



Les stockages géologiques de l'énergie thermique

-
Faire simple et durable ?

30 novembre 2016

Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

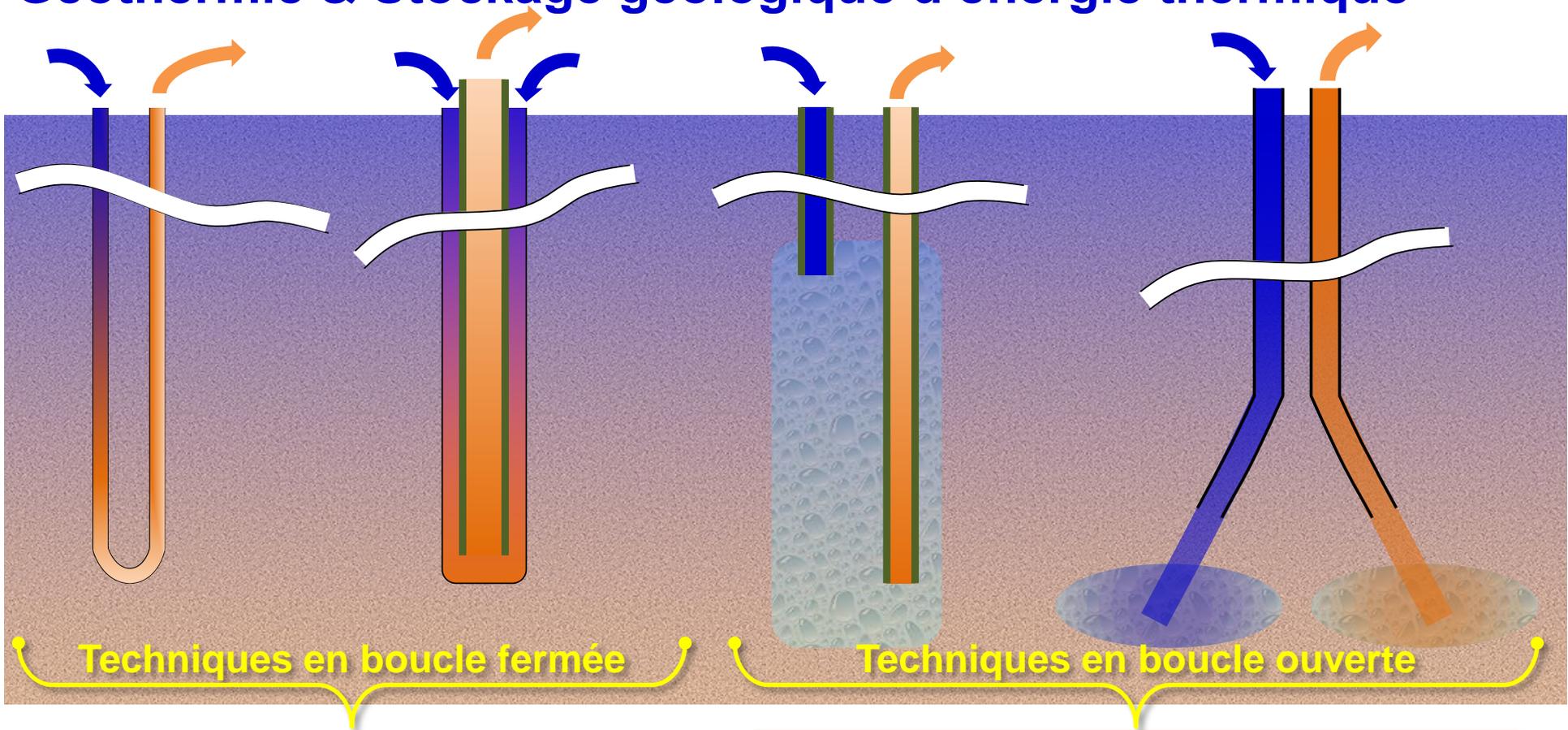
brgm



1^{ère} partie

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

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



Techniques en boucle fermée

Techniques en boucle ouverte

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)

