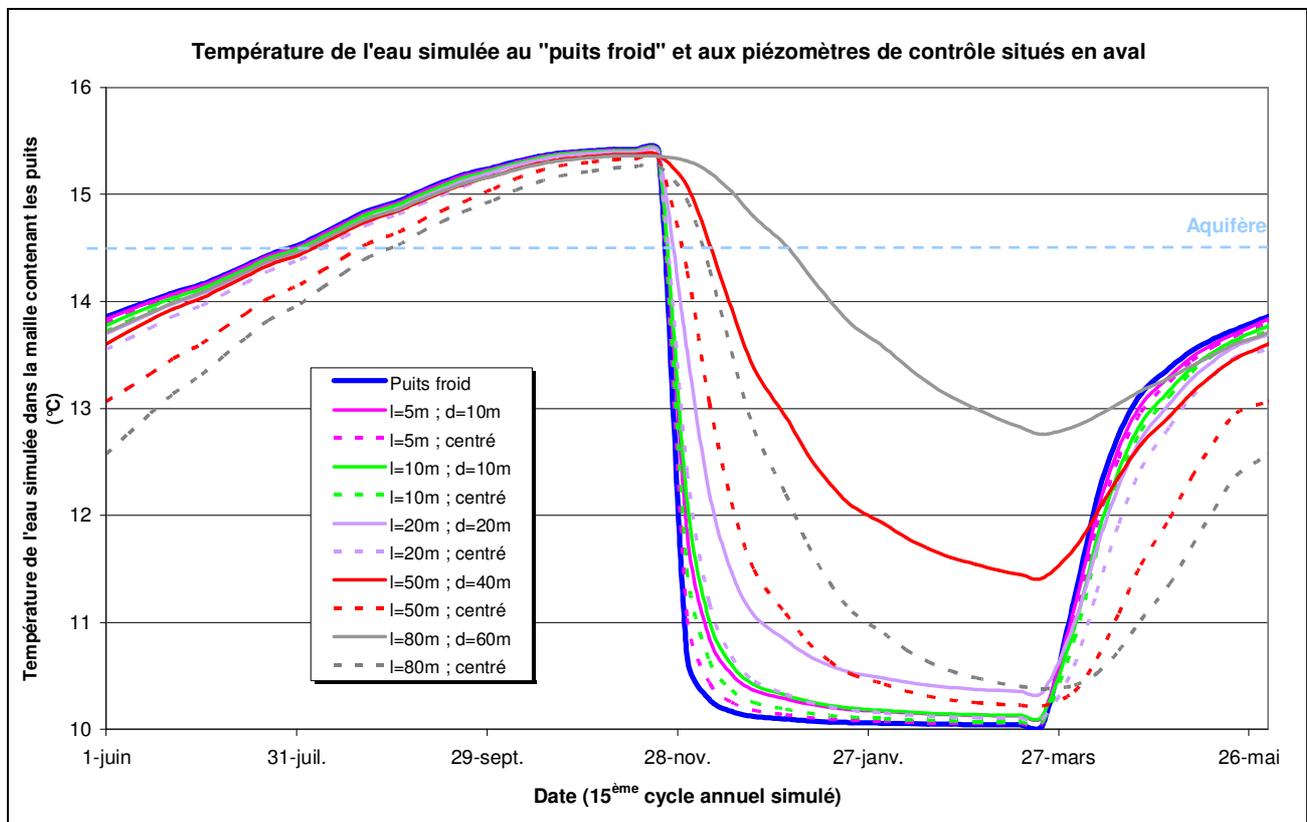


Figure 18 - Températures simulées aux piézomètres de contrôle - Exemple en aval du puits froid, configuration n°1

### 3. Evaluation des impacts potentiels du stockage d'énergie thermique en aquifère sur la qualité des eaux souterraines

#### 3.1 Introduction

Le stockage d'énergie thermique en aquifère peut impacter la qualité des eaux souterraines, suite aux modifications des conditions de température (en chaud et froid). Certains de ces effets, comme les phénomènes d'incrustation et de corrosion dans des forages, conditionnent grandement les modes d'exploitation de certaines installations de géothermie. Leur prise en compte en amont d'une installation est donc essentielle pour sa pérennité.

##### 3.1.1 Rapide état de l'art

Un état de l'art assez complet des impacts potentiels du stockage thermique sur la qualité des eaux souterraines a été réalisé dans le cadre de la rédaction de l'annexe n°6 intitulée « Environmental and chemical aspects of Thermal Energy Storage in Aquifers and Research and Development of Water Treatment Methods », dans le cadre de l'Implementing Agreement on Energy Conservation Through Energy Storage (ECES) de l'International Energy Agency (IEA). Ce travail de recherche a été mis en œuvre de 1987 à 1995 inclus, et s'est soldé en 1996 avec la rédaction de la version finale de l'annexe n°6 (voir : <http://www.iea-eces.org/annexes/completed-annexes.html>). Il s'agissait d'une étude très poussée, représentant un montant global de 4,2 millions de dollars, avec des expériences sur colonnes en laboratoire, mais également in situ, et ce dans plusieurs pays (USA, Suède, Pays-Bas, Suisse, Allemagne, etc.).

Une synthèse des principaux résultats de cette annexe a été rédigée par A. Snijders (If Technology, 2004). Du point de vue physico-chimique, les effets restent a priori minimes pour des températures inférieures à 40°C. Est remarquée cependant, une tendance à la précipitation de carbonates au puits chaud, et de silicates au puits froid. Du point de vue biologique, les expériences menées ont montré :

- un effet limité sur la composition microbiologique naturelle, pour des eaux contenant peu de carbone organique assimilable ;
- un développement de certaines bactéries qui se trouve favorisé ;
- la participation de bactéries à certaines réactions de mise en solution ou précipitation, soit de façon passive (si elles servent de « germe » de précipitation), soit de façon active (si elles sont catalyseuses de réaction de précipitation).

##### 3.1.2 Intérêts, objectifs et limites de l'étude proposée

Dans le cadre du projet de recherche « Serre capteur d'énergie », l'étude présentée ici se propose de donner un premier aperçu des impacts potentiels des changements de température dans la gamme 10°C - 30°C induits par le stockage thermique, sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines.

Les objectifs sont les suivants :

- évaluer les conséquences possibles à l'échelle de l'installation, pour la pérennité des installations (forages, conduites, échangeurs, etc.) ;
- évaluer les conséquences possibles à l'échelle de l'aquifère (long terme, impact pour les autres usages (eau potable en particulier), en appui pour le montage de dossiers administratifs ;
- en fonction des résultats, proposer pour les installations de stockage thermique :
  - o un protocole de suivi de la qualité des eaux souterraines (physico-chimie, microflore, pathogènes, etc.) ;
  - o des actions préventives et éventuellement correctives.

Cette courte étude ne prétend pas dresser un inventaire de tous les effets possibles, mais entend uniquement mettre en lumière des premiers éléments et évaluer l'importance des modifications, cela pour les eaux spécifiques des deux sites de serres retenus pour le test de stockage thermique ; les deux sites du Ctifl de Balandran et de la Crau ayant en effet des eaux assez différentes du point de vue de leur composition physico-chimique et microbiologique initiale.

Une première étude exploratoire a été réalisée sur la base d'une expérience d'incubation en laboratoire à partir d'échantillons d'eau. Une étude plus poussée consisterait à prélever également du terrain aquifère pour prendre en compte les éventuelles modifications d'interaction entre l'eau et son milieu encaissant. Les conditions d'échantillonnage sont toutefois nettement plus compliquées et plus coûteuses (carottage pour prélèvement de milieu non perturbé, précautions d'échantillonnage pour ne pas induire de pollution bactériologique, etc.).

## 3.2 Evaluation des impacts potentiels liés à la microflore

### 3.2.1 Contexte

L'activité des micro-organismes est étroitement liée à la température. Chaque espèce bactérienne est caractérisée par une température optimale de croissance, et toute modification de la température d'un milieu aura pour effet de modifier la composition de sa microflore et les vitesses des réactions catalysées par les micro-organismes.

Le stockage d'énergie thermique en aquifère pourrait être susceptible d'avoir les impacts suivants liés à l'activité microbienne :

- l'augmentation du nombre de bactéries pathogènes, qui pourraient avoir été antérieurement introduites dans l'aquifère (par des opérations d'épandage de lisier, par exemple) ou naturellement présentes dans les sols (par exemple des *Legionella*) ;
- le colmatage de l'aquifère à proximité du point d'injection par des réactions de précipitation de minéraux catalysées par les bactéries ;
- une modification qualitative et/ou quantitative de l'écosystème bactérien de l'aquifère.

Dans le cas précis du présent projet, seuls les deux premiers types d'impact ont été pris en considération :

- les bactéries pathogènes, dont la croissance pourrait être stimulée par une modification de température, ont été recherchées dans les aquifères étudiés,
- l'impact de la microflore sur la précipitation de minéraux a été étudié au laboratoire, en utilisant des échantillons d'eau souterraine réelle.

Des simulations géochimiques effectuées sur la base de composition chimique des eaux de nappe considérées ont révélé une sur-saturation vis-à-vis de la calcite lors d'une augmentation de température, et vis-à-vis de la silice lorsque la température diminue. La participation des bactéries à diverses réactions de précipitation de carbonates est aujourd'hui largement admise. Les bactéries autotrophes utilisent le CO<sub>2</sub> comme source de carbone, pour produire de la matière organique (biomasse). Un déficit de CO<sub>2</sub> (gaz dissous) est alors induit dans l'environnement immédiat des cellules par rapport aux autres formes d'acide carbonique (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Quand des ions Ca<sup>2+</sup> sont présents, la précipitation de carbonate de calcium est favorisée par la croissance bactérienne. Dans le cycle de l'azote, trois processus participent à la précipitation des carbonates : l'ammonification des acides aminés en aérobiose, la dégradation de la matière organique en condition anaérobie ou micro-aérophile couplée à la respiration des nitrates et la dégradation de l'urée ou de l'acide urique et aérobiose. Ces trois voies métaboliques conduisent à la production de CO<sub>2</sub> dissous et d'ammonium. Le fer et le manganèse sont fréquemment présents dans les eaux souterraines. Des bactéries peuvent contribuer à l'oxydation de ces deux éléments et à leur précipitation sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes. La précipitation de carbonates de fer peut également être catalysée par l'activité bactérienne. Enfin, la microflore peut jouer un rôle passif dans la précipitation de minéraux : en effet les micro-organismes peuvent servir de germes initiant la cristallisation/précipitation des phases solides minérales.

### 3.2.2 Méthodologie

Une campagne de prélèvement a été effectuée le 28 février 2008 sur les deux sites, Balandran et Crau. Tous les échantillons ont été stockés à température ambiante dans un récipient isotherme et ramenés sur les lieux d'analyse ou d'expérience le soir même ou le lendemain.

#### 3.2.2.1 Recherche des germes pathogènes

Des échantillons de 500 ml d'eau ont été prélevés dans des flacons stériles et immédiatement apportés au laboratoire ipl santé, environnement durables Méditerranée, 778 rue de la Croix Verte, 34196 Montpellier.

### 3.2.2.2 Etude de la précipitation de minéraux

Des échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons pénicilline de 50 ml stériles. Sur chaque site, 7 flacons ont été remplis avec de l'eau brute (non filtrée) et 7 flacons ont été remplis avec de l'eau filtrée à 0,22  $\mu\text{m}$ . Une filtration à 0,22  $\mu\text{m}$  est considérée comme « stérilisante », elle permet d'éliminer la quasi-totalité des bactéries et des micro-organismes de taille supérieure à celle des bactéries. Les flacons ont été remplis à raz-bord et hermétiquement scellés avec des bouchons stériles.

Des échantillons d'eau ont également été prélevés pour l'analyse chimique des anions et des cations majeurs, et confiés au Service Métrologie, Monitoring et Analyse (MMA) du Brgm.

Des mesures d'alcalinité, pH et potentiel redox ont été effectuées sur les sites le jour du prélèvement.

