



# Les stockages géologiques de l'énergie thermique

-  
Faire simple et durable ?

30 novembre 2016

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





# 1<sup>ère</sup> partie

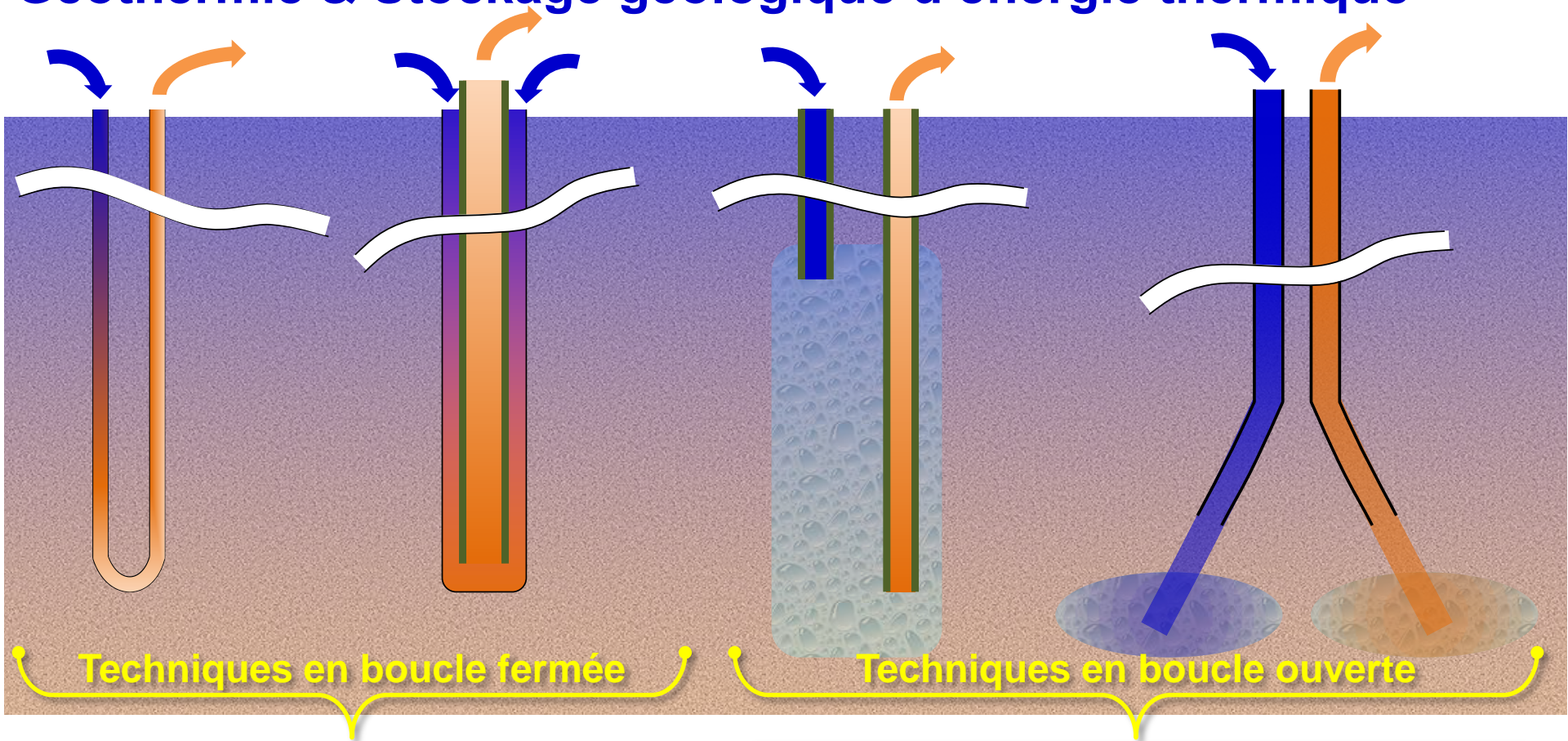
## Usage de la géothermie et du stockage géologique de l'énergie thermique pour le confort thermique des bâtiments



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Essentiellement 2 techniques en Géothermie & Stockage géologique d'énergie thermique



**Sondes géothermiques (U et coaxiales)**  
⇒ **Stockages en champ de sondes**  
(BTES, borehole thermal energy storage)  
⇒ **Stockages dans les fondations**  
(Géostructures énergétiques)

**PACP\* et Doublet géothermique (& variantes)**  
⇒ **Stockages en aquifère**  
(ATES, aquifer thermal energy storage)

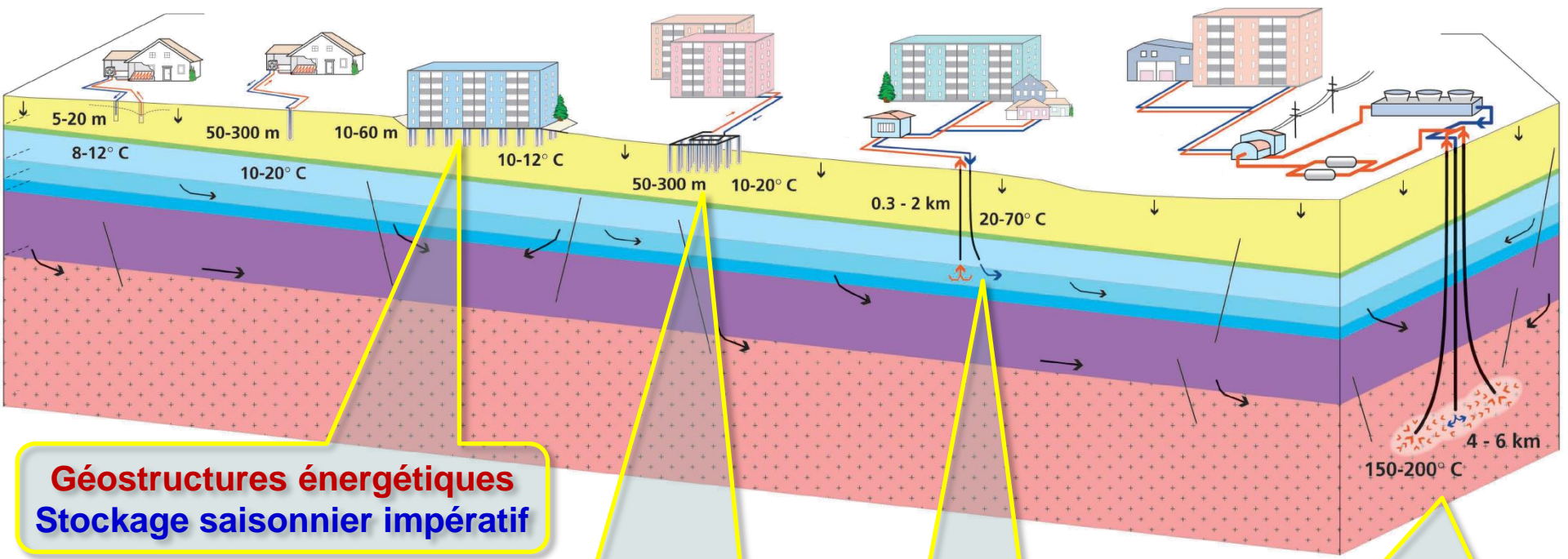
# Les roches du sous-sol ...



# ... une aptitude naturelle au stockage thermique

Déphasage thermique

Stockage thermique en cycle court et/ou en cycle long (saisonnier)



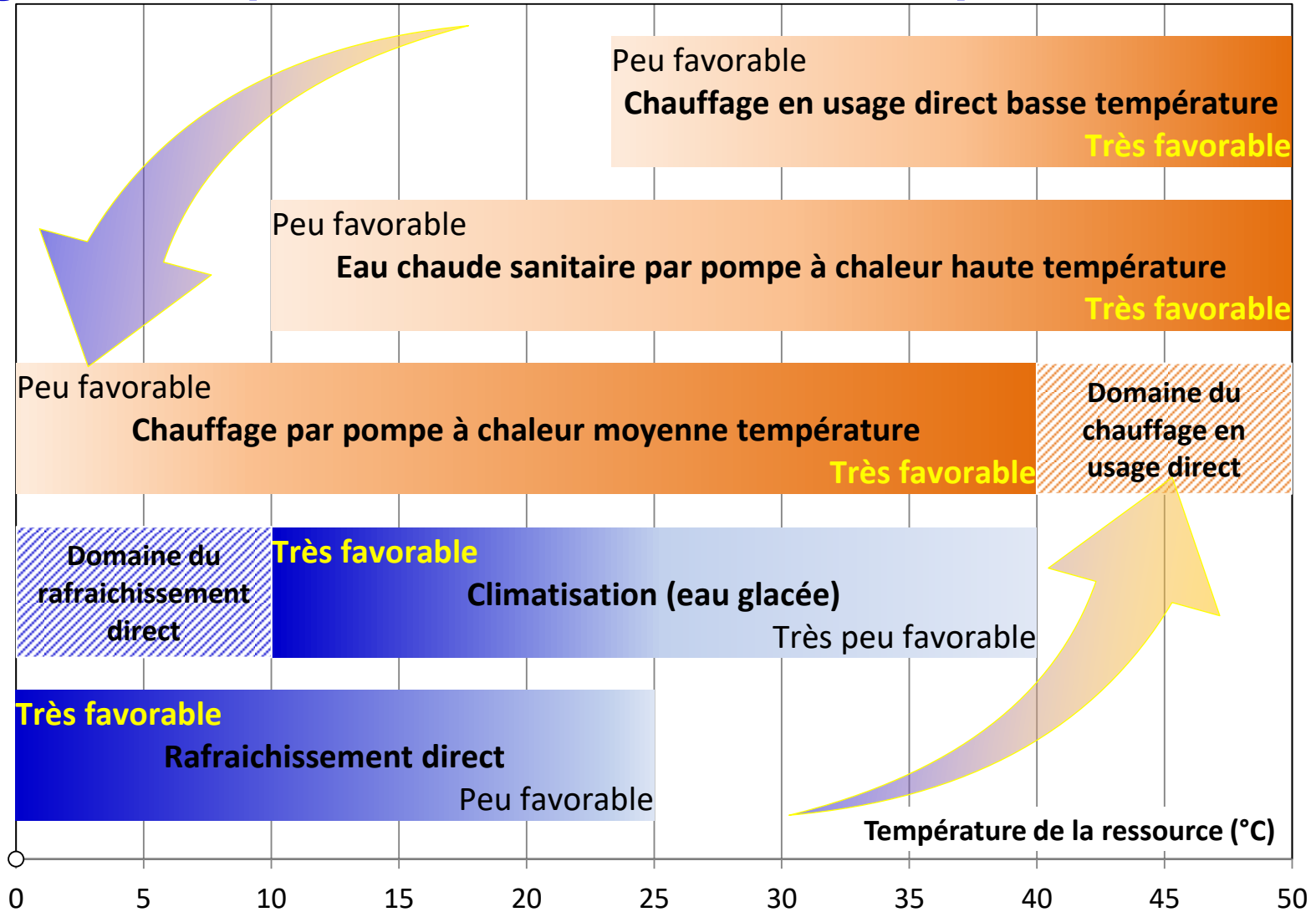
**Géostructures énergétiques**  
Stockage saisonnier impératif

**Champs de sondes géothermiques**  
Stockage saisonnier implicite

**La technique EGS**  
Stockage à envisager!

**Doublet géothermique**  
Stockage peu examiné (en France)

# 1<sup>ère</sup> clef : Favoriser l'usage thermique direct & les COP / EER performants



⇒ 'Adapter' les stocks géothermiques ?

## 2<sup>nd</sup>e clef : 'Adapter'

# les stocks géothermiques pour les pérenniser



## ↳ Energie géothermique ⇔ Pas vraiment renouvelable

↳ En profondeur : 'Stocks' thermiques considérables

Utilisations directe pour le chauffage, voire l'électricité

↳ Proche de la surface : Surtout des échanges avec l'atmosphère

Utilisation directe pour le rafraichissement et le reste avec des PACg

## ↳ Sans assistance à la 'régénération' thermique, les stocks accessibles restent modestes ou s'épuisent assez vite

↳ Flux géothermique  $\approx 60 \text{ mW/m}^2$  (0.53 kWh/an) = très faible

↳ GTH superficielle  $\approx$  puisage typique de 40 à 50 kWh/an.m<sup>2</sup> de sol

## ↳ Mais comment utiliser simplement le sous-sol ?



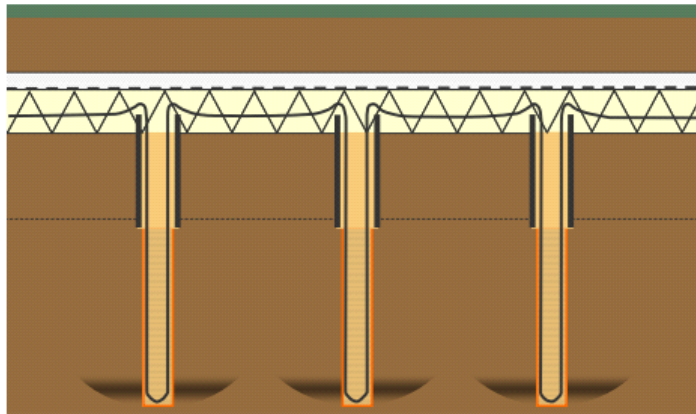
Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

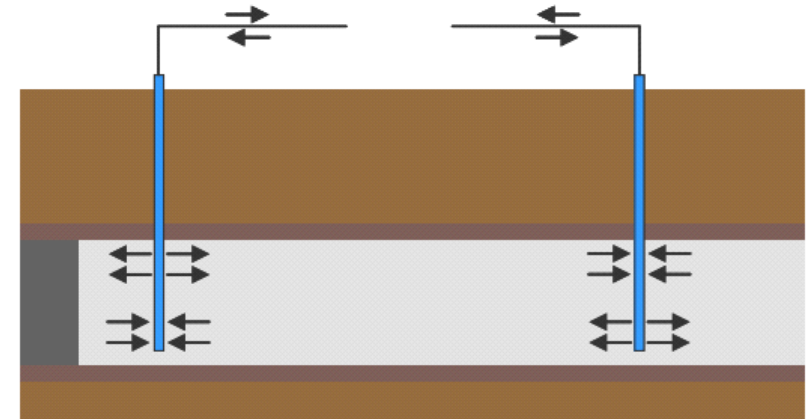
\*PACP : Puits A Colonne Permanente

# 3<sup>ème</sup> clef : Accessibilité

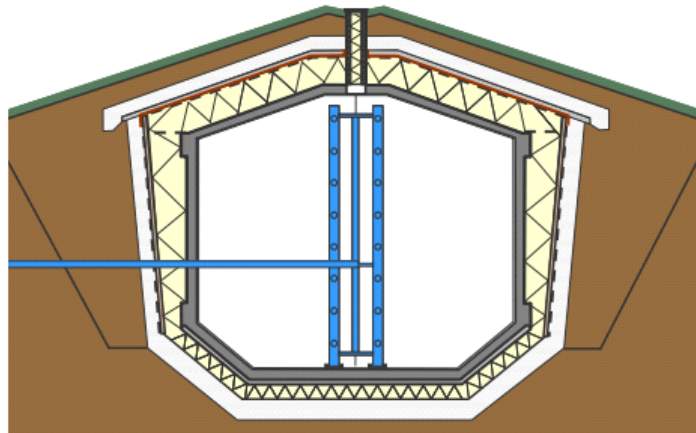
Borehole thermal energy storage (BTES)  
(15 to 30 kWh/m<sup>3</sup>)