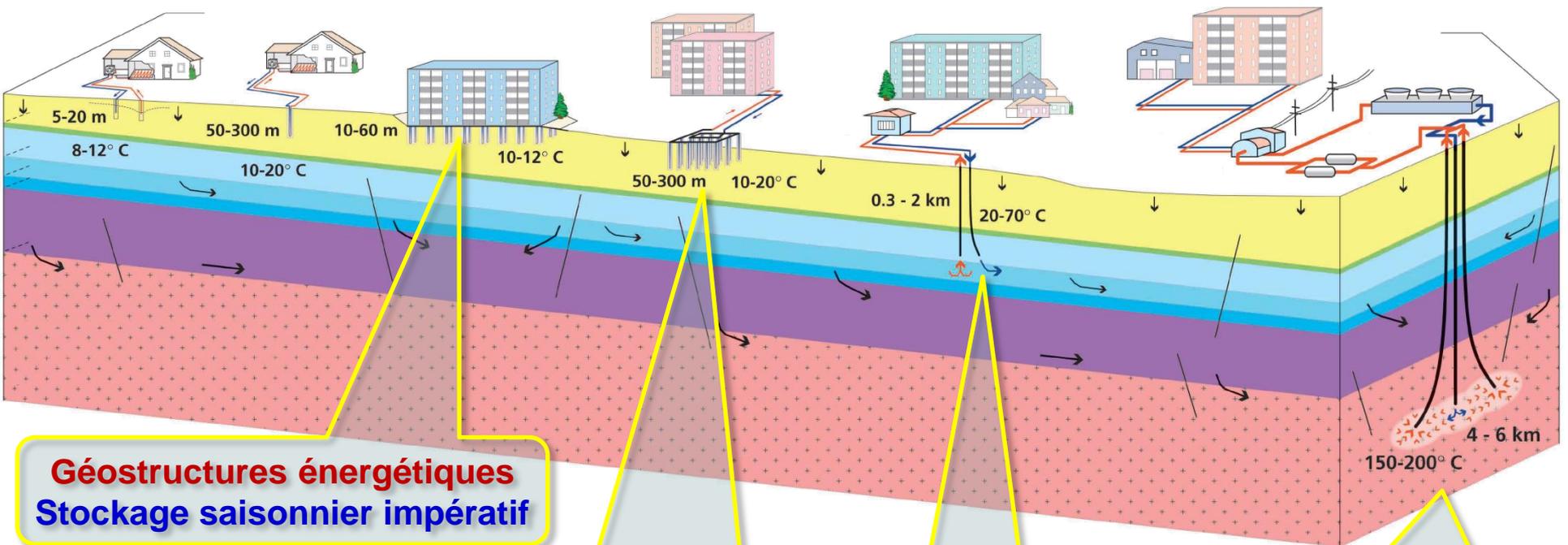
Les roches du sous-sol ...



