



## Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de préfaisabilité

Nathalie Courtois, Jean-Pierre Marchal, André Menjoz, Pascal Monnot, Yves Noël, Vincent Petit, Dominique Thiéry (Brgm)  
Ariane Grisey, Dominique Grasselly, Fabien Pommier (Ctifl)  
Avril 2007

---

### L'énergie et la serre

#### L'énergie, un poste de charge de plus en plus important pour les serristes

En France, la surface totale des serres maraîchères chauffées est d'environ 1300 ha. Elle concerne principalement une production de tomate et de concombre.

Depuis le début des cultures hors sol sous serre, la gestion du climat est devenue le maillon clé de la production. L'optimisation des paramètres climatiques, en prenant de plus en plus en compte la gestion de l'énergie, fait donc partie des enjeux majeurs de la décennie à venir.

Le chauffage est en effet le deuxième poste en terme de coût après la main d'œuvre. Par conséquent, il est pour les serristes, une préoccupation majeure qui s'est accentuée avec la hausse du prix des combustibles. Il est donc primordial d'optimiser la consommation en serre afin de réaliser des économies d'énergie tout en conservant le potentiel de production.

L'enjeu de demain est de rendre les serres plus autonomes au niveau énergétique afin de permettre aux exploitations de rester compétitives sur un marché de plus en plus concurrentiel et de répondre à une exigence environnementale croissante telle que les émissions de gaz à effet de serre.

#### La serre capteur solaire... une solution étudiée depuis longtemps

Plusieurs travaux ont été menés à l'Inra et au CNIH<sup>1</sup> dans les années 1980 en considérant la serre comme un capteur solaire : le stockage de la chaleur était réalisé dans un produit à changement de phase ou dans le sol au niveau de systèmes inspirés des puits canadiens. En conditions expérimentales, ces systèmes ont permis de substantielles économies d'énergie mais ils se sont heurtés à des problèmes techniques et à des coûts d'investissement importants. A l'époque, ils sont devenus d'autant moins intéressants que le prix des combustibles a rapidement baissé au cours des années suivantes. Néanmoins, de tels systèmes retrouvent leur place dans le cadre de la crise énergétique actuelle.

### La serre capteur d'énergie et le stockage en aquifère

#### Une technique développée aux Pays-Bas

Aux Pays-Bas, des travaux ont également démarré dans les années 1990 sur le principe de la serre capteur d'énergie.

Actuellement, on comptabilise environ 15 projets de serres fermées ou semi fermées chauffées et refroidies grâce au stockage d'énergie thermique en aquifère :

- en été, l'eau située en aquifère est pompée dans un premier forage (« puits froid »), refroidit la serre en se réchauffant (elle emmagasine ainsi la chaleur piégée dans la serre pendant cette période estivale), et est réinjectée (à 20-25 °C environ) dans le même aquifère via le deuxième forage (« 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 (à 8-12 °C environ) pour être réutilisée l'été suivant.

Ce principe du stockage thermique en aquifère est illustré sur le schéma ci-après (Figure 1).

Cette technique de doublet de forages avec réinjection présente deux principaux avantages :

- elle permet au dispositif d'être **réversible**, en refroidissant la serre l'été, et en la réchauffant l'hiver ;
- la **réinjection** maintient le potentiel hydraulique de l'aquifère, contrairement au système à puit unique en circuit ouvert où l'eau pompée est envoyée vers l'extérieur (dans un cours d'eau par exemple), ce qui d'une part ne permet pas le stockage d'énergie, et d'autre part, peut entraîner une surexploitation hydraulique de l'aquifère.