Les traitements des échantillons d'eau conditionnés en flacons pénicilline ont été effectués de la façon suivante :

- Pour chaque site, un flacon d'eau brute a été utilisé pour effectuer un comptage de bactéries par observation au microscope optique en fluorescence en utilisant la méthode de coloration au DAPI (Di Aminido Phenyl Indol, cf. Annexe 3) et un autre flacon d'eau brute a été filtré à 0,1  $\mu\text{m}$  afin d'observer au Microscope Electronique à Balayage (MEB) les particules minérales de taille supérieure à 0,1  $\mu\text{m}$ . Le filtre a été séché 24 h à 30°C, puis recouvert d'une couche de carbone (métalliseur EDWARDS Auto 306) puis observé au MEB. Les expériences de microscopie électronique ont été réalisées avec un microscope JEOL JSM 6100 couplé à un spectromètre de rayons X en dispersion d'énergie (EDS pour Energy Disperive Spectrometry) KEVEX Quantum.
- Il restait à cette étape 6 flacons d'eau brute et 6 flacons d'eau filtrée à 0,22  $\mu\text{m}$  pour chaque site. Ces flacons ont été divisés en deux groupes : 3 ont été placés à 10°C (température de puits froids), et 3 ont été placés à 30°C (température de puits chauds). L'incubation a été effectuée du 29 février au 29 mai 2008 (3 mois). Les flacons placés dans l'incubateur à 30°C sont montrés ci-après (Figure 19).
- En fin d'incubation, un flacon de chaque triplicat a été sacrifié pour effectuer une mesure d'alcalinité. Les autres flacons ont été traités de la façon suivante. Les flacons d'eau brute ont été analysés (flore totale en DAPI et MEB) de la même façon que ceux des eaux initiales avant incubation. Les flacons d'eau initialement filtrée à 0,22  $\mu\text{m}$  puis incubés ont fait l'objet d'une observation rapide au microscope optique afin de vérifier l'absence de tout germe bactérien, puis ont été filtrés à 0,1  $\mu\text{m}$  pour l'observation au MEB des précipités néoformés. Les filtrats ont été envoyés au service d'analyse MMA du Brgm pour l'analyse des cations et anions majeurs.

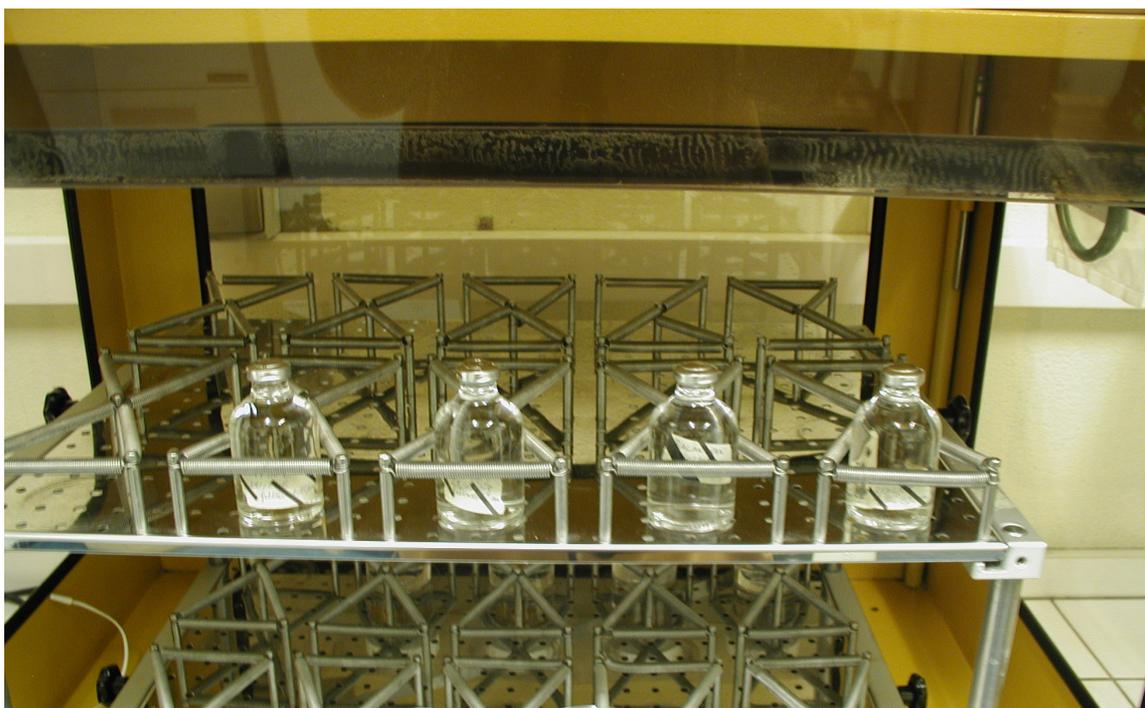


Figure 19 - Flacons pénicilline de 50 ml remplis d'eaux prélevées sur les sites de la Crau et du Ctifl, incubés à 30°C

### 3.2.3 Résultats

#### 3.2.3.1 Description des « profils » des eaux des deux sites

Les résultats des analyses chimiques des eaux des deux sites sont donnés en Annexe 1. L'eau du site de la Crau se distingue de celle du site du Ctifl à Balandran par la présence en concentrations nettement plus élevées de nitrate, sulfate et calcium. Les mesures de terrain (Annexe 2) indiquent des valeurs plus élevées de conductivité et d'alcalinité sur le site de la Crau que sur le site du Ctifl. Ces résultats pourraient refléter l'impact de l'utilisation de substances fertilisantes sur le site de la Crau. Ces apports de fertilisants auraient pour effet d'augmenter la quantité de micro-organismes dans l'aquifère (apport de nutriments).

Les résultats des analyses effectuées par le laboratoire ipl santé, environnement durables Méditerranée montrent qu'effectivement l'eau de la Crau contient davantage de germes revivifiables que l'eau du Ctifl (Tableau 2). Par contre, aucune des eaux analysées ne contient de germes pathogènes d'origine fécale.

Tableau 2 - Analyse des paramètres microbiologiques effectuée par le laboratoire ip santé, environnement durables Méditerranée sur les eaux prélevées le 28/02/2008

	Crau		Ctifl (Balandran)	
Bactéries aérobies revivifiables à 36°C (44 h d'incubation)	180	UFC/ml	0	UFC/ ml
Bactéries revivifiables à 22°C (68 h d'incubation)	210	UFC/ml	0	UFC/ ml
Coliformes totaux	0	UFC/100 ml	0	UFC/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	0	UFC/100 ml	0	UFC/100 ml
Entérocoques	0	UFC/100 ml	0	UFC/100 ml
Spores de bactéries sulfito-réductrices	0	UFC/100 ml	0	UFC/100 ml

#### 3.2.3.2 Résultats après incubation - Etude de la précipitation de minéraux

##### ▪ Evolution de la quantité de germes totaux

L'évolution de la quantité de germes totaux a été évaluée dans les flacons pénicilline contenant de l'eau brute (non filtrée) incubés aux températures de puits froids (10°C) et de puits chauds (30°C). Les résultats de ces dénombrements sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 3 - Dénombrement des germes totaux par la méthode de coloration DAPI

	Crau	Ctifl (Balandran)
T0 (prélèvement)	100 bact/ml	3,5 x 10 <sup>4</sup> bact/ml
Incubé à 10°C	7,9 x 10 <sup>4</sup> bact/ml	12,3 x 10 <sup>4</sup> bact/ml
Incubé à 30°C	29,9 x 10 <sup>4</sup> bact/ml	7,7 x 10 <sup>4</sup> bact/ml

Pour le dénombrement initial, contrairement aux résultats obtenus par le laboratoire ipl santé environnement durable Méditerranée, la méthode DAPI permet de détecter davantage de cellules dans l'eau du Ctifl que dans l'eau de la Crau. Cette apparente contradiction peut s'expliquer si l'on considère que le laboratoire ipl a utilisé des milieux riches permettant de détecter des germes revivifiables « contaminants » issus d'environnements plus riches que des aquifères. La méthode DAPI, quant à elle, permet d'observer l'ensemble des bactéries (le DAPI se fixe sur l'ADN de tous les organismes). Les résultats obtenus semblent signifier que l'eau de l'aquifère de la Crau contient en majorité des germes « contaminants » détectables sur milieu riche, alors que l'eau de l'aquifère du Ctifl contient presque uniquement des organismes « oligotrophes » qui ne se développent pas sur milieu riche. Ces organismes oligotrophes sont davantage susceptibles d'être présents en tant que microflore propre à l'aquifère que les bactéries revivifiables sur milieu riche. Ce résultat suggère que la flore de la Crau est déjà impactée par les activités anthropiques, alors que la nappe du Ctifl semble plus préservée et « naturelle ».

Cette hypothèse semble confirmée par les dénombrements effectués en fin d'incubation. En effet, le nombre de bactéries totales augmente davantage à 30°C qu'à 10°C dans l'eau de la Crau, ce qui révèle la présence de bactéries dont l'optimum de croissance est supérieur à celui de la température de l'aquifère (donc des bactéries contaminantes ou exogènes). Par contre, dans l'eau du Ctifl, le nombre de bactéries augmente davantage à 10°C qu'à 30°C : la microflore de ce site est plutôt psychrophile, son optimum de croissance se situe à des températures relativement basses. Il s'agit donc probablement de bactéries autochtones à l'aquifère (endogènes). Les résultats donnés par le tableau précédent (Tableau 3) montrent également que

l'impact d'un changement de température sur la concentration en bactéries serait plus important sur le site de la Crau que sur le site du Ctifl.

La figure suivante (Figure 20) montre l'aspect des populations colorées au DAPI issues de flacons incubés à 30°C.

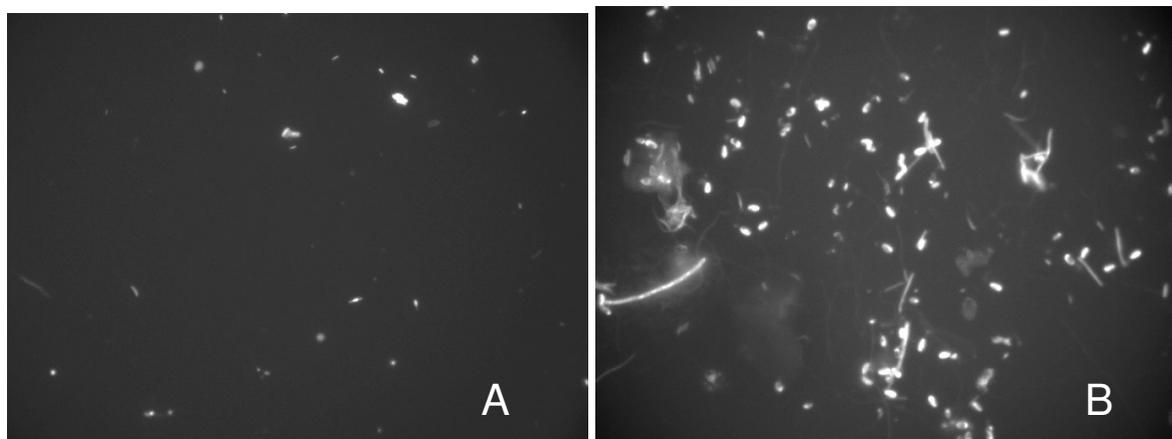


Figure 20 - Observation en épifluorescence sur filtre des bactéries colorées par la méthode DAPI. A : site du Ctifl, B : site de la Crau

La population bactérienne présente dans l'eau de la Crau incubée à 30°C contient de nombreux bâtonnets courts et épais, ainsi que des bâtonnets plus longs.

