



Le stockage géologique de l'énergie thermique

-
Déjà une réalité

ASPRM

3 décembre 2013

Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr





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)

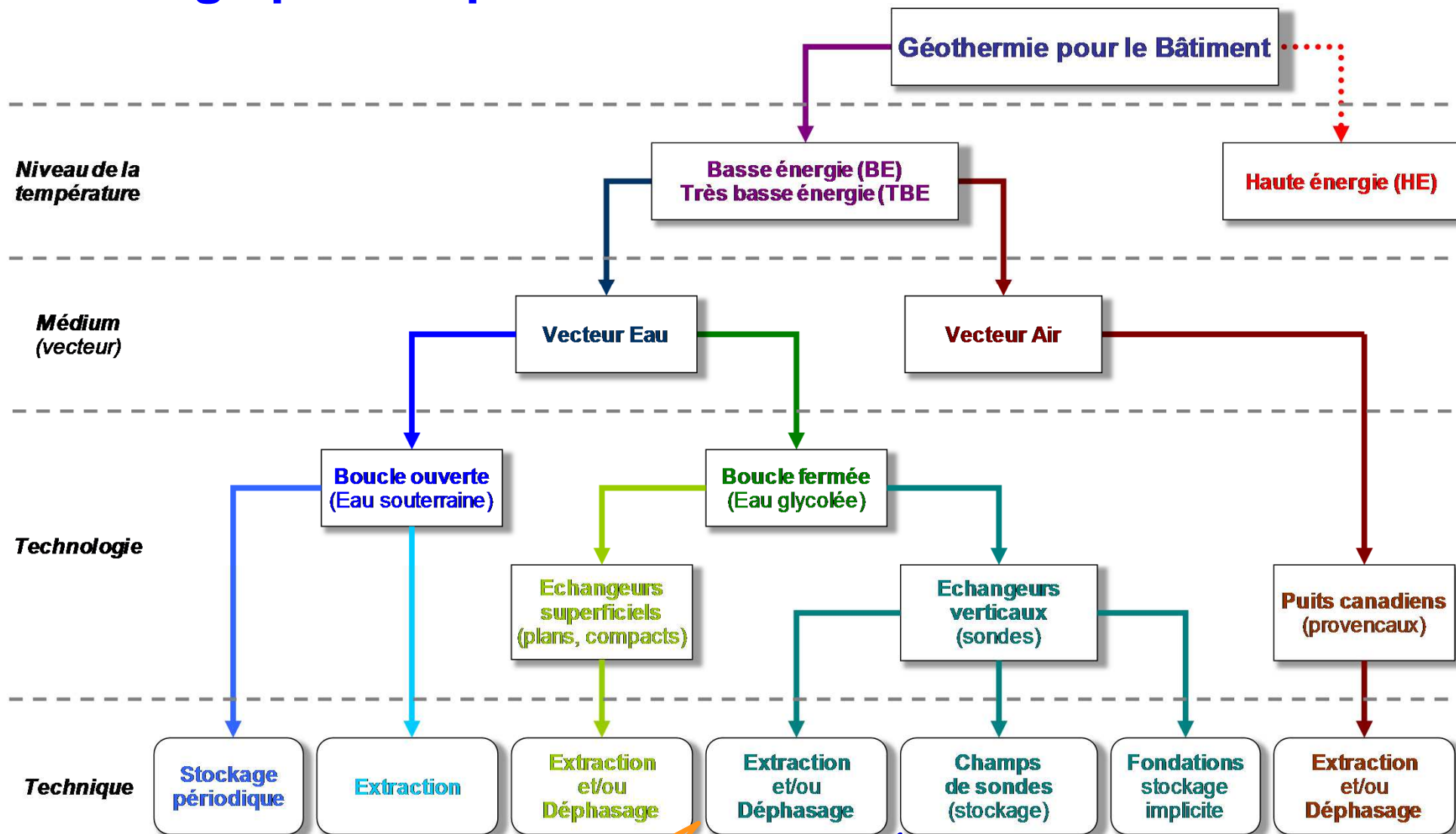
> Via un échange de chaleur : **Boucle fermée enterrée**