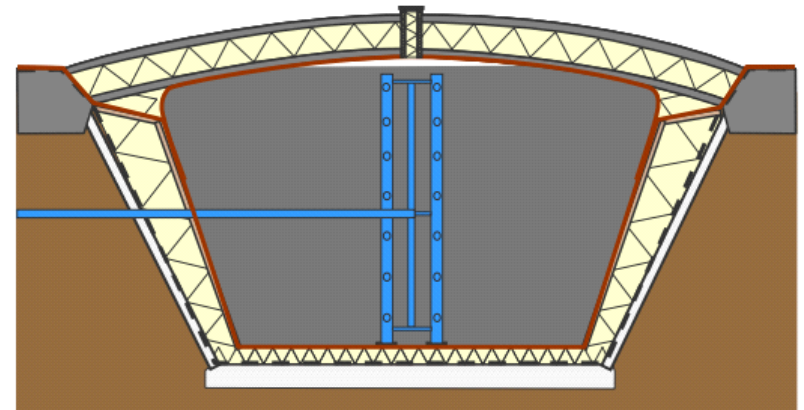
Aquifer thermal energy storage (ATES)  
(30 to 40 kWh/m<sup>3</sup>)



Tank thermal energy storage (TTES)  
(60 to 80 kWh/m<sup>3</sup>)



Pit thermal energy storage (PTES)  
(60 to 80 kWh/m<sup>3</sup>)



(STES : Seasonal Thermal Energy Storage)

# 4<sup>ème</sup> clef : Revaloriser localement les excédents thermiques (& Valoriser les autres ENR&R)



## ↳ En Hiver, les excédents sont froids

- ↳ En usage direct, l'énergie prélevée correspond à l'énergie livrée
- ↳ Avec des pompes à chaleur, l'énergie prélevée représente 60% à 75% de l'énergie livrée ; le reste provenant du réseau électrique

## ↳ En été, les excédents sont chauds

- ↳ En usage direct, l'énergie injectée correspond à l'énergie prélevée dans le bâtiment pour assurer son rafraichissement
- ↳ Avec des pompes à chaleur, l'énergie réinjectée représente 125% à 140% du froid livré ; l'énergie électrique des groupes étant rejetée

## ↳ Mais avant de stocker dans le sous-sol, d'abord envisager de revaloriser de suite

⇒ Dans tous les cas, il faut un réseau





## - Conclusion partielle -

Dans le sous sol, des solutions techniques locales peuvent être partout mises en œuvre

La géothermie est déjà opérationnelle en France à l'échelle du bâtiment et des grands réseaux de chaleur.



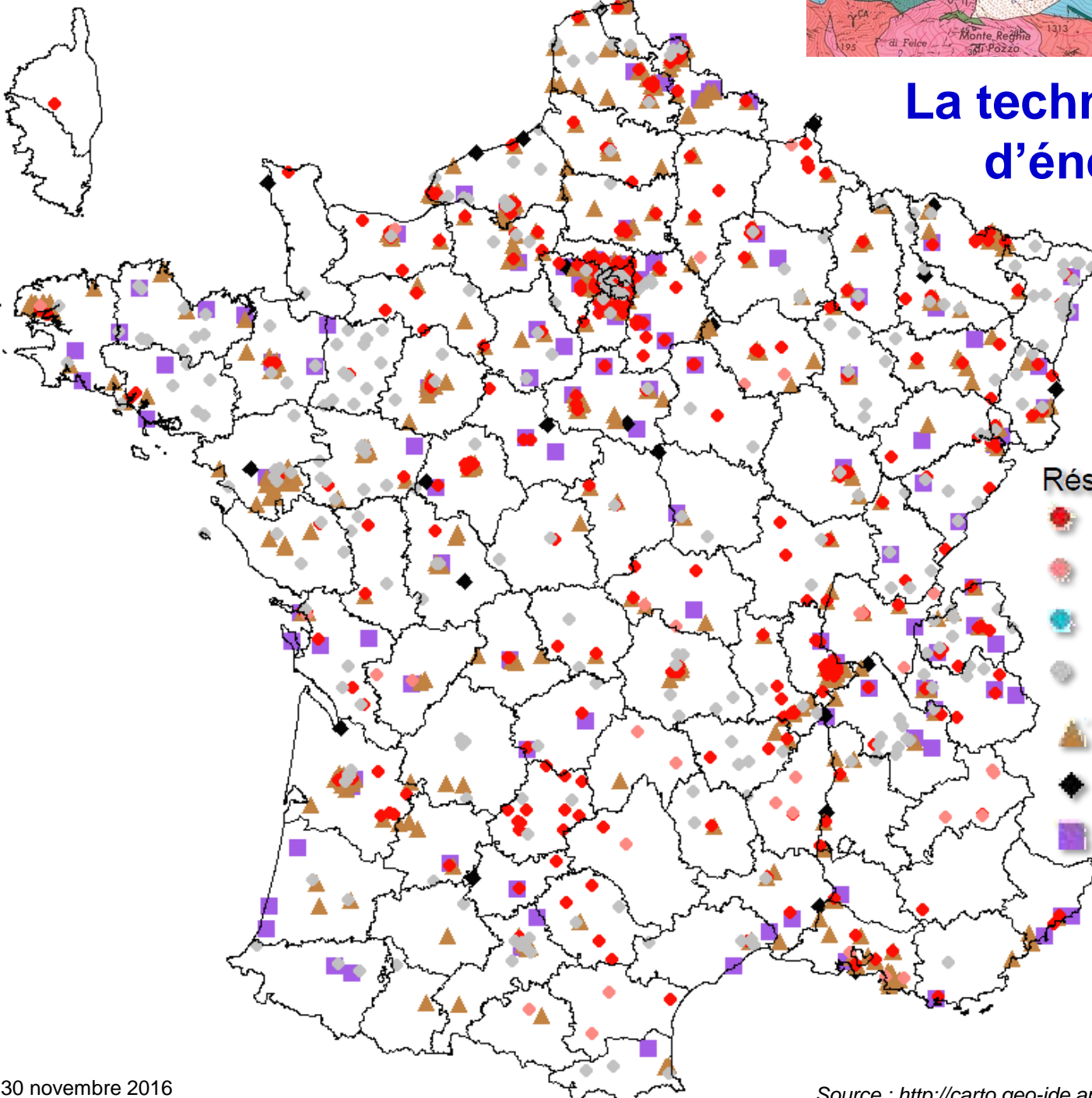
## 2<sup>nd</sup>e partie

Vers des réseaux en boucle tempérée  
multi-énergies et multipoints ...

... incluant du stockage géologique  
d'énergie(s) thermique(s)



# La technique du réseau d'énergie thermique est appliquée partout en France, mais modestement



- Réseaux de chaleur et de froid
- Réseau de chaleur
  - Réseau de chaleur (projet)
  - Réseau de froid
  - Projets
  - ▲ Unités de cogénération
  - ◆ Centrales électriques
  - Usines d'Incinération



↪ **Les réseaux d'énergie thermique restent peu développés**

⇒ **Environ 600 en France** (Source SNCU/Viaséva)

↪ **2.2 millions de foyer, 500 villes, 6% du chauffage** (<3 500 km)

↪ **Une vingtaine de réseaux de froid** (<200 km)

↪ **Ces réseaux restent majoritairement 'mono-service'**

↪ **Le 'chaud' pour le chauffage et l'ECS**

La priorité reste à une température de départ réseau typiquement  $>70^{\circ}\text{C}$

*Les boucles primaires relayées par des PAC ou Thermo-Frigo-Pompes distribuées dans les boucles secondaires restent peu répandues, tout comme les réseaux dédiés à des émetteurs à basse à basse température.*

↪ **Le 'froid' pour la climatisation**

La priorité reste à une température de départ réseau typiquement  $<7^{\circ}\text{C}$

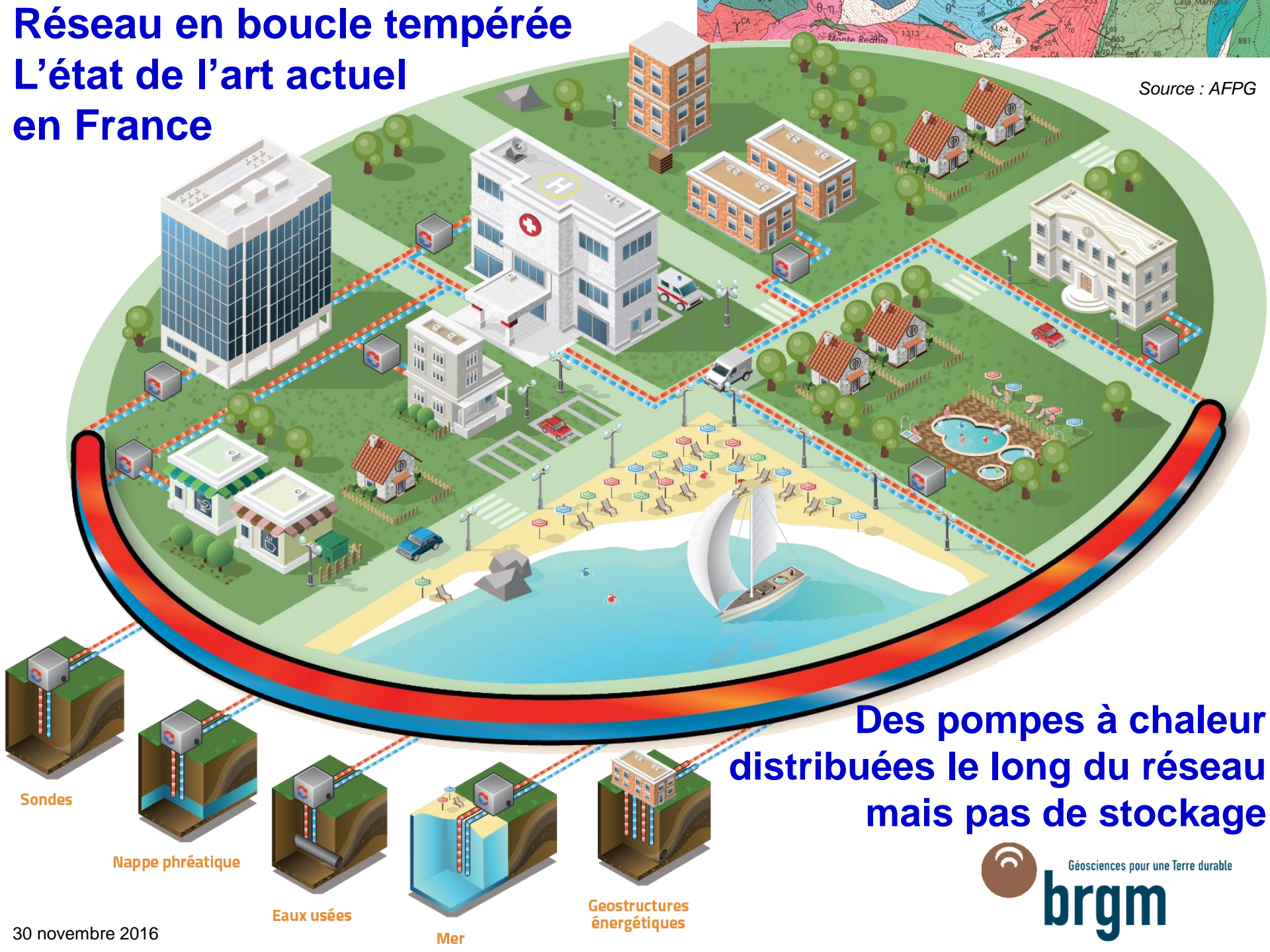
*La notion de rafraîchissement reste peu prise en considération, c'est-à-dire avec une température de départ réseau typiquement de  $10^{\circ}\text{C}$  à  $15^{\circ}\text{C}$ , voire  $20^{\circ}\text{C}$ .*