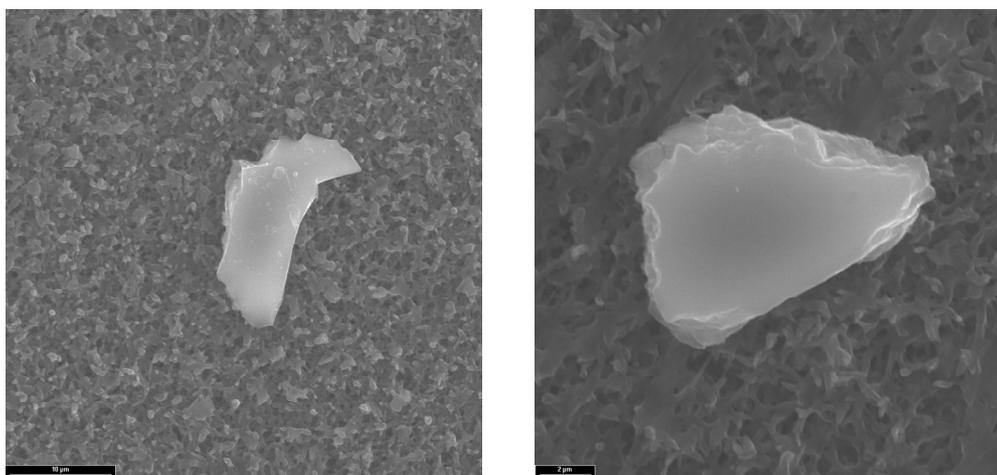
En conclusion, l'impact du stockage d'énergie thermique sur la microflore totale serait plus prononcé sur le site de la Crau que sur le site du Ctifl, avec une prolifération probable au niveau du puits chaud de bactéries n'appartenant pas à la microflore naturelle de l'aquifère.

#### ▪ Impact de la microflore sur la précipitation des minéraux

Pour tous les échantillons analysés, un volume équivalent d'eau (50 ml) a été filtré à 0,1 µm, et les particules retenues par le filtre ont été observées au MEB.

##### ➤ *Etat initial*

L'état initial révèle quelques particules éparses seulement dans l'eau du Ctifl. Il s'agit de particules contenant de la silice, du calcium (Figure 21) ou du fer (Figure 22). Une particule riche en fer en forme de torsade (Figure 22) est de façon certaine (caractéristique) le produit de l'oxydation de fer ferreux par une bactérie du genre *Gallionella*. Lors du prélèvement, il avait été remarqué que l'eau du Ctifl présentait une couleur rougeâtre au moment de la mise en route de la pompe (Annexe 2).



Silice majoritaire, barre = 10 µm

Calcium majoritaire, barre = 2 µm

Figure 21 - Particules isolées observées dans l'eau du Ctifl, à l'état initial

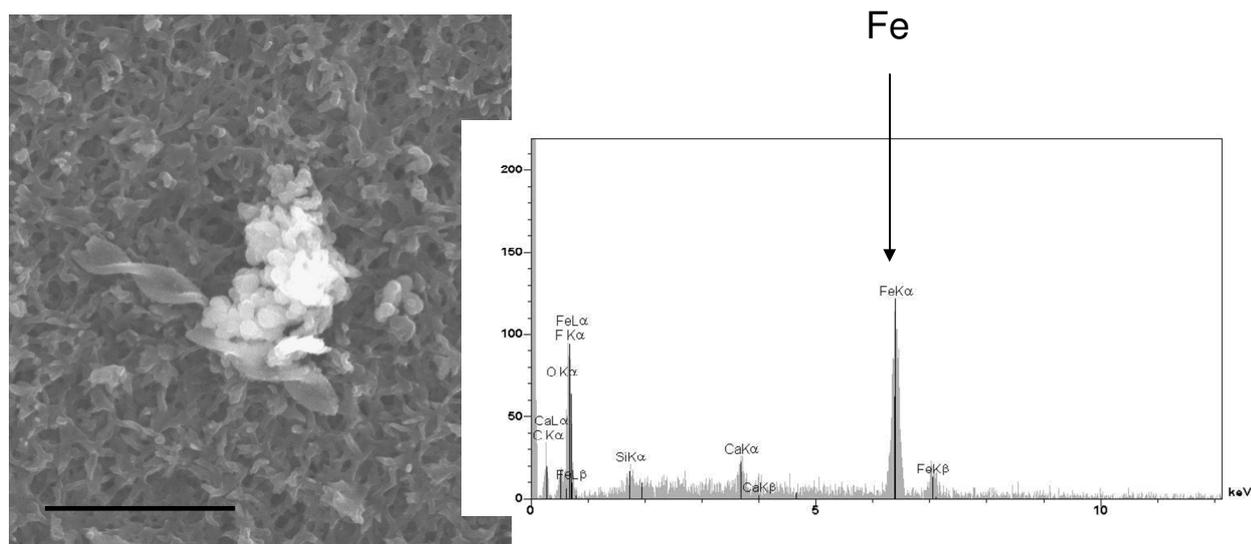


Figure 22 - Particule isolée d'oxyde de fer typiquement produit par la bactérie *Gallionella*, présente dans l'eau du Ctifl à l'état initial

A l'état initial (avant incubation), l'eau du site de la Crau contient déjà de nombreuses particules. Une vue générale du filtre montre qu'il est couvert de particules. Le spectre en rétrodiffusion de ce tapis indique de façon qualitative la composition chimique de ces particules :  $Si \gg Al = Ca > Fe = K > Mg$ . Les silicates seraient majoritaires, suivis par les carbonates (Figure 23). Quelques particules riches en Pb, Ni ou Mn sont observées. Cette figure (Figure 23) semble montrer que les particules riches en silice sont plus petites et plus nombreuses que les particules riches en calcium.

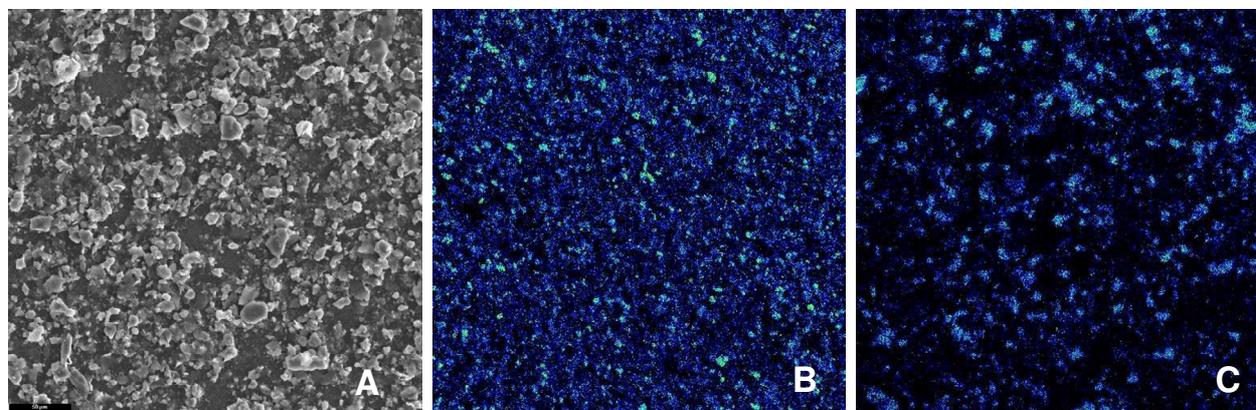


Figure 23 - Observation et analyse au MEB des particules présentes dans l'eau de la Crau à l'état initial. A : observation générale du filtre (barre = 50 µm). B : cartographie de la silice. C : cartographie du calcium.

#### ➤ Observations après incubation

Les observations effectuées sur les eaux filtrées à 0,22 µm puis incubées montrent la présence de particules rares et éparses (Figure 24 et Figure 25). Les précipités néoformés durant l'incubation ne sont pas très nombreux. Pour l'eau du Ctifl, les particules précipitées à 10°C sont principalement composées de silice, alors que les particules précipitées à 30°C contiennent du calcium en tant qu'élément principal. Pour l'eau de la Crau, des particules riches en silice, calcium, fer, aluminium sont observées aux deux températures.

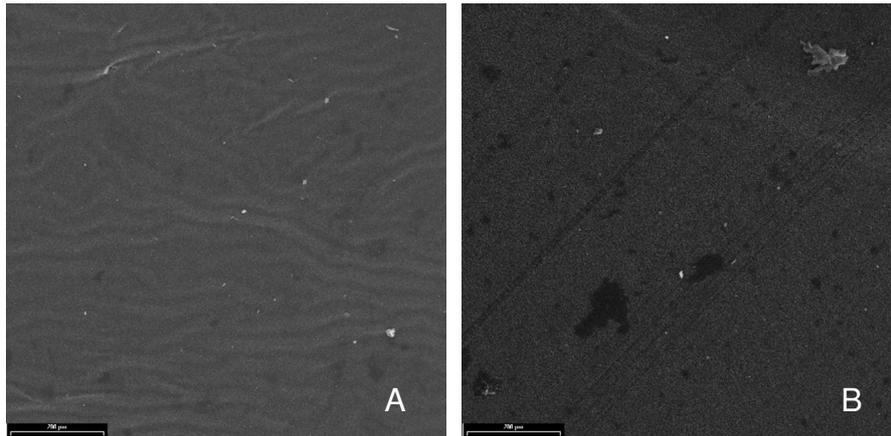


Figure 24 - Eau du Ctifl filtrée à 0,22 $\mu$ m puis incubée à A : 10°C et B : 30°C pendant 3 mois. Observation au MEB (barre = 200  $\mu$ m).

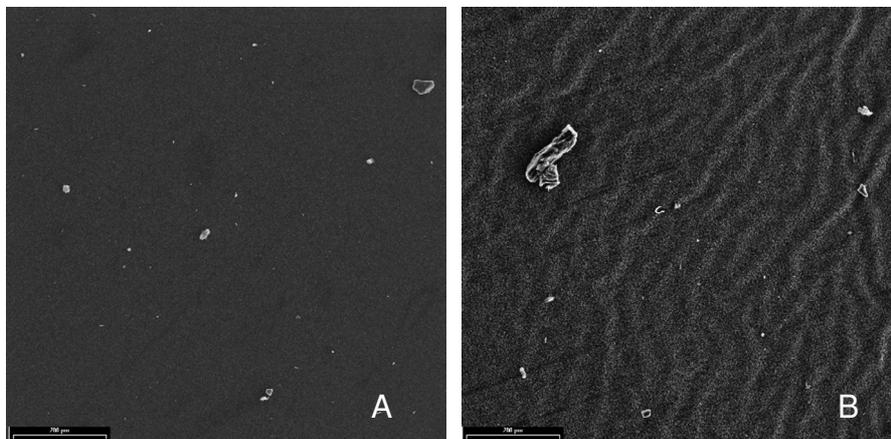


Figure 25 - Eau de la Crau filtrée à 0,22 $\mu$ m puis incubée à A : 10°C et B : 30°C pendant 3 mois. Observation au MEB (barre = 200  $\mu$ m).

Les observations au microscope optique des eaux filtrées à 0,22  $\mu$ m ont montré que ces eaux sont demeurées stériles jusqu'à la fin de l'incubation.

Les eaux brutes (non filtrées), contenant la microflore totale, ont été analysées de la même façon. Pour le site du Ctifl, l'eau brute observée avant incubation était très pauvre en particules. Après incubation, des amas de précipités néoformés sont observés. A 10°C, ces amas sont constitués majoritairement d'oxydes de fer, avec une contribution moindre de la silice, puis du calcium (Figure 26). Ces amas contiennent des particules torsadées caractéristiques des oxydes de fer produits par la bactérie *Gallionella*. Une particule de ce type avait été observée dans l'eau avant incubation (Figure 22), mais de façon isolée. En fin d'incubation, les particules de ce type sont beaucoup plus nombreuses et organisées en amas.