- 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

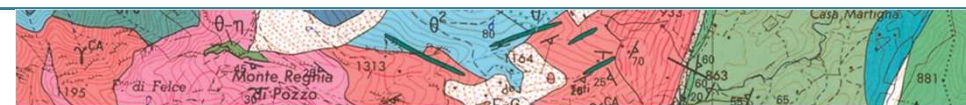


Pas encore en France

Déphasages

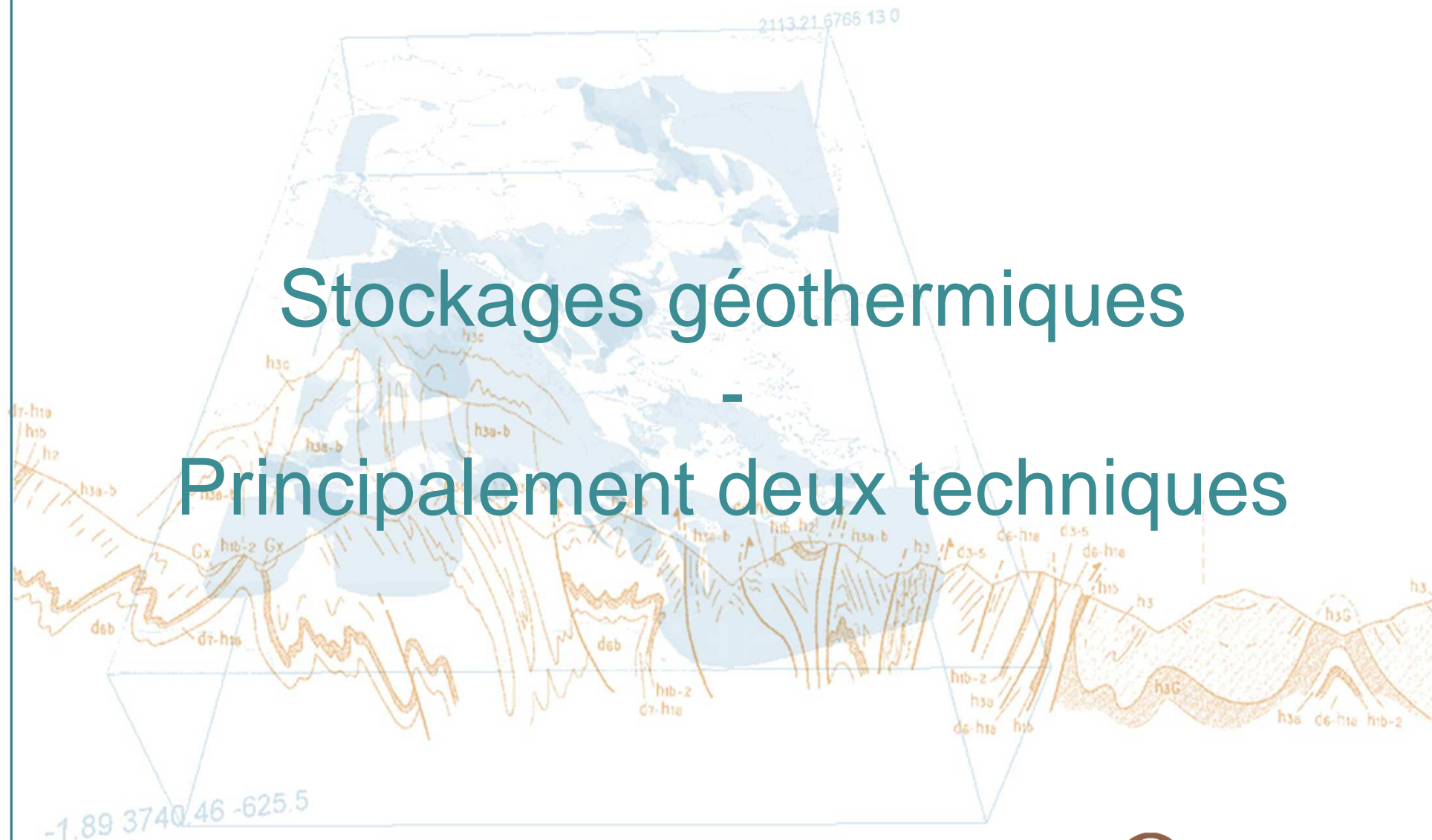
Stockage recommandé

Stockage quasi-obligatoire

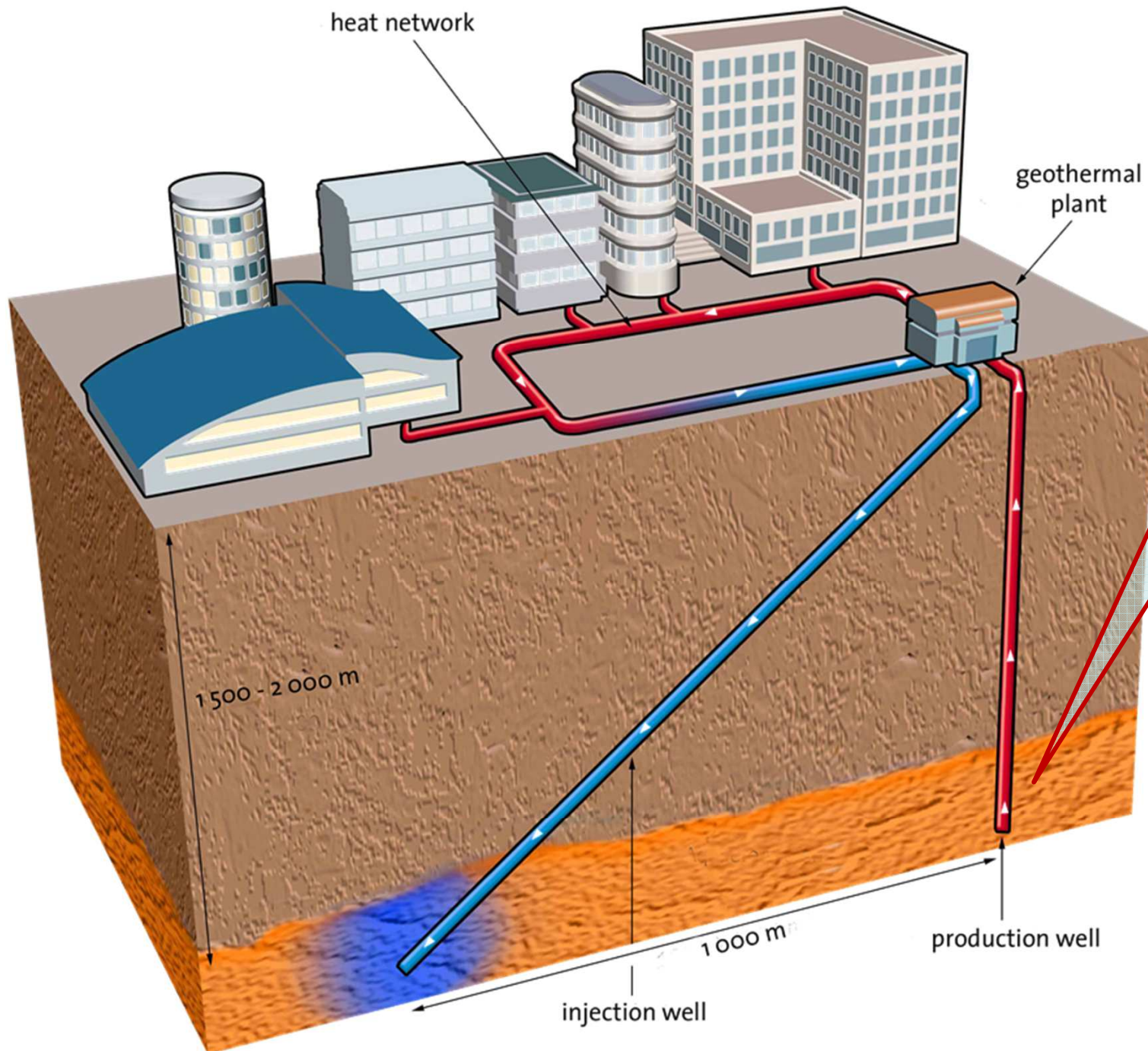


Stockages géothermiques

-
Principalement deux techniques



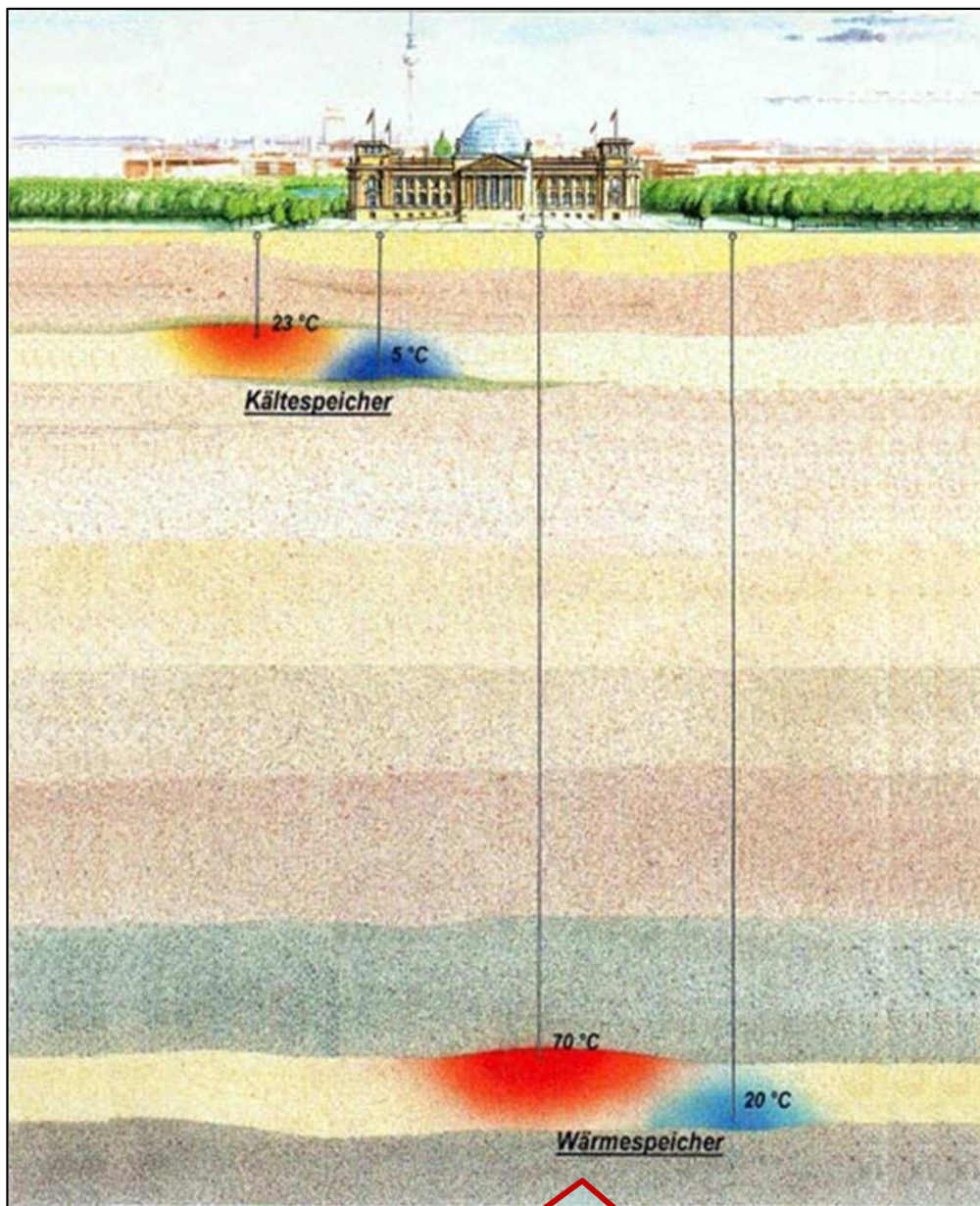
Le doublet de stockage



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 Mm³/saison

Double Stockage été / hiver



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

Stock frais (air ambiant & PAC)

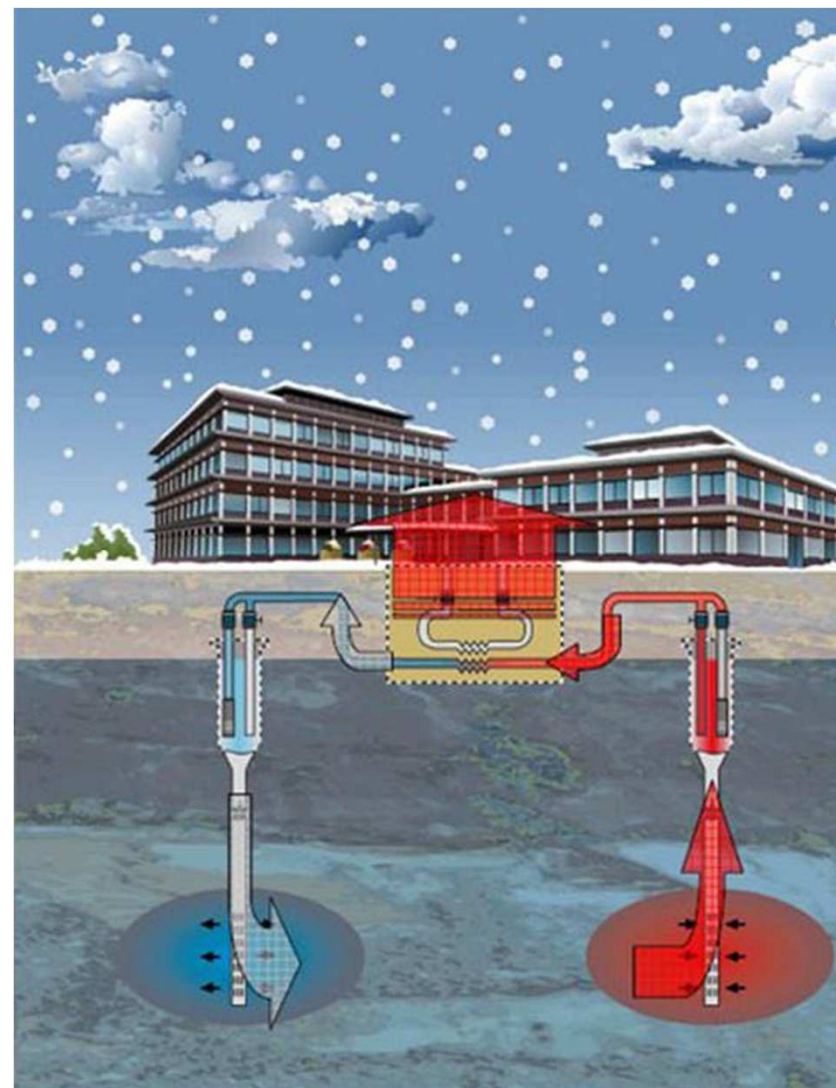
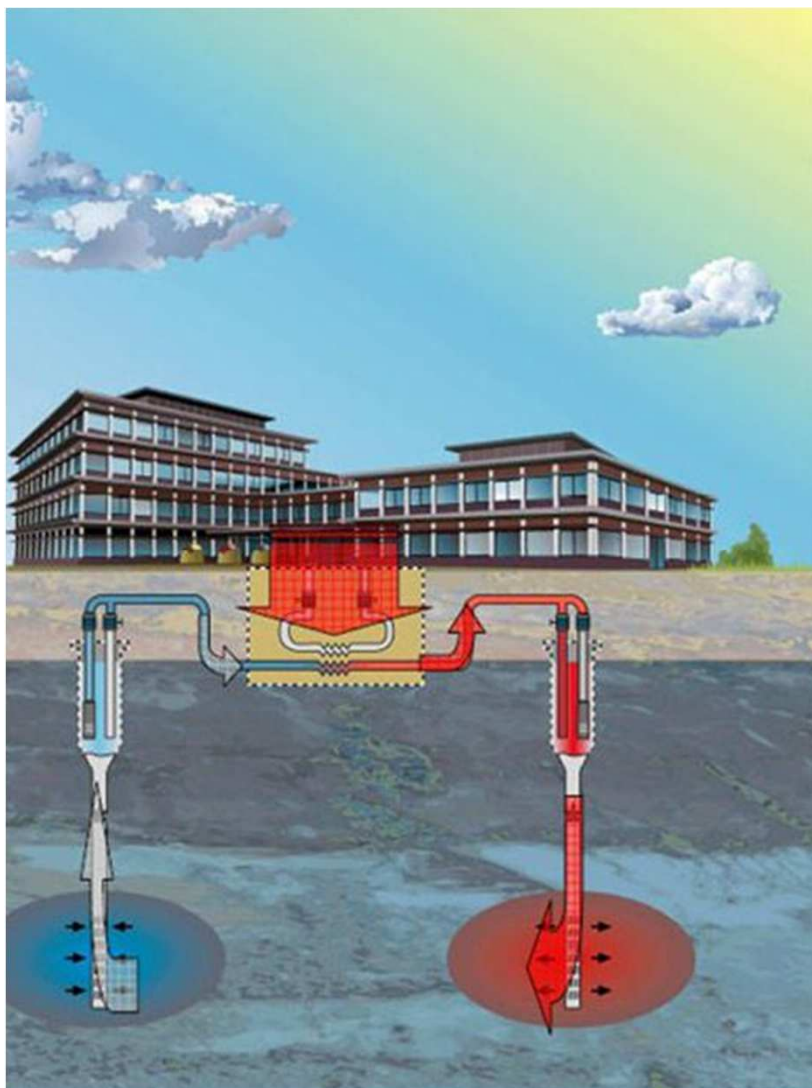
- ↪ Profondeur : 60m – 2 x 5 puits
- ↪ Distance entre puits : 300m
- ↪ Puits frais : 5°C / Puits chaud : 28°C
- ↪ Stockage hivernal => 4 250 MWh/an
- ↪ Puisage estival => 3 950 MWh/an
- ↪ Débit nominal : 300 m³/h

