



# Le stockage géologique de l'énergie thermique

-  
Déjà une réalité

## ASPRM

3 décembre 2013

*Hervé Lesueur – [h.lesueur@brgm.fr](mailto:h.lesueur@brgm.fr)*



Géosciences pour une Terre durable

# brgm



# Géothermie(s) : Conventions

## > Géothermie très basse énergie (TBE)

- Typiquement moins de 30°C et profondeur < 200m
- **Chaud** (chauffage et ECS) et/ou **Climatisation** généralement via des pompes à chaleur géothermique (PACg)
- **Frais** en utilisation directe (free cooling) et/ou **Tiède** (préchauffage)
- Techniques sur **aquifères** (boucle ouverte) ou **échangeurs** enterrés (boucle fermée)

## > Géothermie basse énergie (BE)

- Typiquement de 30°C à 90°C pour la température initiale de la ressource
- **Chaud** (chauffage et ECS) en **utilisation directe** et/ou **pompe à chaleur**
- **Frais** (voire Froid) via des pompes à chaleur (selon machinerie)
- Techniques très majoritairement sur **aquifères** (boucle ouverte)

## > Géothermie haute énergie (HE) => vapeur (en surface)

- Pas en France métropolitaine
- Attendu : contribution à la production d'électricité

## > Stockage géologique d'énergie thermique

- Pas vraiment dans les textes en France



# A quoi sert une installation géothermique ?

## > Pour le bâti : **Fournir de l'énergie thermique**

- **Chaud** (chauffage et ECS) via des **pompes à chaleur géothermique (PACg)**
- **Chaud** (chauffage et ECS) en **utilisation directe**
- **Tiède** (préchauffage), si possible en **utilisation directe**
- **Frais**, si possible en **utilisation directe** (free cooling, géocooling, direct cooling ...)
- **Froid / Climatisation** via des **pompes à chaleur géothermique (PACg)**

## > Via un pompage : **Boucle ouverte sur nappe aquifère**

- Forage de production (avec pompe immergée)
- Echangeur de chaleur en surface = l'énergie est prélevée dans l'eau
- Forage de réinjection (recommandation pour préserver l'équilibre hydraulique)

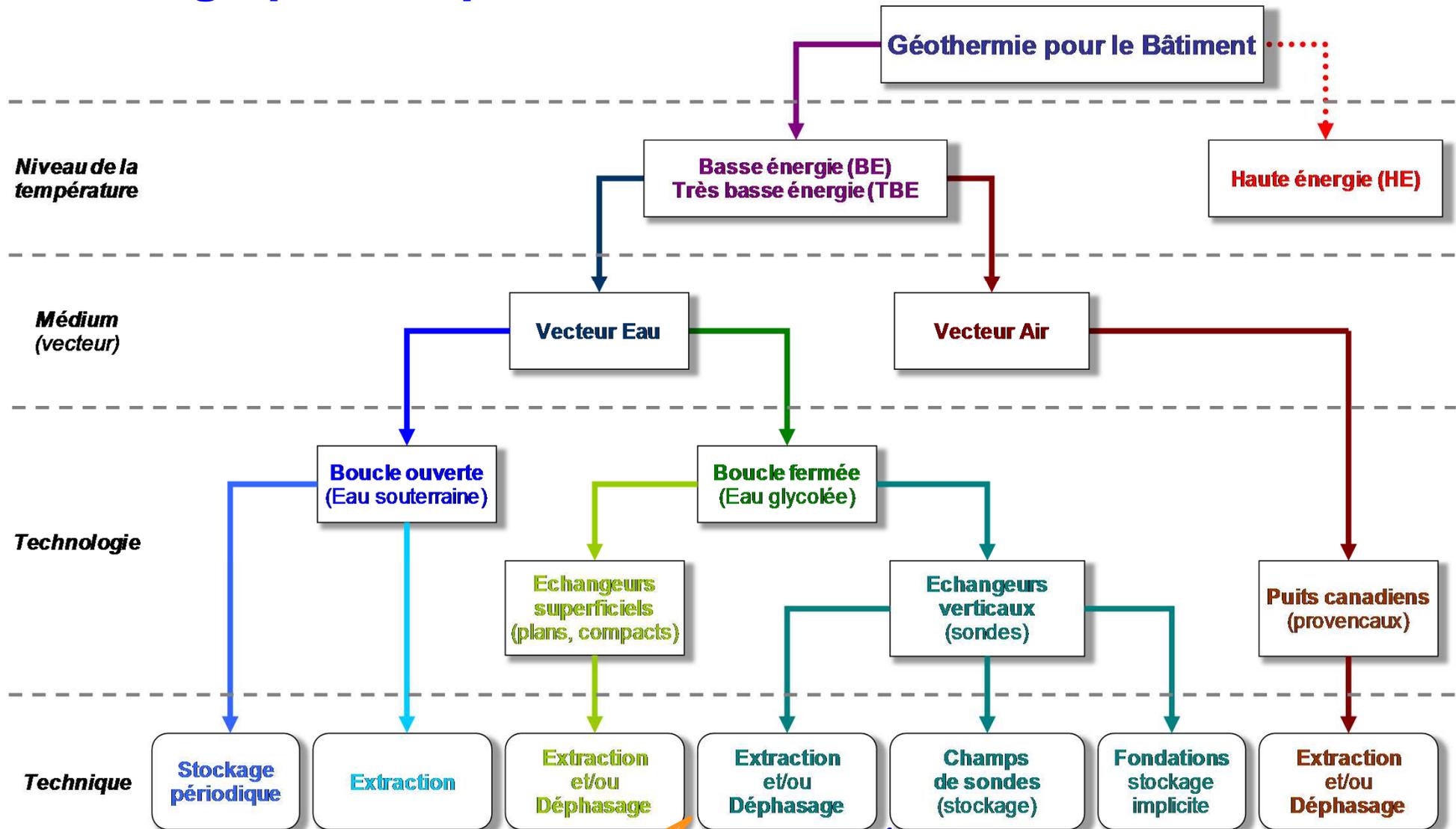
## > Via un échange de chaleur : **Boucle fermée enterrée**

- Toujours la même eau qui circule dans des conduites (fermées)
- L'énergie est directement échangée avec les roches (par conduction)

## > **Via une gestion de stock(s) d'énergie dans les formations géologiques**

- Stockage de **court terme** (déphasage)
- Stockage de **moyen/long terme** (inter-saisonnier)