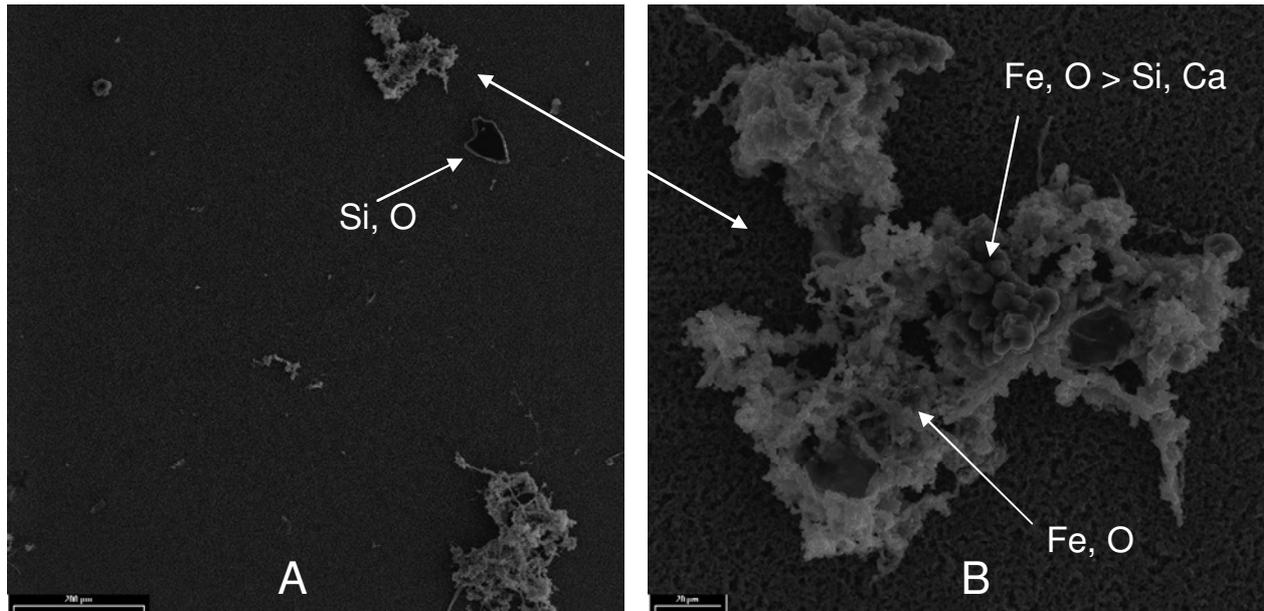


Figure 26 - Eau du Ctifl brute, incubée à 10°C. A : barre = 200 µm, B : barre = 20 µm

Pour ce même site du Ctifl, l'eau brute incubée à 30°C (Figure 27) contient également des amas de particules riches en fer produites par *Gallionella*, mais qui semblent plus petits et plus nombreux, et davantage associés à des particules riches en calcium qu'à 10°C

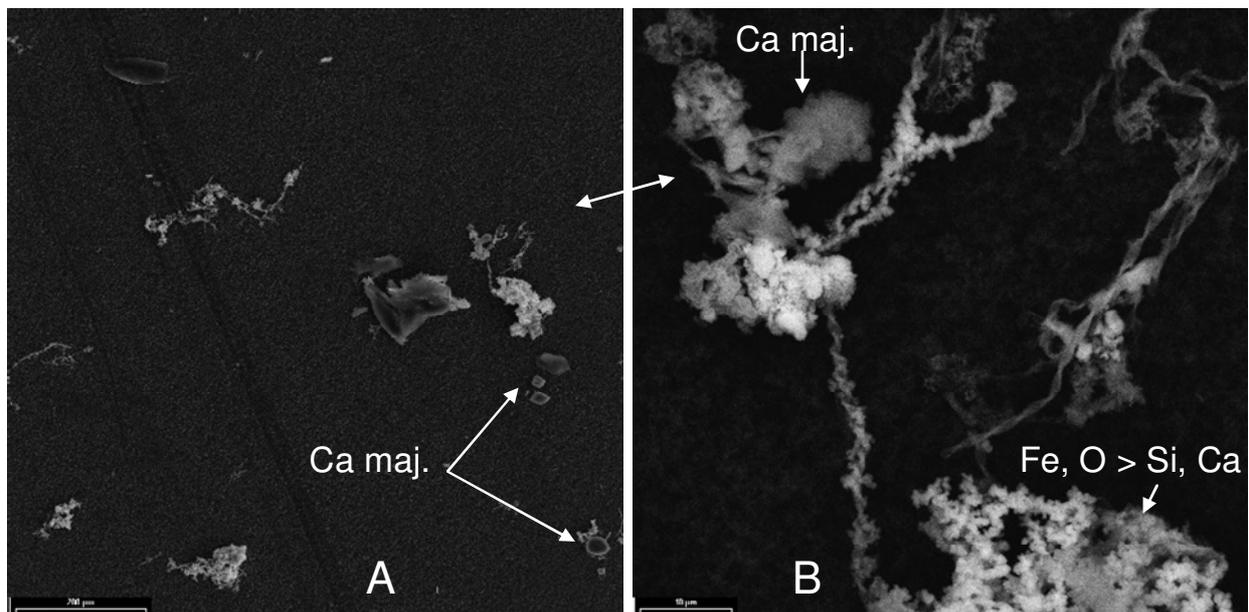


Figure 27 - Eau du Ctifl brute, incubée à 30°C. A : barre = 200 µm, B : barre = 10 µm

L'eau du Ctifl incubée en présence de la microflore est donc dominée, au niveau minéralogique, par des particules d'oxy-hydroxydes de fer d'origine biologique, accompagnées soit de particules de silice à 10°C, soit de carbonates de calcium à 30°C.

L'eau brute de la Crau, incubée à 10°C, contient de nombreuses particules au sein desquelles la silice semble dominer (Figure 28) ; une particule d'oxyde de fer (isolée) produite par *Gallionella* est observée (Figure 29).

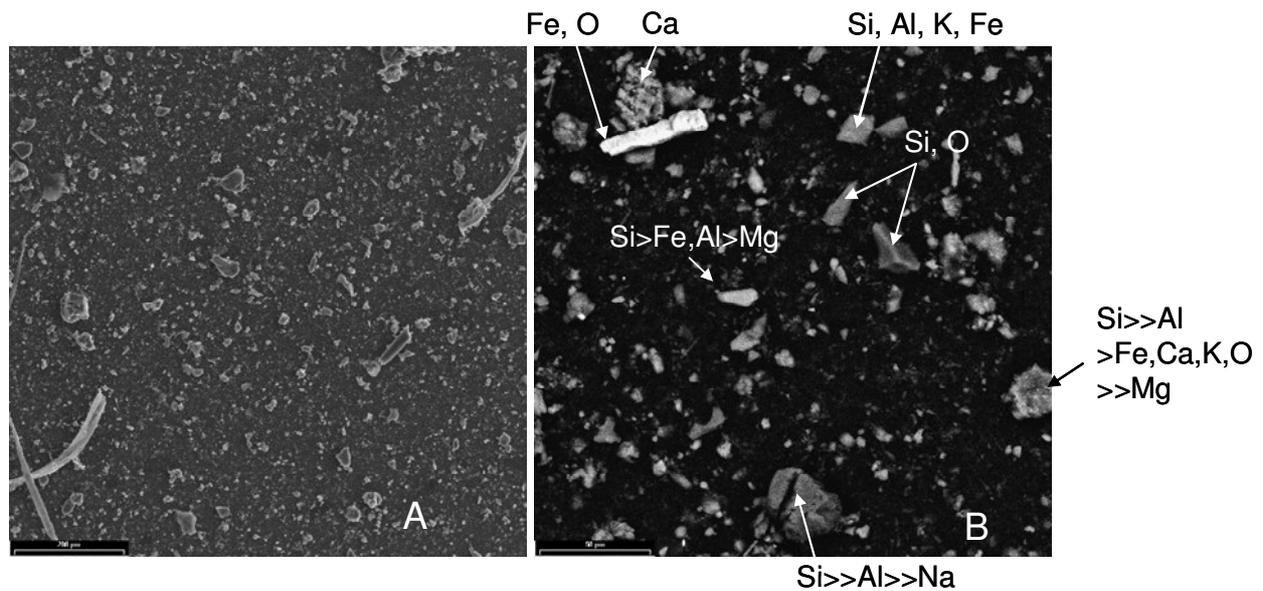


Figure 28 - Eau de la Crau brute, incubée à 10°C. A : barre = 200 µm ; B : barre = 50 µm

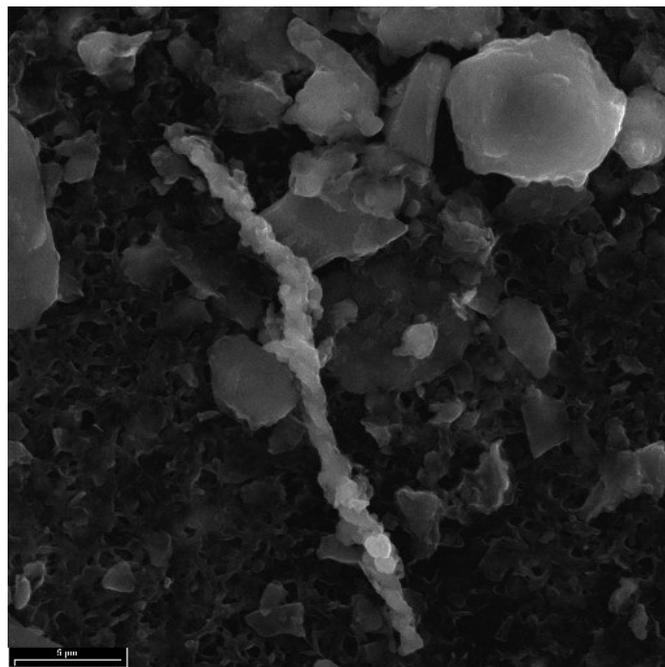


Figure 29 - Eau de la Crau brute, incubée à 10°C. Oxyde de fer produit par *Gallionella*. Barre = 5 µm.

Dans l'eau brute de la Crau incubée à 30°C, les particules riches en calcium sont majoritaires (Figure 30). Elles sont principalement groupées en amas, peut-être agglomérées par des exopolymères bactériens.

L'observation avant incubation (Figure 23) montrait des particules indépendantes réparties de façon homogène sur le filtre. Le comportement de l'eau brute de la Crau est donc proche de celui prédit par la modélisation géochimique, qui annonçait la précipitation de silice à 10°C et de calcite à 30°C (cf. §3.3).

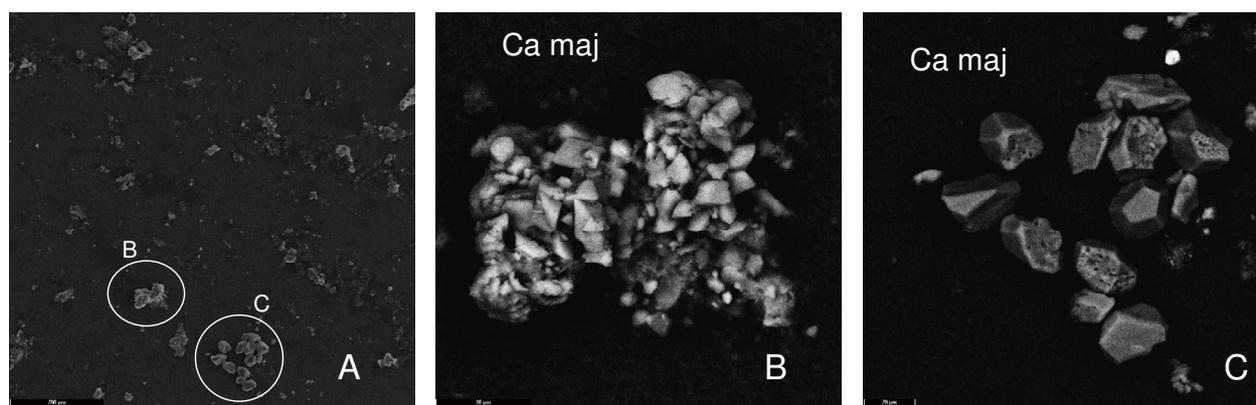


Figure 30 - Eau de la Crau brute, incubée à 30°C. A : barre = 200 µm ; B et C : barre = 20 µm.

Les observations au MEB ont donc montré que la température a un effet sur la composition finale des phases solides, surtout en présence de bactéries. Elles indiquent également la présence dans les deux eaux de bactéries du fer, appartenant à l'espèce *Gallionella*, qui se développent aux deux températures mais préférentiellement à 10°C. L'élément Fe n'a pas été analysé dans les eaux prélevées le 28 février 2008. Les aquifères choisis sont a priori pauvres en Fe dissous, cependant une couleur rouge a été observée en début de pompage sur le site du Ctifl. Ce fer pourrait provenir de la corrosion du tubage, mais ce facteur sera à contrôler au cours de la prochaine phase du projet (test in situ).