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 m³/h

Stockage en aquifère superficiel

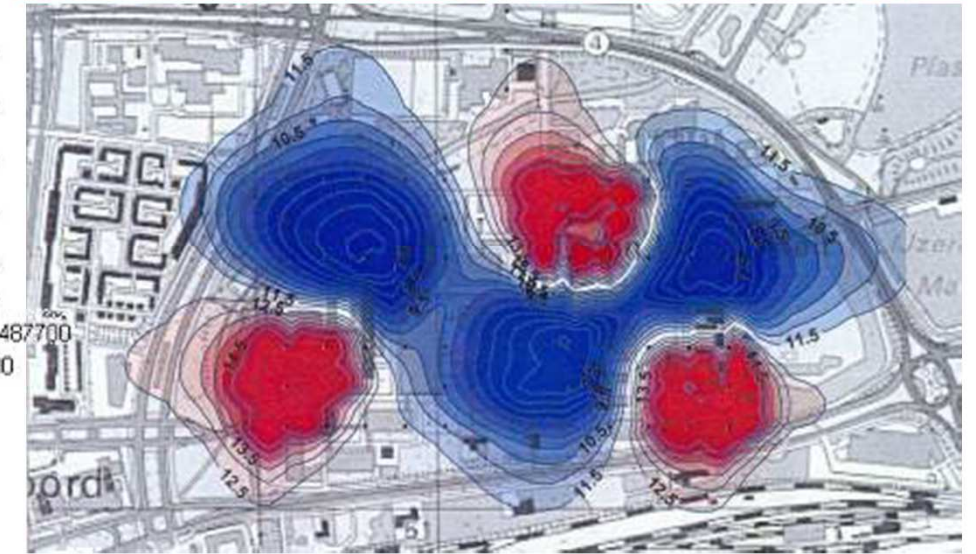
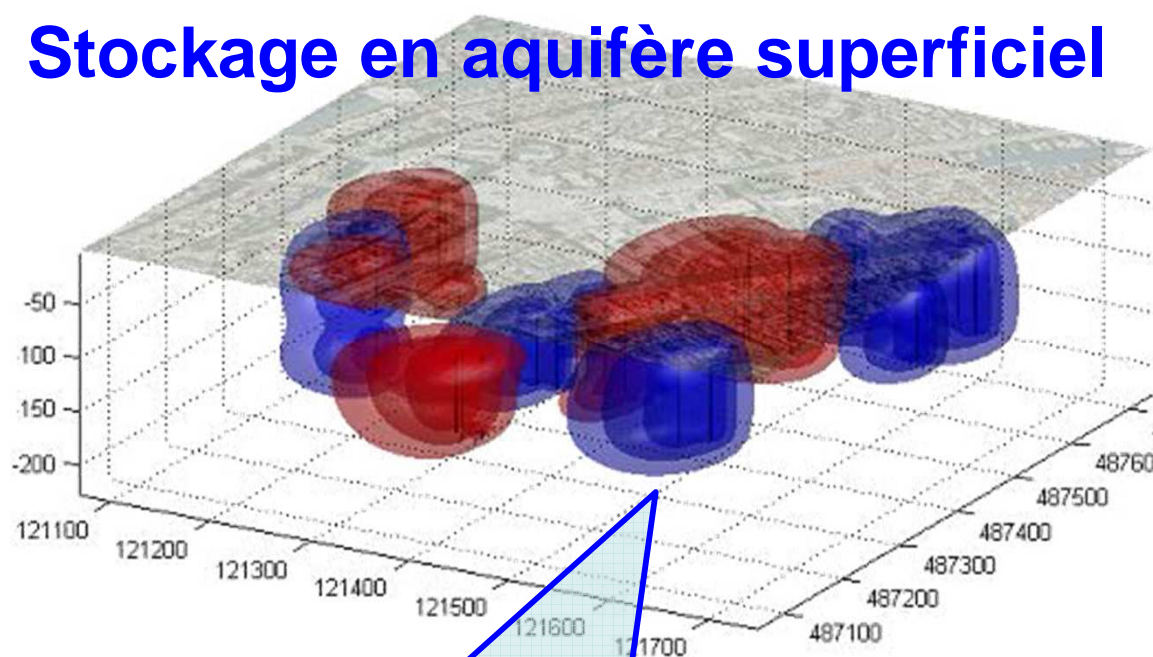
=> Au moins deux stocks à gérer : **Stock chaud & Stock froid**



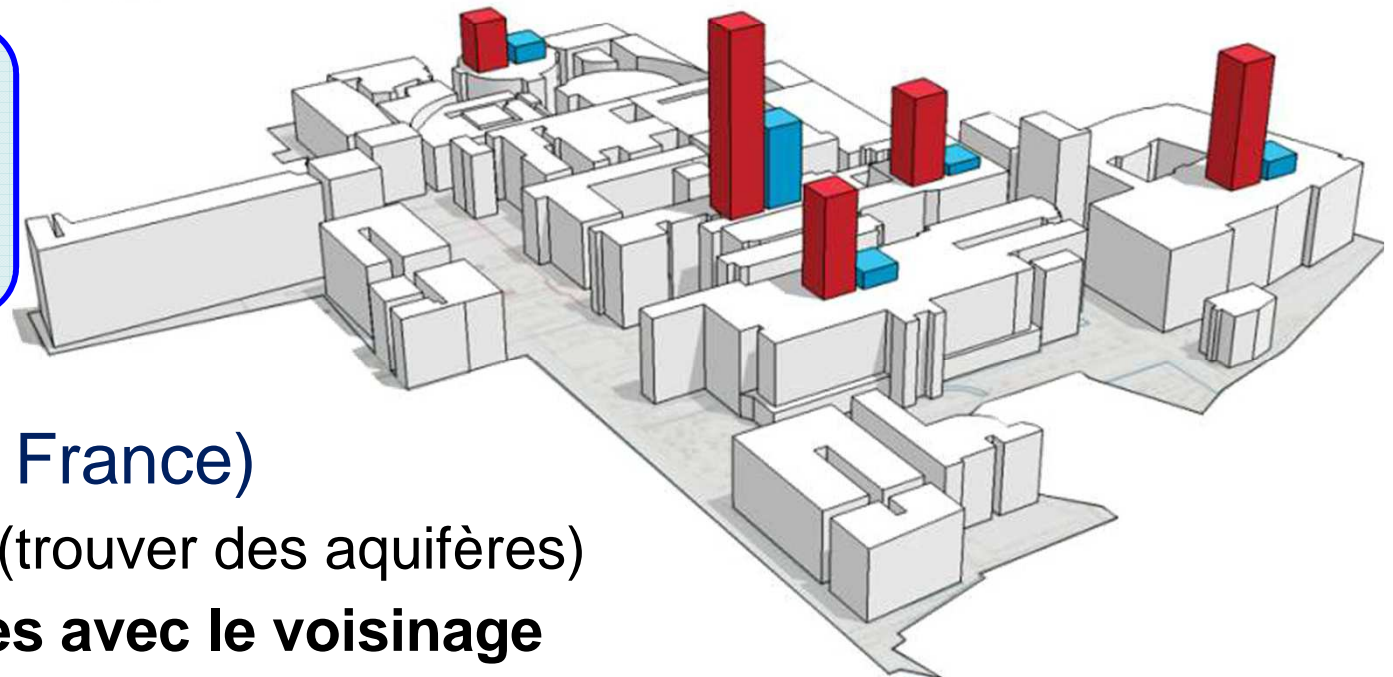
Epruvé mais pas en France

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

Stockage en aquifère superficiel



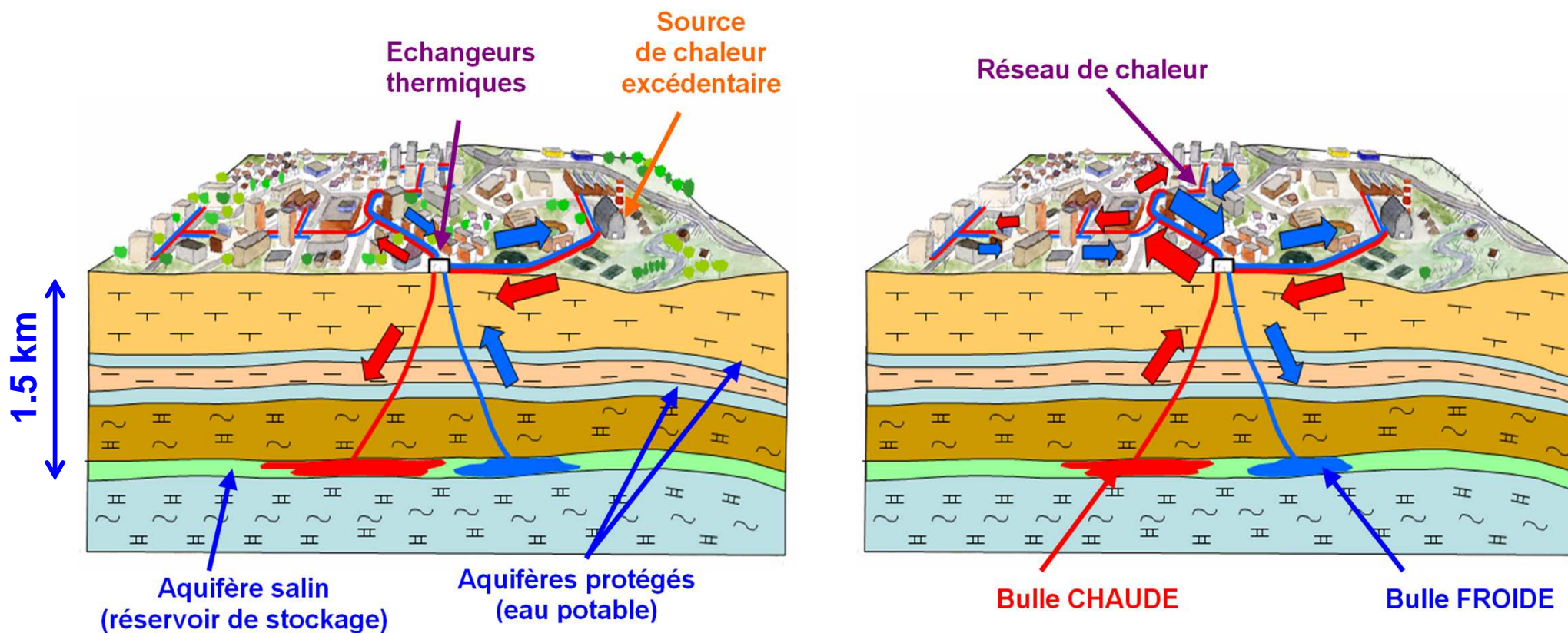
Privilégier le
rafraichissement direct
(direct cooling, géocooling)