# Techniques géothermiques et stockage périodique



Déphasages

Pas encore en France

Stockage recommandé

Stockage quasi-obligatoire



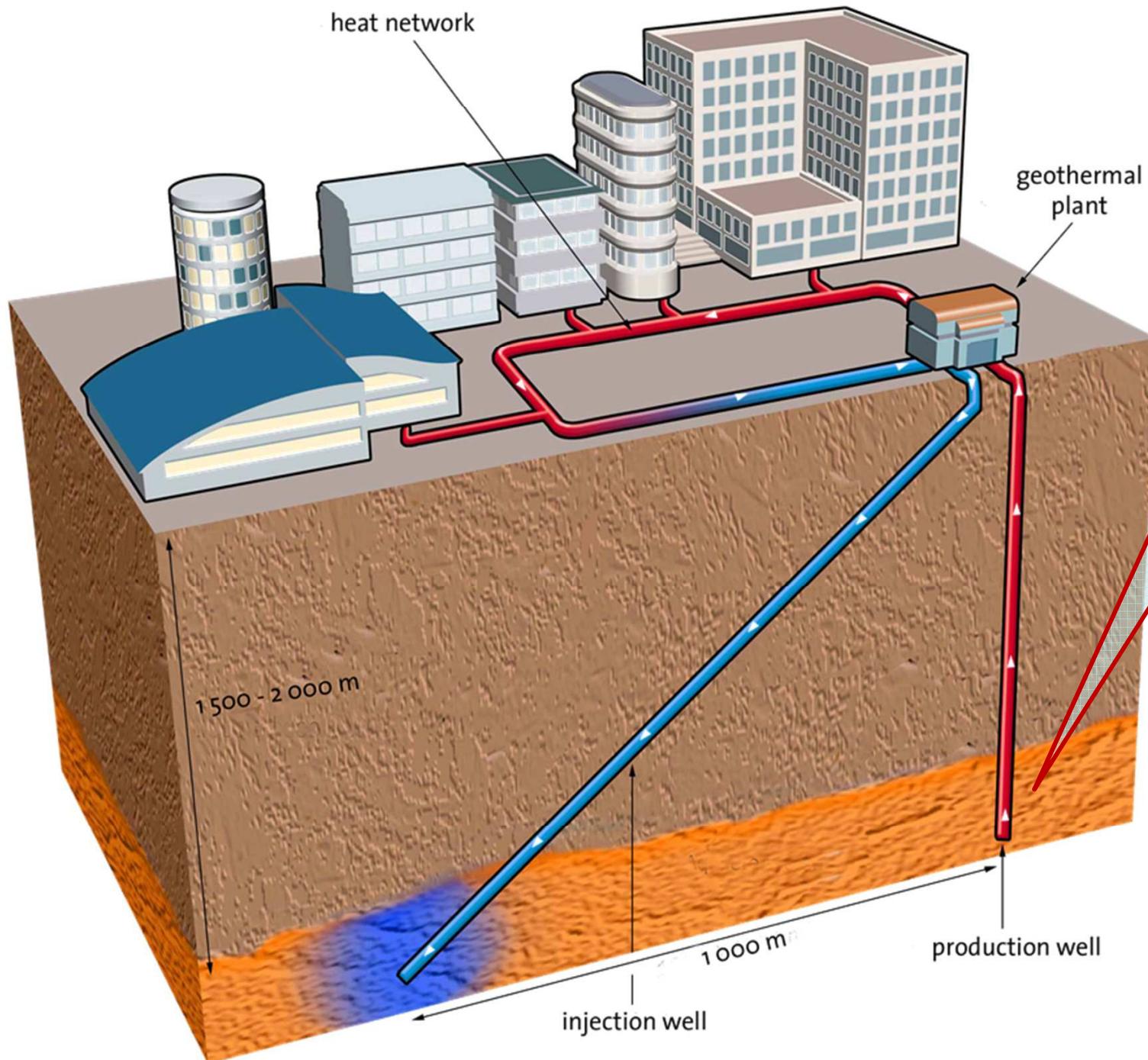


# Stockages géothermiques

-  
Principalement deux techniques



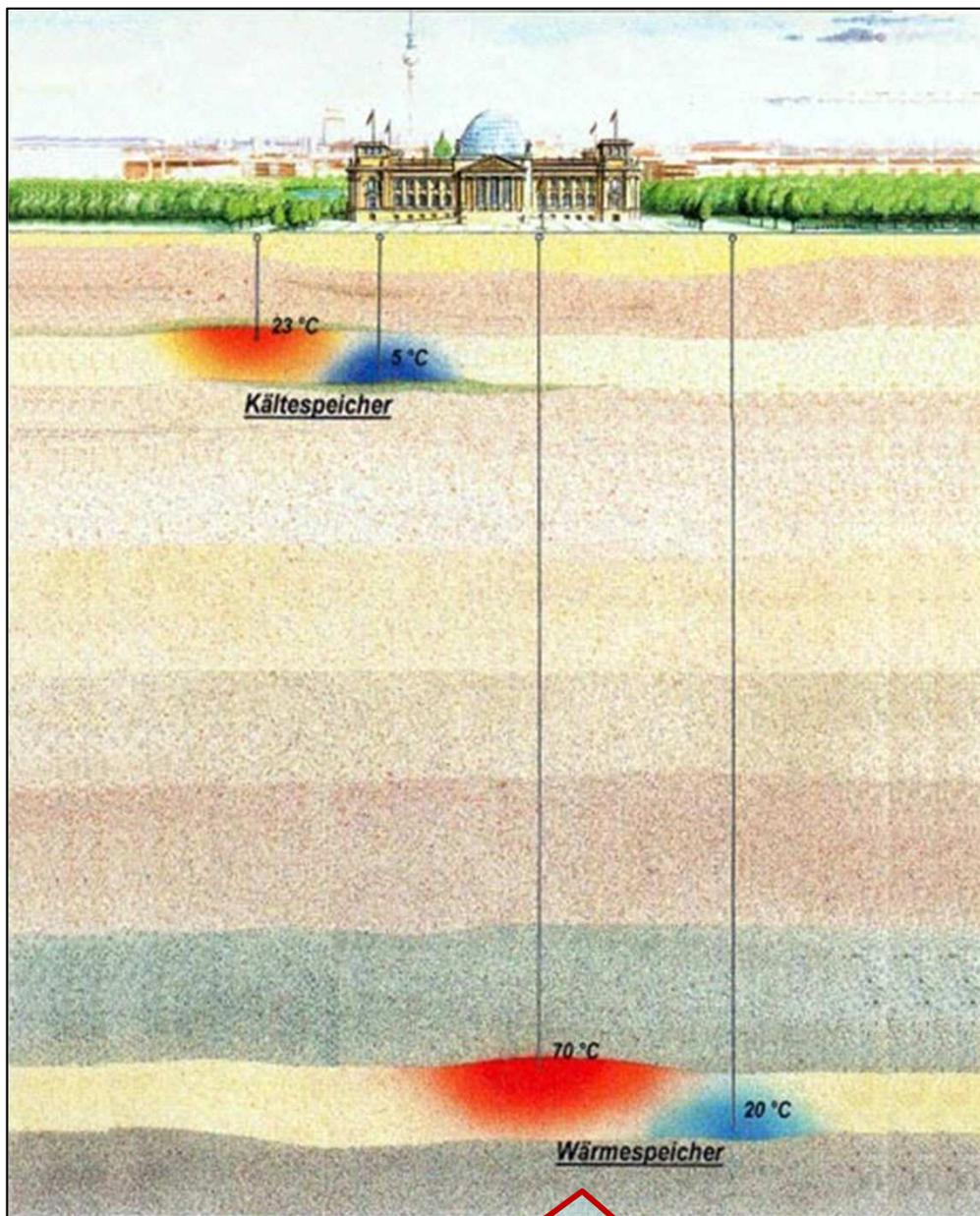
# Le doublet de stockage



Faut-il 'forer' profond pour faire du stockage (géo)thermique ?

- ↔ 10 à 15 M€
- ↔ 10 à 15 MW
- ↔ Typiquement 95°C
- ↔ 1 à 1.5 Mm<sup>3</sup>/saison

# Double Stockage été / hiver



## Stock frais (air ambiant & PAC)

- ↪ Profondeur : 60m – 2 x 5 puits
- ↪ Distance entre puits : 300m
- ↪ Puits frais : 5°C / Puits chaud : 28°C
- ↪ Stockage hivernal => 4 250 MWh/an
- ↪ Puisage estival => 3 950 MWh/an
- ↪ Débit nominal : 300 m<sup>3</sup>/h

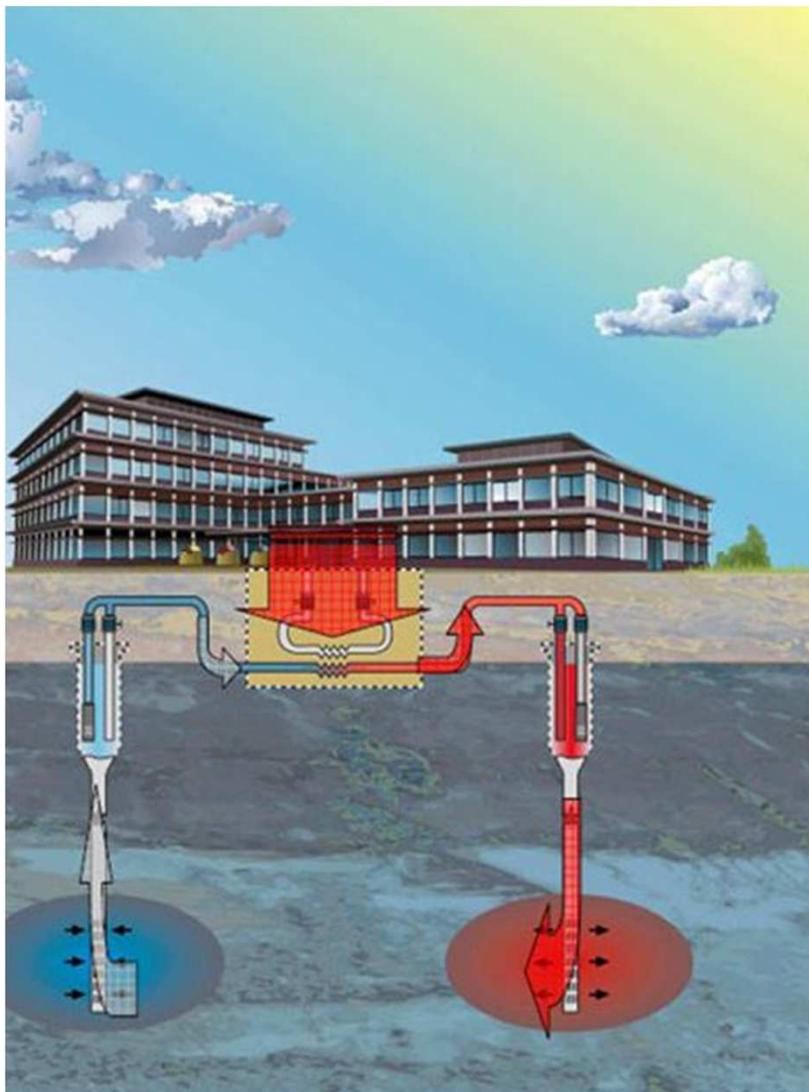
## Stock Chaud (excédent cogénération)

- ↪ Profondeur : 285-315 – 2 puits
- ↪ Distance entre puits : 300m
- ↪ Puits frais : 20°C / Puits chaud : 70°C
- ↪ Puisage hivernal : 2 050 MWh/an
- ↪ Stockage estival : 2 650 MWh/an
- ↪ Débit nominal : 100 m<sup>3</sup>/h

**Double ATES sous le parlement de Berlin**  
(source Geothermie Neubrandenburg GMBH)

# Stockage en aquifère superficiel

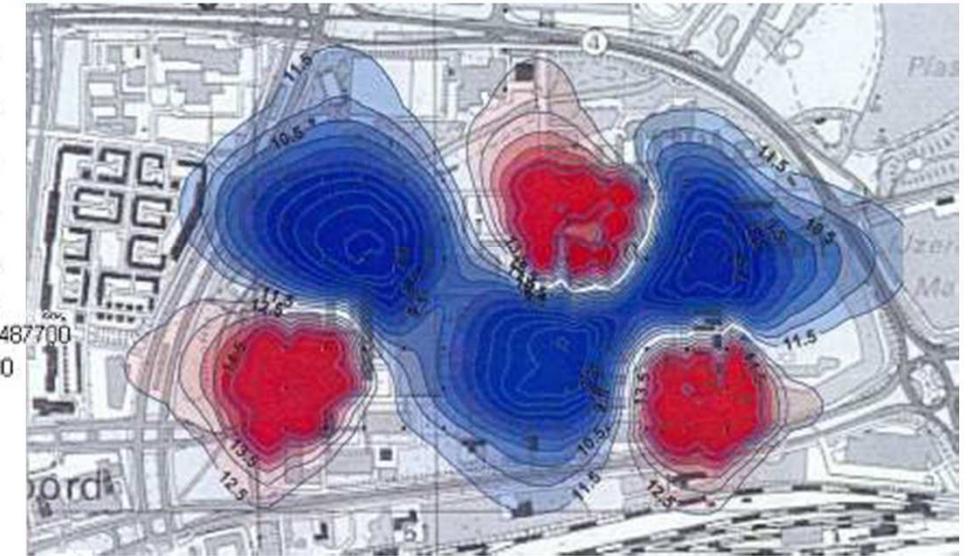
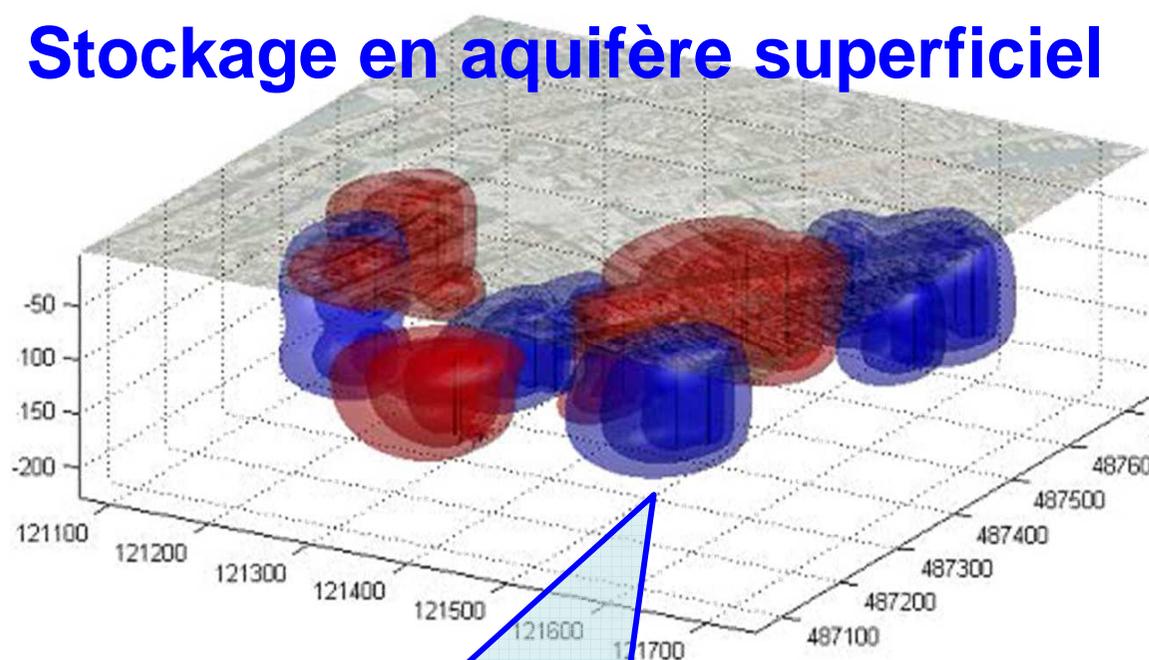
=> Au moins deux stocks à gérer : **Stock chaud & Stock froid**