➤ *Mesures d'alcalinité en fin d'incubation*

Les alcalinités des eaux, exprimées en mg/l d' $\text{HCO}_3^-$ , sont données dans le tableau suivant (Tableau 4). Les valeurs d'alcalinité ont diminué dans tous les flacons incubés par rapport aux valeurs du site. Les carbonates ont été soustraits de la solution soit par dégazage de  $\text{CO}_2$ , soit par précipitation de carbonates solides. Une dégazage de  $\text{CO}_2$  aurait entraîné une augmentation de pH alors que le pH dans tous les flacons a diminué. Dans une seule condition, l'alcalinité est nettement plus faible dans le flacon contenant de l'eau brute que dans le flacon contenant de l'eau filtrée : pour l'eau de la Crau incubée à 30°C. Il s'agit de la condition dans laquelle la prolifération bactérienne a été la plus importante. Pour cette condition expérimentale, le pH de l'eau brute est également nettement plus faible que le pH de l'eau filtrée. Une chute de pH pourrait donc bien être liée à la précipitation de carbonate solide.

Tableau 4 - Valeurs d'alcalinités et de pH sur site et en fin d'incubation

	Ctifl Alcalinité mg/l d' $\text{HCO}_3^-$ (pH)	Crau Alcalinité mg/l d' $\text{HCO}_3^-$ (pH)
In-situ	<b>234 (7,15)</b>	<b>249 (7,47)</b>
Incubé 10°C filtré	212 (5,99)	233 (6,39)
Incubé 10°C non filtré	210 (5,95)	231 (6,42)
Incubé 30°C filtré	212 (6,19)	211 (6,48)
Incubé 30°C non filtré	212 (6,24)	<b>166 (6,22)</b>

Il est important de noter que dans ces expériences, réalisées en conditions de batch (pas de prise en compte d'écoulement) et en absence de phase solide, le pH a évolué. Une acidification a été observée. Cela ne serait pas le cas dans l'aquifère réel, puisque la phase solide de l'aquifère aurait un effet tampon. Les réactions de précipitation, en particulier de carbonate de calcium, seraient accélérées si le pH était maintenu à sa valeur initiale.

L'interprétation de l'ensemble de ce programme expérimental sera complétée dans le rapport final par les résultats des analyses de cations et anions majeurs.

### 3.3 Evaluation des impacts potentiels sur la qualité physico-chimique

#### 3.3.1 Méthodologie

L'évaluation des impacts potentiels des modifications de températures (chaud et froid) engendrées par le stockage d'énergie thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique (modification des équilibres chimiques, risques de colmatage, risques de corrosion, etc.), est effectuée par modélisation à l'aide du code de calcul géochimique PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999). Les modélisations géochimiques sont effectuées avec les hypothèses suivantes :

- les équilibres sont supposés instantanés ;
- pas de prise en compte d'écoulement (modélisation dite « en batch ») ;
- pas de prise en compte de l'effet de la matière organique.

Ce code est utilisé pour caractériser la stabilité des équilibres chimiques dans les eaux des aquifères de la Crau et de Balandran. Ces essais permettent d'évaluer dans un premier temps la qualité des eaux initiales, sans matière organique, avant installation du stockage d'énergie thermique. Ensuite plusieurs chemins réactionnels avec variation de la température (chemin puits froid à puits chaud/puits chaud à puits froid) sont réalisés afin d'envisager la réactivité du système après installation des puits, mais toujours sans prise en compte de la matière organique.

#### 3.3.2 Spéciation de l'état initial des eaux de nappe de la Crau et du Ctifl de Balandran

##### 3.3.2.1 Solutions utilisées : Equilibrage de la balance ionique

L'électroneutralité  $E_{\pm}(\%)$  renseigne sur la qualité de l'analyse et permet ainsi d'écarter toute erreur d'analyse de l'interprétation des résultats de la modélisation.

Le logiciel donne également la balance électrique ionique de la solution exprimée ci-dessous. Une solution aqueuse doit être électriquement neutre c'est à dire que la somme des charges des ions positifs doit être égale à la somme des charges d'ions négatifs.

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

avec :

$C$  : Cations ;  $A$  : Anions ;  $E_{\pm}(\%)$  : balance électrique ionique ;  $z_i+$  et  $z_j-$  : charges positives et négatives respectivement.

$E_{\pm}(\%) < 5\%$  : analyse bonne ;  $5\% < E_{\pm}(\%) < 10\%$  : analyse médiocre ;  $E_{\pm}(\%) > 10\%$  analyse inexploitable.

Les résultats d'analyse de la composition des eaux des sites de Crau et de Balandran présentent des  $|E_{\pm}(\%)| < 5\%$ . Cependant, afin d'obtenir une balance ionique nulle, les concentrations d'ions majeurs seront légèrement modifiées.

##### ▪ Aquifère de la Crau : mesure du 02/2008

La solution présente un déficit en cations ( $E_{\pm}(\%) < 0$ ). Devant les fortes teneurs en nitrates et l'incertitude sur la mesure, la concentration en  $\text{NO}_3^-$  a été modifiée ( $[\text{NO}_3^-]_{ini} = 182,4 \text{ mg.l}^{-1}$  à  $[\text{NO}_3^-]_{modif} = 175,6 \text{ mg.l}^{-1}$ ) ainsi que la teneur en  $\text{Cl}^-$  ( $[\text{Cl}^-]_{ini} = 73 \text{ mg.l}^{-1}$  à  $[\text{Cl}^-]_{modif} = 69,3 \text{ mg.l}^{-1}$ ). La modification de ces valeurs permet d'obtenir une balance ionique nulle.

##### ▪ Aquifère de Balandran : Mesure du 02/2008

La solution présente un déficit en cations (Percent error,  $100 \cdot (\text{Cat} - |\text{An}|) / (\text{Cat} + |\text{An}|) < 0$ ). En considérant l'incertitude sur la mesure, la concentration en  $\text{NO}_3^-$  a été modifiée ( $[\text{NO}_3^-]_{ini} = 29,8 \text{ mg.l}^{-1}$  à  $[\text{NO}_3^-]_{modif} = 28,31 \text{ mg.l}^{-1}$ ) ainsi que la teneur en  $\text{Cl}^-$  ( $[\text{Cl}^-]_{ini} = 23,9 \text{ mg.l}^{-1}$  à  $[\text{Cl}^-]_{modif} = 22,705 \text{ mg.l}^{-1}$ ) et la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  ( $[\text{Ca}^{2+}]_{ini} = 96,9 \text{ mg.l}^{-1}$  à  $[\text{Ca}^{2+}]_{modif} = 101,2 \text{ mg.l}^{-1}$ ). La modification de ces valeurs permet d'obtenir une balance ionique nulle (Tableau 5).

Tableau 5 - Composition des solutions de la Crau et de Balandran

	CRAU		BALANDRAN	
	mg.l <sup>-1</sup>	mol.kgH <sub>2</sub> O <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mol.kgH <sub>2</sub> O <sup>-1</sup>
pH	7,65*		7,42*	
Temp(°C)	17,03*		15,03*	
pe	9,53*		9,6*	
Concentration	mg.l <sup>-1</sup>	mol.kgH <sub>2</sub> O <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mol.kgH <sub>2</sub> O <sup>-1</sup>
Alcalinité HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq,l <sup>-1</sup> )	4,08	4.23 x 10 <sup>-3</sup>	3,83	3,830 x 10 <sup>-3</sup>
Br	0,7	8,76 x 10 <sup>-6</sup>	0,2**	2,503x 10 <sup>-6</sup>
Ca	199,9	4,99x 10 <sup>-3</sup>	101,2	2,525 x 10 <sup>-3</sup>
Cl**	69,3	1,96 x 10 <sup>-3</sup>	22,705	6,404 x 10 <sup>-4</sup>
F	0,1	5,26 x 10 <sup>-6</sup>	0,2	1,053 x 10 <sup>-5</sup>
K	4,5	1,15 x 10 <sup>-4</sup>	0,7	1,790 x 10 <sup>-5</sup>
Mg	8,5	3,5 x 10 <sup>-4</sup>	6,9	2,839 x 10 <sup>-4</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>**</sup>	175,6	2,83 x 10 <sup>-3</sup>	28,31	4,567 x 10 <sup>-4</sup>
Na	17,9	7,79 x 10 <sup>-4</sup>	15,3	6,655 x 10 <sup>-4</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	129	1,34 x 10 <sup>-3</sup>	65,4	6,810 x 10 <sup>-4</sup>
Si	10,9	1,81 x 10 <sup>-4</sup>	16	2,663 x 10 <sup>-4</sup>

\*Mesures de terrain (P. Auger)\*\*valeurs modifiées à hauteur de 5 % d'erreur maximum sur la mesure afin d'équilibrer la balance ionique.

### 3.3.2.2 Détermination des principales phases solides à l'équilibre avec les solutions

De manière générale, les deux eaux sont à l'équilibre, voire légèrement sursaturées vis-à-vis des carbonates comme la calcite et la dolomite ainsi qu'avec la silice. Les sulfates tels que l'anhydrite ne sont pas stables dans les deux aquifères (Figure 31), comme le montrent les indices de saturation<sup>2</sup> (IS).

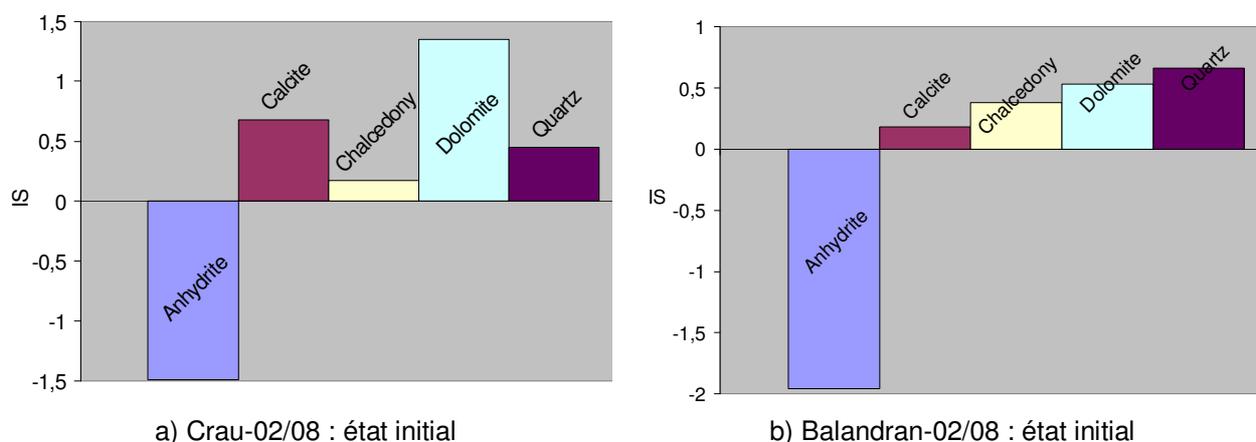


Figure 31 - IS issus des spéciations des eaux de la Crau et de Balandran

<sup>2</sup> Un indice de saturation positif indique une sur-saturation de la solution en l'élément considéré (tendance à la précipitation), inversement, un IS négatif indique une sous-saturation (tendance à la dissolution).

L'IS du quartz est donné à titre indicatif car il s'agit d'un minéral natif des roches des sites étudiés. La phase secondaire silicatée susceptible de précipiter dans le système est représentée par la calcédoine. Les minéraux carbonatés comme la calcite et la dolomite sont à prendre en compte dans le cas de précipitations secondaires causées du colmatage.

### 3.3.3 Simulation de la variation de température sur la stabilité des minéraux : sites de la Crau et du Ctifl de Balandran

#### 3.3.3.1 Variations de température sur les eaux initiales

Les principaux minéraux secondaires susceptibles de précipiter dans le système sont ici étudiés en fonction de l'augmentation ou de la diminution de température de la solution (Figure 32).