**Les grands réseaux existants  
restent peu adaptés à la  
revalorisation et au stockage**

# Réseau en boucle tempérée

## L'état de l'art actuel en France

Source : AFGP



Des pompes à chaleur distribuées le long du réseau mais pas de stockage

Sondes

Nappe phréatique

Eaux usées

Mer

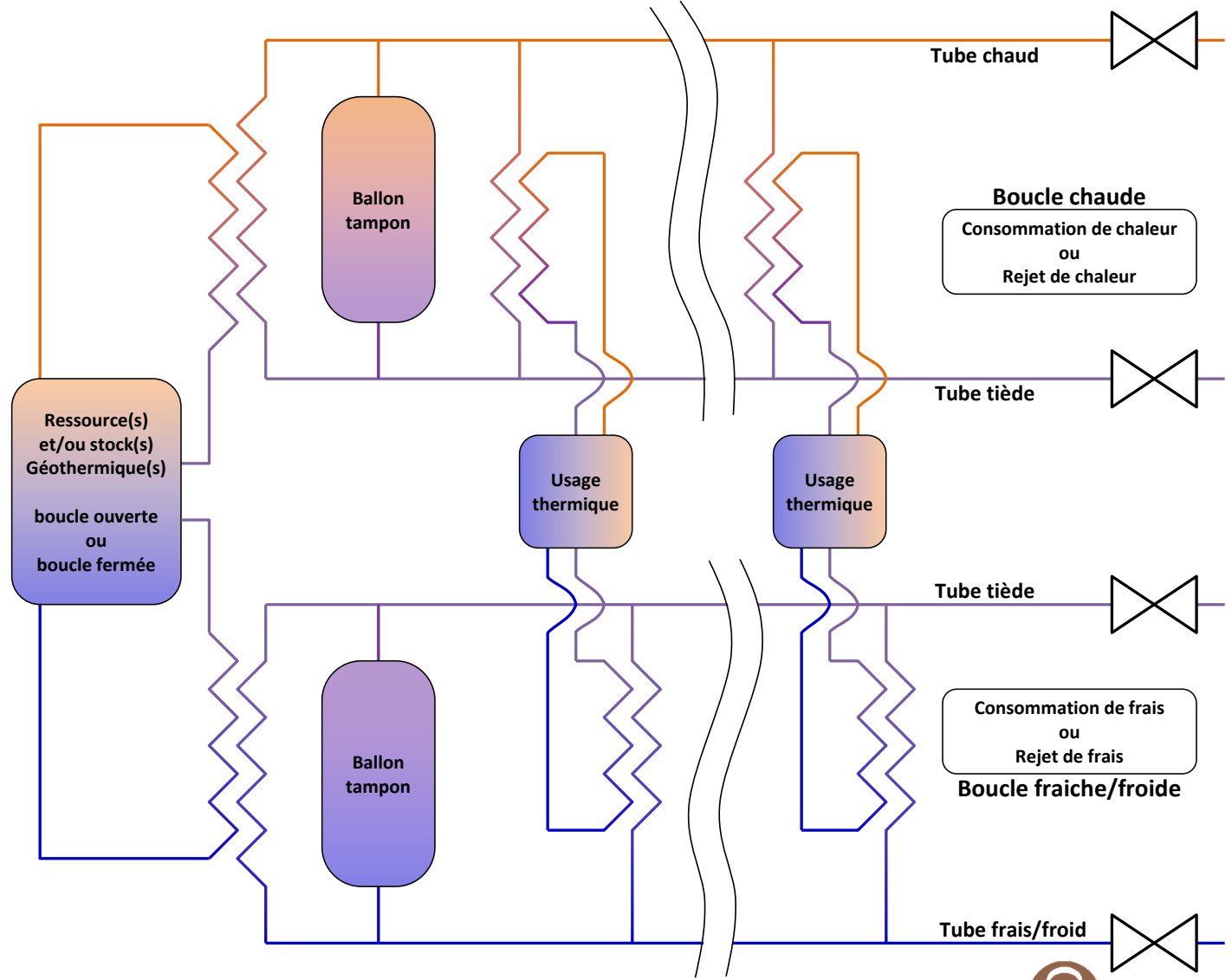
Geostructures énergétiques



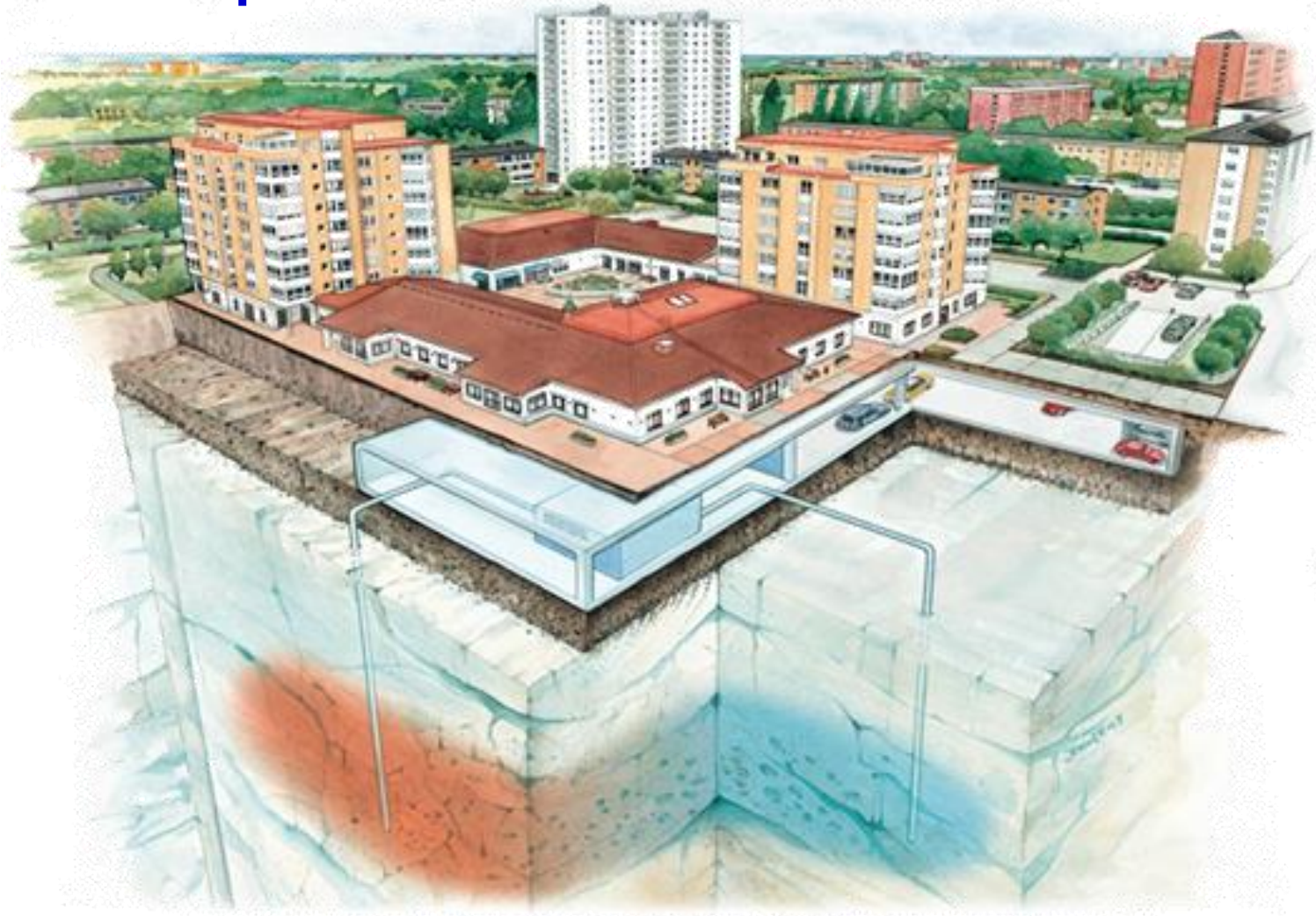
Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Réseau en boucle tempérée : Une présentation plus générale adaptée à la revalorisation



# Réseau et ATES : Aquifer Thermal Energy Storage (pas encore en France) Doublet sur aquifère



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Stockage en aquifère superficiel

=> Au moins 2 stocks à gérer : **Stock chaud & Stock froid**

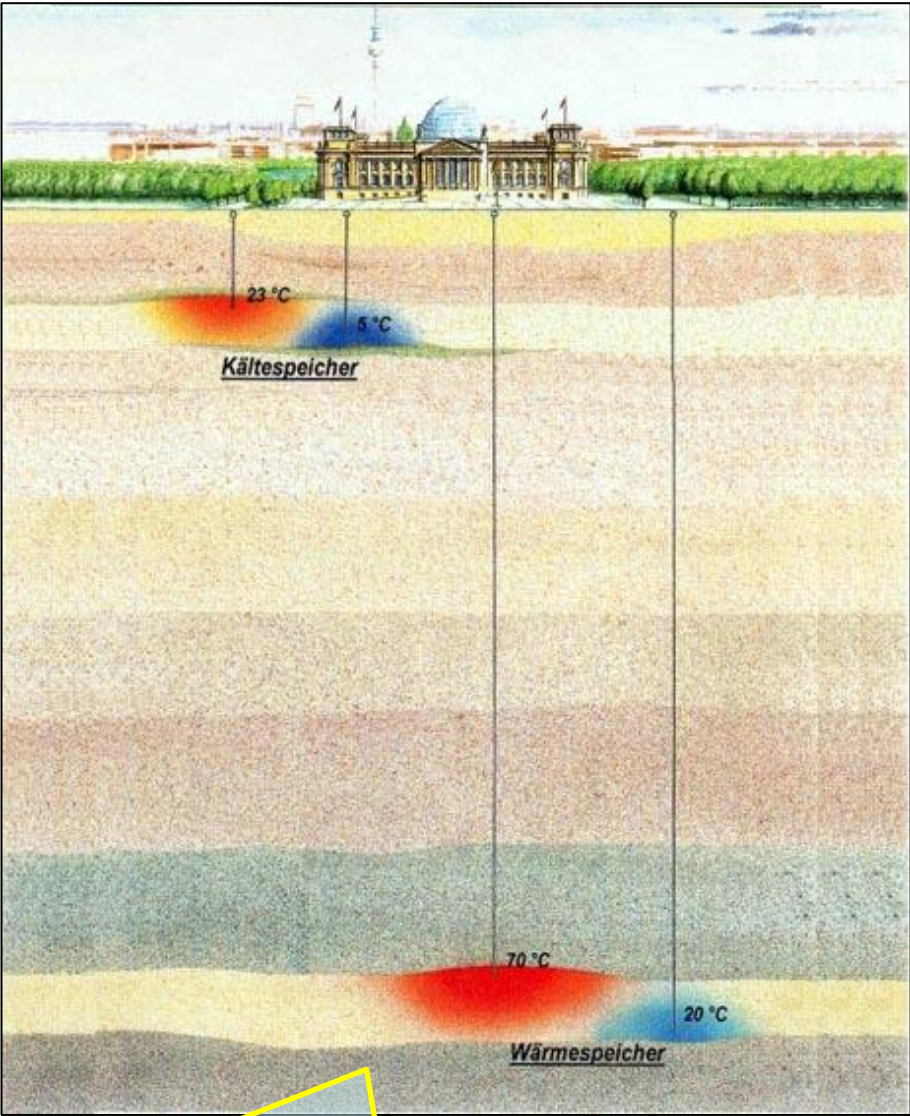


## Epruvé mais pas en France

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



# 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

## Exemple : Gardermoen airport, Oslo, Norvège, 1998



**Raccordés : 150 000 m<sup>2</sup>**  
– 9 doublets sur aquifère  
– 45 m de profondeur

**Puissances installées**  
– 3 MW en geocooling  
– 6 MW en climatisation  
– 7.5 MW en chauffage (40%)

**Températures des stocks**  
– Production froid 4.5 °C  
– Production chaud 20/30°C

**Production d'énergie**  
– Chaud : 11 GWh  
– Frais & Clim : 11GWh

# Stockage en aquifère superficiel

## Exemple : Stockholm-Arlanda (2009)

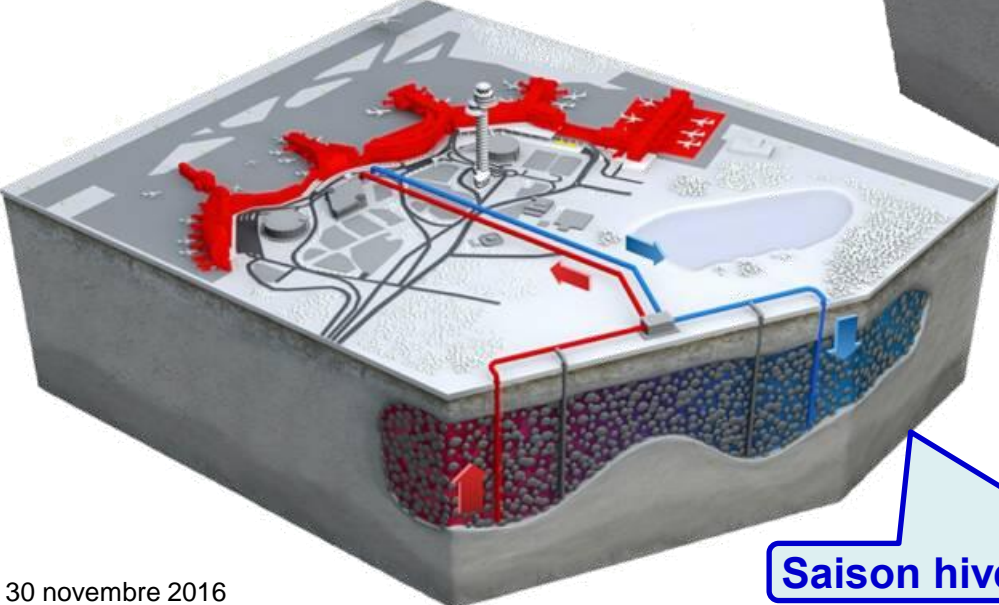
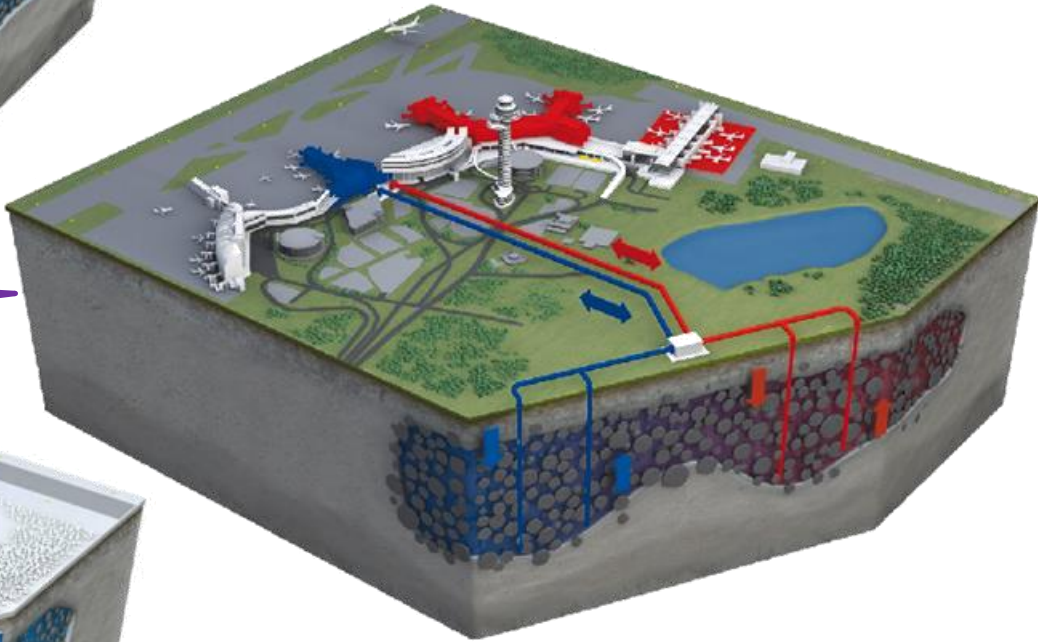
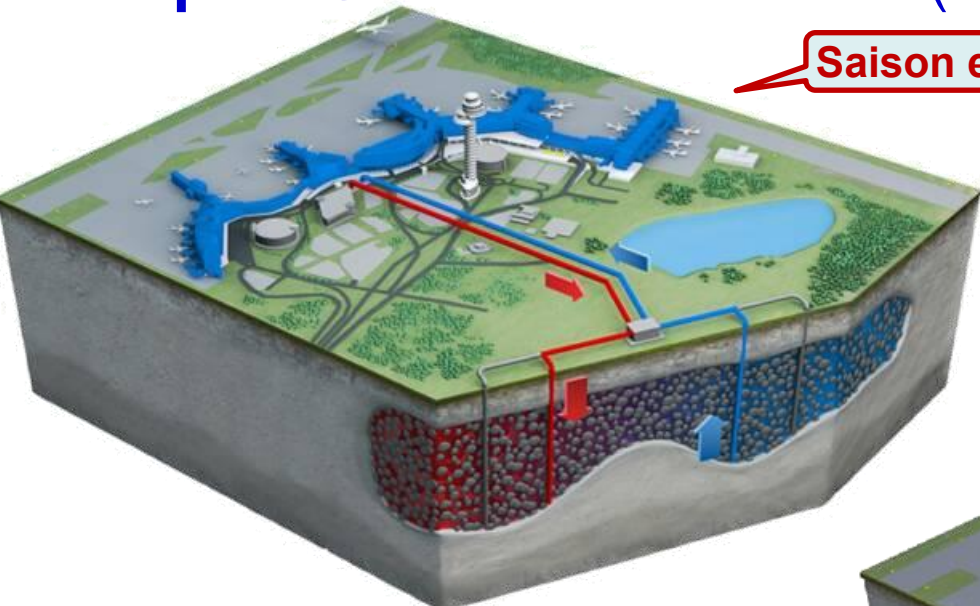


Saison estivale : Stockage de 'chaud'