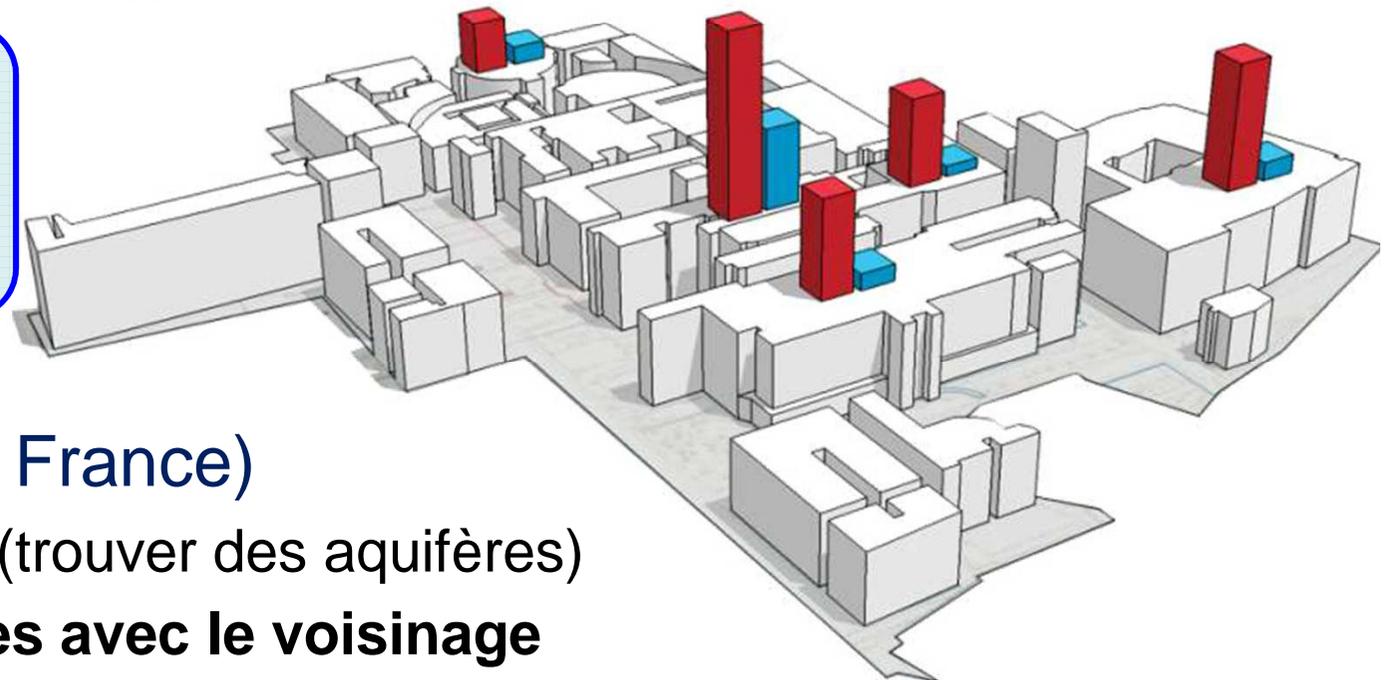
## Epruvé mais pas en France

- > Stockage inter-saisonnier Eté / Hiver
- > Puissances significatives : de 100 kW à 4 MW

# Stockage en aquifère superficiel



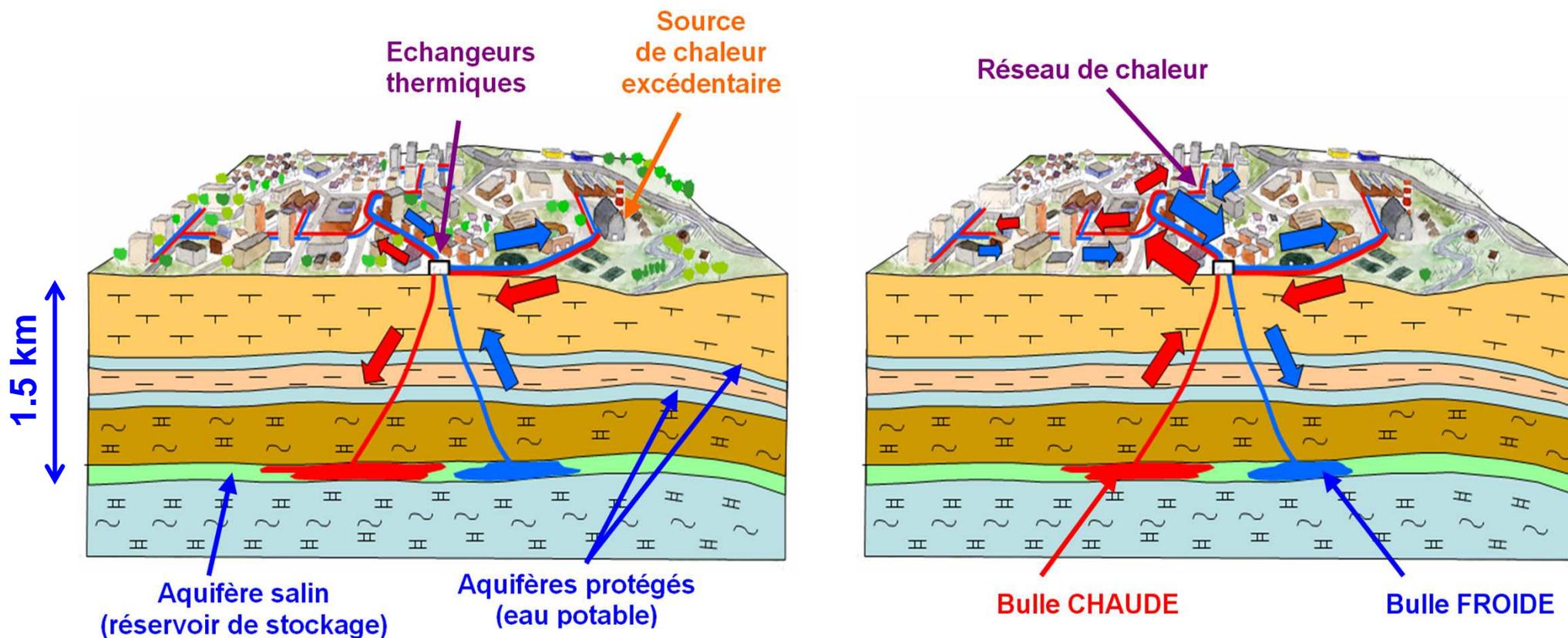
Privilégier le  
rafraichissement direct  
(direct cooling, géocooling)



## Eprouvé (mais pas en France)

- > Pas toujours possible (trouver des aquifères)
- > Veiller aux interférences avec le voisinage
- > Au moins **deux stocks** par installation
- > Pas de réelle limite de puissance
- > Prévisible plusieurs années à l'avance

# Stockage profond en aquifère GEOSTOCAL – ANR-Stock-E (terminé)



## Objectif : Préciser la faisabilité économique

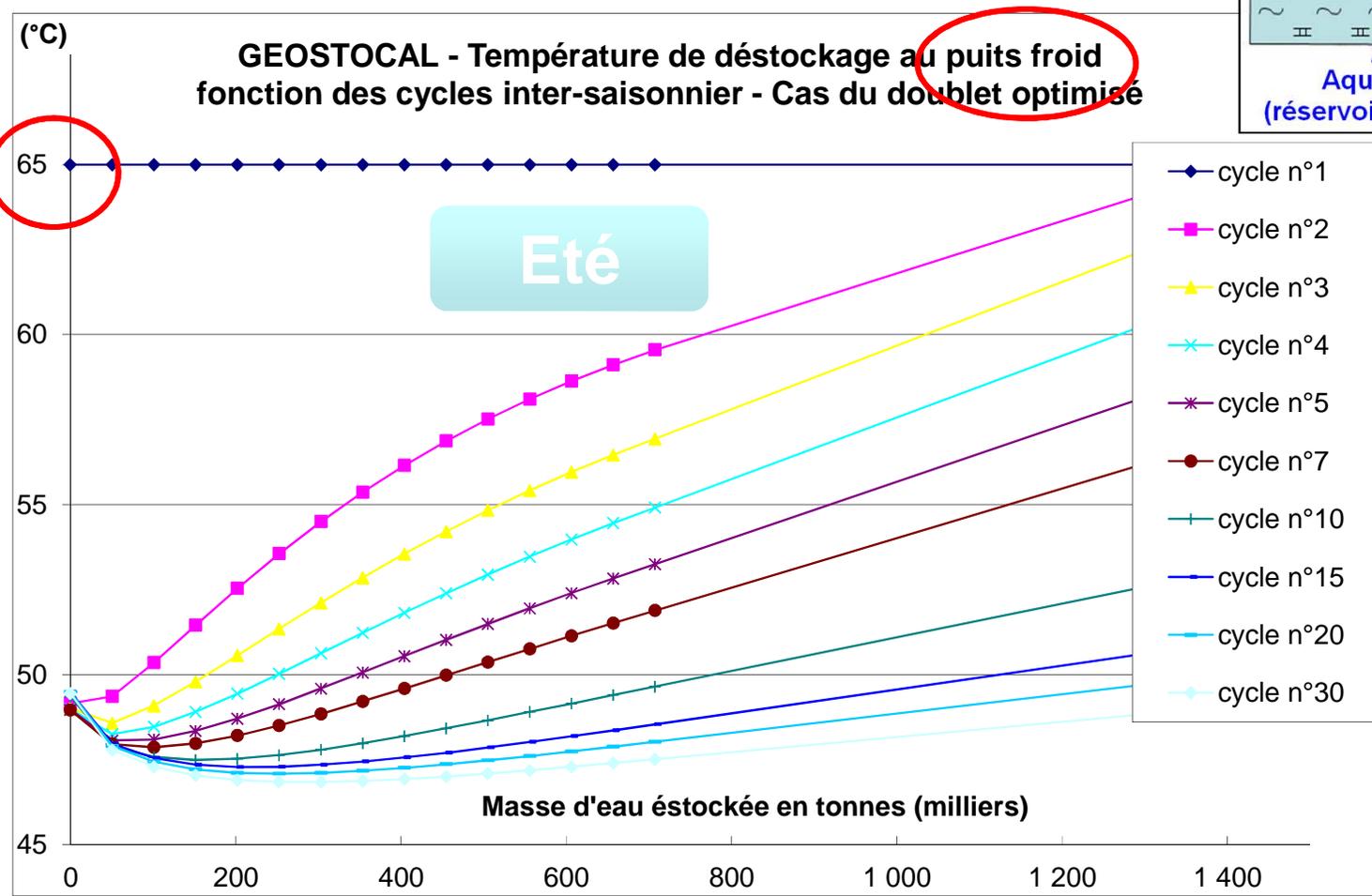
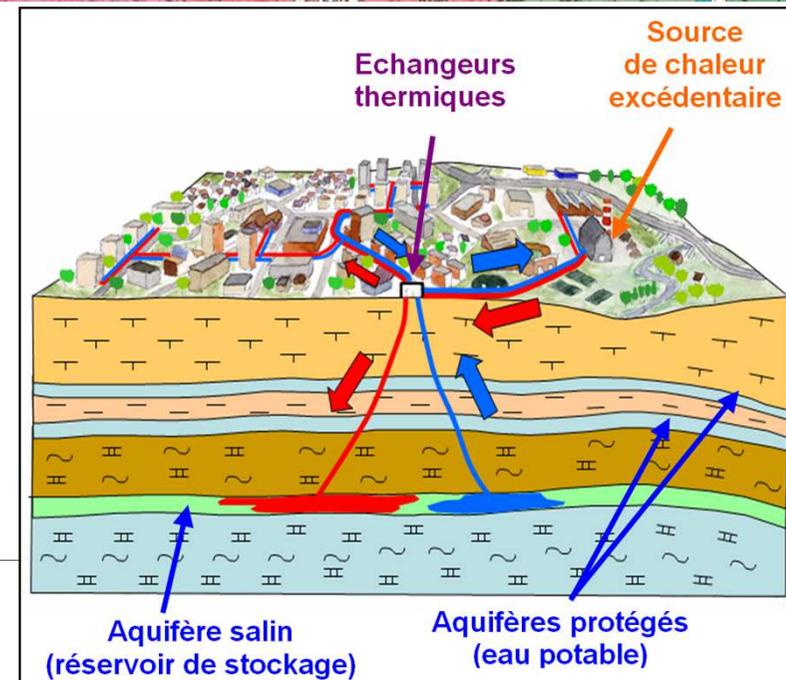
- Stocker de la chaleur en période estivale (vue de gauche)
- Déstocker l'énergie en période hivernale (vue de droite)