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

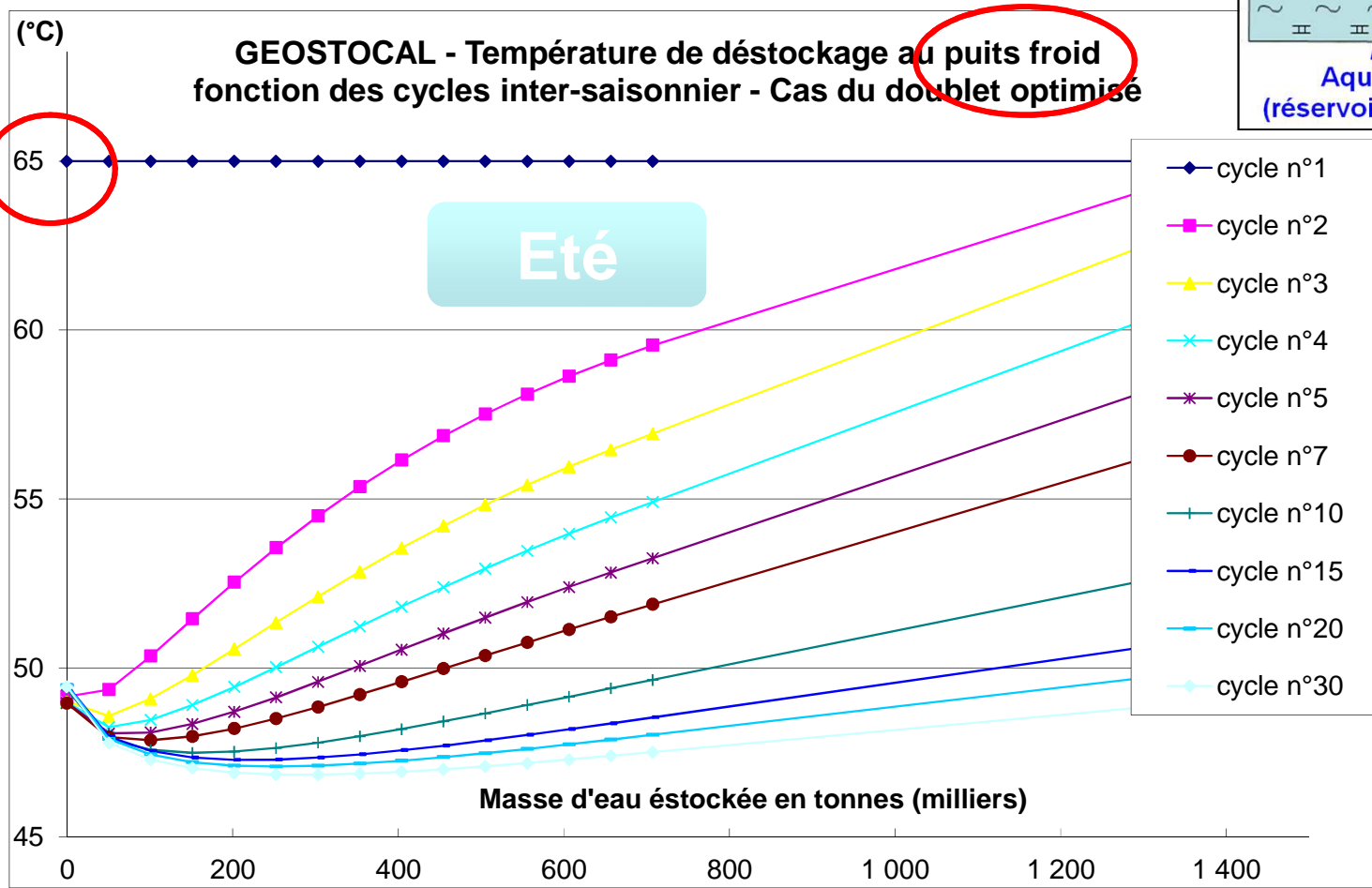
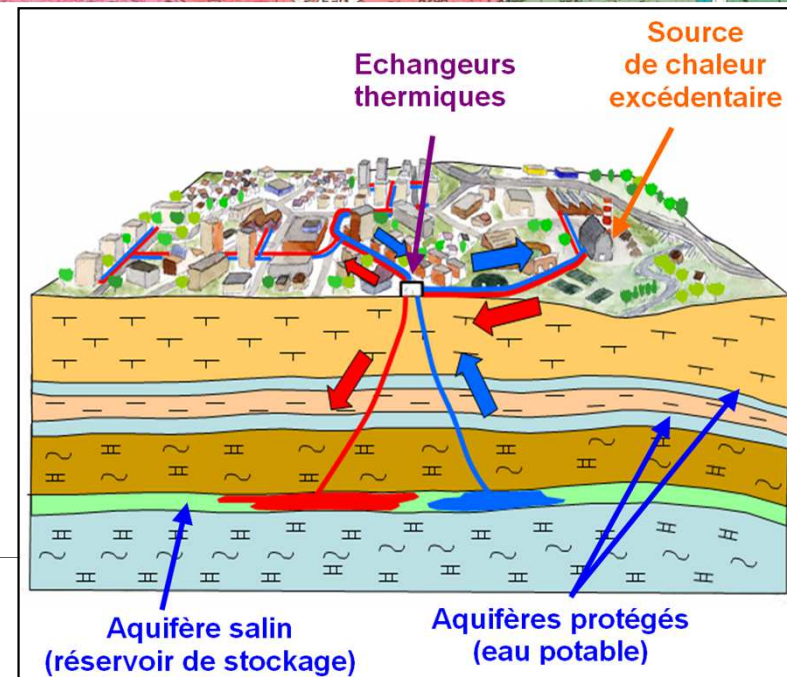
- Stocker de la chaleur en période estivale (vue de gauche)
- Déstocker l'énergie en période hivernale (vue de droite)

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

GEOSTOCAL (mode été)

Observation du puits froid

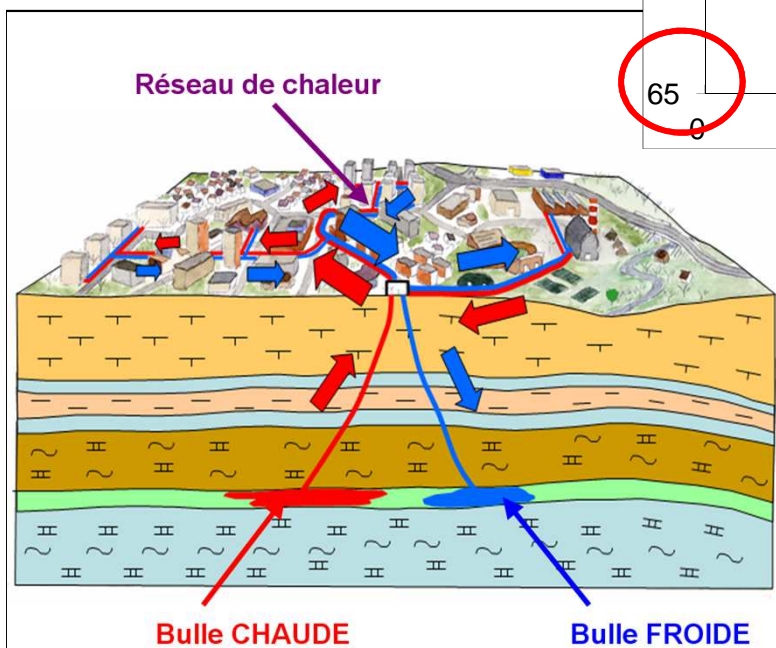
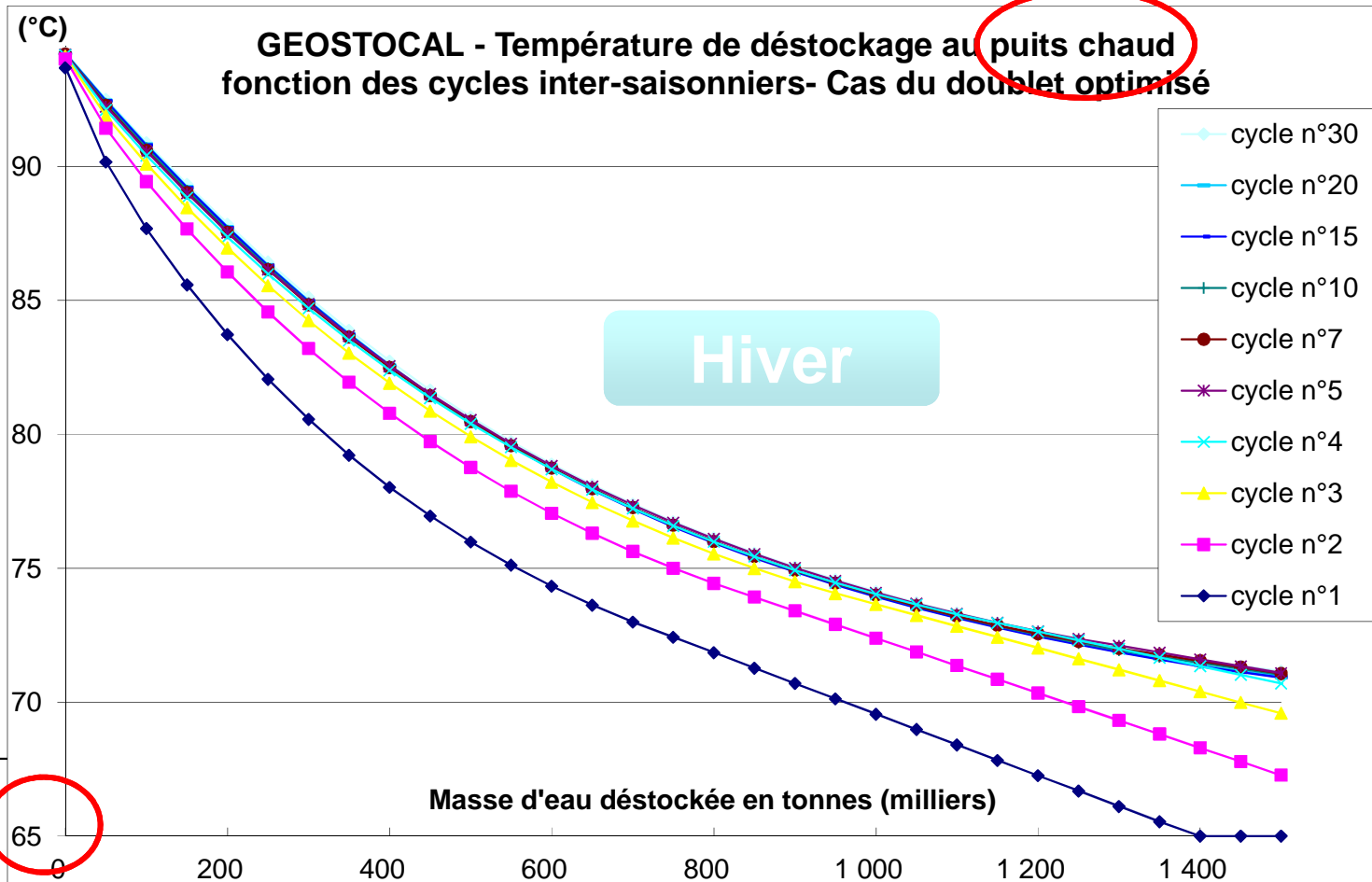
- Modélisation sur 30 ans
- Température :
65°C (cycle 1) => 47°C (cycle 20)
- Stockage : 700 000 m³ (saison estivale)



GEOSTOCAL (mode hiver)



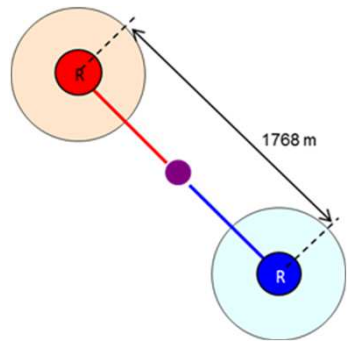
- > Livré :
58 GWh/an
- > Fonctionnement :
2.5 M€/an
- > Taux d'EnR
dans le réseau :
85%