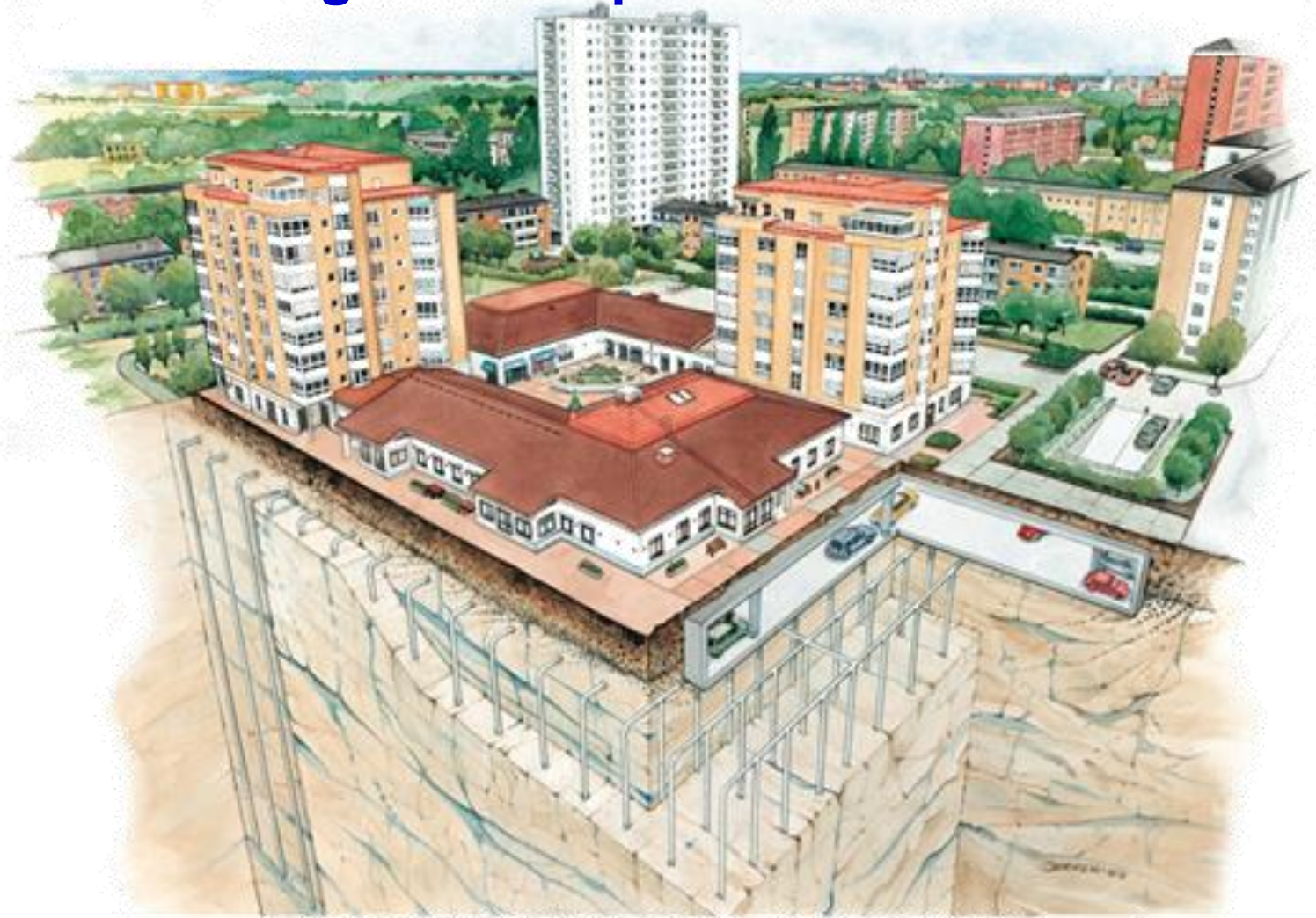
Le problème : Trouver des aquifères exploitables

Mi-saison : Alternance 'chaud' / 'frais'

Saison hivernale : Stockage de 'frais'



# Réseau et BTES : Borehole Thermal Energy Storage (déjà en France) Champ de sondes géothermiques

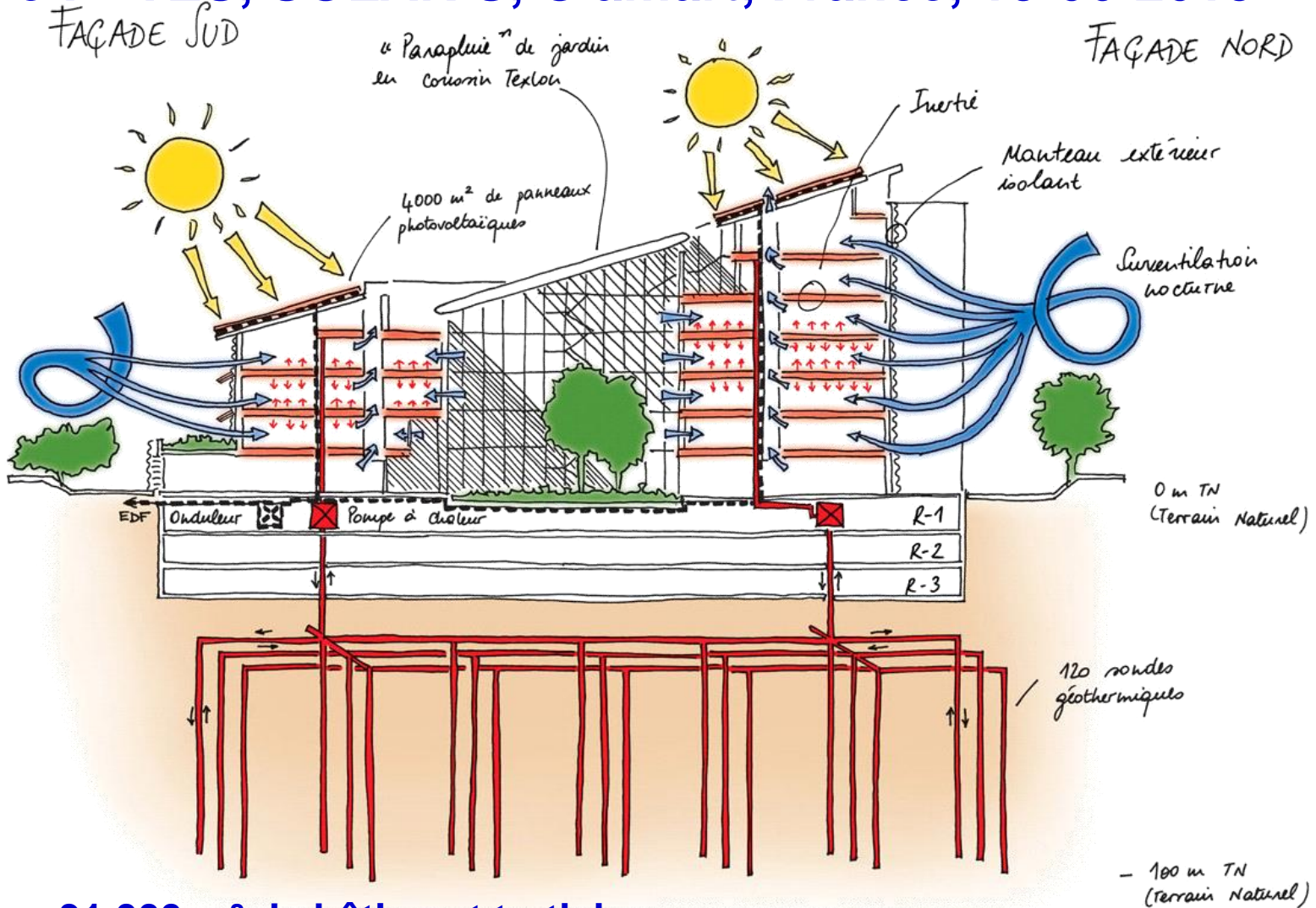


Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# Stockage en champ de sondes

## Exemple : BTES, SOLARIS, Clamart, France, 18-06-2015



- 31 000 m<sup>2</sup> de bâtiment tertiaire
- 4 000 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïque
- 116 sondes géothermiques à 100 m de profondeur
- Excédents des PACg stockés dans le champ de sondes

# BTES – Solaris à Clamart



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

30 novembre 2016

# BTES - Solaris à Clamart



# BTES - Solaris à Clamart



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

30 novembre 2016



# Stockage en champ de sondes

## Exemple : Micro-réseau du Campus Airbus Group à Blagnac



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

25

30 novembre 2016

# BTES – Micro-réseau à Blagnac

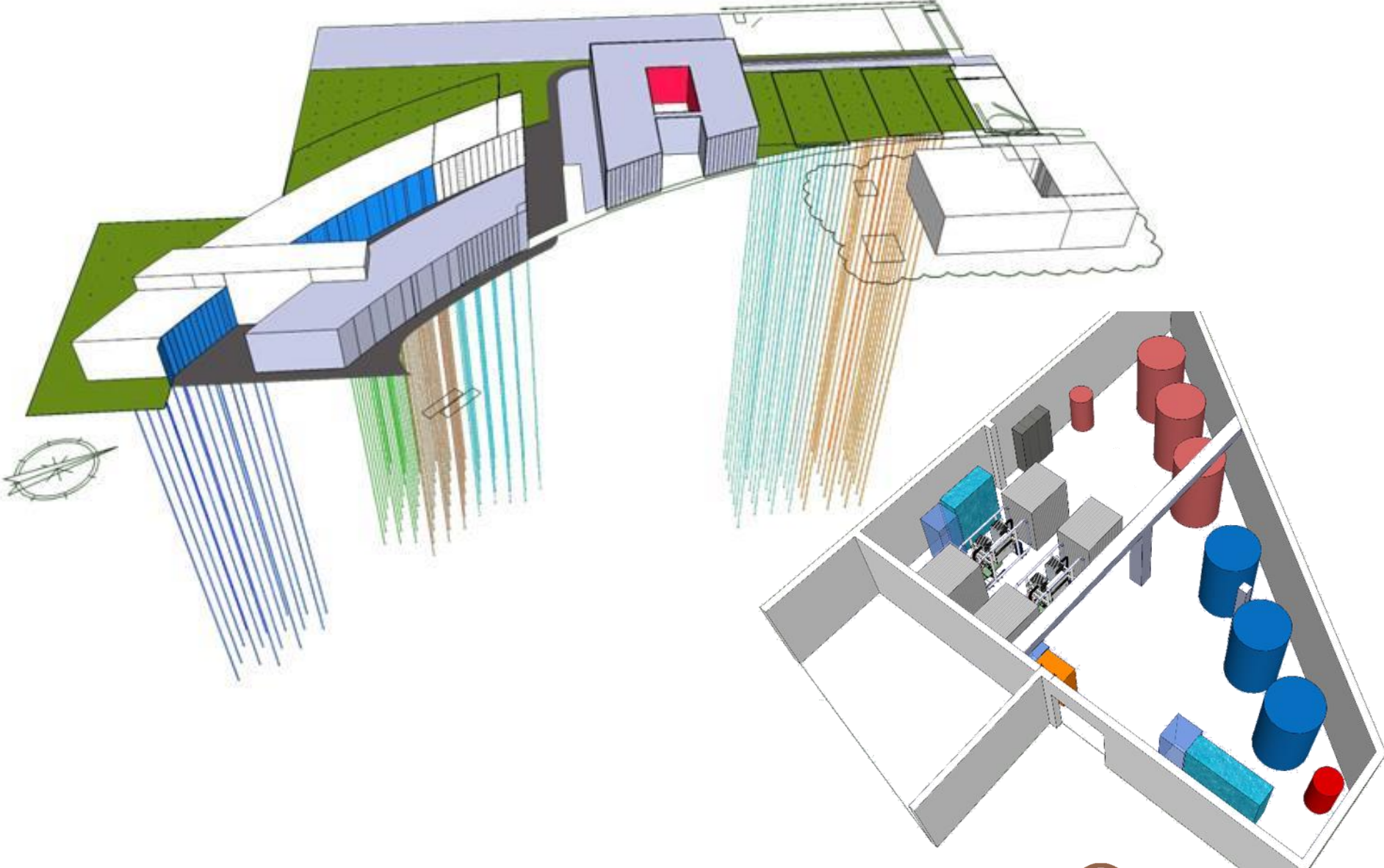
(source ADEME)



<b>Nombre SGV</b>	<b>140</b>
<b>Profondeur SGV</b> (diamètre 152 mm)	<b>205 m</b> (hors des argiles localisées à -260 m)
<b>Espacement SGV</b>	<b>8 m</b> (puissance spécifique : 40 W/m de profondeur)
<b>Coûts SGV</b> (raccordées)	<b>2 439 k€</b>
<b>PAC géothermiques + Tampons</b>	<b>700 k€</b>
<b>Groupe Froid</b> (appoints pour 10%)	<b>340 k€</b>
<b>Boucle d'eau</b>	<b>528 k€</b>
<b>Ingénierie</b>	<b>310 k€</b>
<b>Puissance thermique (mode chaud)</b>	<b>1 973 kW</b> (= 1845 chauffage + 128 ECS) <i>[1 144 MWh/an (100%) + 137 MWh/an (50%)]</i>
<b>Puissance froid (tout cumulé)</b>	<b>1 078 kW</b> <i>[1 071 MWh/an (90% GTH)]</i>
<b>Raccordé</b>	<b>32 000 m<sup>2</sup></b>



# BTES - Micro-réseau à Blagnac



# Géostructures Énergétiques

(source Projet ANR-Gecko)

Châteauroux, 37 pieux, gymnase



Gonesse, 2013, 63 pieux à 12 mètres



**Généralement  
à l'échelle du bâtiment ...**

Collège de Achères (78), 2014, 84 pieux à 15 mètres



# Géostructures Énergétiques

(fondations géothermiques)



... mais des bâtiments  
déjà au cœur des quartiers  
(Neuilly, 300m<sup>2</sup> sur 560 m<sup>2</sup>, 2010)



Géosciences pour une Terre durable

Source : INDIGO (ex. Vinci-Park), Neuilly

**brgm**

# Fondations géothermiques

Zurich, Dock Midfield, 300 pieux sur 440 à 30m de profondeur



2 GWh/an en chauffage, 1.2 GWh/an en frais/froid



# Les géostructures énergétiques ... ... le premier maillon de l'optimisation thermique de demain ?



- ✓ Un seul stock par champ
- ✓ Stockage inter-saisonnier obligatoire
- ✓ Accumulation de chaud en été
- ✓ Accumulation de froid en hiver



## - Conclusion partielle -

Les techniques géothermiques intègrent de plus en plus le stockage thermique, notamment dans les milieux urbanisés

d'abord à l'échelle du bâtiment mais aussi à l'échelle des (micro)réseaux.

-1.89 3740.46 -625.5





## 3<sup>ème</sup> partie

L'intégration des  
stockages géothermiques  
dans les systèmes énergétiques ...