Puissance thermique indicative :  
10 MW (40-60 GWh par saison)

# GEOSTOCAL (mode été)

## Observation du puits froid

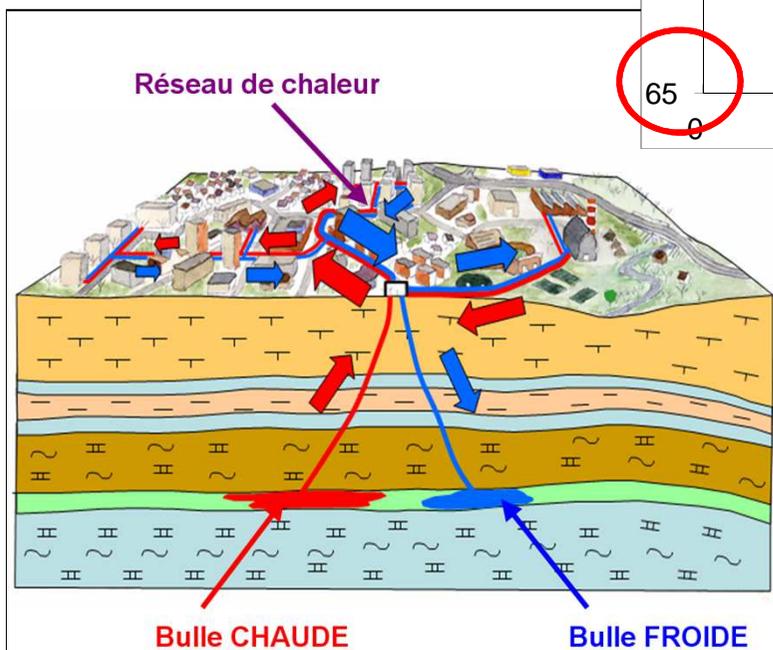
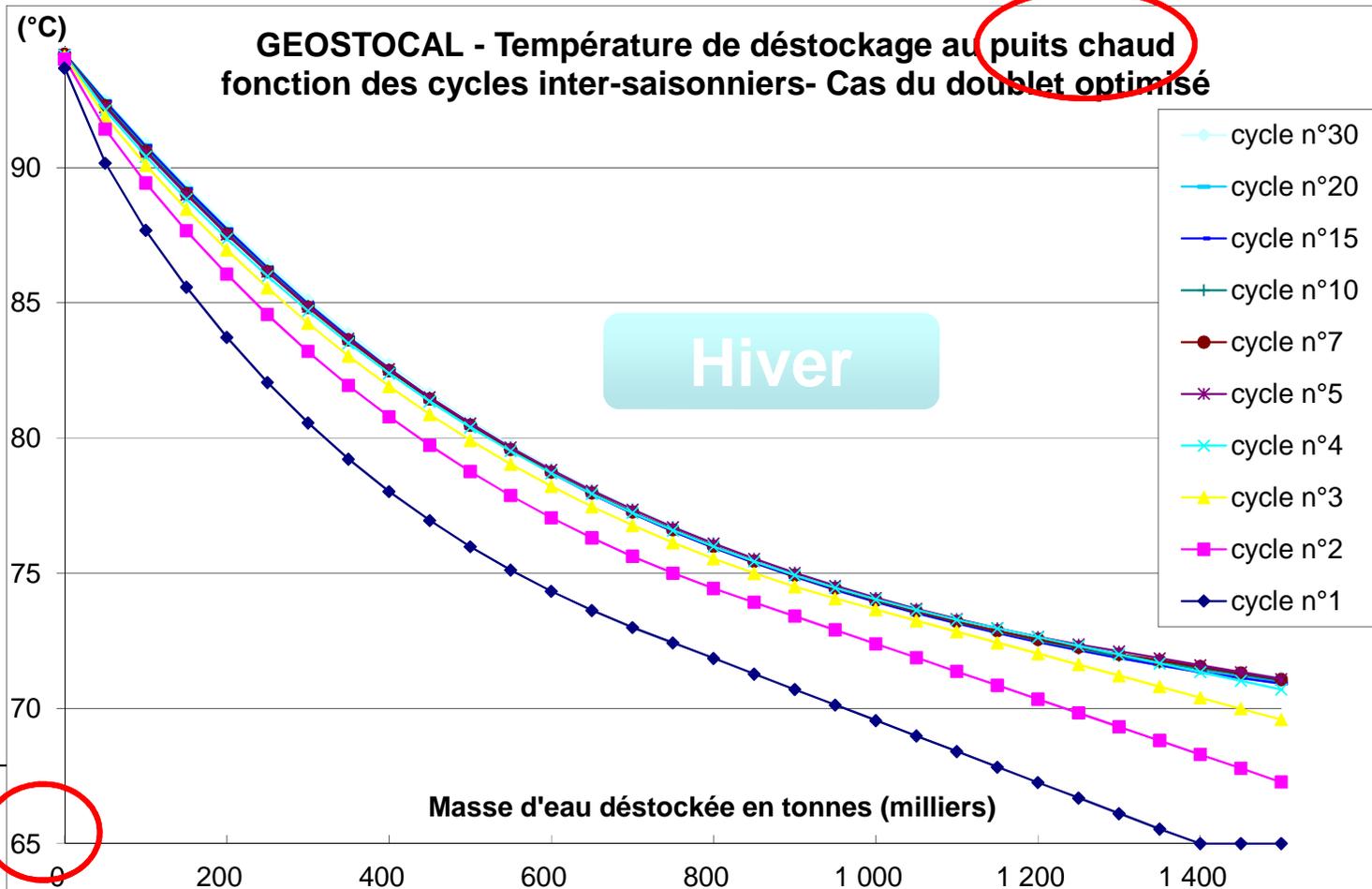
- Modélisation sur 30 ans
- Température :  
65°C (cycle 1) => 47°C (cycle 20)
- Stockage : 700 000 m<sup>3</sup> (saison estivale)



# GEOSTOCAL (mode hiver)



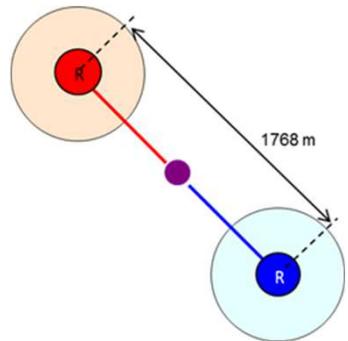
- > Livré :  
58 GWh/an
- > Fonctionnement :  
2.5 M€/an
- > Taux d'EnR  
dans le réseau :  
85%



## Observation du puits chaud

- > Déstockage : 1 500 000 m<sup>3</sup> (saison hivernale)
- > Modélisation sur 30 ans
- > Stockage à 95°C

# GEOSTOCAL => la 'stratégie'



1. Scénario géothermique de référence (**sans stockage**)  
Doublet géothermique (65°C – 40°C) + appoint vapeur

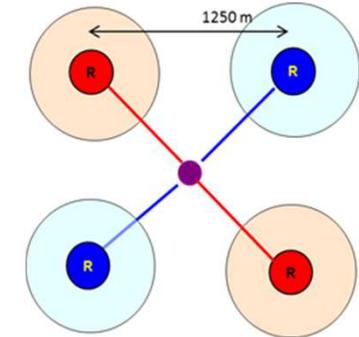
2. Scénario de stockage en doublet équilibré (**connu**)  
La même eau déstockée en hiver que stockée l'été