---

<sup>1</sup> Comité National Interprofessionnel de l'Horticulture

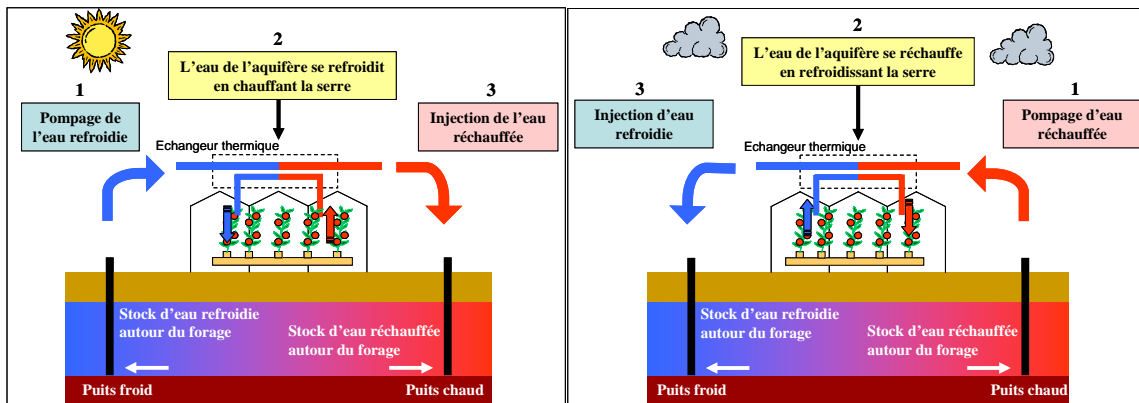


Figure 1 - Schéma de principe du stockage d'énergie thermique en aquifère

## Une solution dans le contexte français ?

En France, l'enjeu pour la filière des légumes sous serres chauffées est d'évaluer la possibilité de mettre en place ce système sur le sol national. Pour répondre aux attentes de la profession et dans le cadre d'un groupe de travail sur « la serre durable », le Ctifl s'est associé au Brgm pour étudier la pré-faisabilité de ce système au niveau technique, réglementaire, économique et hydrogéologique. Cette étude est financée par l'ADEME, le Ctifl, le Brgm et Viniflor.

## Un contexte bien différent aux Pays-Bas et en France

Les Pays-Bas sont un pays particulièrement propice à cette technique de stockage d'énergie thermique en aquifère car ils conjuguent plusieurs aspects :

- une géologie relativement simple, avec des formations planaires et a priori homogènes ;
- la présence d'aquifères sableux à la fois productifs (débits importants) et sous couverture (limite les déperditions d'énergie vers la surface) ;
- un écoulement naturel des nappes très limité (de l'ordre de 10 à 60 mètres par an) du fait du faible relief du pays, ce qui est favorable au stockage d'énergie.

En France, ce n'est pas partout « le plat pays » des Pays-Bas ou encore de la région des Flandres, et les conditions hydrogéologiques y sont a priori moins « idéales » : formations géologiques variées et de géométries complexes, écoulement de nappe plus rapide. Cependant aucun site n'est exclu a priori, une étude au cas par cas est nécessaire.



La première étape du travail Brgm-Ctifl-ADEME présentée dans ce document est une étude « théorique » de portée générale, qui a pour objectif d'inventorier les paramètres à prendre en compte dans une étude de faisabilité de stockage thermique en aquifère sur un site, et à évaluer leur influence relative sur sa faisabilité et son efficacité.

## Bilan thermique de la serre

Le tableau ci-dessous présente les besoins en chauffage et en refroidissement pour une serre située dans le Sud-Est et dans le Nord-Ouest.

Hypothèses : serre verre simple paroi (transmission 80 %), écran d'ombrage, température de consigne de nuit = 15 °C, température de consigne de jour = 18 °C, température maximale en serre = 30 °C, HR = 75 %, différence de température entre le puits chaud et le puits froid = 15 °C.

	Conditions climatiques de Bellegarde (Nîmes)	Conditions climatiques de Carquefou (Nantes)
Puissance à installer en chauffage (W/m <sup>2</sup> )	205	207
Consommation énergétique (chauffage) (kWh/m <sup>2</sup> /an)	272	326
Puissance à installer en refroidissement (W/m <sup>2</sup> )	500	452
Quantité de chaleur à extraire (kWh/m <sup>2</sup> /an)	736	592
Débit maximal (m <sup>3</sup> /h/ha)	288	260
Nombre d'heures par an où le débit est > 250 m <sup>3</sup> /h/ha	210	14
Besoin en eau sur une année (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	42	34

## Déterminer les paramètres techniques influençant le stockage thermique en aquifère

Cette partie présente la méthode et les principaux résultats de l'étude pour déterminer les paramètres influençant le stockage thermique en aquifère.

### Analyse de sensibilité du stockage thermique en aquifère par modélisation numérique

Les différents paramètres du sous-sol peuvent interagir, aussi leurs effets ne peuvent donc pas s'évaluer simplement et individuellement. Par exemple, une forte perméabilité (la perméabilité traduit l'aptitude de l'aquifère à laisser s'écouler l'eau) sera favorable puisqu'elle permettra l'obtention de forts débits, et potentiellement défavorable en permettant de fortes vitesses d'écoulement qui auront tendance à entraîner les stocks d'eau.