Observation du puits chaud

- > Déstockage : 1 500 000 m³ (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

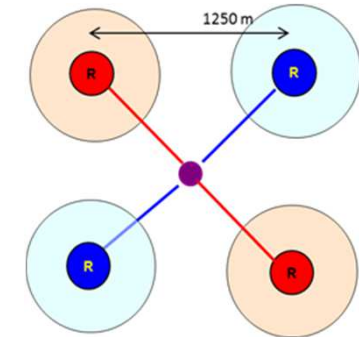
2. Scénario de stockage en doublet équilibré (**connu**)
La même eau déstockée en hiver que stockée l'été

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

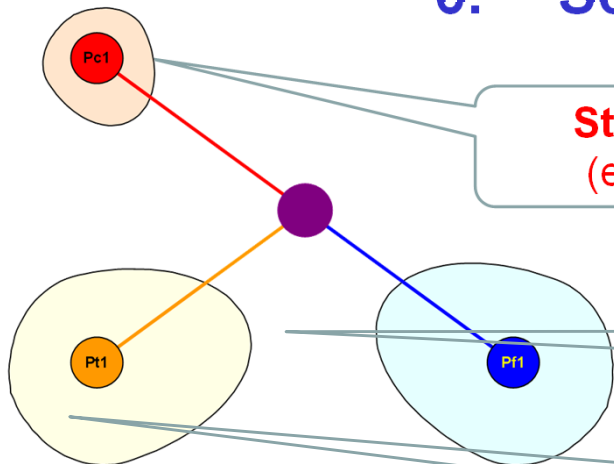
6. Scénario de cumul de doublets (si demande forte)



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

Bulle froide
(expansion restreinte)

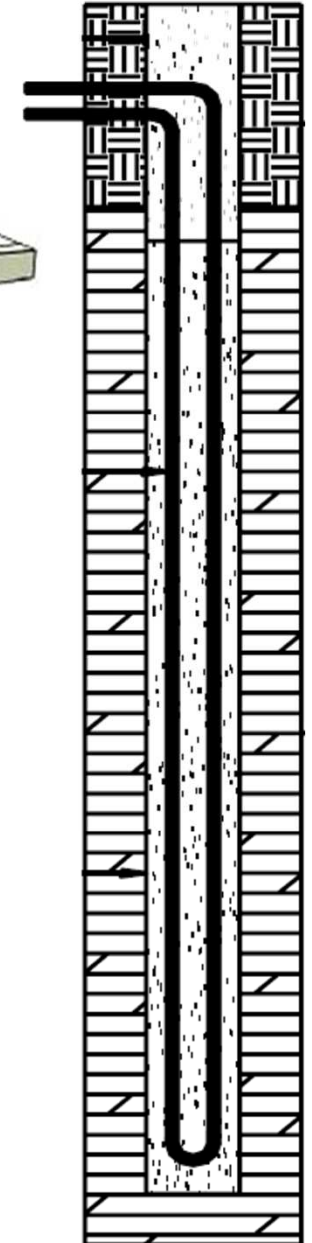
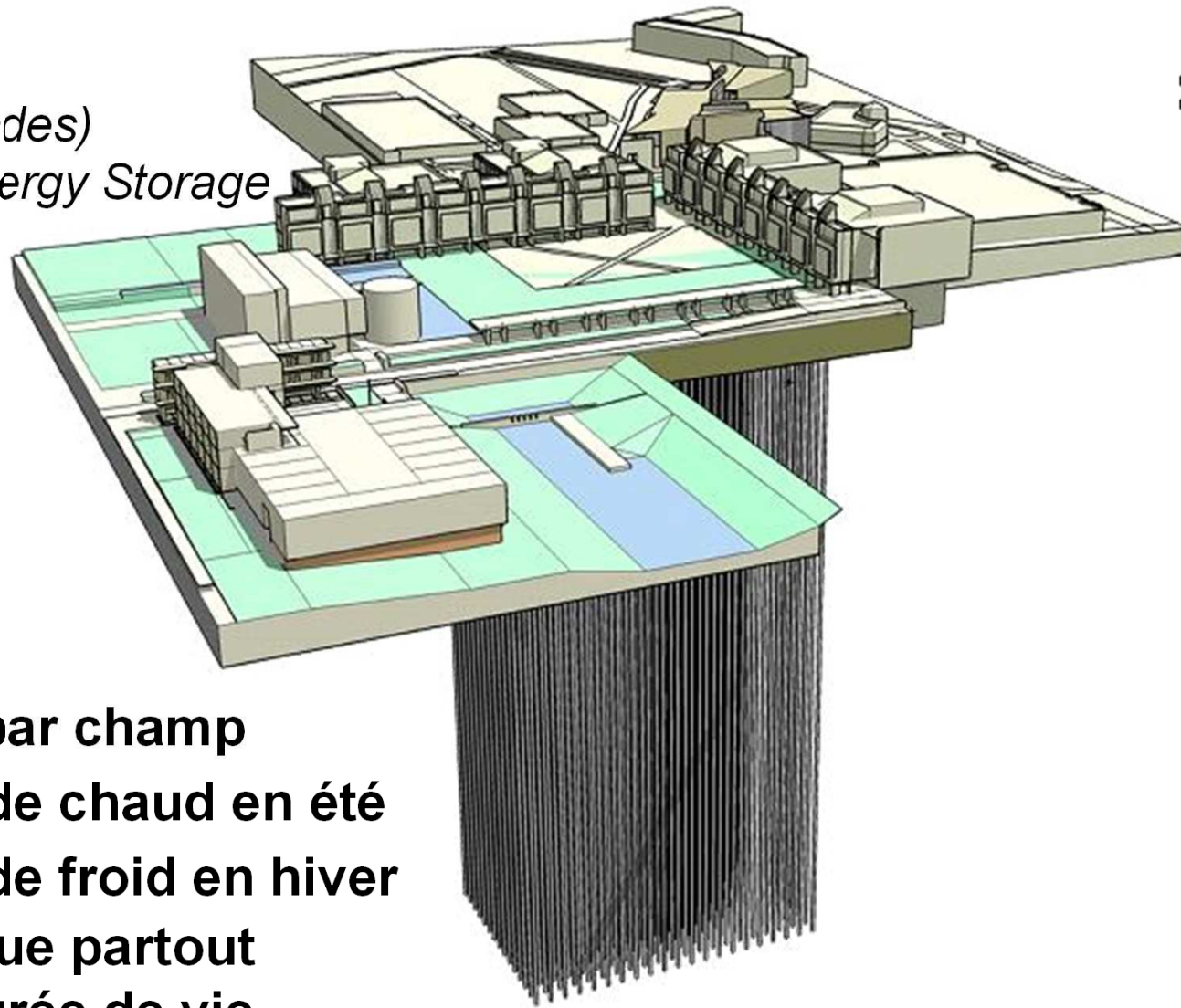
Bulle tiède
(ressource géothermale naturelle)



Stockage en champ de sondes

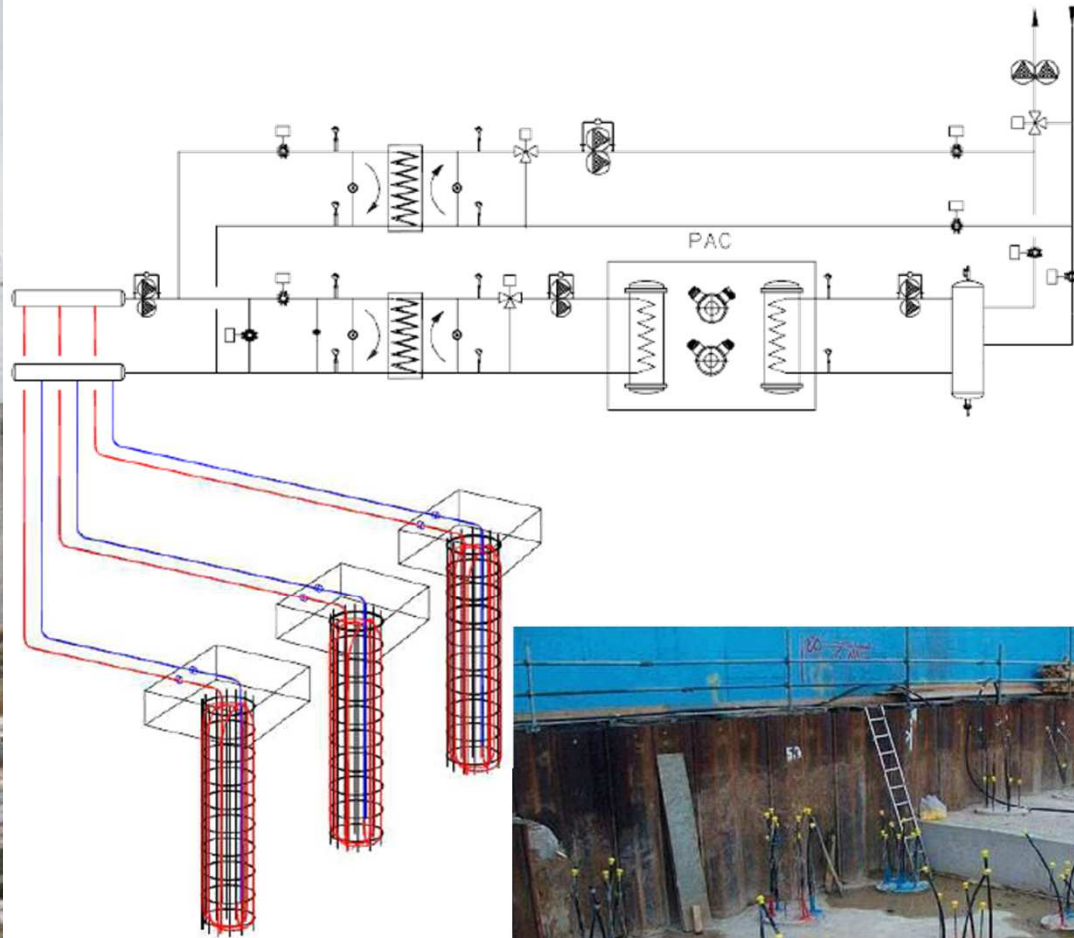


BTES (*champ de sondes*)
Borehole Thermal Energy Storage
(Oshawa, Ontario)



- > 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**

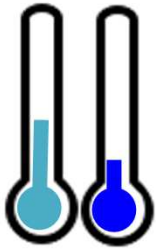
Fondations géothermiques



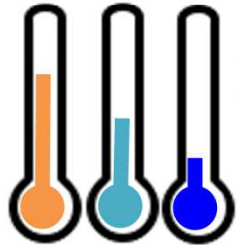
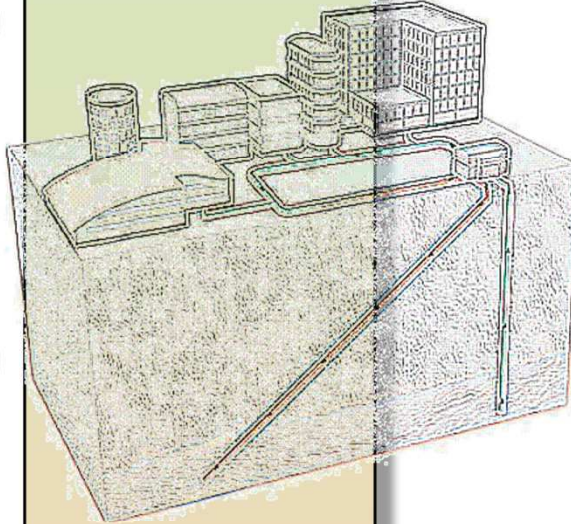
- > Un **seul stock** par champ
- > **Stockage inter-saisonnier Obligatoire**
- > Accumulation de chaud en été
- > Accumulation de froid en hiver
- > (très) longue durée de vie