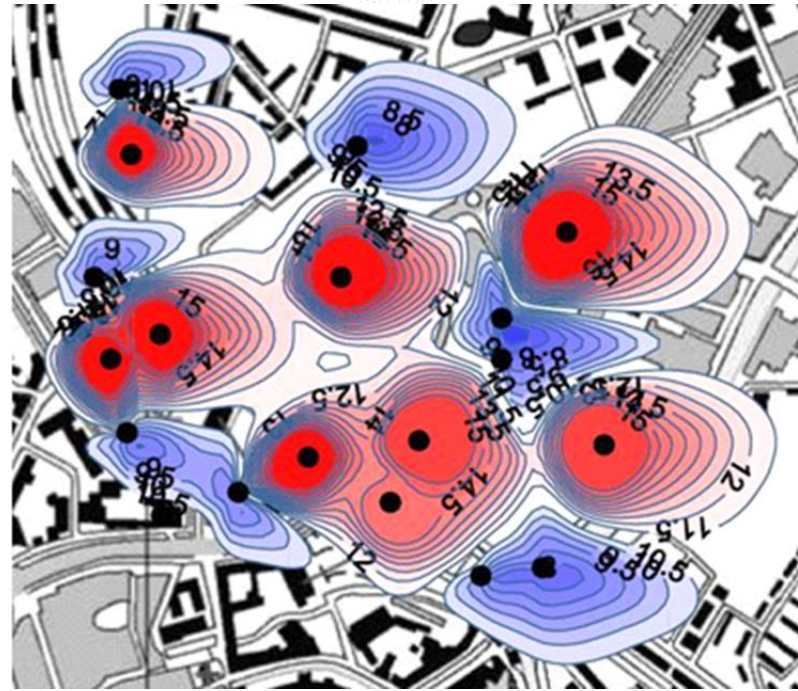
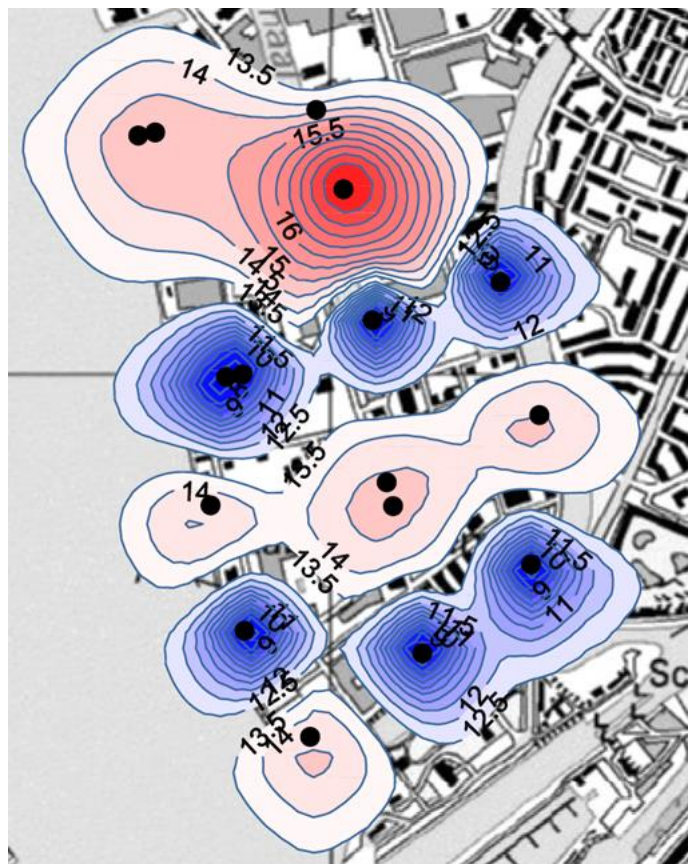
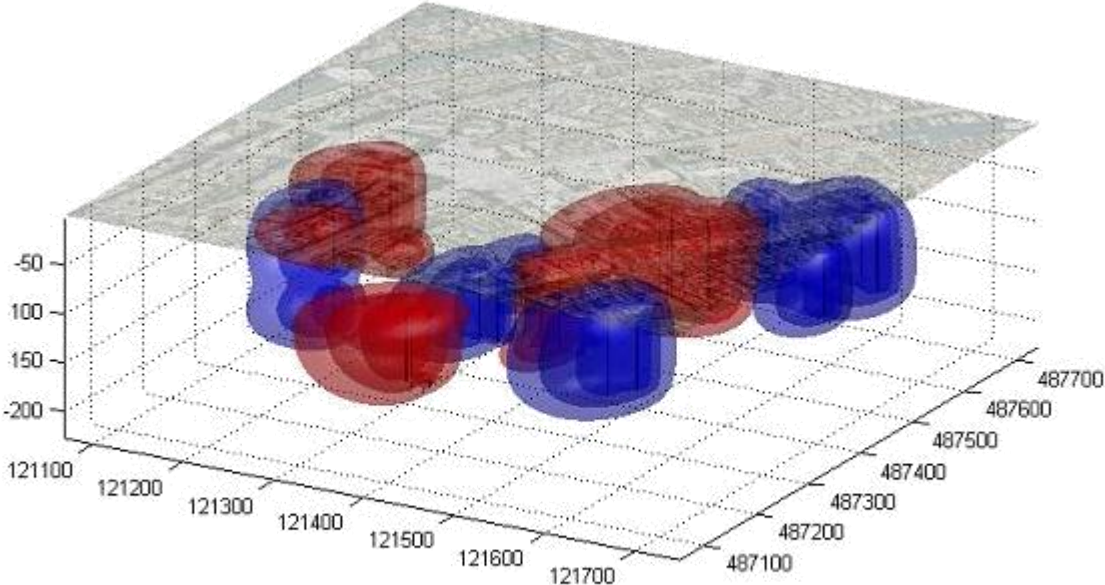
... peut-elle favoriser durablement  
une moindre dépendance énergétique  
et la maîtrise des dépenses ?

-1.89 3740.46 -625.5

# Mais si chacun veut son stockage ?

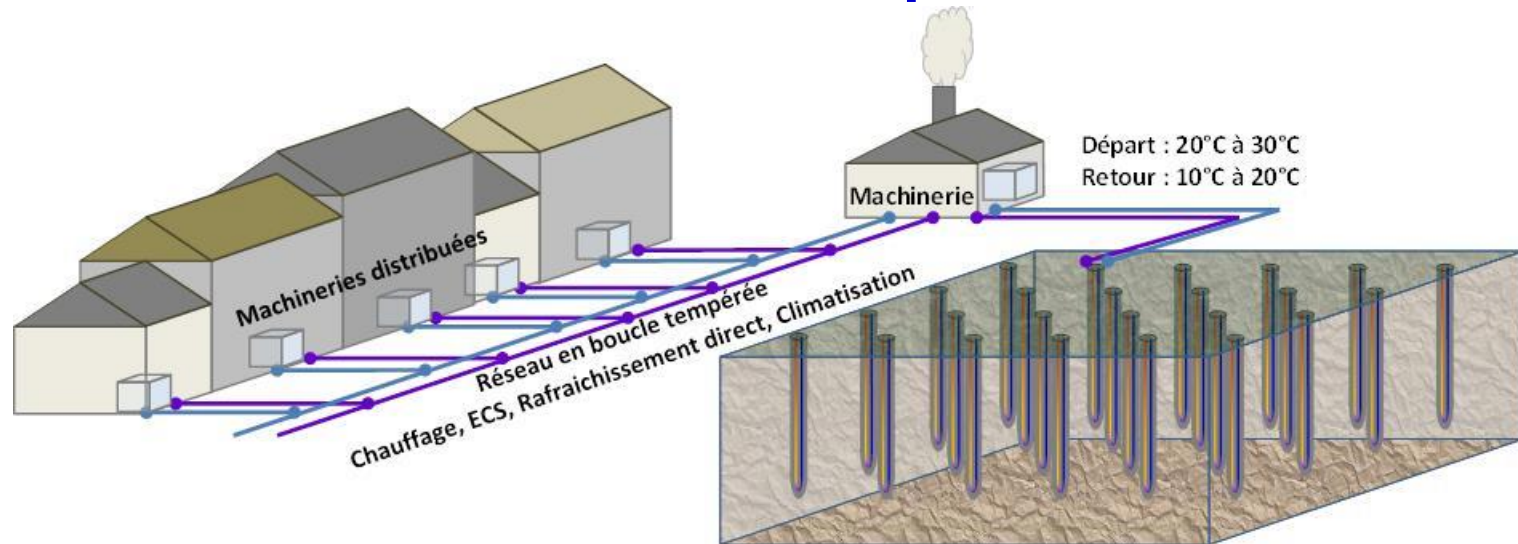


# En milieu urbain, l'enjeu peut devenir très 'concurrentiel' ...

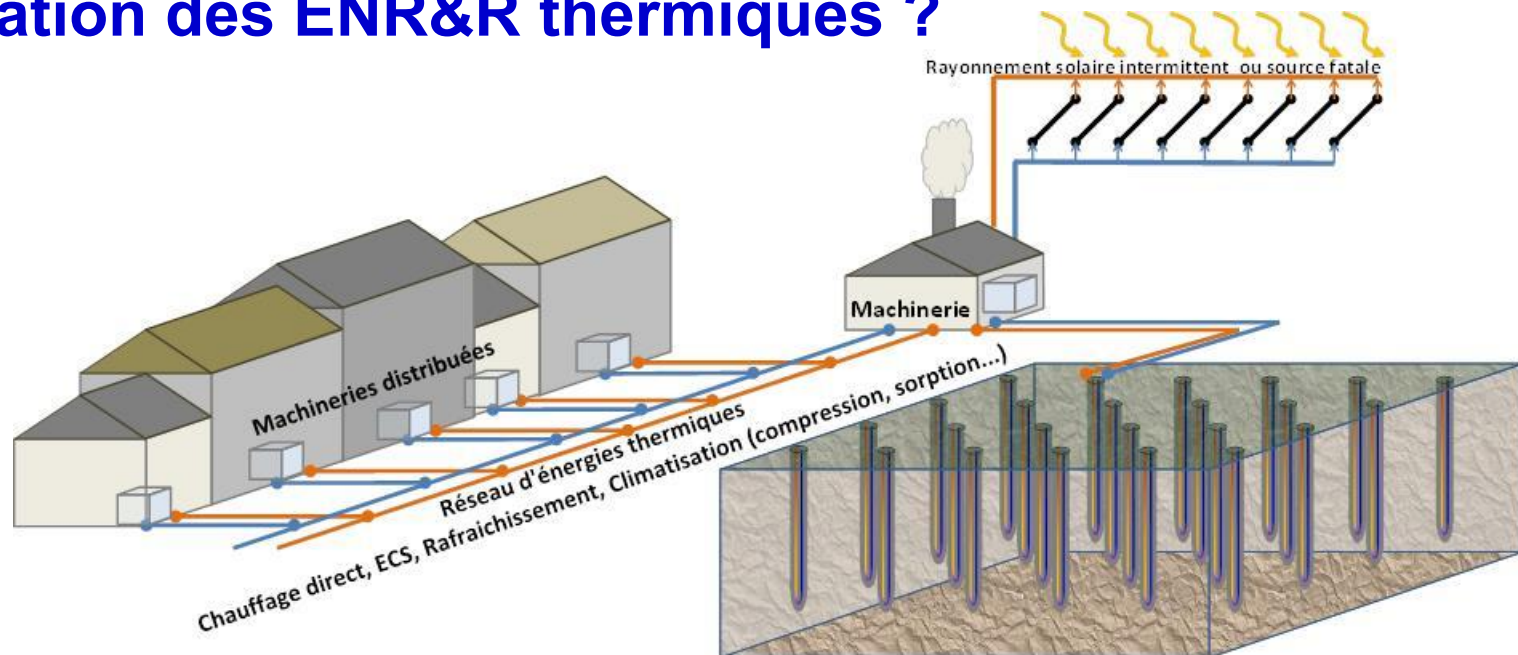


...Probablement des règles à piloter en local.

# Quel territoire à 'énergie positive' sans redistribution des excédents thermiques ...

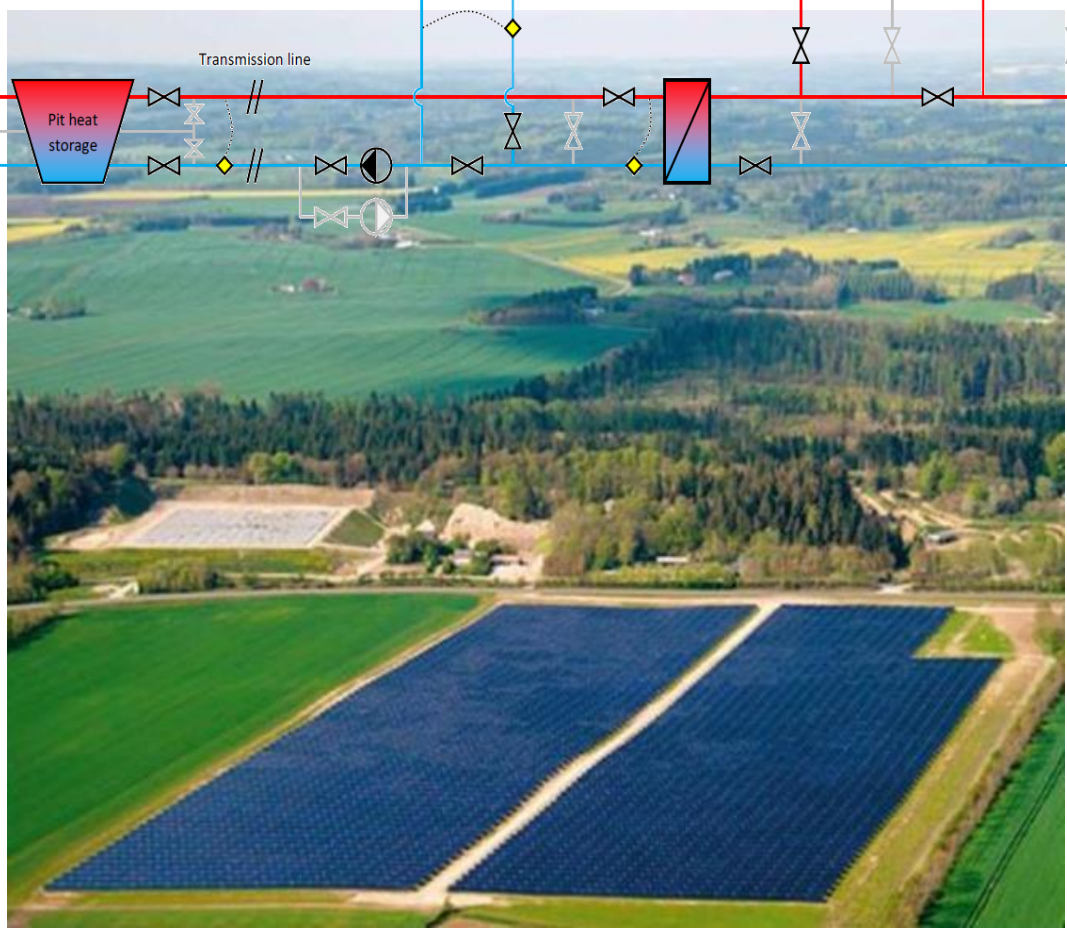
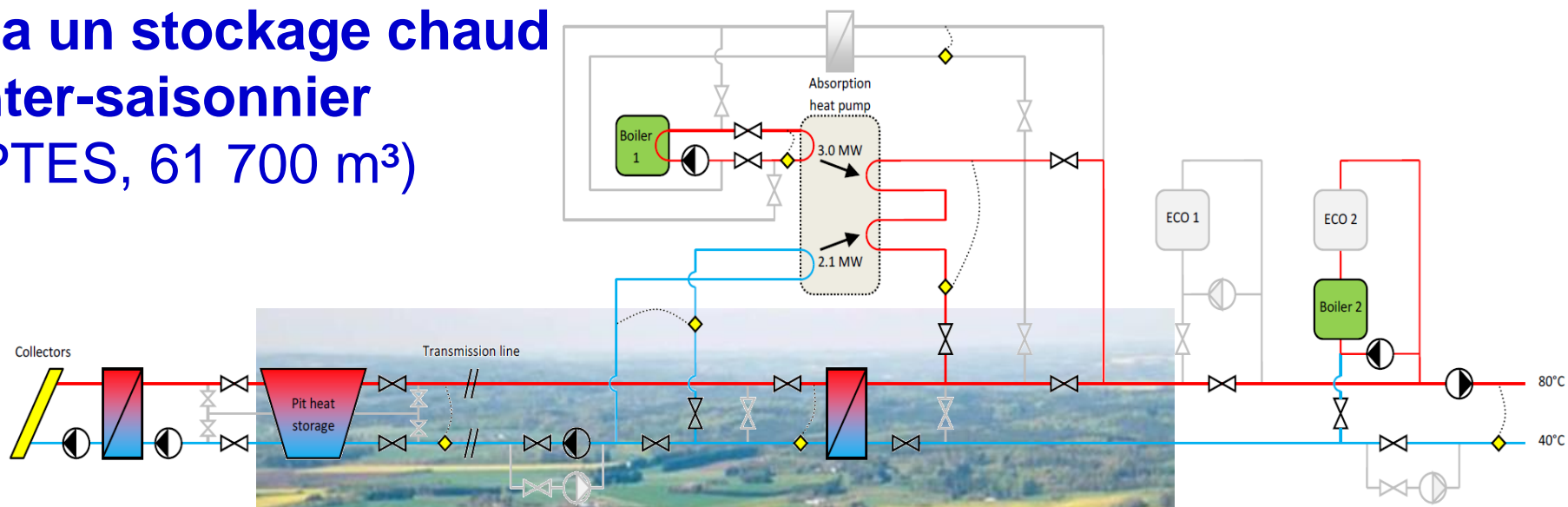