L'utilisation d'un modèle numérique de simulation capable de prendre en compte les facteurs qui jouent un rôle dans le rendement d'un système de stockage thermique présente donc l'intérêt de pouvoir évaluer leur influence relative, en les faisant varier un par un dans des fourchettes de valeurs (Figure 2). C'est le principe de l'analyse de sensibilité menée dans cette étude.

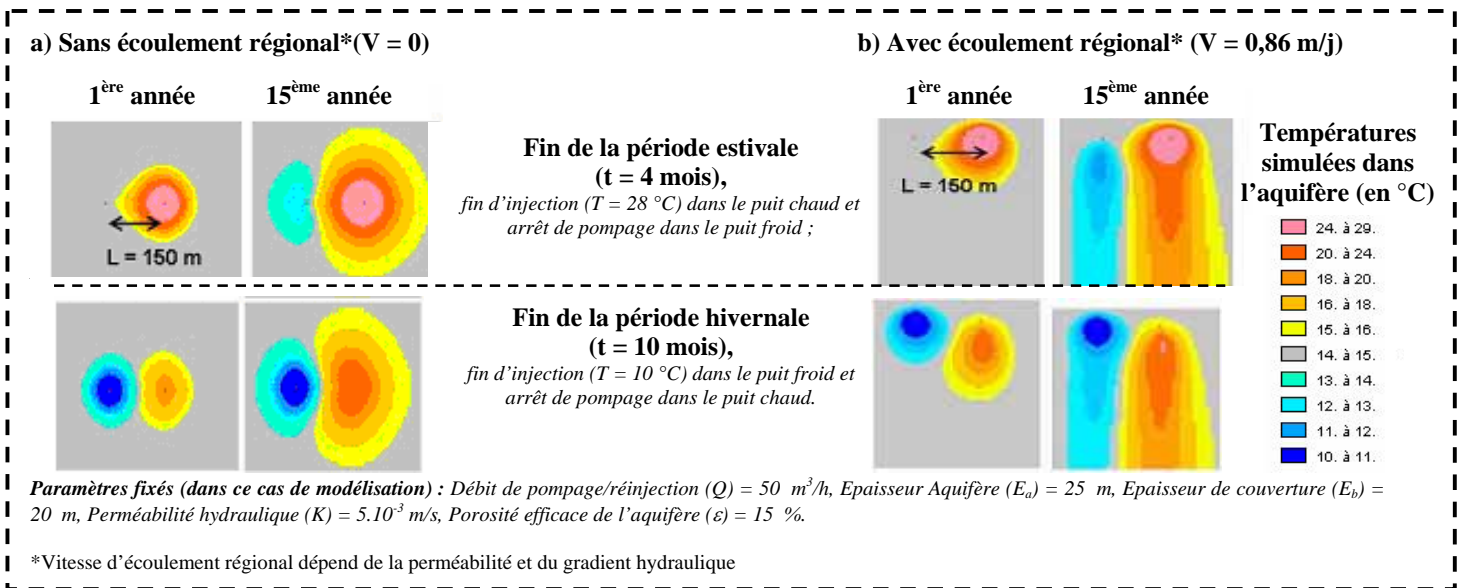


Figure 2 : Exemple de simulation : « Déplacement » des bulles d'eau au niveau des puits chaud et froid en fonction de l'écoulement

### Quelques résultats de l'étude hydrogéologique

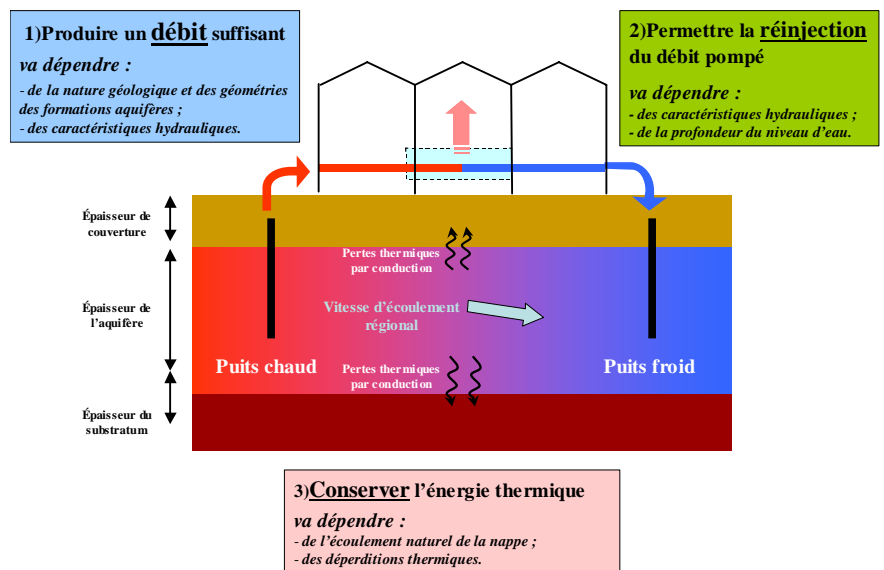
La faisabilité du stockage thermique dépend du contexte hydrogéologique du site. L'étude à l'aide de simulation numérique a montré que le taux de récupération de l'énergie stockée pouvait selon les cas, varier de 0 à près de 75%. La vitesse naturelle d'écoulement de l'aquifère est le facteur qui va le plus conditionner l'efficacité du stockage thermique.