... une aptitude naturelle au stockage thermique

Déphasage thermique

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



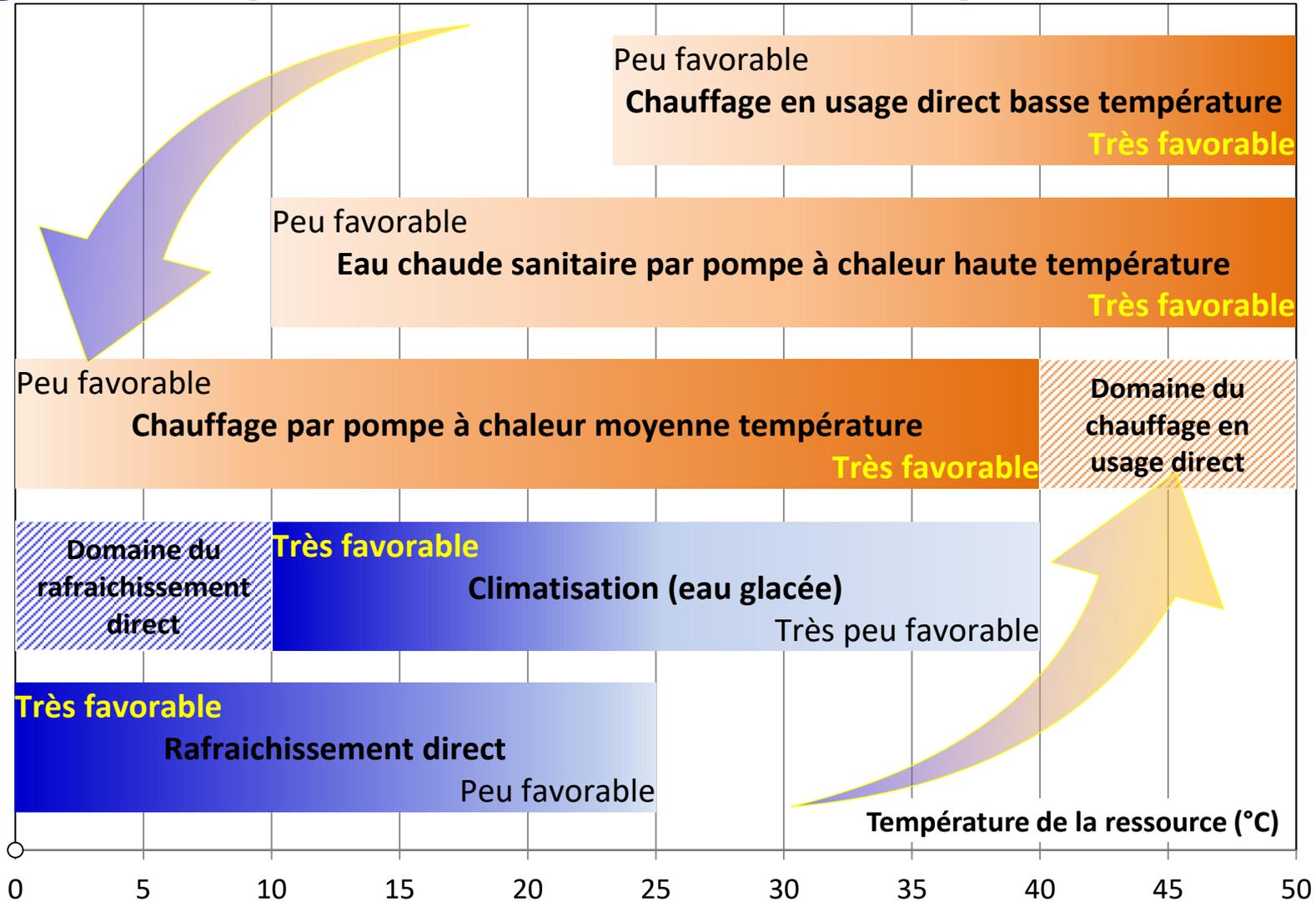
Géostructures énergétiques
Stockage saisonnier impératif

Champs de sondes géothermiques
Stockage saisonnier implicite

La technique EGS
Stockage à envisager!

Doublet géothermique
Stockage peu examiné (en France)

1^{ère} clef : Favoriser l'usage thermique direct & les COP / EER performants



⇒ 'Adapter' les stocks géothermiques ?

2nde 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**

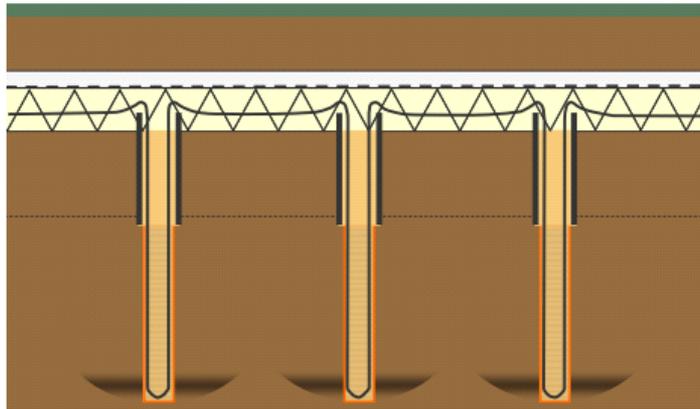
↳ **Flux géothermique $\approx 60 \text{ mW/m}^2$ (0.53 kWh/an) = très faible**