3. Scénario de stockage en triplet équilibré (**nouveau**)  
Un seul puits réversible + rendement du stockage ↗

4. Scénario de stockage en doublet optimisé (**innovant**)  
Deux puits réversibles + composant GTH classique

5. Scénario de stockage en triplet optimisé (**innovant**)  
Un seul puits réversible + GTH classique + disponibilité

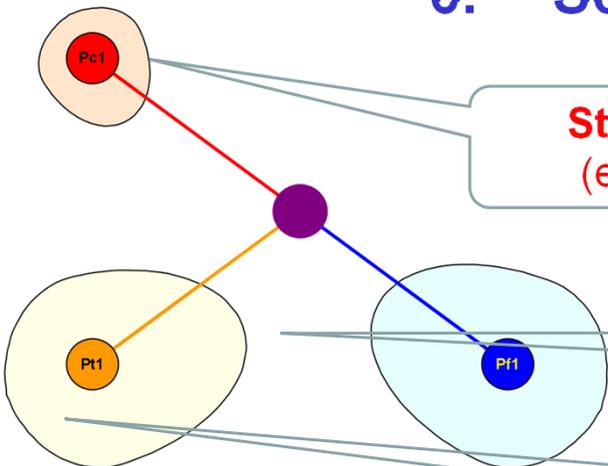
6. Scénario de cumul de doublets (si demande forte)



**Stockage : Eviter de surdimensionner**  
(en aquifère profond pour le chauffage)

**Bulle froide**  
(expansion restreinte)

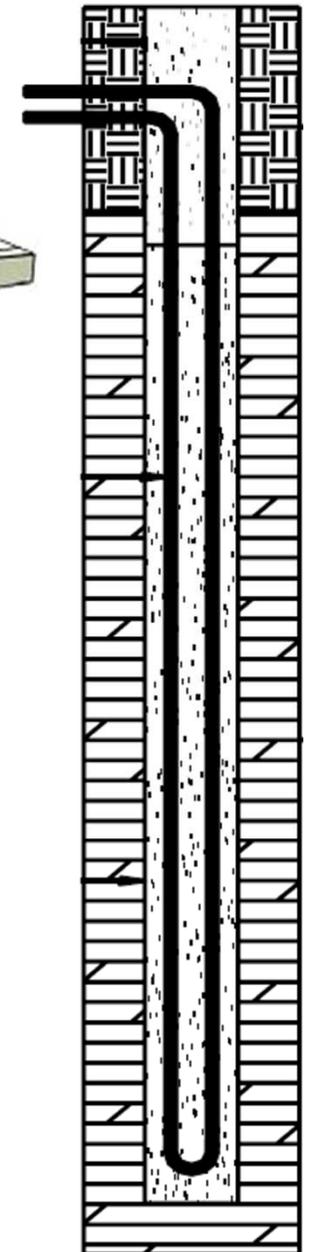
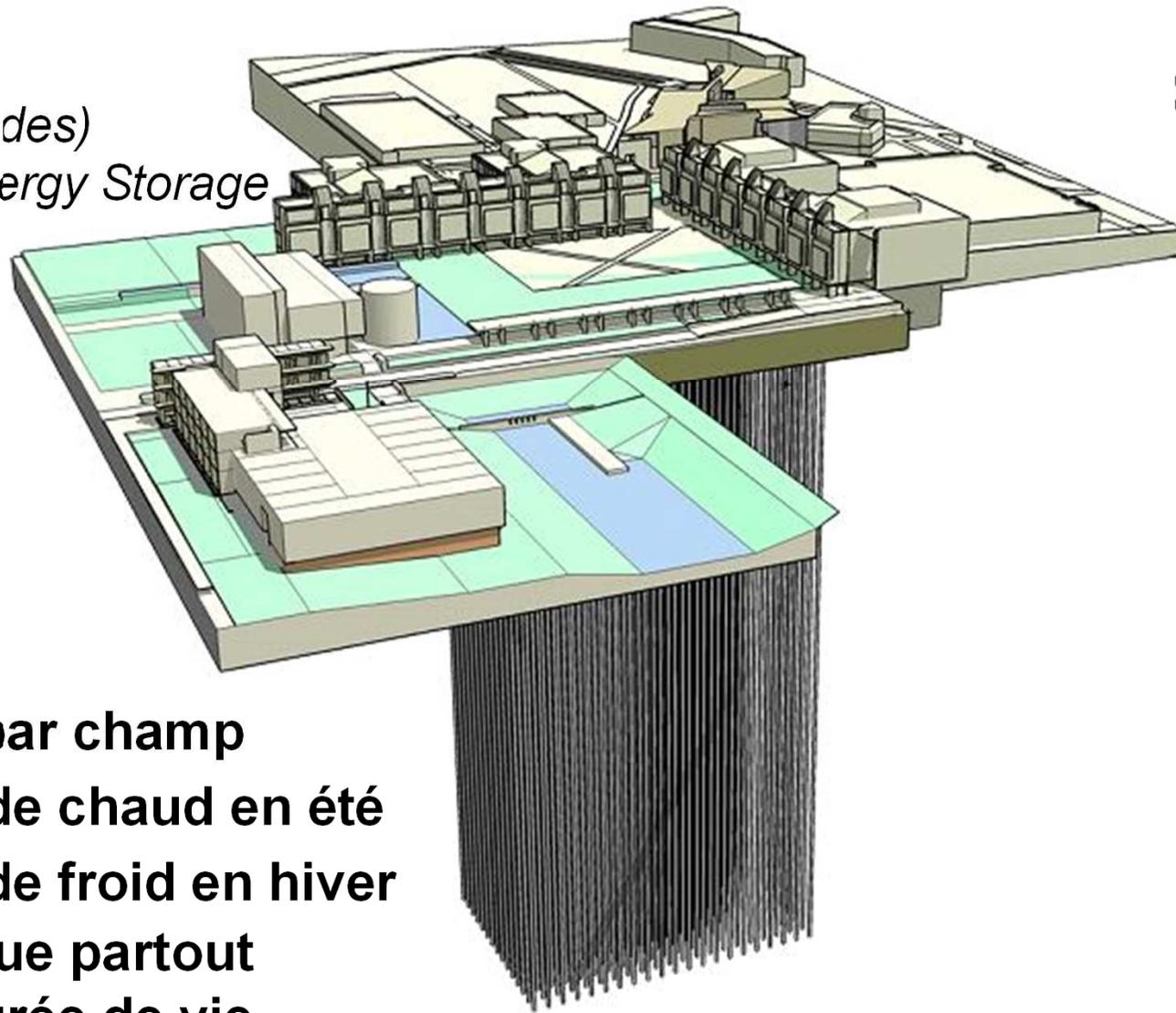
**Bulle tiède**  
(ressource géothermale naturelle)



# Stockage en champ de sondes

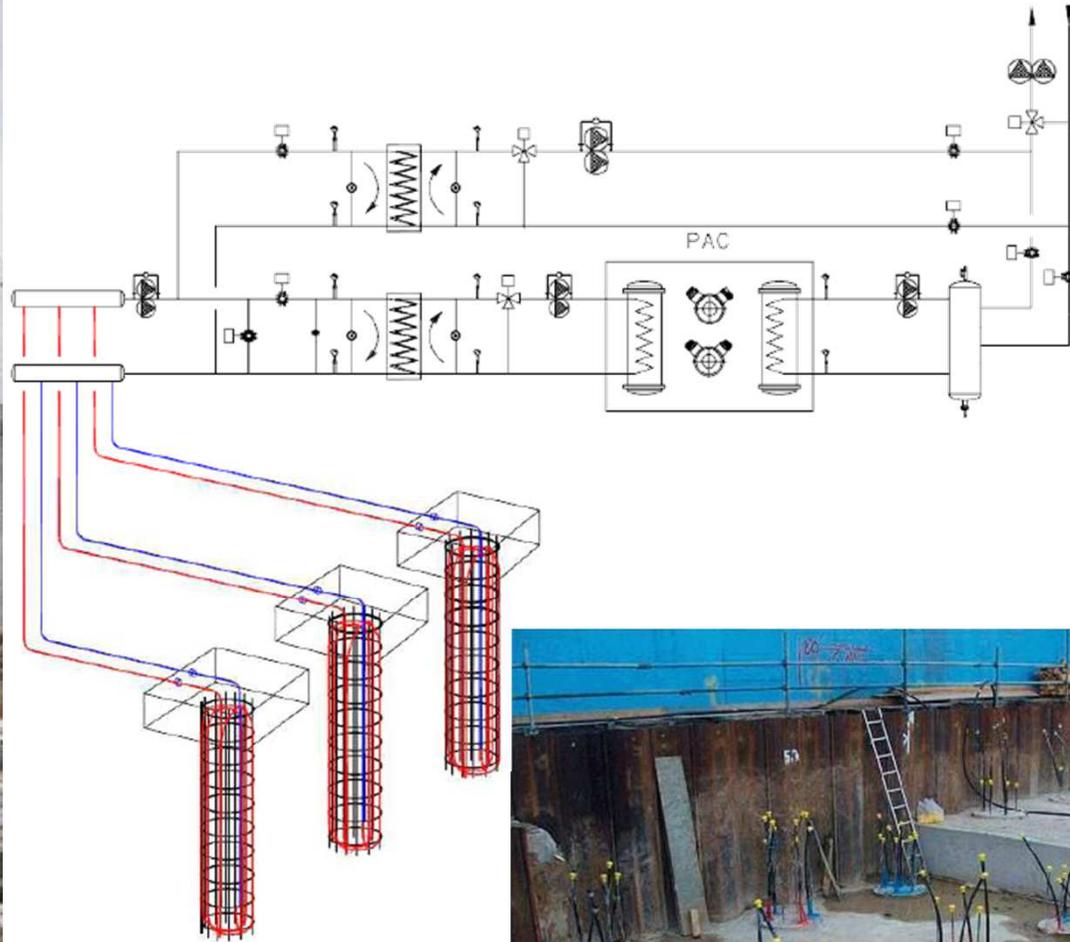


**BTES** (*champ de sondes*)  
*Borehole Thermal Energy Storage*  
(Oshawa, Ontario)



- > Un **seul stock** par champ
  - > Accumulation de chaud en été
  - > Accumulation de froid en hiver
  - > Possible presque partout
  - > (très) longue durée de vie
  - > Peu d'interférence avec le voisinage
  - > Adapté aux stockage inter-saisonnier Eté / Hiver
  - > Des puissances significatives : de 50 kW à 4 MW
- Encore peu répandu en France**

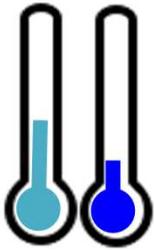
# Fondations géothermiques



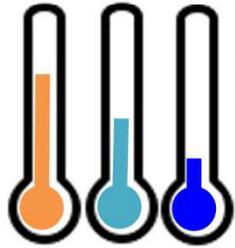
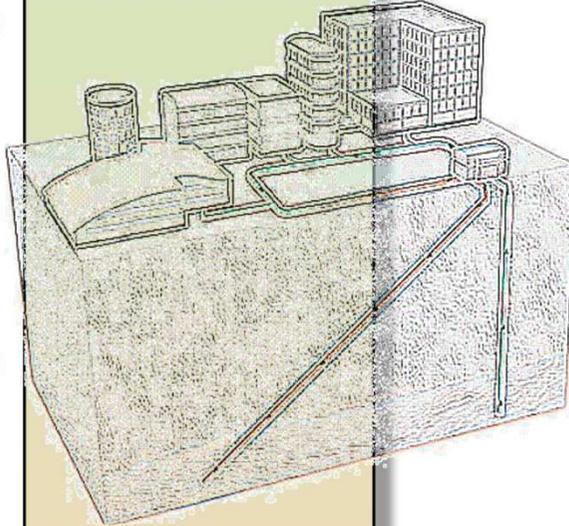
- > Un **seul stock** par champ
- > **Stockage inter-saisonnier Obligatoire**
- > Accumulation de chaud en été
- > Accumulation de froid en hiver
- > (très) longue durée de vie