Encore peu répandu en France

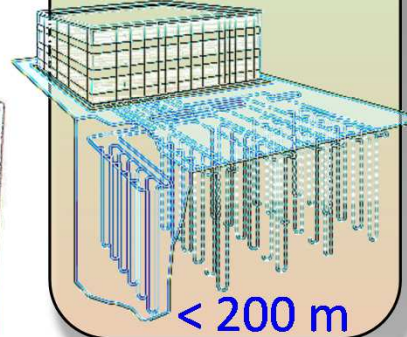
Récapitulatif



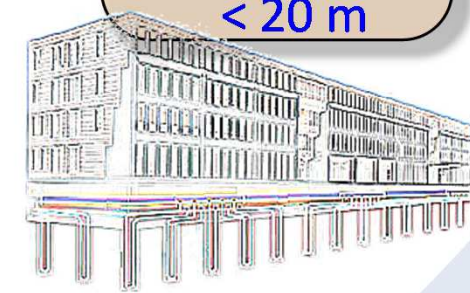
ATES
de 500 kW
à 20 MW



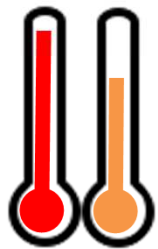
BTES
de 50 kW
à 4 MW



Fondations
de 10 kW
à 0.5 MW



< 20 m

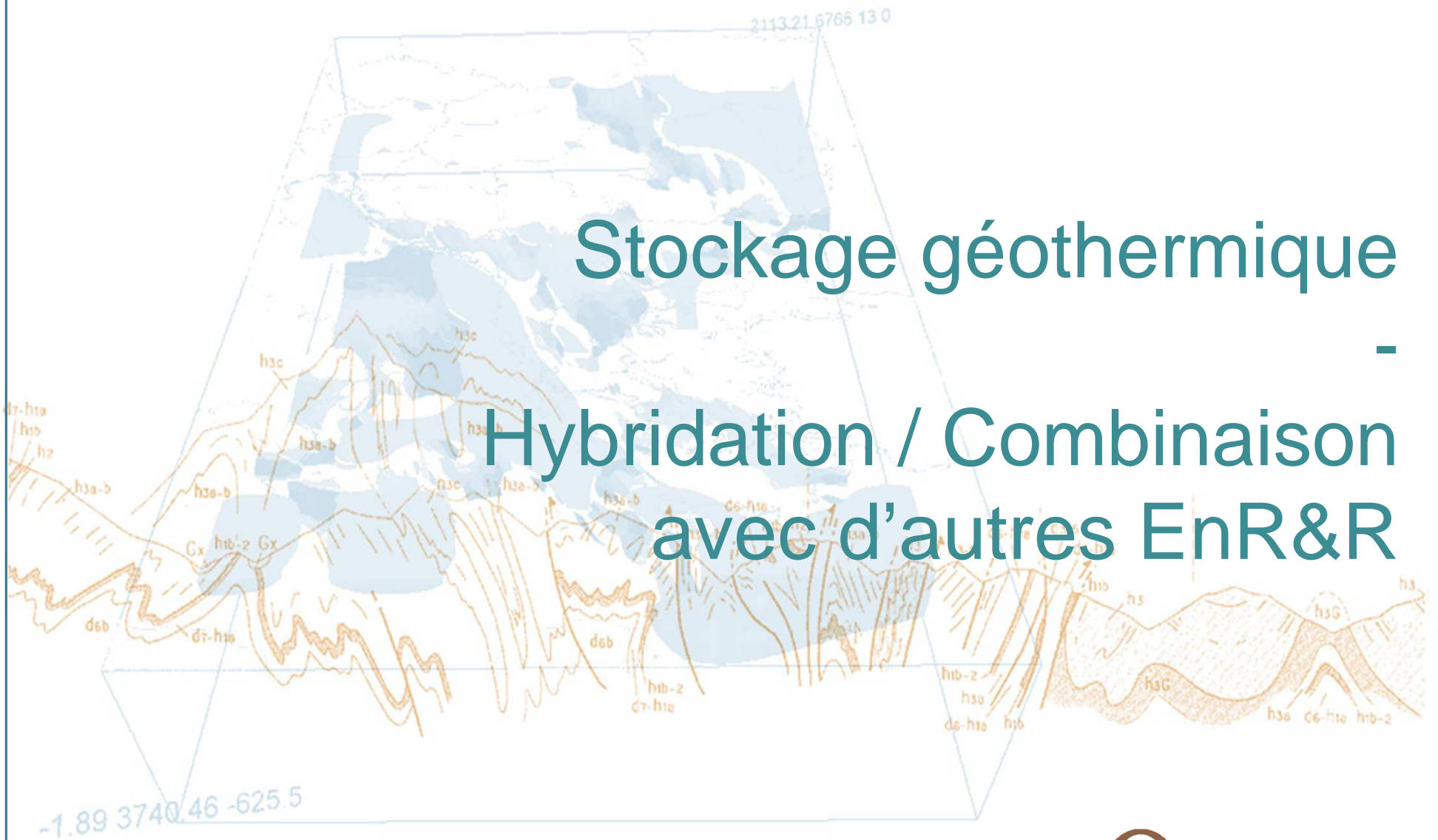
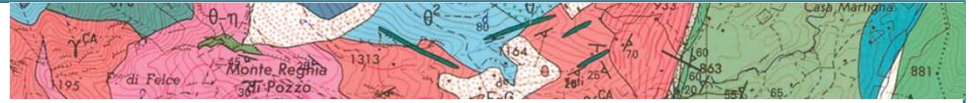


**Technicité
très spécifique**

< 2 000 m

**Technicité
disponible**

**Technicité
du BTP**



Stockage géothermique

-
Hybridation / Combinaison
avec d'autres EnR&R



Stocker pour le chauffage direct

Okotoks (ca): 34 000 m³, 144 sondes à -35m



52 logements
en 4 branches

2 ballons tampons
de 240m³ au total
& appoint thermique



2 293m² de
panneaux solaires
en 4 branches

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

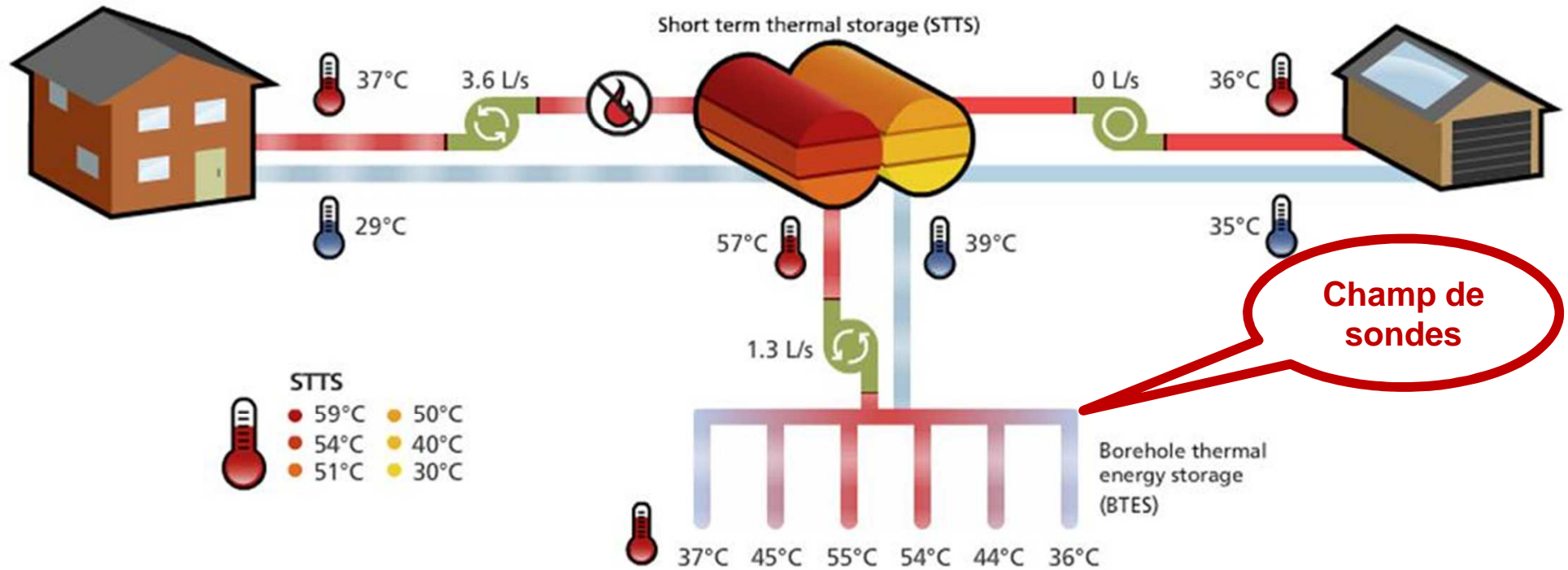
Okotoks (canada)



Current Conditions

April 25, 2013

5:20



Hybridation Solaire / Géothermie (Okotoks, Ca)



Etat en avril 2013

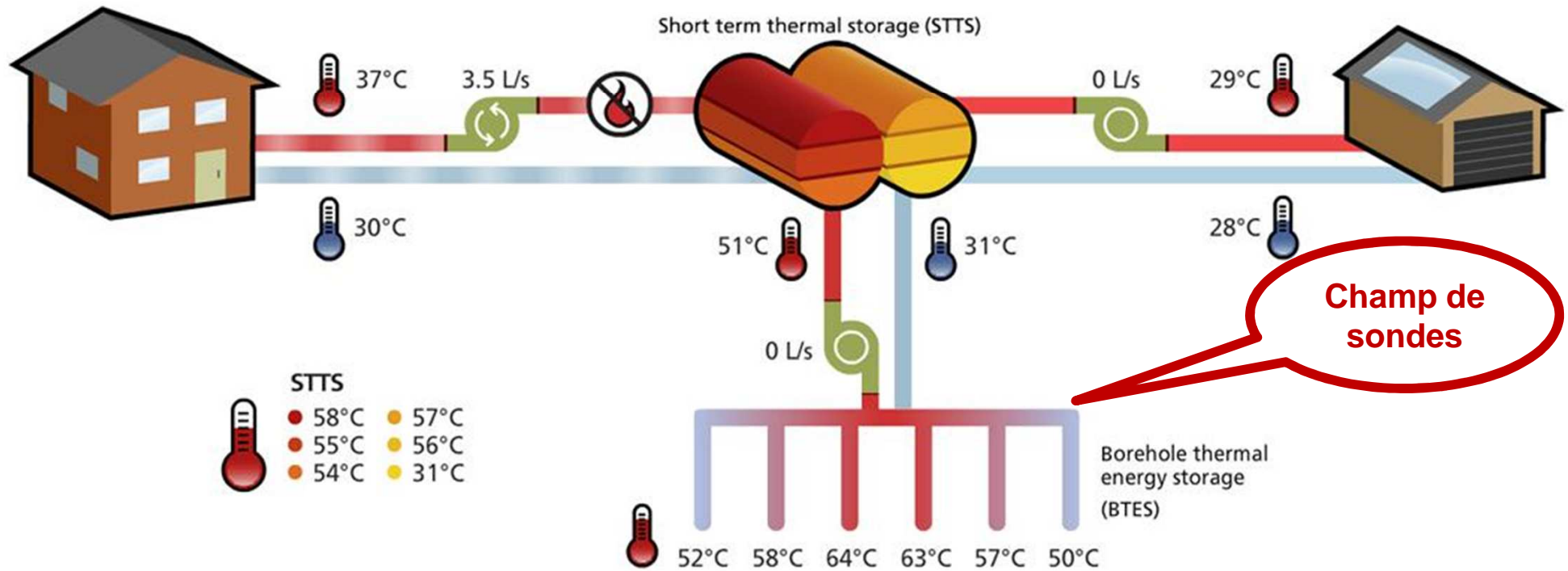
Okotoks (canada)