La distance entre forages est également importante pour éviter les influences réciproques entre les stocks d'eau refroidie et réchauffée. Chaque forage devient alors alternativement forage de pompage ou de réinjection en fonction des besoins. Il est à noter que la réinjection avec des débits importants est souvent techniquement difficile.

La capacité de réinjection dans l'aquifère (toujours plus délicate que le pompage) sera un des critères techniques déterminants pour l'applicabilité de la méthode.

En France, si aucune région n'est à écarter a priori,

### Trois principaux aspects à étudier pour définir la faisabilité du stockage thermique en aquifère...



certains sites seront plus propices que d'autres. **Chaque site est un cas particulier, qui nécessitera un dimensionnement précis au cas par cas.**

A l'échelle d'une année, le stockage et le déstockage de l'énergie doivent être équilibrés. Cependant, la quantité d'énergie pouvant être captée durant l'été est beaucoup plus importante que les besoins de chauffage pendant l'hiver. Il est donc nécessaire d'utiliser ce surplus d'énergie pour chauffer d'autres serres ou bâtiments, ou de ne pas stocker la totalité de l'énergie produite durant l'hiver.

Pour les conditions climatiques des Pays-Bas, 1,4 ha de serre fermée contribuent au chauffage de 4 ha de serres classiques.

## Les aspects réglementaires et économiques à prendre en compte

### Les contraintes réglementaires

La réglementation pour les installations de géothermie sur nappe<sup>2</sup> est représentée à la fois dans le Code de l'Environnement et dans le Code Minier.

Elle est peut être résumée par les éléments suivants :

- le prélèvement dans la nappe est soumis à autorisation lorsque la capacité totale maximale des installations de prélèvement est supérieure ou égale à 200 000 m<sup>3</sup>/an, et à déclaration en deçà ;
- le rejet dans la même nappe est soumis à autorisation lorsque la capacité totale de réinjection est supérieure à 80 m<sup>3</sup>/h, et à déclaration si elle est comprise entre 8 m<sup>3</sup>/h et 80 m<sup>3</sup>/h ;
- dans le cas d'une exploitation d'eau chaude où le débit calorifique maximal possible (calculé par référence à une température de 20 °C) est supérieur à 200 th<sup>3</sup> ou que la profondeur des ouvrages est supérieure à 100 m, un dossier d'autorisation en préfecture est à réaliser.

L'exploitant doit donc soit déposer une simple déclaration, soit faire une demande d'autorisation avant toute mise en service, démontrant l'acceptabilité du projet en terme d'impact sur l'aquifère et les installations environnantes (autres captages par exemple). L'autorisation est donnée par le préfet. Une consultation est actuellement en cours entre les deux Ministères de l'Industrie et de l'Ecologie pour clarifier et simplifier la réglementation en matière d'exploitation des eaux souterraines.

### Evaluation des coûts d'investissements et d'exploitation

Le coût moyen d'investissement des équipements nécessaires à la mise en œuvre de cette technique reste à définir dans les conditions françaises de culture sous serre. Il va dépendre de nombreux paramètres (caractéristiques du forage, puissance de la pompe à chaleur, type d'échangeurs).

Concernant le forage quelques exemples de coûts peuvent être donnés à titre indicatif :

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Coût de forage (€HT /m)	Pompe (€kW)
50	500 à 700	750
100	600 à 800	450

L'étude de préfaisabilité de stockage thermique en aquifère pour un site coûte environ 5 000 à 20 000 €HT selon la complexité du site, et les connaissances préalables dont on peut disposer.