**Encore peu répandu en France**

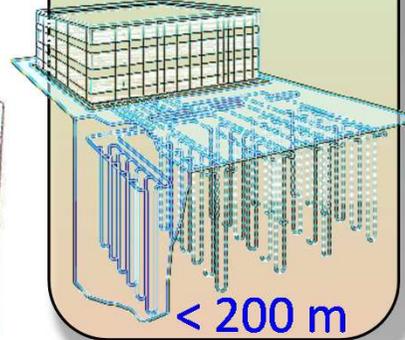
# Récapitulatif



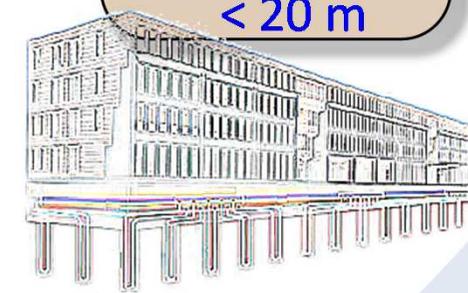
**ATES**  
de 500 kW  
à 20 MW



**BTES**  
de 50 kW  
à 4 MW



**Fondations**  
de 10 kW  
à 0.5 MW

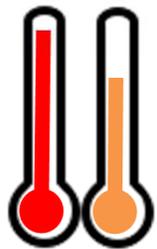


< 20 m

Technicité  
disponible

Technicité  
très spécifique

< 2 000 m





# Stocker pour le chauffage direct

Okotoks (ca): 34 000 m<sup>3</sup>, 144 sondes à -35m



52 logements  
en 4 branches

2 ballons tampons  
de 240m<sup>3</sup> au total  
& appoint thermique



2 293m<sup>2</sup> de  
panneaux solaires  
en 4 branches

Champ de 144 sondes  
de 35 m de profondeur  
(24x6 circuits parallèles)

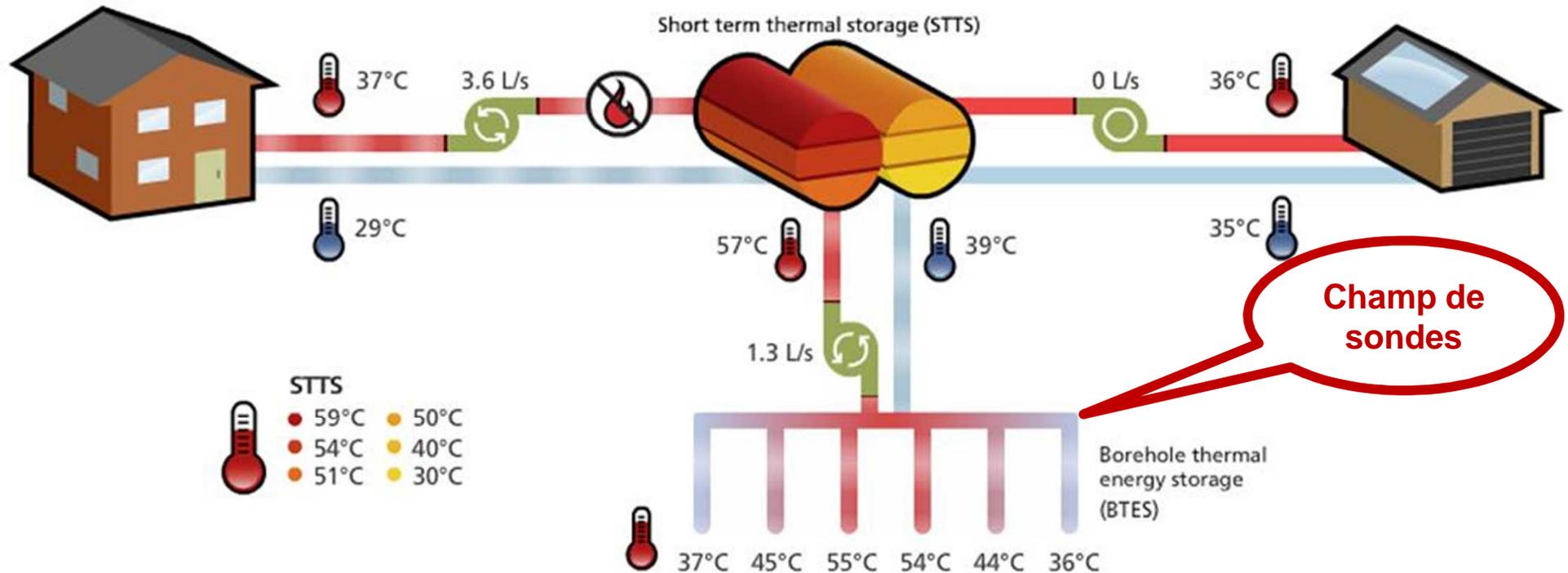
# Okotoks (canada)



Current Conditions

April 25, 2013

5:20



<p>Outdoor Temperature 5°C</p>	<p>Incident Solar 0 W/m<sup>2</sup></p>	<p>Solar Energy Collected 0 kW</p> <p>x 798</p>	<p>Solar Fraction 100%</p>	<p>Space Heating Load 116 kW</p> <p>x 52</p>
------------------------------------	---	---	--------------------------------	--

## Hybridation Solaire / Géothermie (Okotoks, Ca)



Etat en avril 2013

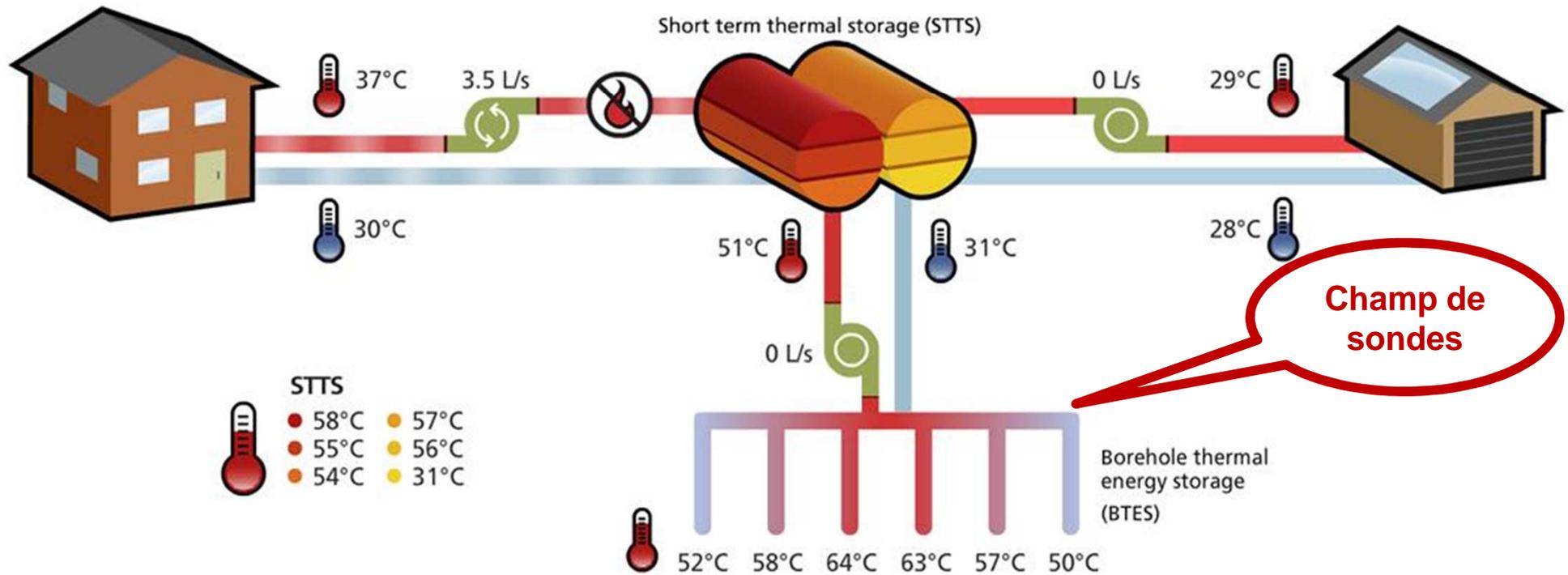
# Okotoks (canada)



Current Conditions

October 21, 2013

6:20



Hybridation Solaire / Géothermie (Okotoks, Ca)