Current Conditions

October 21, 2013

6:20



Hybridation Solaire / Géothermie (Okotoks, Ca)



Etat en octobre 2013

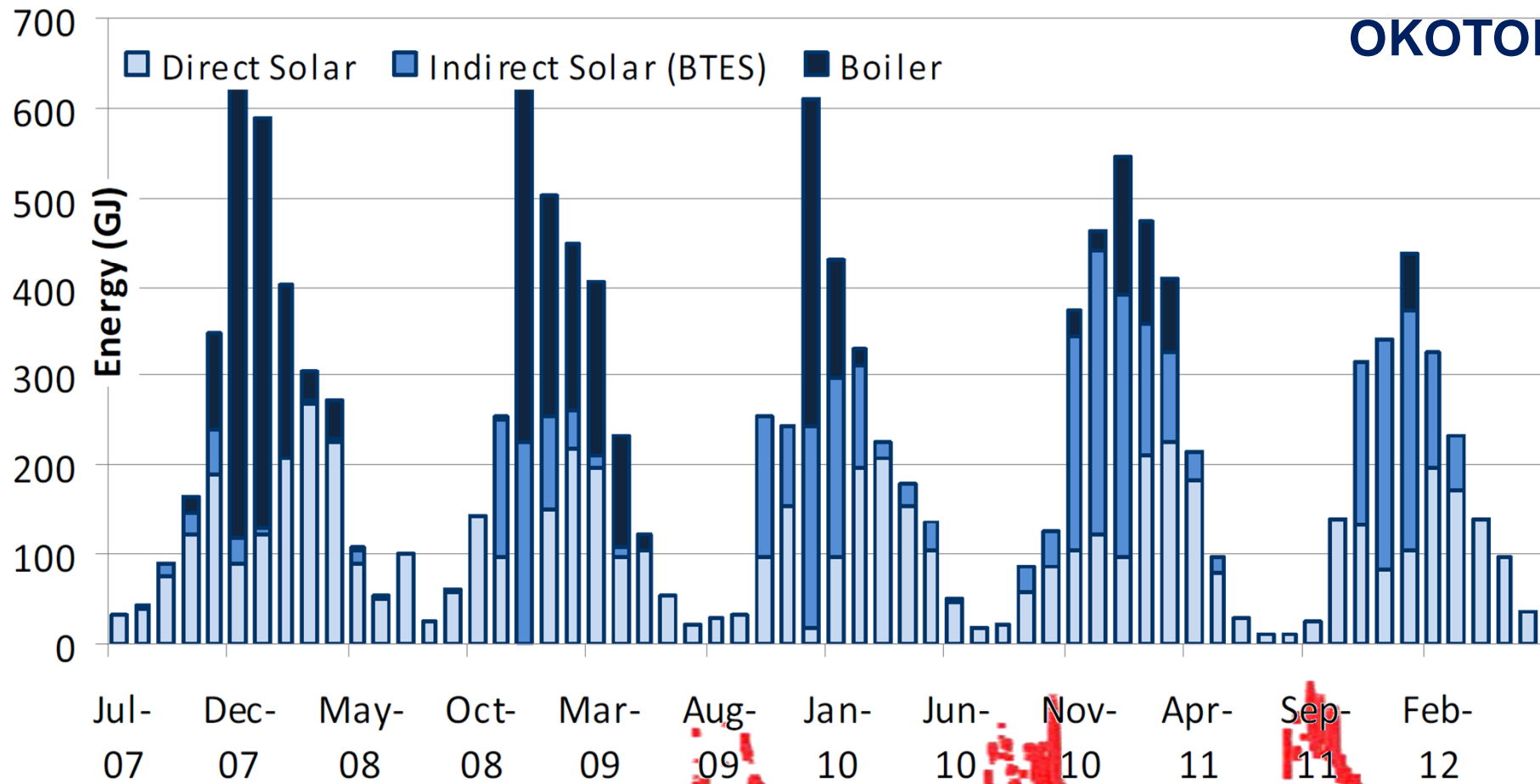
mardi 3 décembre 2013

20

Okotoks (canada)



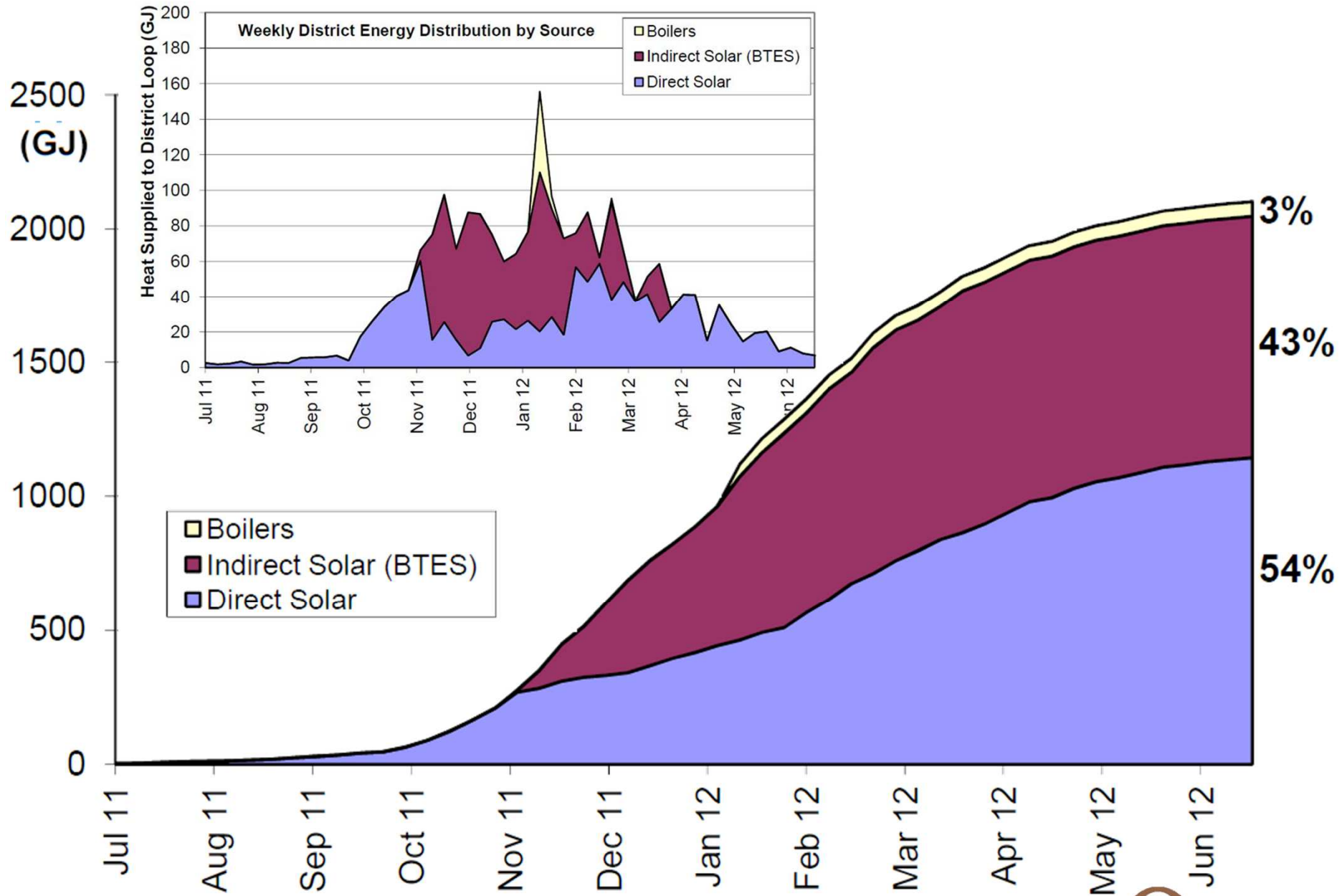
OKOTOKS



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%)



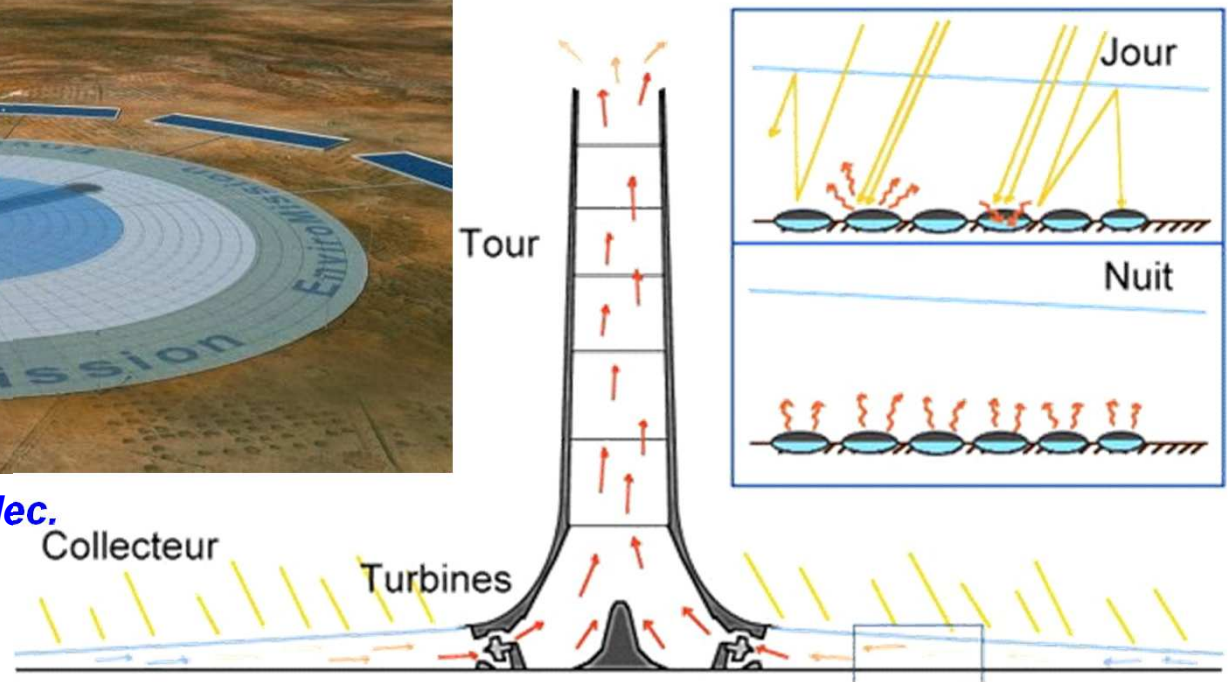
Hybrider pour l'électricité ?