↳ **GTH superficielle \approx puisage typique de 40 à 50 kWh/an.m² de sol**

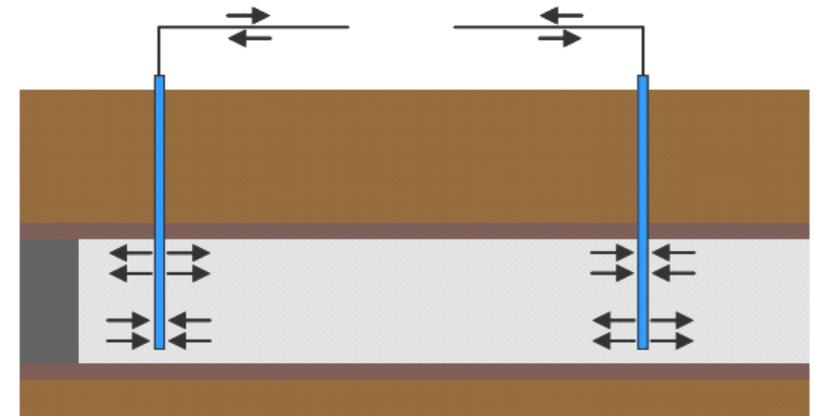
↳ **Mais comment utiliser simplement le sous-sol ?**

3^{ème} clef : Accessibilité

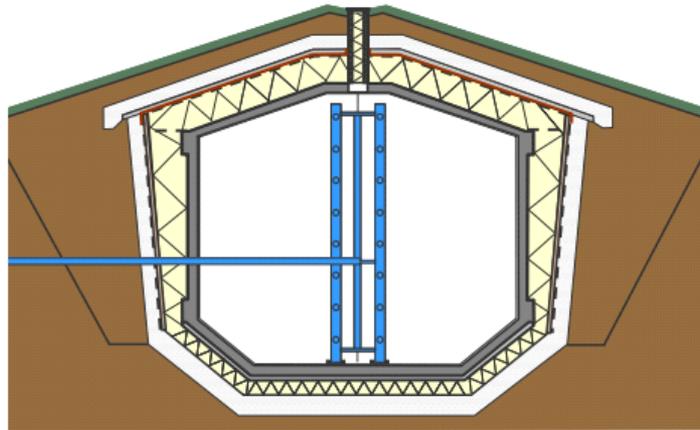
Borehole thermal energy storage (BTES)
(15 to 30 kWh/m³)



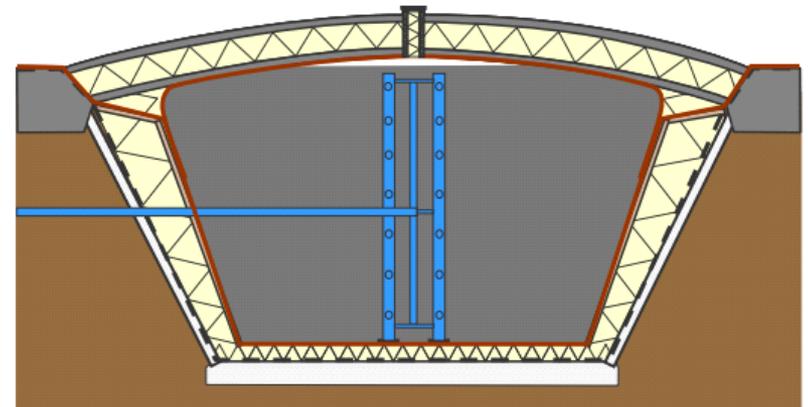
Aquifer thermal energy storage (ATES)
(30 to 40 kWh/m³)



Tank thermal energy storage (TTES)
(60 to 80 kWh/m³)



Pit thermal energy storage (PTES)
(60 to 80 kWh/m³)



(STES : Seasonal Thermal Energy Storage)

4^{ème} 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.