##### ▪ Augmentation de la température de $T^{\circ}\text{C}_{\text{initiale}}$ à $30^{\circ}\text{C}$

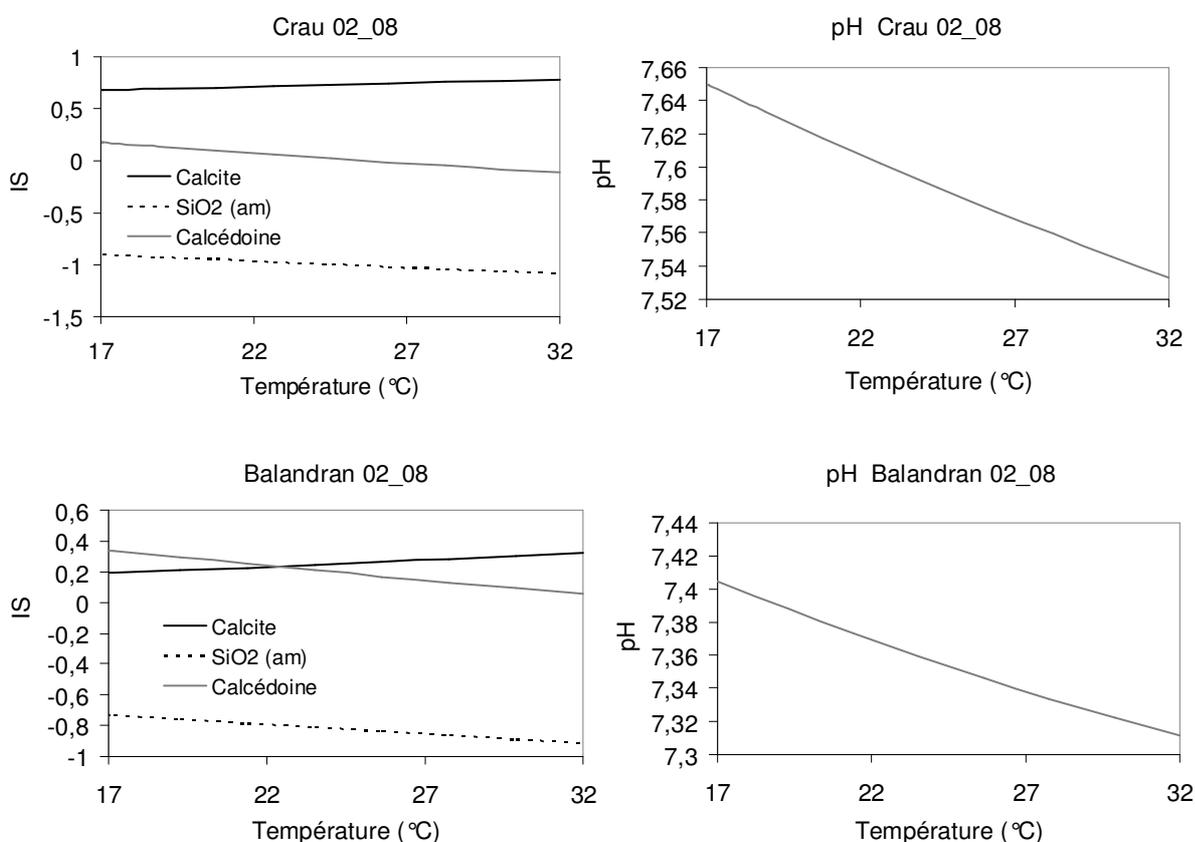


Figure 32. Impact de l'augmentation de la température sur la stabilité des minéraux et sur le pH des eaux de l'aquifère de la Crau et de Balandran.

Ces premiers résultats montrent que la solubilité de la calcite diminue légèrement lorsque la température augmente (IS croissant). La valeur du pH diminue avec l'augmentation de température tandis que la solubilité de la silice augmente.

##### ▪ Diminution de la température de $T^{\circ}\text{C}_{\text{initiale}}$ à $10^{\circ}\text{C}$

Les mêmes solutions sont maintenant soumises à une diminution de température. La solubilité de la calcite ainsi que le pH augmentent avec la diminution de la température alors que la solubilité diminue pour la silice (Figure 33).

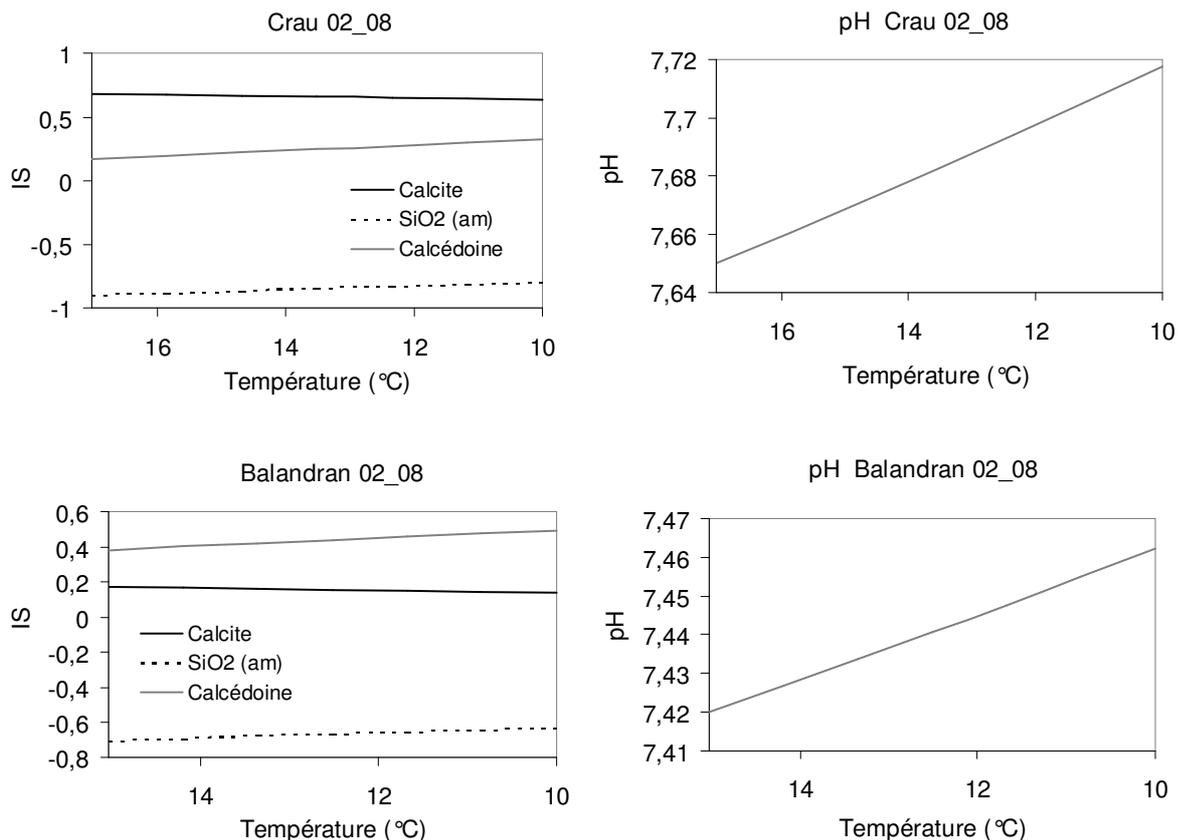


Figure 33. Impact de la diminution de la température sur la stabilité des minéraux et sur le pH des eaux de l'aquifère de la Crau et de Balandran.

Les tendances principales sont donc une déstabilisation préférentielle des carbonates et précipitations des silicates en cas de diminution de température contre une dissolution préférentielle des silicates et précipitation des carbonates lorsque la température augmente.

### 3.3.3.2 Simulation d'un chemin réactionnel avec circulation entre puits froid et puits chaud

Un fonctionnement simple en batch est réalisé avec changement de température pour simuler le fonctionnement hydrochimique possible autour des puits « chaud » et puits « froid » du système de stockage d'énergie thermique. N'ayant pas connaissance des propriétés minéralogiques du sol, l'aquifère est défini pour le moment par un assemblage théorique de calcite, dolomite, calcédoine et kaolinite (fraction argileuse). Ces minéraux sont à l'équilibre avec les solutions étudiées.

La simulation est réalisée en augmentant la température de la valeur naturelle des eaux des sites de la Crau et de Balandran jusqu'à la valeur de 30°C (Figure 34 et Figure 35) en considérant plusieurs valeurs du log de la pCO<sub>2</sub> (-1,77 ; -2,34 ; valeur obtenue d'après la spéciation des eaux de la Crau, -2,13, valeur obtenue d'après la spéciation des eaux de Balandran et -3,5 correspondant à la valeur à l'équilibre avec l'atmosphère). Le système est ensuite refroidi à 10°C puis réchauffé à 30°C.

Pour les deux sites, l'augmentation de la température conduit à la diminution de la solubilité de la calcite et de la dolomite (puits chaud). Lorsque le système est refroidi, l'IS atteint des valeurs négatives indiquant une dissolution possible de la calcite (puits froid). La deuxième augmentation de température conduit à la reprécipitation de la calcite dans le système. Ceci est observé quelle que soit la valeur de la pCO<sub>2</sub>. Cependant aux valeurs proches de la pression partielle de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, les valeurs d'IS sont proches de zéro. Le pH varie également en fonction du sens du passage du puits chaud au puits froid.

La valeur de pCO<sub>2</sub> retenue est celle calculée d'après la spéciation originale des deux solutions (log pCO<sub>2</sub>Crau = -2,34 ; log pCO<sub>2</sub>Balandran = -2,13).

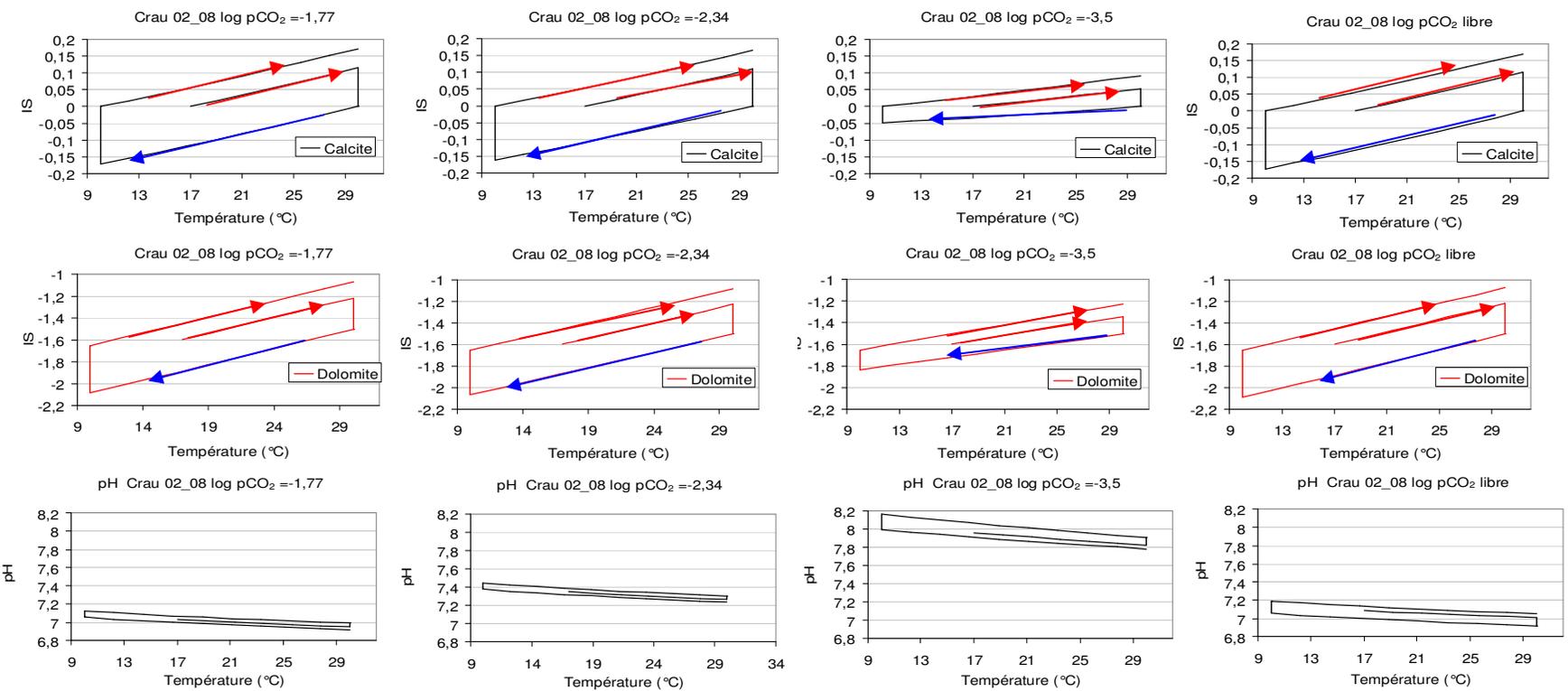


Figure 34 - Chemin réactionnel thermique : IS des carbonates et pH pour la solution de la CRAU avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