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



*EnviroMission (Arizona) - 750M\$ - 200 MWélec.
800m de haut, 10 km², r 1.8km*



Stockage Géothermique ?

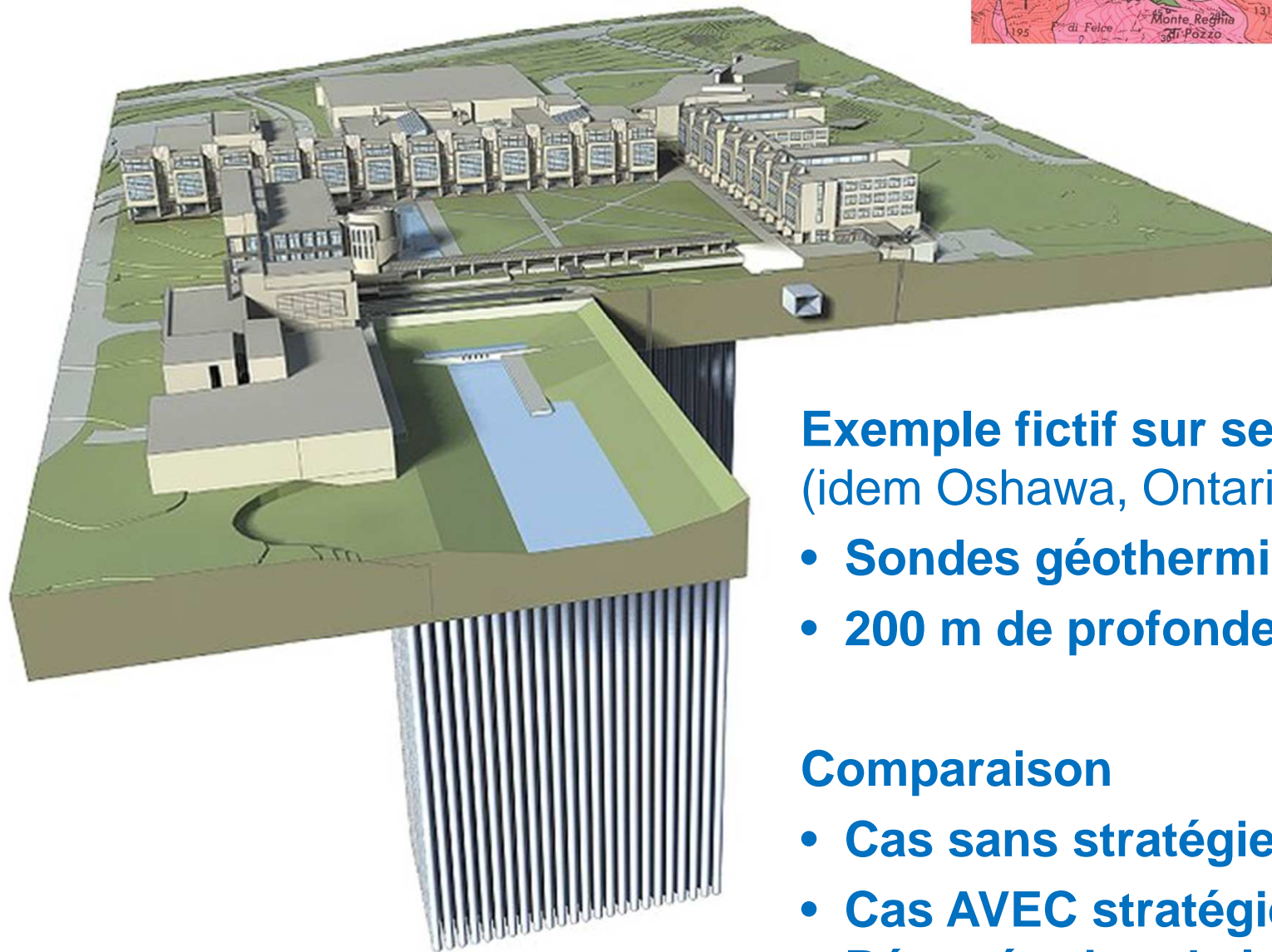
- Puissance incidente : 7.5 GWth
- Energie incidente (8h) : 60 GWh
- Capacité du Sol : 2.3 MJ/m³.K
- $\Delta T 10^{\circ}C \Rightarrow 65 GWh/m$ de profondeur (rayon 1.8 km)



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

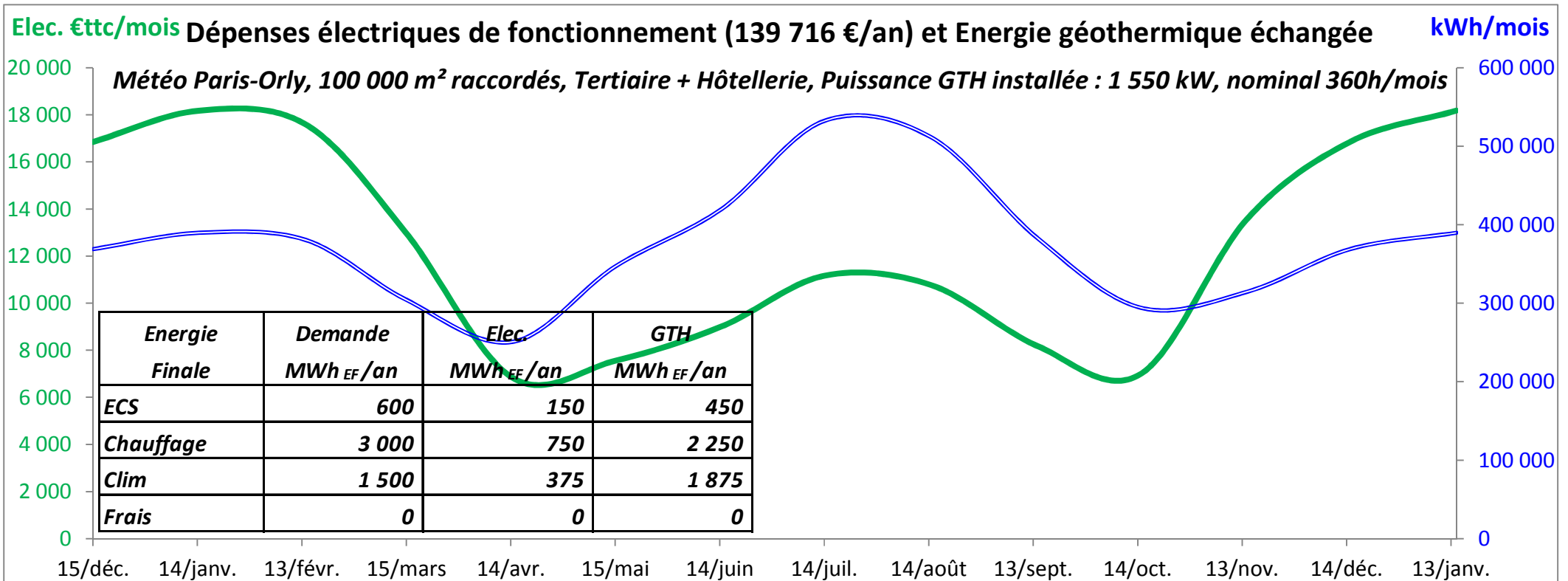
- Cas sans stratégie de stockage
- Cas AVEC stratégie de stockage :
Récupération de la chaleur
de la climatisation estivale

100 000 m² 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/m².an) : ECS 4.5 (6.0), Chauff. 22.5 (30.0), Clim. 18.8 (15.0), Frais 0.0 (0.0)

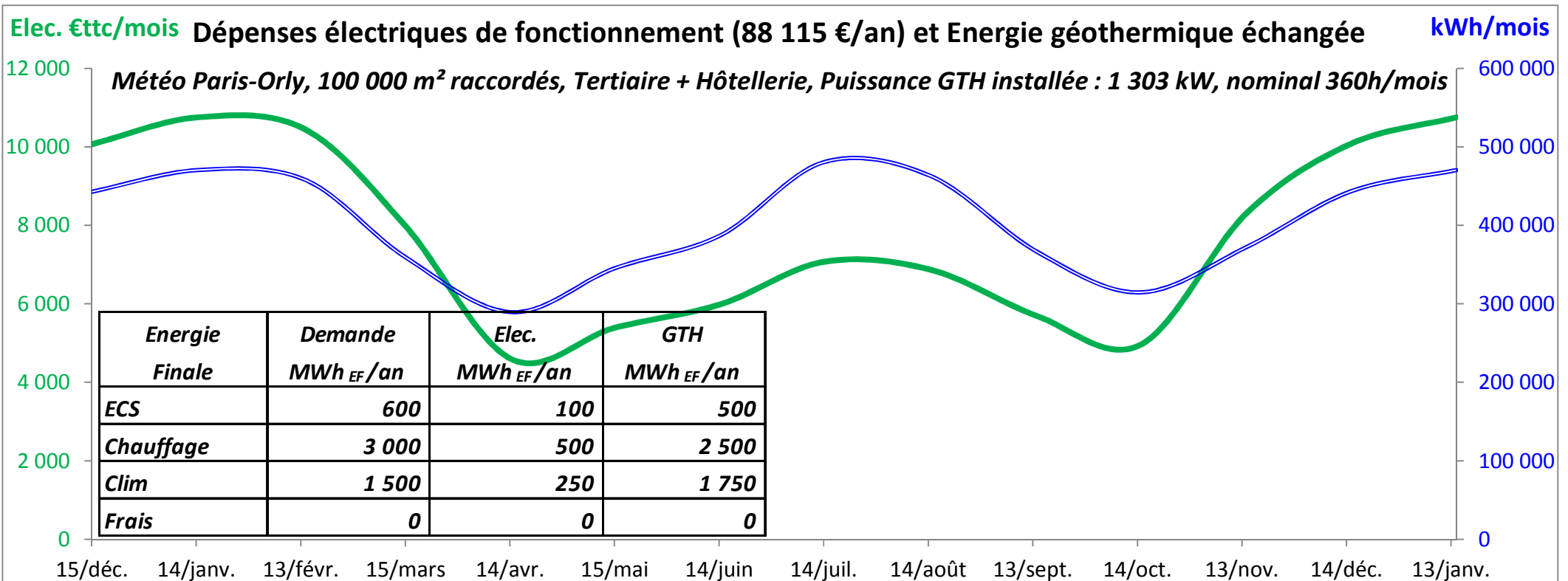
(Energie géothermique échangée (MWh/an) : ECS 450.0, Chauff. 2 250.0, Clim. 1 875.0, Frais 0.0)

100 000 m² 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/m².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

ASPRM

3 décembre 2013

Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr