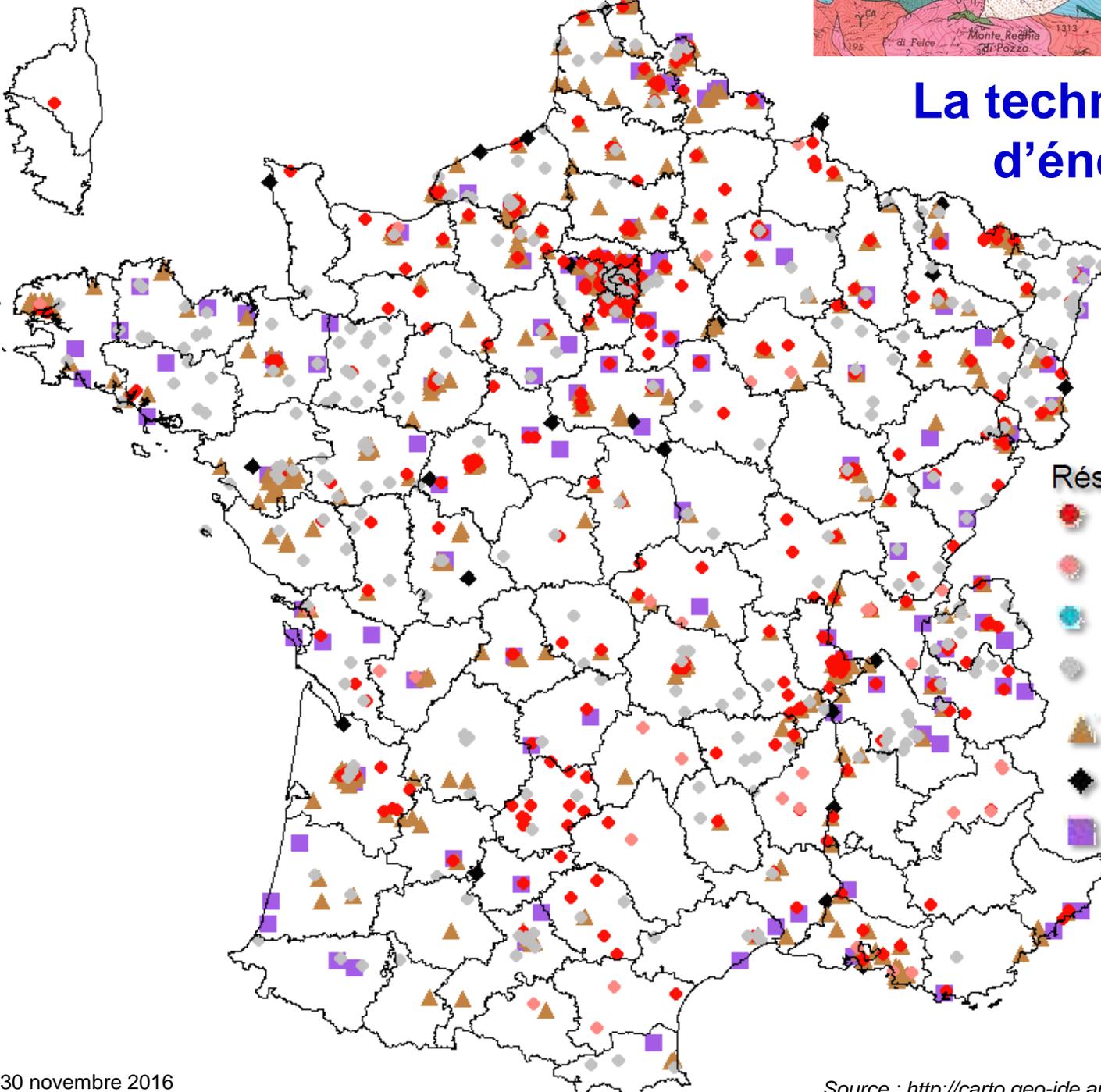
2nde partie

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 $<7^{\circ}\text{C}$

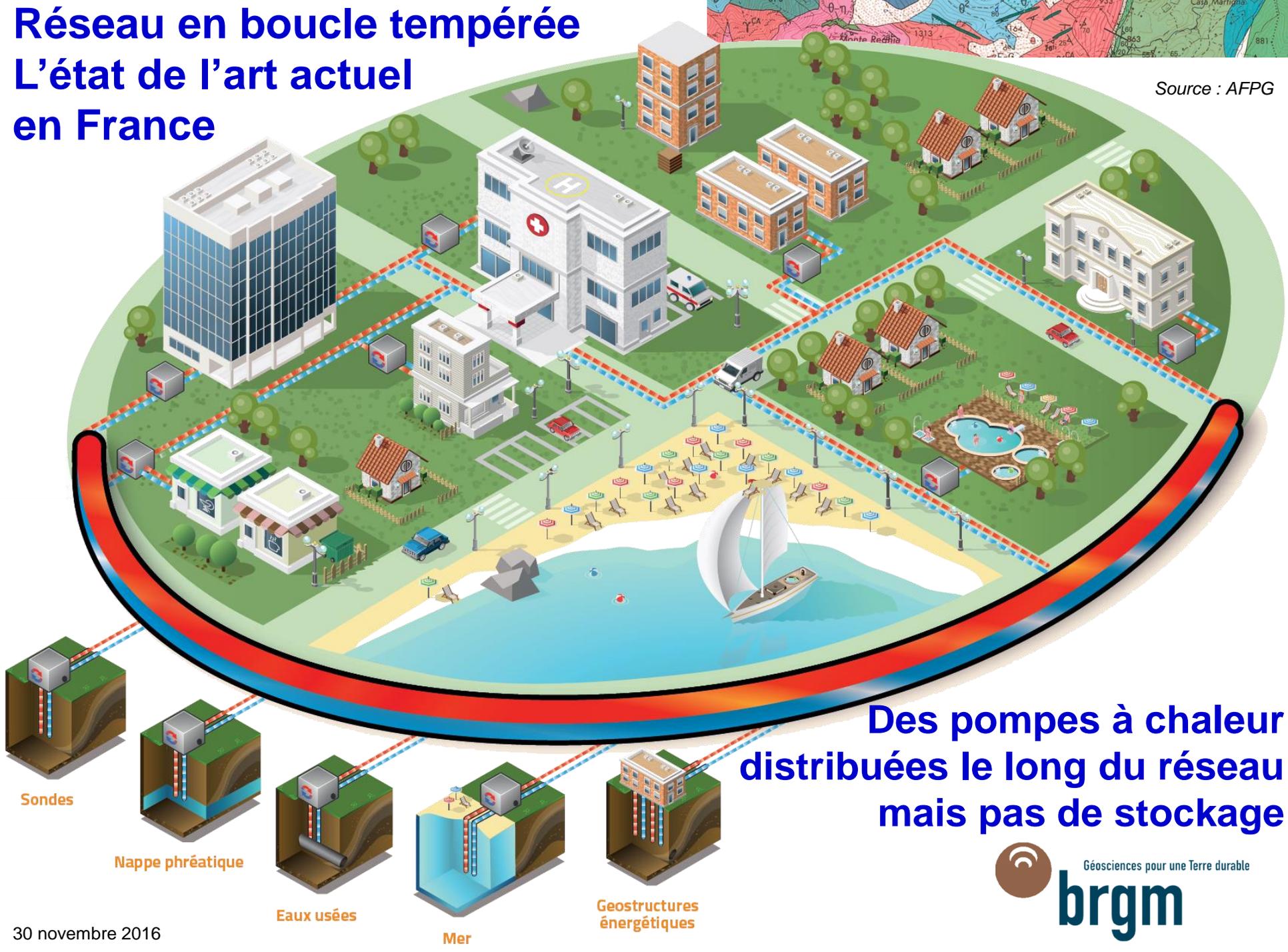
La notion de rafraîchissement reste peu prise en considération, c'est-à-dire avec une température de départ réseau typiquement de 10°C à 15°C , voire 20°C .

**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

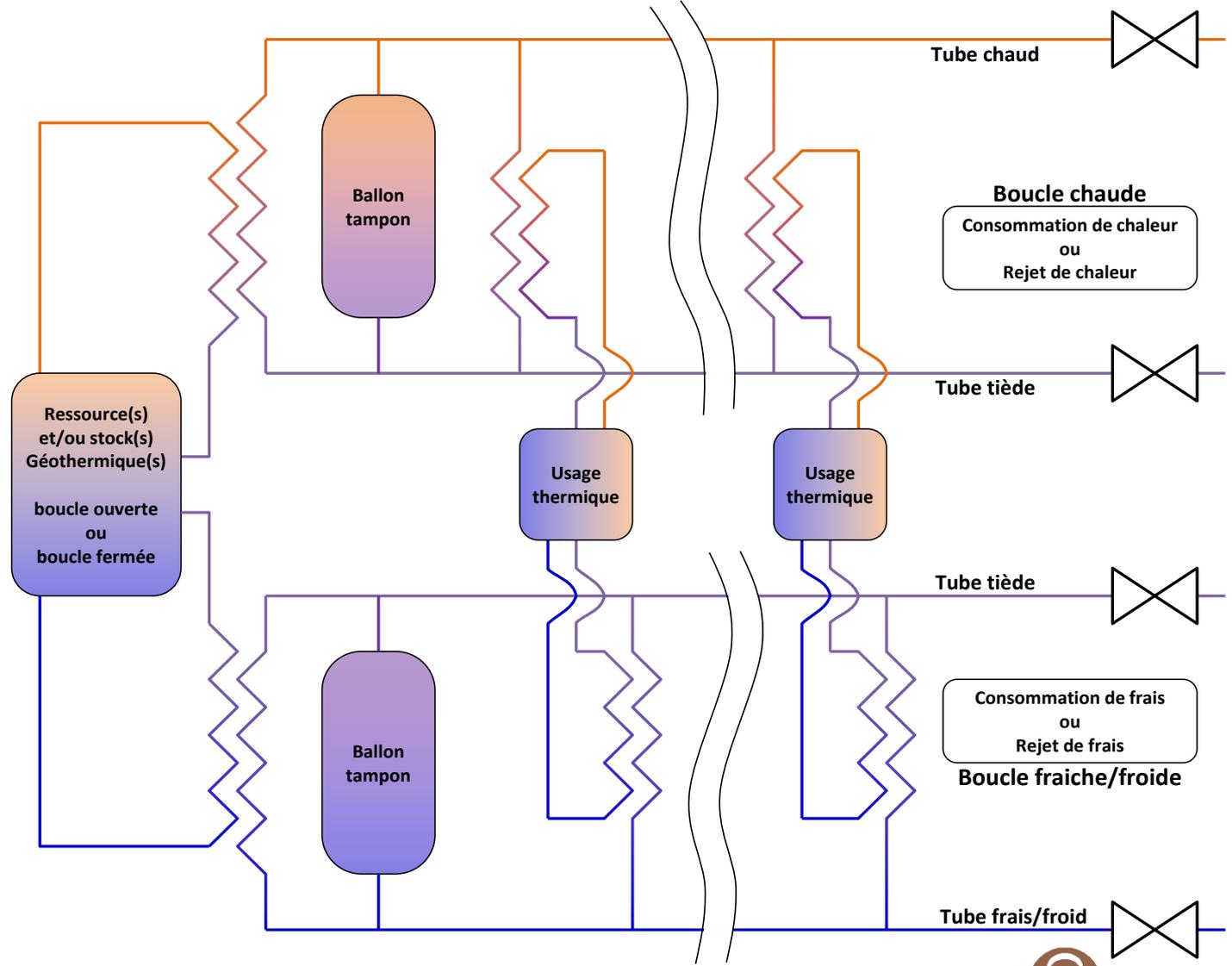
Geostructures énergétiques