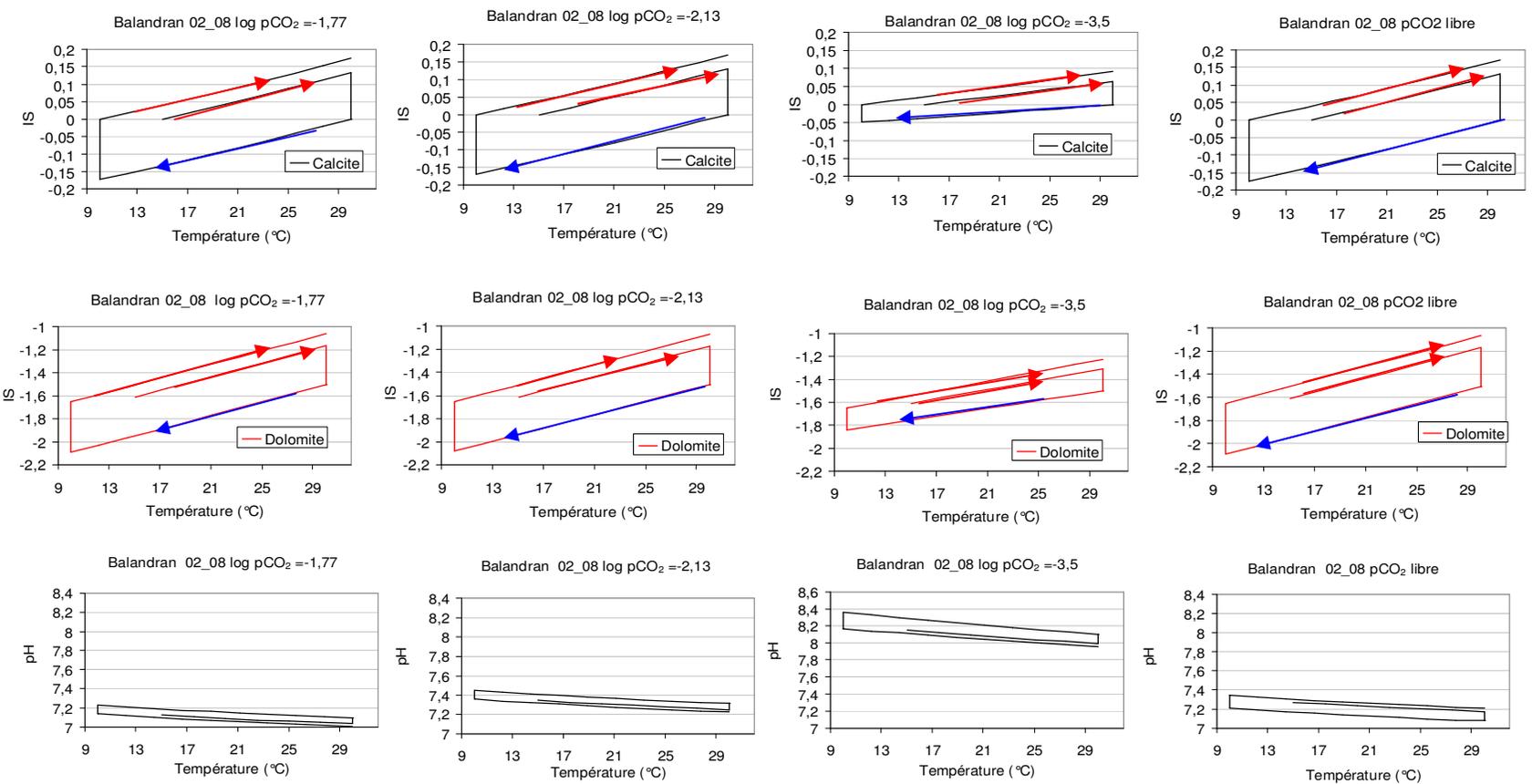


Figure 35 - Chemin réactionnel thermique : IS des carbonates et pH pour la solution de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

L'effet de la variation de la température du système sur les silicates est totalement opposé à celui sur les carbonates (Figure 36 et Figure 37). La solubilité diminue en cas de diminution de température contre une augmentation en cas d'augmentation de la température.

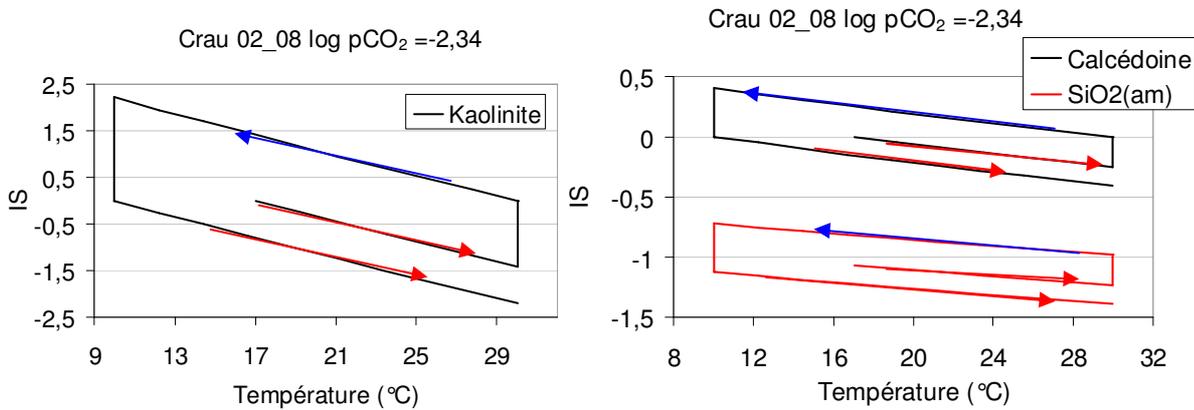


Figure 36 - Chemin réactionnel thermique : IS des silicates pour la solution de la Crau avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

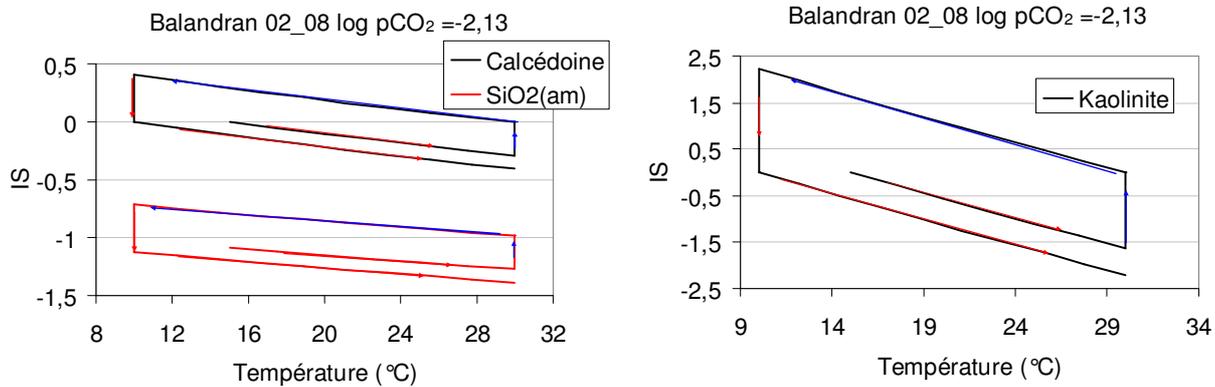


Figure 37 - Chemin réactionnel thermique : IS des silicates pour la solution de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

L'effet de ces transferts puits chaud à puits froid conduit à la diminution de la teneur en  $Ca^{2+}$  avec l'augmentation de la température et à son augmentation avec la diminution de la température. L'effet inverse est observé pour la silice dissoute (Figure 38 et Figure 39).

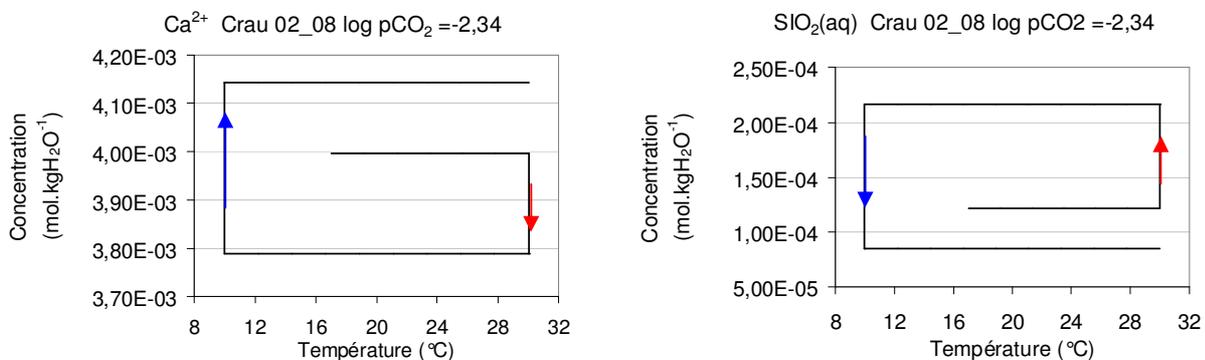


Figure 38 - Chemin réactionnel thermique : Concentration en Calcium et en Silice des eaux de la Crau avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

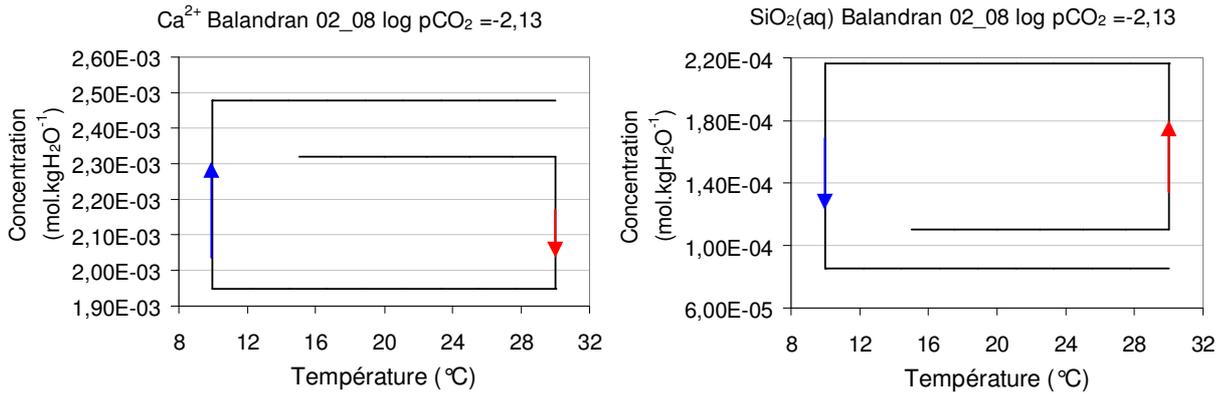


Figure 39 - Chemin réactionnel thermique : Concentration en Calcium et en Silice des eaux de Balandran avec cortège minéralogique à l'équilibre (Kaolinite, Dolomite, Calcite, Calcédoine) : Augmentation de la température de 17,03°C à 30°C (Flèches rouges), refroidissement de 30°C à 10°C (Flèches bleues) et dernier chauffage à 30°C.