Etat en octobre 2013

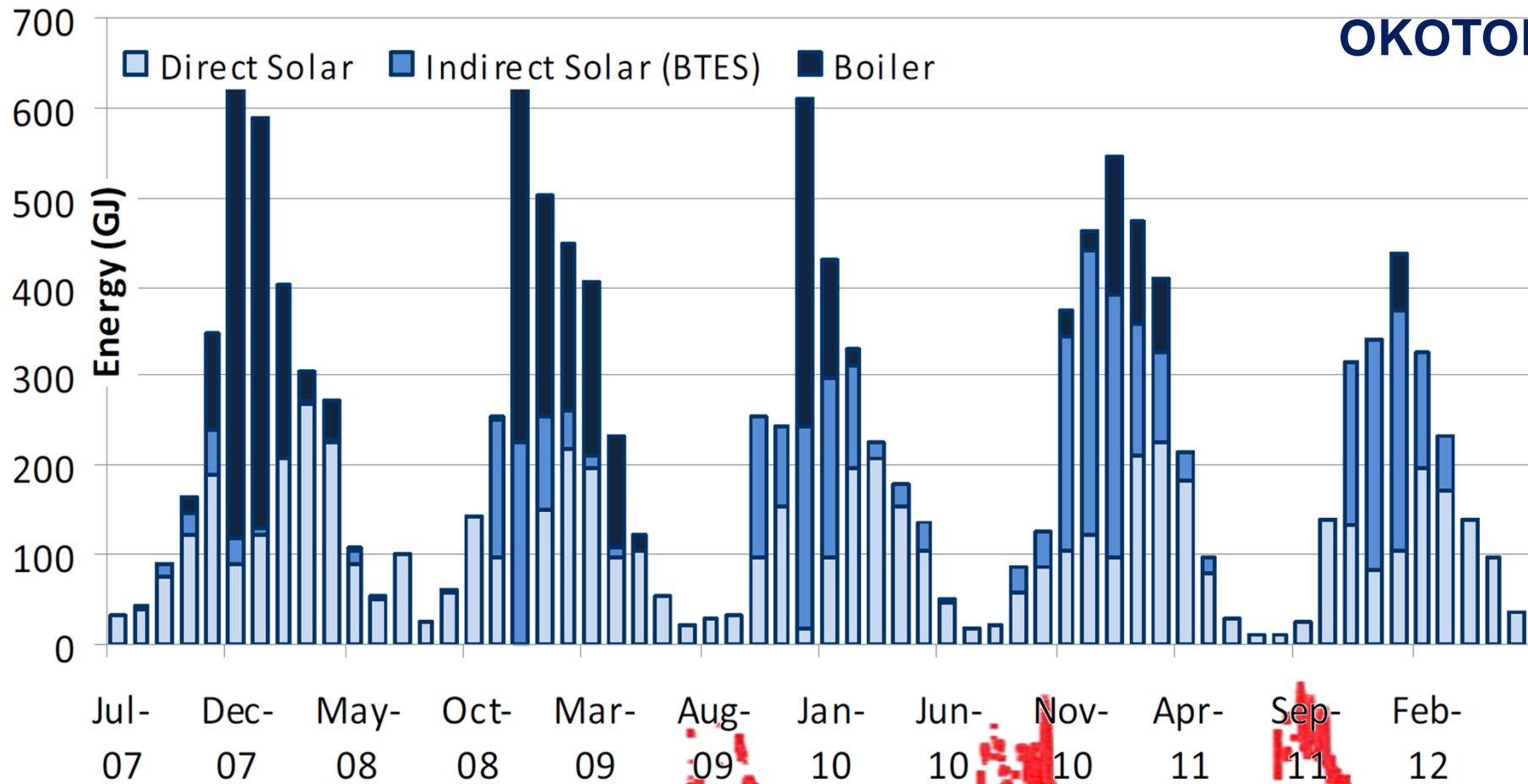
mardi 3 décembre 2013

20

# Okotoks (canada)

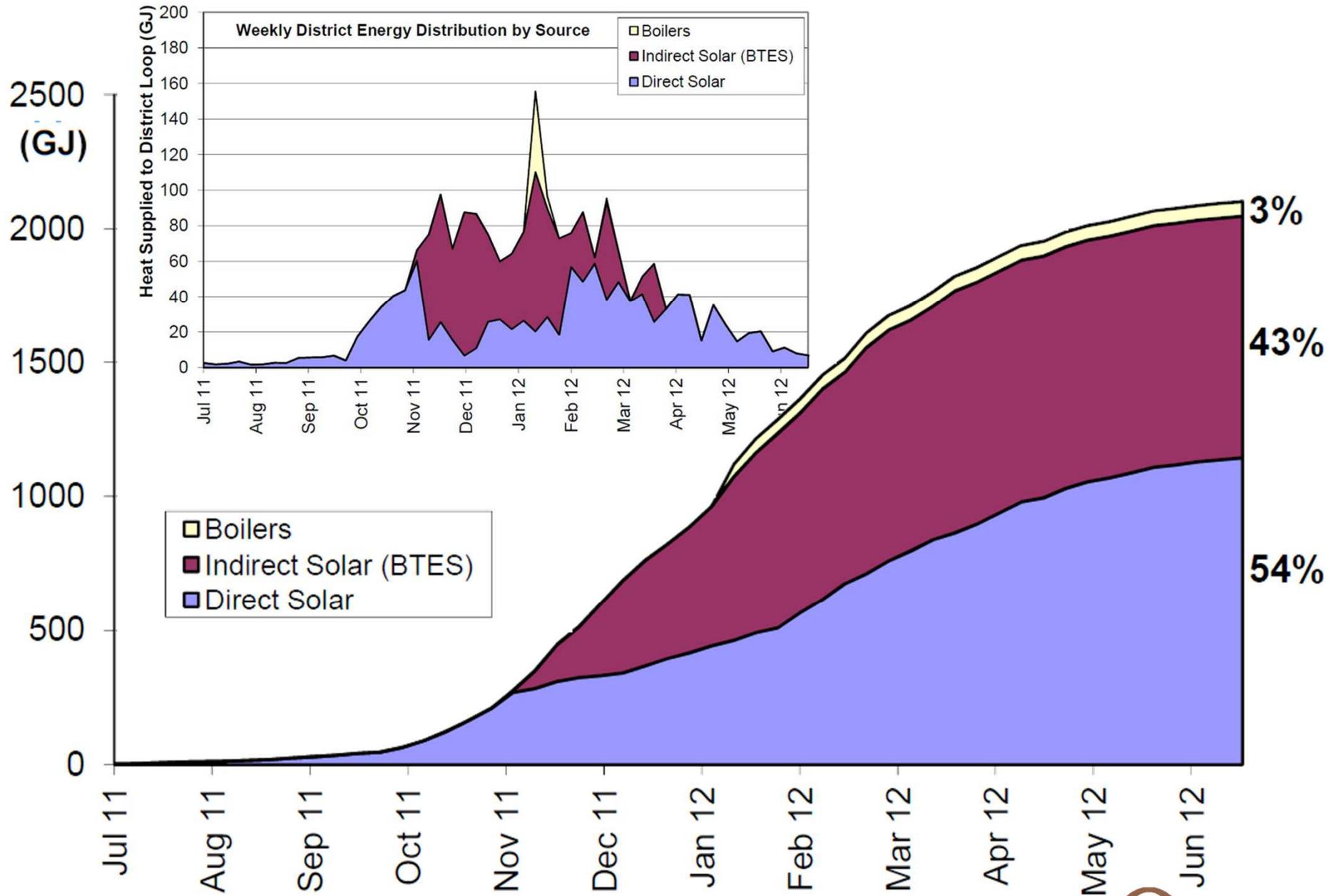


## OKOTOKS



Quelques années pour  
atteindre le régime de croisière

# Okotoks (canada) : le bilan



**97% de l'énergie thermique finale d'origine solaire dont 43% a transité par le champ de sondes**  
 (Taux de récupération dans le champ de sondes : 36%)

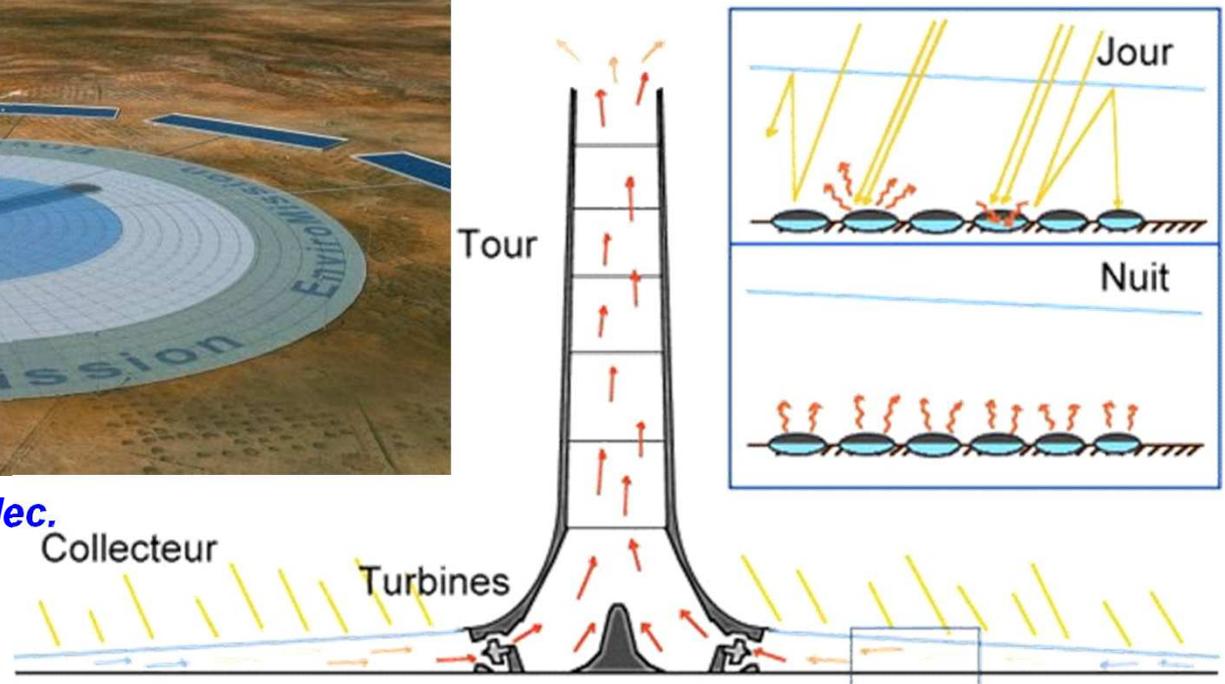
# Hybrider pour l'électricité ?



*Tour solaire à vortex atmosphérique  
SUMATEL, France, 1997, Pr Nazare*



*EnviroMission (Arizona) - 750M\$ - 200 MWélec.  
800m de haut, 10 km<sup>2</sup>, r 1.8km*