## ... ni valorisation des ENR&R thermiques ?



# Ex. : Dronninglund, Danemark

## Valorisation de la chaleur solaire (37 573 m<sup>2</sup>) via un stockage chaud Inter-saisonnier (PTES, 61 700 m<sup>3</sup>)



**Valoriser le patrimoine local :**

**Projet de reconversion du Puits Y. Morandat à Gardanne en stockage thermique pour un pôle économique, culturel et énergétique (avec l'autorisation de la *Semag*)**



**⇒ Un exemple français en cours d'examen**

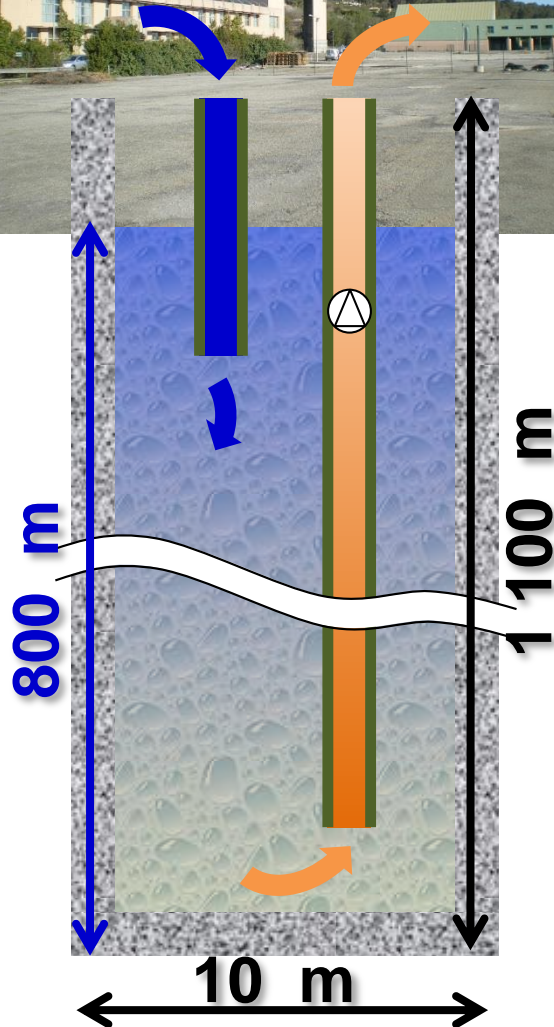
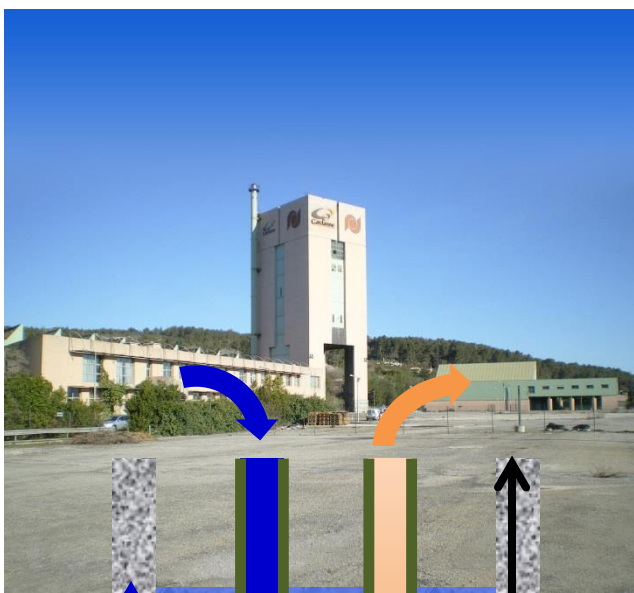


Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Utiliser un puits minier en stockage

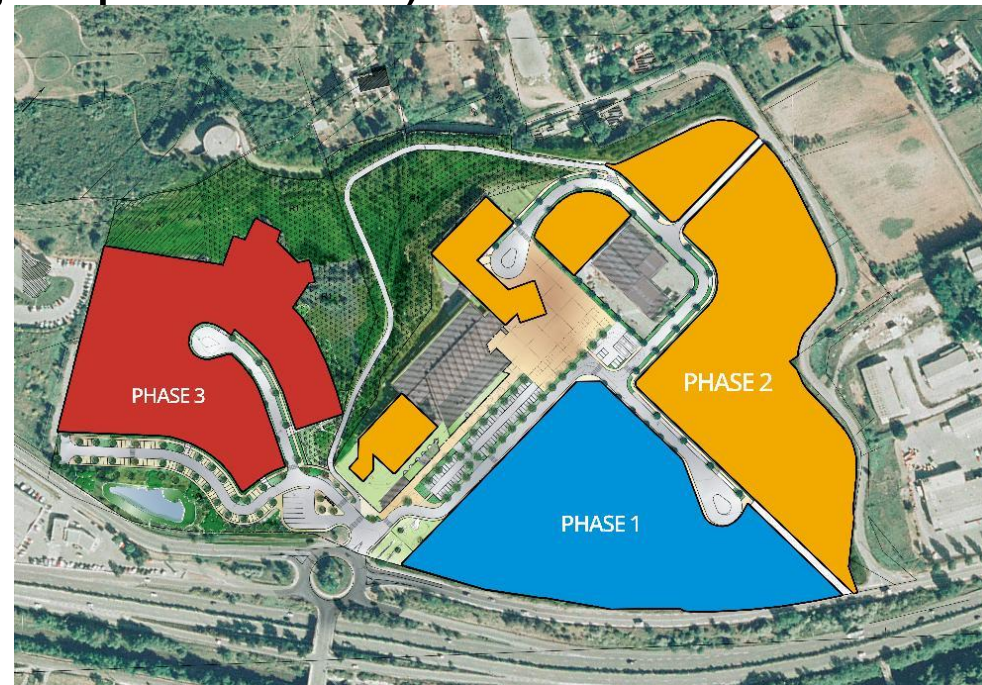


- > L'ancien Puits Y. Morandat : un des plus profonds en Europe = patrimoine industriel
- > Plus de 60 000 m<sup>3</sup> d'eau (puits ≈ étanche)
- > Stock saisonnier envisageable :
  - Eau : 1.1 GWh ( $\Delta T$  moyen 15°C)
  - Encaissant : 0.2 GWh ( $\Delta T$  moyen 5°C)
  - Total stock saisonnier : 1.3 GWh

# Pré faisabilité technique

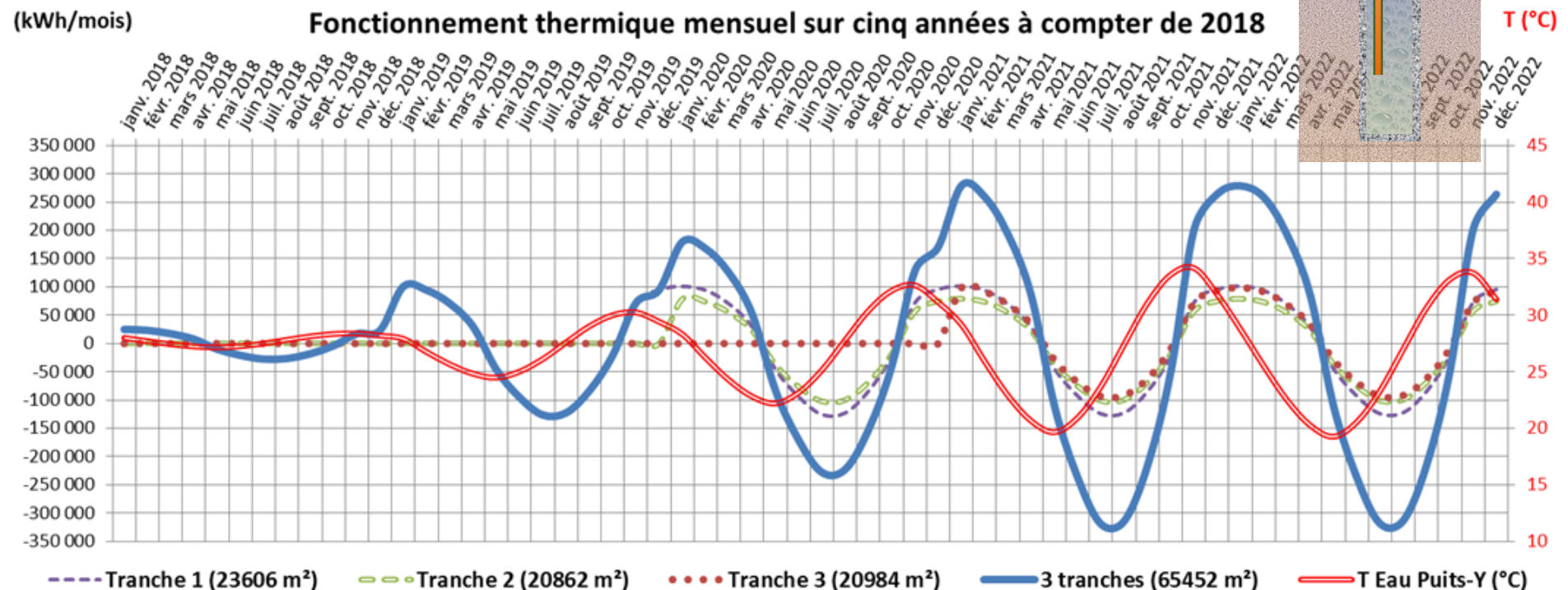
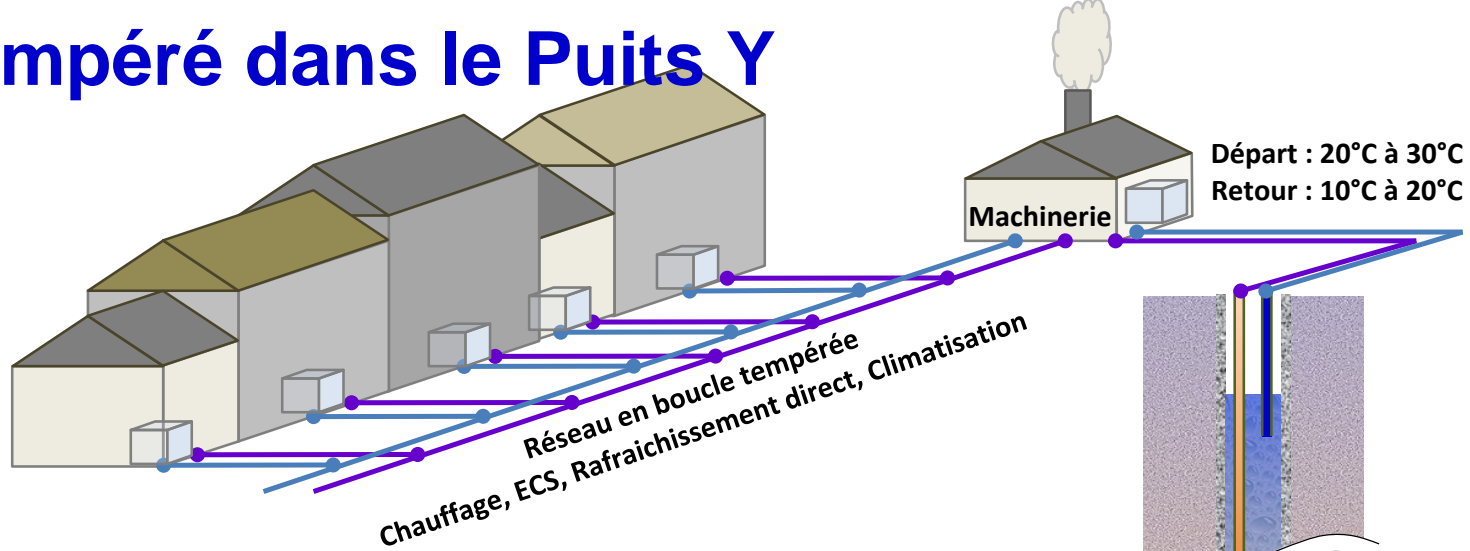


- **Scénario 1 : Boucle primaire tempérée**
- **Scénario 2 : Boucle chaude & Solaire (ambitieux)**
- **Scénario 3 (Repli) : Champ de sondes géothermiques**  
(≈ idem scénario 1 mais transposable ailleurs)
- **Trois grandes phases de mises en service**
- **De 65 000 m<sup>2</sup> à 80 000 m<sup>2</sup> (jusqu'à 50 lots)**
- **Réseau primaire**
- **Machineries distribuées**
- **Revalorisation des rejets**  
(chaud ou frais)
- **Appoints centralisés**  
(chaud ou frais)