Pour information, le coût d'investissement moyen aux Pays-Bas est compris entre 50 à 100 €/m<sup>2</sup> selon la technologie employée.

Le temps de retour sur investissement annoncé est de 5 ans.

## Optimiser l'utilisation de l'énergie

### Les différents systèmes d'échange

Il existe plusieurs systèmes actuellement installés aux Pays-Bas :

- un système constitué d'échangeurs eau/air situés au niveau du faitage de la serre, principalement installés dans des exploitations horticoles et dont l'objectif est de refroidir la culture,
- un système qui correspond à une serre utilisant peu d'énergie, équipée pour optimiser la gestion climatique et la culture. L'air traité par chauffage/refroidissement est distribué à travers des gaines et utilise également l'air extérieur,
- un système qui correspond à une serre productrice d'énergie et qui utilise des échangeurs répartis dans les rangs de culture.

---

<sup>2</sup> Exploitation des calories des eaux souterraines

<sup>3</sup> 1 th = 1 thermie = 1,16 kWh



Depuis 2006, le Ctifl expérimente sur son site de Balandran près de Nîmes, des échangeurs thermiques eau/air. Ces équipements sont testés pour chauffer et refroidir les serres dans les conditions du sud de la France à l'aide d'un stockage artificiel pour simuler un stockage en aquifère (eau à 25 °C pour chauffer et < à 15 °C pour refroidir).

L'objectif est de comparer un compartiment avec une installation classique de chauffage par rapport à un compartiment avec des échangeurs FiWiHEX et d'acquérir des connaissances sur la maîtrise du climat en serre avec ces systèmes. Cette expérimentation permet également d'étudier les conséquences sur la consommation d'énergie, le développement et la production de la culture.

### ***La distribution de l'air climatisé dans la serre***

En fonction des systèmes, l'air traité, chaud ou froid est distribué de façon centralisée via des gaines perforées, ou localement via plusieurs échangeurs situés sous les gouttières de culture ou en faitage. Dans les deux cas, l'objectif recherché est de bien homogénéiser le climat dans la serre.

### ***Dimensionnement des équipements***

Le dimensionnement dépend du débit d'exploitation apte à satisfaire un besoin et compatible avec les conditions hydrogéologiques du milieu. Le dimensionnement doit également prendre en compte la réinjection des eaux dans l'aquifère après utilisation des calories pour le chauffage de la serre.

## **Conclusion et perspectives**

Le principe de stockage d'énergie thermique en aquifère est déjà opérationnel depuis plusieurs années, en particulier aux Pays-Bas, il n'en demeure pas moins que la technologie n'est pas directement transposable d'un site à l'autre, car son applicabilité est complètement conditionnée par les caractéristiques hydrogéologiques locales du site. La condition sine (a) qua non pour qu'un système de stockage thermique en aquifère puisse être envisagé sur un site agricole donné est bien sûr la présence, sous ce site, d'un aquifère capable à la fois de fournir un débit suffisant et pérenne, de permettre la réinjection de ce même débit, et la récupération de l'énergie stockée la saison précédente, avec un taux de restitution acceptable. Cette technique est donc exigeante en termes de conditions aquifères à remplir, et implique des investissements conséquents. Aucune zone n'est donc exclue a priori, mais nécessitera une étude au cas par cas.

Mettre au point une serre plus autonome en énergie, en valorisant le surplus d'énergie solaire qui peut être emmagasiné pendant l'été pour être réutilisé l'hiver, et la tester in situ en France est l'objectif du projet intitulé « Serre capteur d'énergie ». Ce projet de recherche, cofinancé par le Fond de Compétitivité des Entreprises (FCE) du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, a démarré en mars 2007 pour une durée de 4 ans. La technique de stockage d'énergie sera testée sur une serre expérimentale, construite sur le site du Ctifl de Balandran, près de Nîmes et sur deux serres pilotes chez des producteurs.

Ce concept innovant, dont les premiers résultats des Pays Bas sont prometteurs, permettrait une économie d'énergie de près de 30 % à 80 % selon les équipements et un gain de rendement de 15 % lié à une meilleure maîtrise du climat et de la nutrition carbonée. De même, d'après les premières observations, la technique des échangeurs permet de récupérer une eau de très bonne qualité par condensation (de 40 % à 60 % de la consommation d'eau des plantes). Un meilleur contrôle du climat de la serre permet de limiter l'entrée des ravageurs et donc de diminuer les traitements phytosanitaires.