## Stockage Géothermique ?

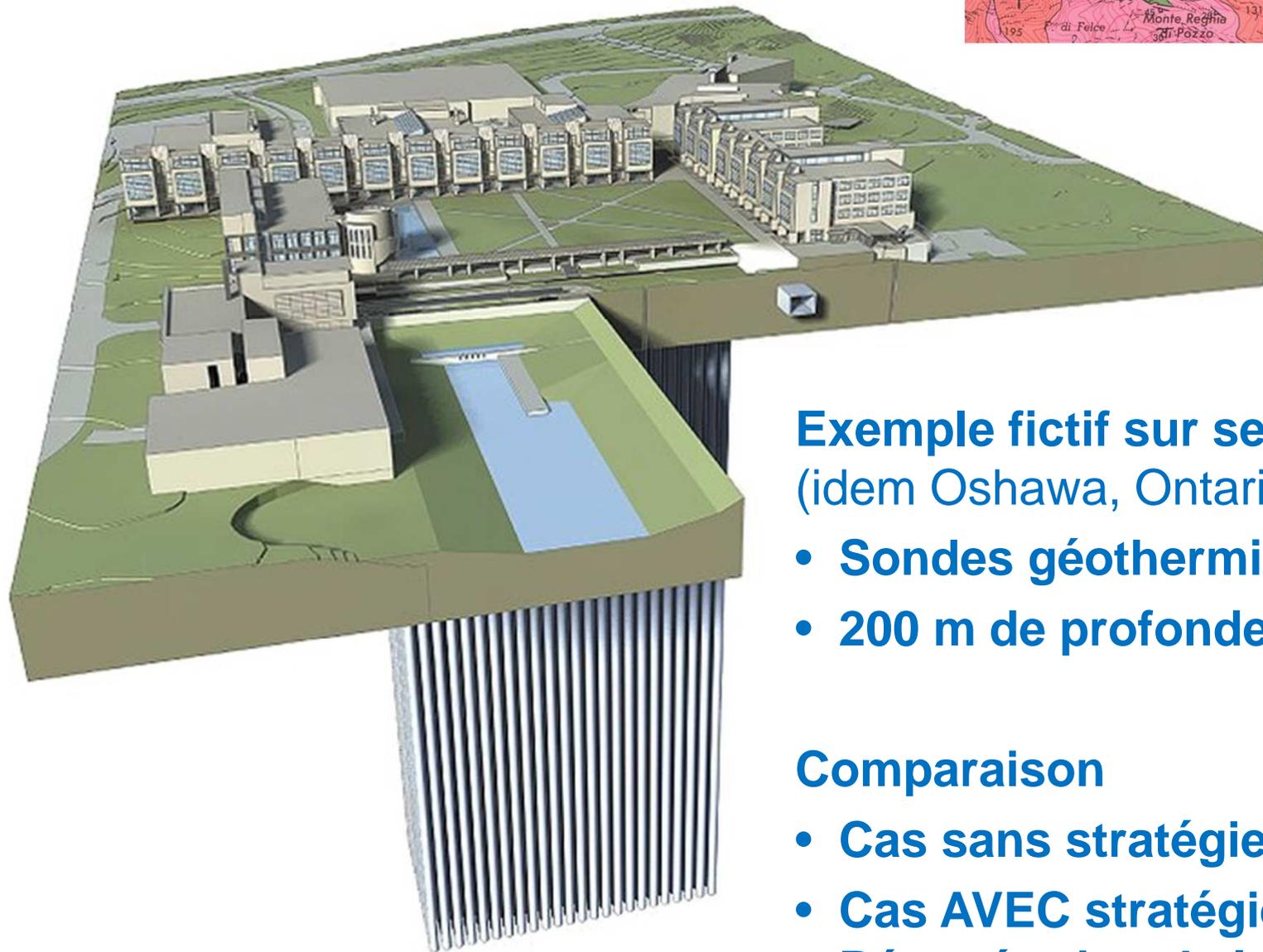
- Puissance incidente : 7.5 GWth
- Energie incidente (8h) : 60 GWh
- Capacité du Sol : 2.3 MJ/m<sup>3</sup>.K
- $\Delta T 10^{\circ}C \Rightarrow 65 GWh/m$  de profondeur (rayon 1.8 km)



# Stockage géothermique

## L'intérêt économique par l'exemple





## Exemple fictif sur secteur de Paris-Orly (idem Oshawa, Ontario)

- Sondes géothermiques
- 200 m de profondeur

## Comparaison

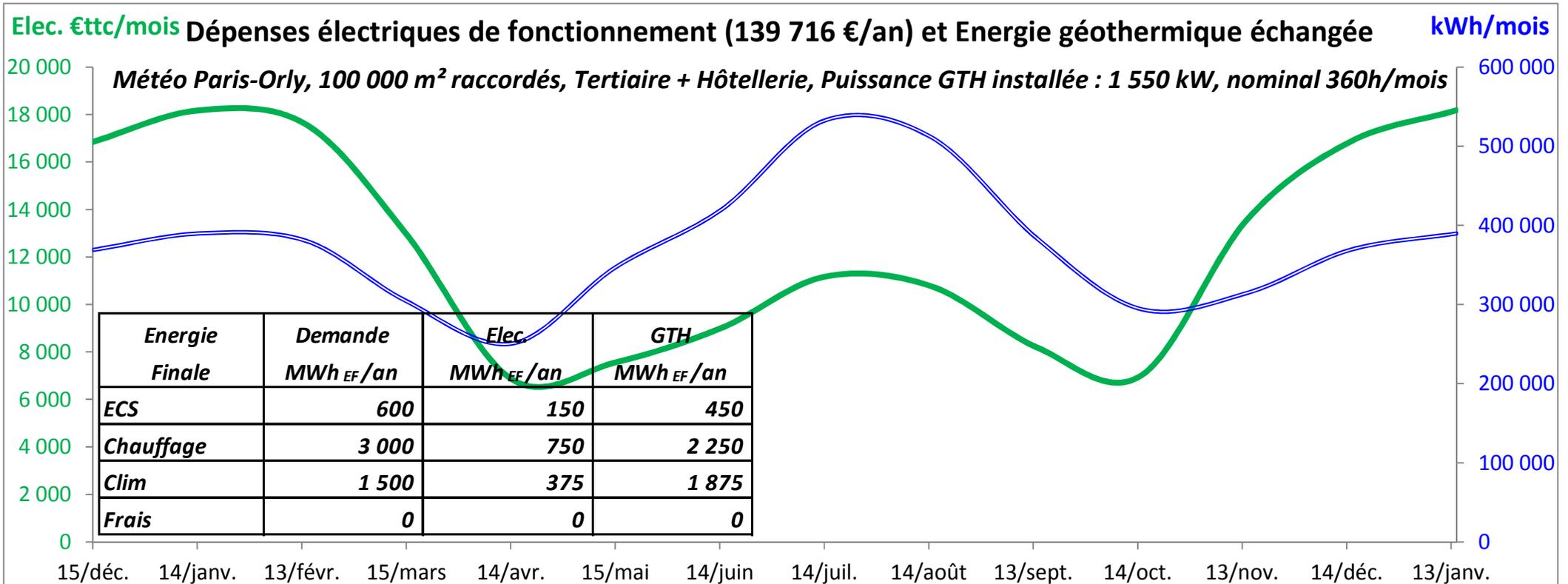
- Cas sans stratégie de stockage
- Cas AVEC stratégie de stockage :  
Récupération de la chaleur  
de la climatisation estivale

# 100 000 m<sup>2</sup> Tertiaire + Hôtellerie



## SANS stratégie de stockage inter-saisonnier

- De l'ordre de 155 sondes géothermiques verticales (baisse de puissance en fin de saison)
- Puissance géothermique installée (été et hiver) : 1.5 MW
- Temps de fonctionnement moyen : 445 heures (janvier et août) => COP machine = 4
- Abonnement électrique de 470 kW avec pompage (PAC été : 280 kW, PAC hiver : 395 kW)
- Environ 2.5 M€ d'investissement (estimation)



**Energie géothermique spécifique (kWh/m<sup>2</sup>.an) : ECS 4.5 (6.0), Chauff. 22.5 (30.0), Clim. 18.8 (15.0), Frais 0.0 (0.0)**

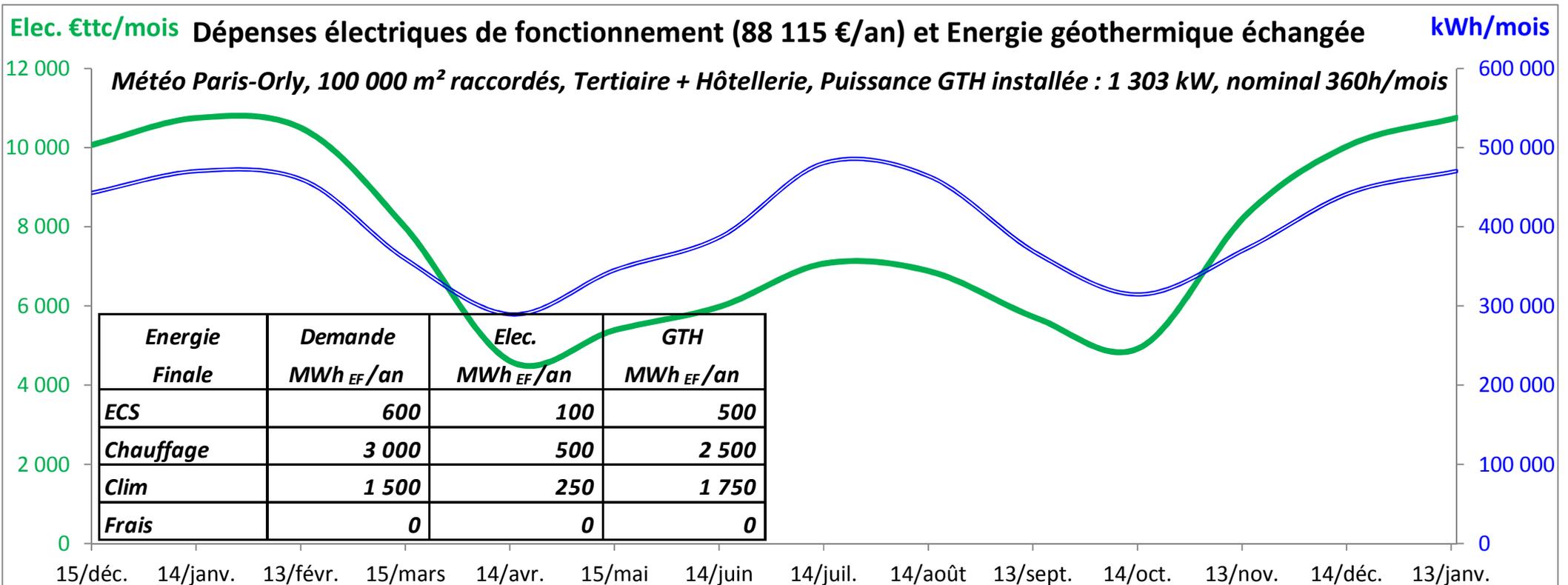
*(Energie géothermique échangée (MWh/an) : ECS 450.0, Chauff. 2 250.0, Clim. 1 875.0, Frais 0.0)*

# 100 000 m<sup>2</sup> Tertiaire + Hôtellerie



## AVEC stratégie de stockage inter-saisonnier

- De l'ordre de 131 sondes géothermiques verticales
- Puissance géothermique installée (été et hiver) : 1.3 MW
- Temps de fonctionnement moyen : 360 heures (janvier et août) => COP machine = 6
- Abonnement électrique de 330 kW avec pompage (PAC été : 190 kW, PAC hiver : 265 kW)
- Environ 2.1 M€ d'investissement (estimation)



Energie géothermique spécifique (kWh/m<sup>2</sup>.an) : ECS 5.0 (6.0), Chauff. 25.0 (30.0), Clim. 17.5 (15.0), Frais 0.0 (0.0)

(Energie géothermique échangée (MWh/an) : ECS 500.0, Chauff. 2 500.0, Clim. 1 750.0, Frais 0.0)



# Le stockage géologique de l'énergie thermique

-  
Déjà une réalité

## ASPRON

3 décembre 2013

*Hervé Lesueur – [h.lesueur@brgm.fr](mailto:h.lesueur@brgm.fr)*



Géosciences pour une Terre durable

# brgm