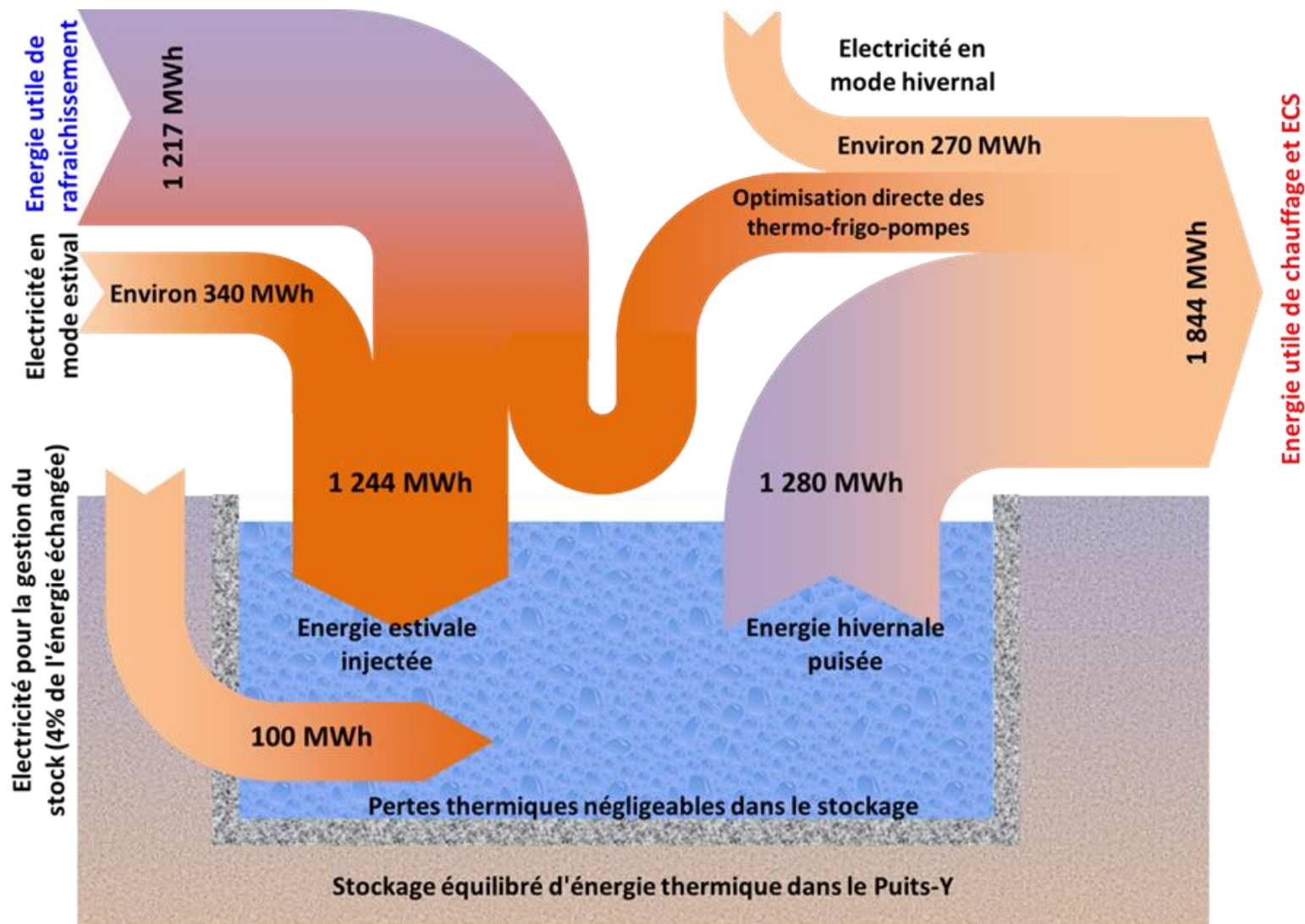


# Scénario 1 : Stockage tempéré dans le Puits Y

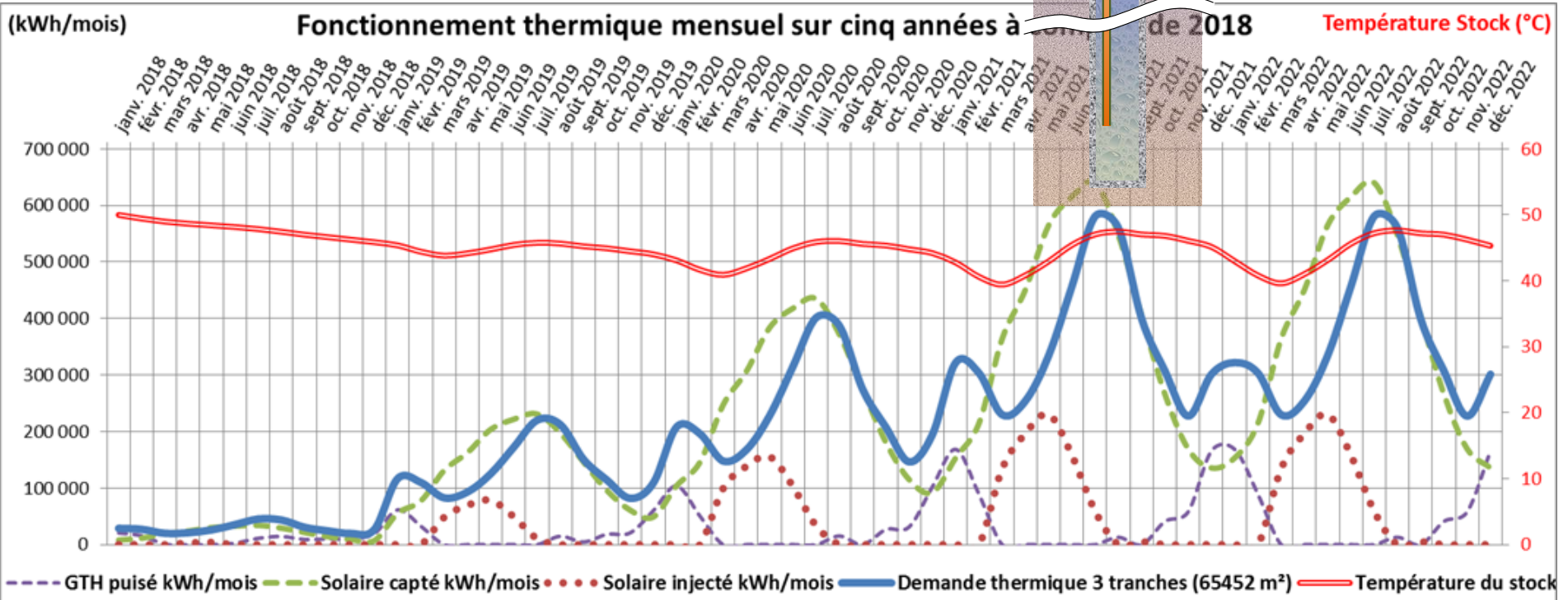
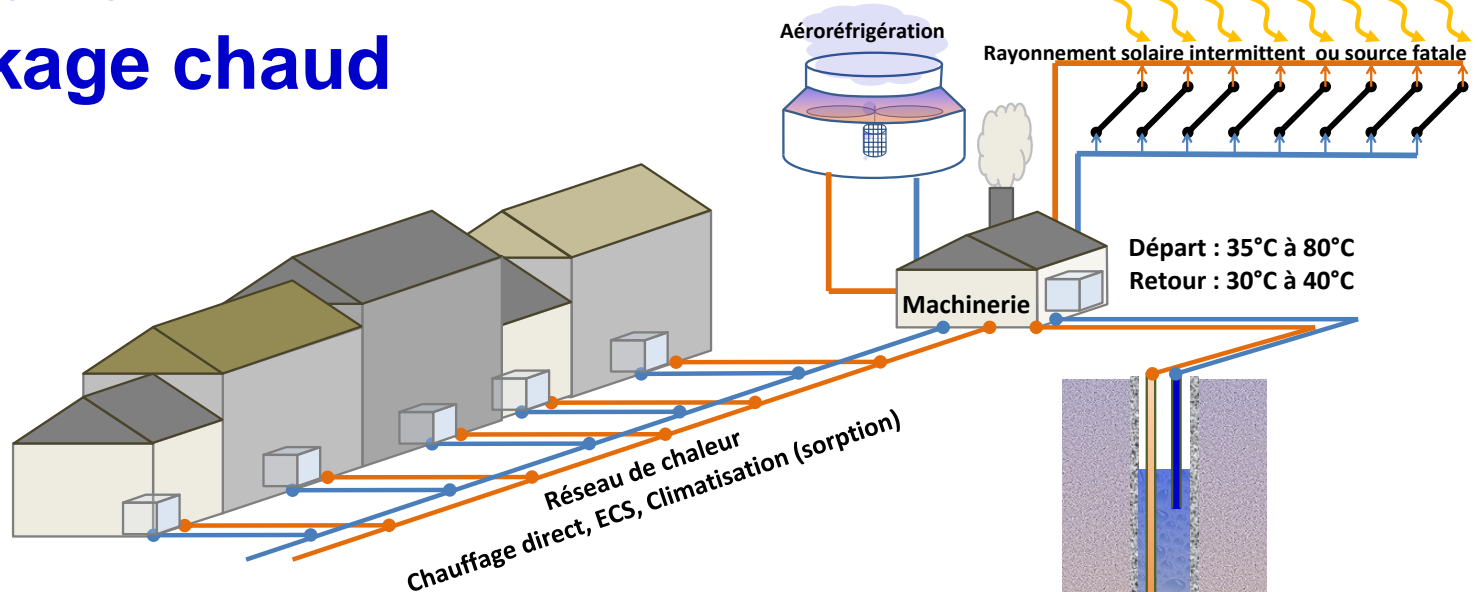


# Bilan du Scénario 1 :

Electricité  $\Leftrightarrow$  710 MWh/an  $\Leftrightarrow$   $\approx$  24% de l'énergie livrée