### 3.3.4 Conclusions

En fonction de l'état de saturation initiale des eaux des sites de la Crau et de Balandran, on peut s'attendre à la dissolution des carbonates en contexte de refroidissement et des silicates en contexte de chauffage.

Les carbonates seraient susceptibles de colmater le système en contexte de chauffage tandis que les silicates précipiteront en contexte de refroidissement.

Plusieurs effets peuvent s'opposer aux conclusions déduites des simulations effectuées. Il est possible de rencontrer un effet écran sur les surfaces réactives des carbonates (inhibition) par rapport à la diminution de la solubilité de la calcite avec augmentation de la température. Ceci permettrait un écart possible entre les calculs réalisés à l'équilibre et la réalité.

Les simulations sont réalisées à l'équilibre thermodynamique. En cas de précipitation de calcaire, la vitesse de la réaction de précipitation augmente de manière importante à mesure que la température monte. Le rapport entre la vitesse de réaction à 30°C et celle à 10°C est de 7. L'importance des précipités attendus en fonction de la vitesse d'écoulement des eaux dans le système ne sera pas la même si on omet de considérer les cinétiques de précipitation/dissolution des carbonates.

La dégradation de carbone organique est également plus importante en cas d'augmentation de la température (If Technology, 2004). Ce facteur n'est pas à négliger sachant que les phénomènes de dégradation de la matière organique dissoute entraînent une augmentation de la pression de gaz carbonique (pCO<sub>2</sub>) qui contrôle la stabilité des minéraux carbonatés.

D'autres phénomènes pourront être considérés en vue de la réalisation d'un modèle plus réaliste du système comme :

- la sorption et les échanges cationiques également sensibles à l'augmentation de la température ;
- la gêne possible de la précipitation des carbonates à haute température par les acides organiques et orthophosphates.

## 4. Conclusions et perspectives

Pour le site du Ctifl de Balandran, la prochaine étape sera maintenant de préciser les caractéristiques des forages, pompes, conduites, équipements de surface (armoires de commande de forages, asservissements, type de liaison avec les logiciels de pilotage des appareils placés dans la serre, etc.).

En ce qui concerne l'étude des impacts potentiels du stockage thermique en aquifère sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines, les premiers résultats sont conformes aux tendances générales attendues et citées dans la bibliographie (cf. §3.1.1), en particulier une précipitation de carbonates au puits chaud et de silicates au puits froid.

Un impact des modifications de température sur la microflore a également été mis en évidence. Il confirme l'intérêt de suivre son développement dans le cadre d'une installation, en particulier dans le cas d'eaux chargées en éléments nutritifs (eau de la Crau).

Pour compléter cette étude, il reste encore à interpréter les résultats des analyses physico-chimiques des eaux avec et sans bactéries, après les 3 mois d'incubation, et à les comparer aux résultats de modélisation géochimique.

En fonction des résultats, un protocole de suivi de la qualité des eaux des exploitations sera proposé, avec des spécificités éventuelles pour les deux sites de la Crau et du Ctifl.

## 5. Bibliographie

**Bourgeois M.** (1976) - La corrosion et l'incrustation dans les forages d'eau (choix de l'équipement adapté). Rapport Brgm 76 SGN 379 AME.

**Courtois N., Marchal J.P., 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 préfaisabilité. Rapport BRGM/RP-55481-FR, 288 pp., 94 ill., 8 ann. *Le rapport de synthèse de cette étude est téléchargeable gratuitement depuis le site Internet de l'ADEME (<http://www2.ademe.fr> domaine « Economies d'énergie », puis « Publications »), ou celui du Brgm (<http://www.brgm.fr/publication/rapportpublic.jsp>).*

**Grieffioen J., J. Appello C.A.** (1993) - Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry*, Vol 8, p. 161-176.

**Hicks R.J., Stewart D.L.** (1988) - Environmental assessment of the potential effects of aquifer thermal energy storage systems on microorganisms in groundwater. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, US. Contract DE-AC06-76RLO 1830.

**Holm T.R., Eisenreich S.J., Rosenberg H.L., Holm N.P.** (1987) - Groundwater Geochemistry of Short-Term Aquifer Thermal Energy Storage. *Water Resources Research* 23, no. 6, p. 1005-1019.

**If Technology** (2004) - Temperatureffecten op grondwaterkwaliteit. Samenvatting bestaande kennis (Impact de la température sur la qualité des eaux souterraines). Rapport n° 1/53232/GW.

**Jaudin F.** (1988) - Eaux souterraines et pompes à chaleur. Guide pour l'utilisation de l'eau souterraine à des fins thermiques. Manuels et Méthodes n°17, Editions Brgm.

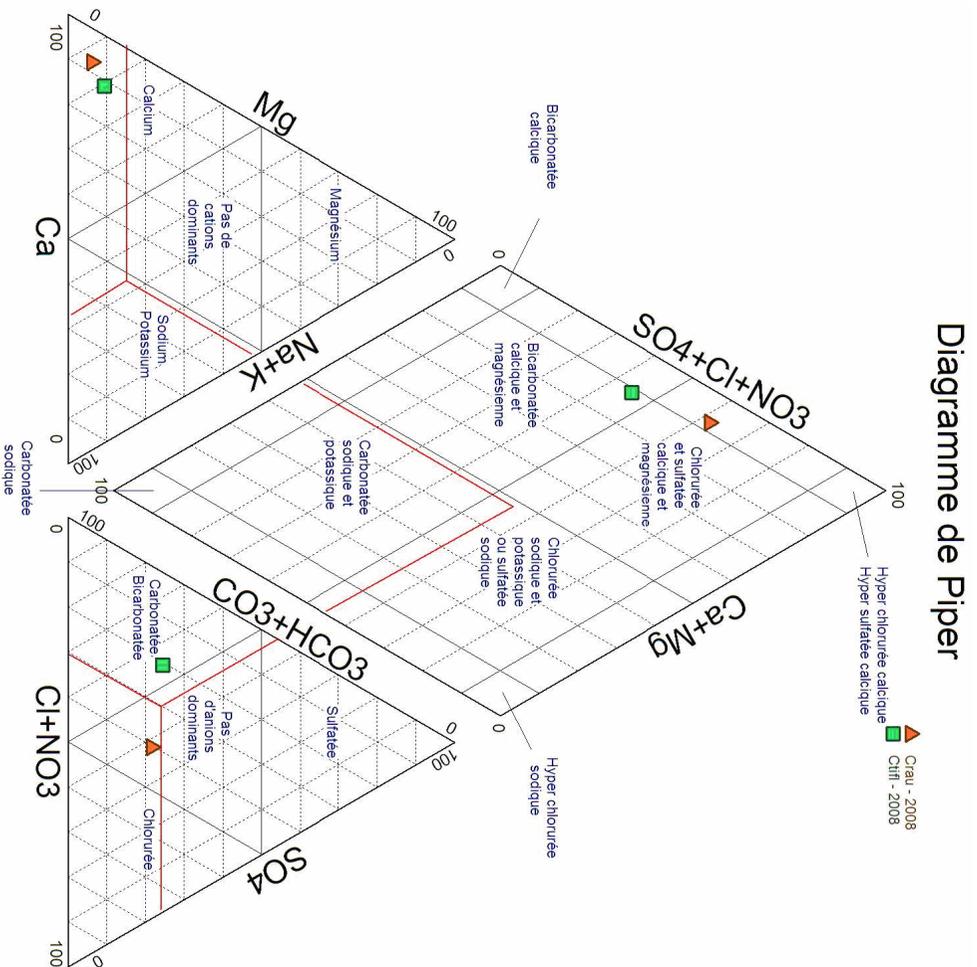
**Jenne E.A., Andersson O., Willemsen A.** (1992) - Well, hydrology and geochemistry problems encountered in ATES systems and their solutions. In *Proceedings of the 27<sup>th</sup> intersociety energy conversion engineering conference*.

**Palmer C.D., Cherry J.A.** (1984) - Geochemical reactions associated with low-temperature thermal energy storage in aquifers. *Can. Geotech. J.*, 21, p. 475-488.

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

**Perlinger J.A., Almendinger J.E., Urban N.R., Eisenreich S.J.** (1987) - Groundwater Geochemistry of Aquifer Thermal Energy Storage: Long Term Test Cycle. *Water Resources Research* 23, no. 12, p. 2215-2226.

## Annexe 1 Analyses géochimiques initiales de l'eau des deux sites (Ctiffi et Crau)



	*Br- (Bromures)	*COT (Carbone organique total) mg/l	*Ca (Calcium) mg/l	*Cl (Chlorures) mg/l	*F (Fluorures) mg/l	*K (Potassium) mg/l	*Mg (Magnésium) mg/l	*NH4 (Ammonium exprimé en NH4) mg/l	*NO2 (Nitrites exprimés en NO2) mg/l	*NO3 (Nitrates exprimés en NO3) mg/l	*Na (Sodium) mg/l	*PO4 (OrthoPhosphates en PO4) mg/l	*SO4 (Sulfates) mg/l	*SiO2 (Silice) mg/l
1		0.5	0.5	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1	0.01	0.5	0.5	0.1	0.5	0.5
		0.9	199.9	73	0.1	4.5	8.5	< LQ	< LQ	182.4	17.9	< LQ	129	10.9
2		0.7	96.9	23.9	0.2	0.7	6.9	< LQ	< LQ	29.8	15.3	< LQ	65.4	16

## **Annexe 2**

### **Mesures de terrain effectuées le 28/02/2008**

#### **Site du Ctifl (BALANDRAN 8)**

Forage non utilisé.

Niveau statique : 5,05 m

Pompage à 5 m<sup>3</sup>/h pendant 20 minutes avant relevé des paramètres physico-chimiques.

Début de pompage : eau rougeâtre devenant plus claire par la suite.

Température : 15,03 °C

pH : 7,42

Eh : 549 mV

Conductivité : 551 µS/cm à la température mesurée

Oxygène dissous O<sub>2</sub> : 2,92 mg/l soit 31%.

Nous avons utilisé la sonde multi-paramètres du SGR/LRO.

Durée totale du pompage : 1h

Le niveau d'eau était 1 cm plus bas après une heure de pompage.

Alcalinité : 3,83 meq/l

#### **Site de la Crau**

Forage en fonctionnement depuis une heure avant notre arrivée.

Eau très claire.

Prélèvement par piquage.

Température : 17,03 °C

pH : 7,65

Eh : 549 mV

Conductivité : 1039 µS/cm à la température mesurée

La mesure de l'oxygène n'avait aucun sens car nous prélevions l'eau dans un seau par aspersion d'où une augmentation de l'oxygène.

Alcalinité : 4,08 meq/l

## **Annexe 3**

### **Méthode de coloration au DAPI (Di Aminido Phenyl Indol)**

Des filtres Millipore à fond noir sont utilisés. 2 ml d'eau déminéralisée stérile sont filtrés pour humidifier le filtre. Un volume connu d'eau à analyser est filtré (entre 10 et 30 ml selon la concentration bactérienne). On ajoute 1 ml de solution de glutaraldéhyde et 1 ml d'eau à analyser et on les laisse en contact avec le filtre pendant 5 min pour fixer les bactéries. La solution de glutaraldéhyde est préparée en diluant 1 ml de glutaraldéhyde en ampoule (SIGMA) avec 4 ml d'eau déminéralisée et 10 µl de formaldéhyde. On ajoute ensuite 10 µl de solution de DAPI à 1 mg/ml. Les solutions sont laissées en contact pendant 20 min, puis sont filtrées. Le filtre est rincé avec 2 ml d'eau déminéralisée stérile afin d'éliminer l'excès de DAPI. Le filtre est déposé sur lame de verre, recouvert d'huile à immersion, puis d'une lamelle sur laquelle on ajoute une goutte d'huile à immersion. La lame est observée au microscope en épifluorescence avec un microscope ZEISS Imager Z1 à l'objectif 100 (plan neofluar) avec le filtre FITC.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

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

**Service géologique régional Languedoc-Roussillon**  
1039, rue de Pinville  
34000 - Montpellier - France  
Tél. : 04 67 15 79 80