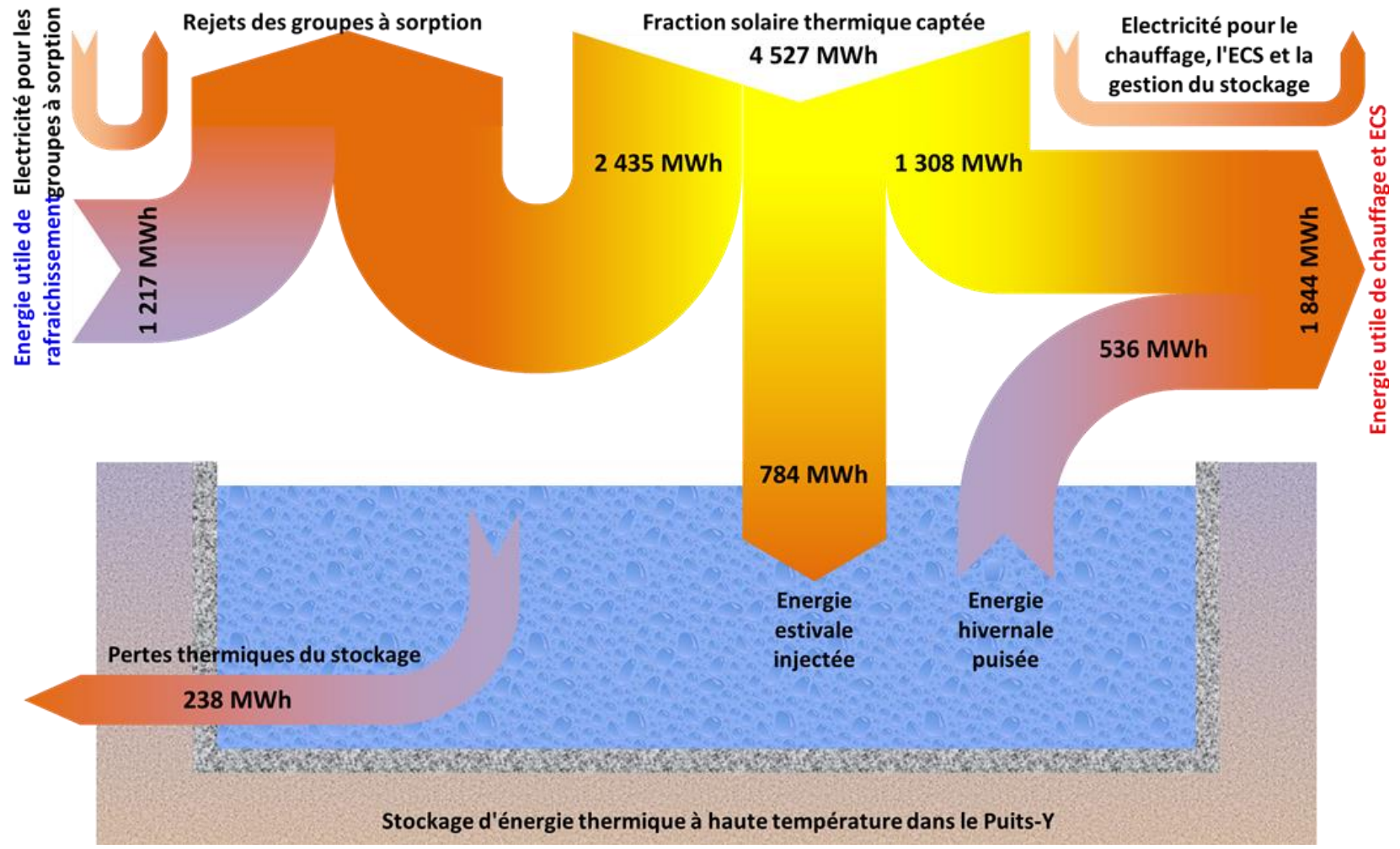


# Scénario 2 : Stockage chaud

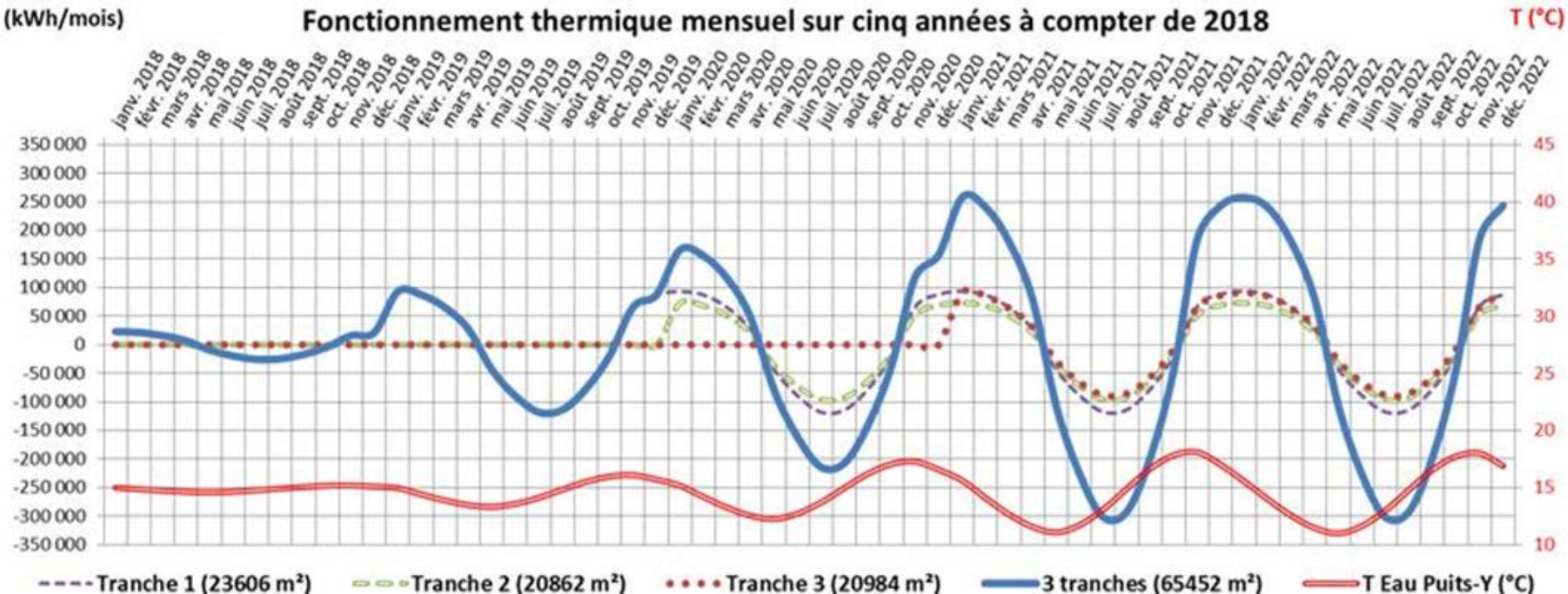
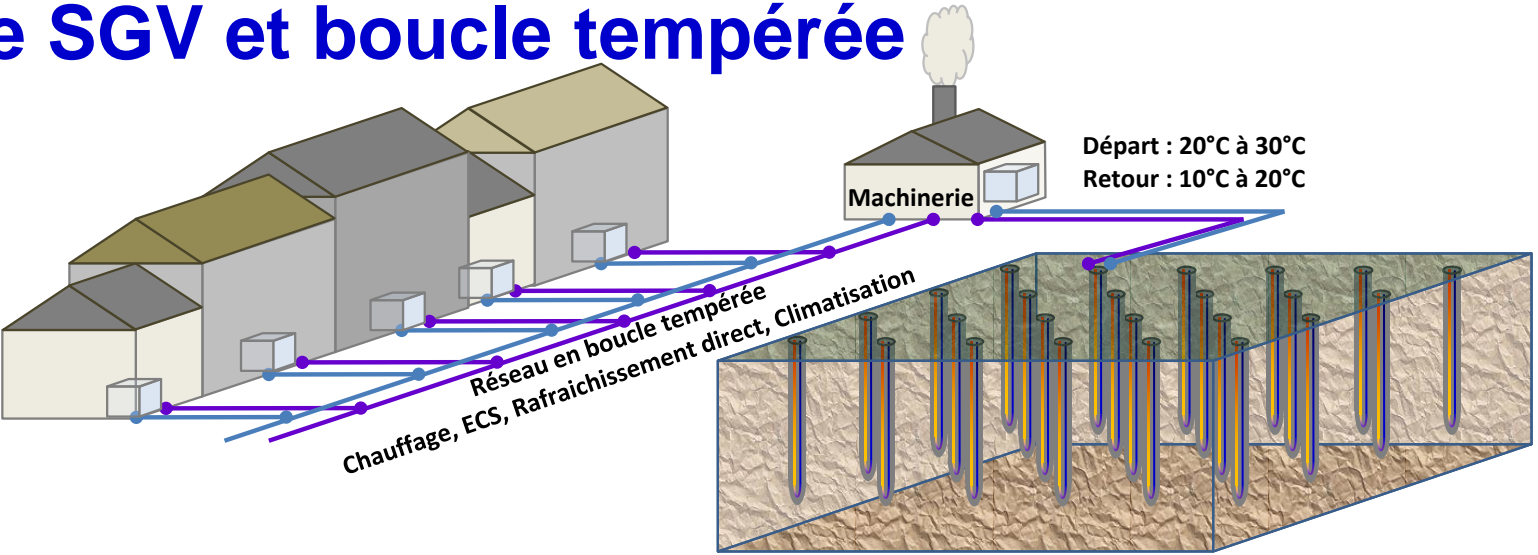


# Bilan du Scénario 2 :

Electricité ↔ 210 MWh/an (10% du froid livré,  
4% de l'énergie stockée/déstockée, 2.5 % du solaire direct)

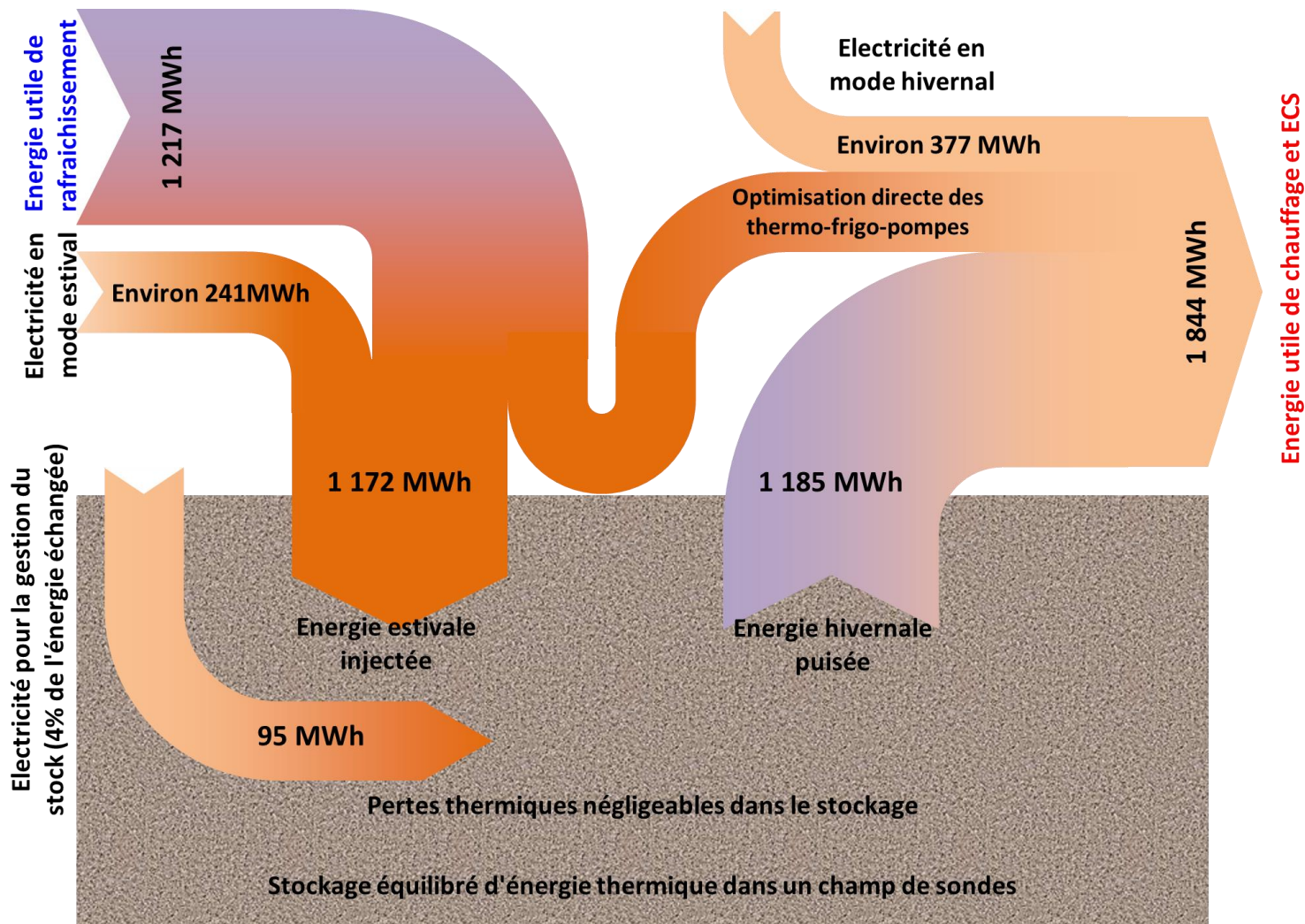


# Scénario 3 : Champ de SGV et boucle tempérée



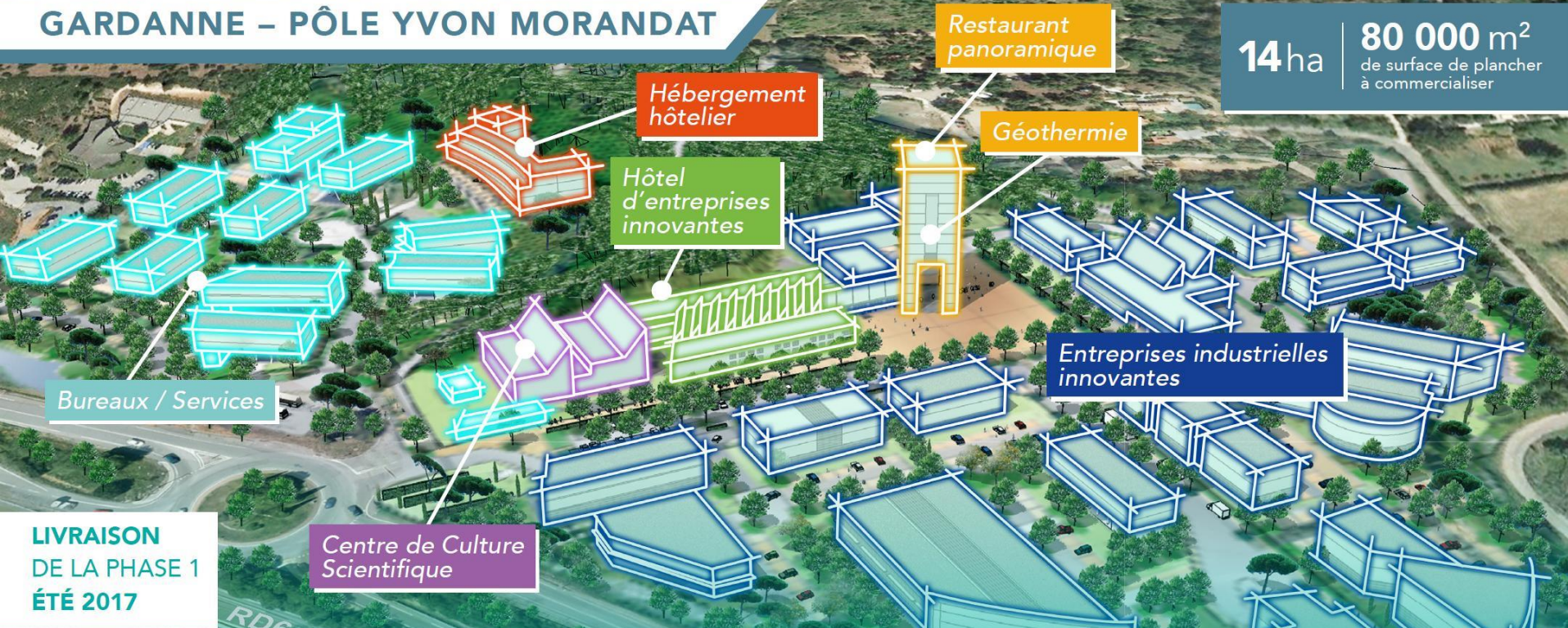
# Bilan du Scénario 3 :

## Electricité ⇔ 715 MWh/an ⇔ ≈ 24 % de l'énergie livrée



# GARDANNE – PÔLE YVON MORANDAT

14 ha | 80 000 m<sup>2</sup>  
de surface de plancher  
à commercialiser



LIVRAISON  
DE LA PHASE 1  
ÉTÉ 2017

## L'innovation sociale et technologique, notre énergie

GARE  
MULTIMODALE



LES +

- La situation stratégique
- La synergie unique sur le territoire
- Le cadre de travail exceptionnel
- La fibre optique à très haut débit
- La zone gardiennée



**Semag**  
Société d'Economie Mixte  
d'Aménagement de Gardanne et sa région



COMMERCIALISATION



04 42 65 77 20 | contact@semag13.com

[www.ville-gardanne.fr/Parc-d-activites-du-Puits-Morandat](http://www.ville-gardanne.fr/Parc-d-activites-du-Puits-Morandat)



- Conclusion -

Le stockage souterrain  
d'énergie(s) thermique(s)  
est adapté aux milieux urbanisés.

-

C'est une des clefs durables pour maîtriser  
l'approvisionnement et les dépenses ...

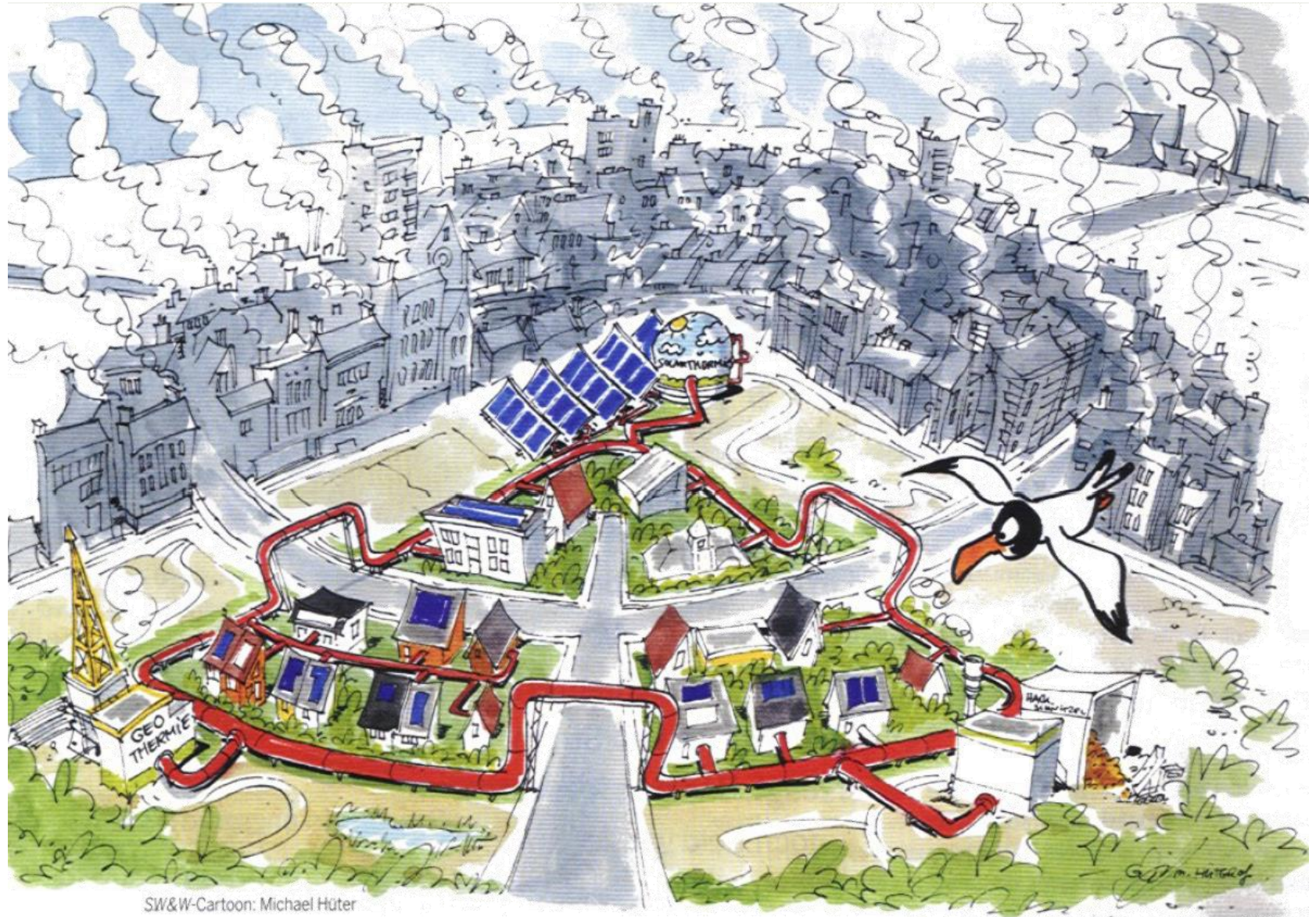
... à la condition de penser dès maintenant  
aux réseaux qui seront utiles demain.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**





SW&W-Cartoon: Michael Hüter

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



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**