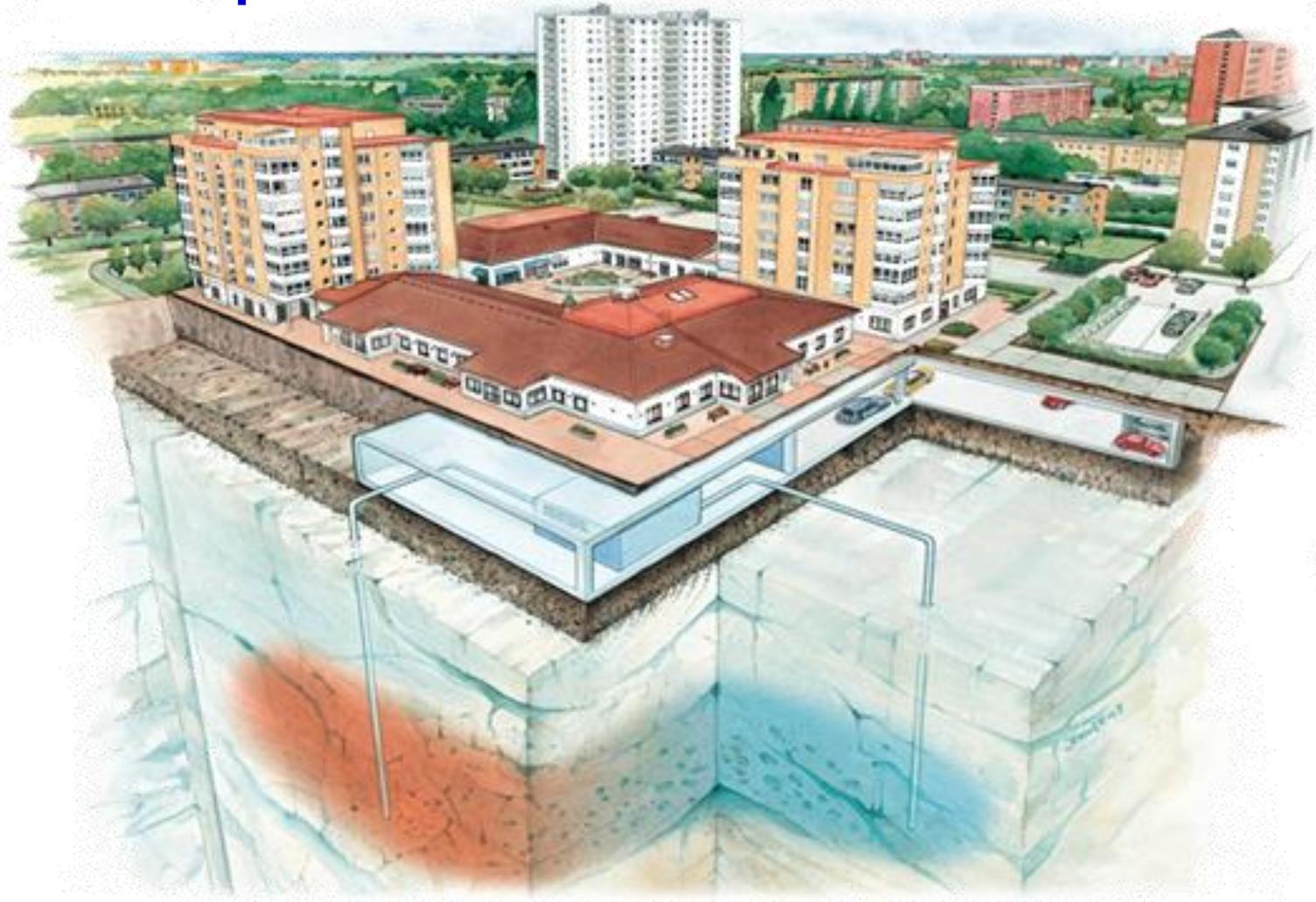
Géosciences pour une Terre durable

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

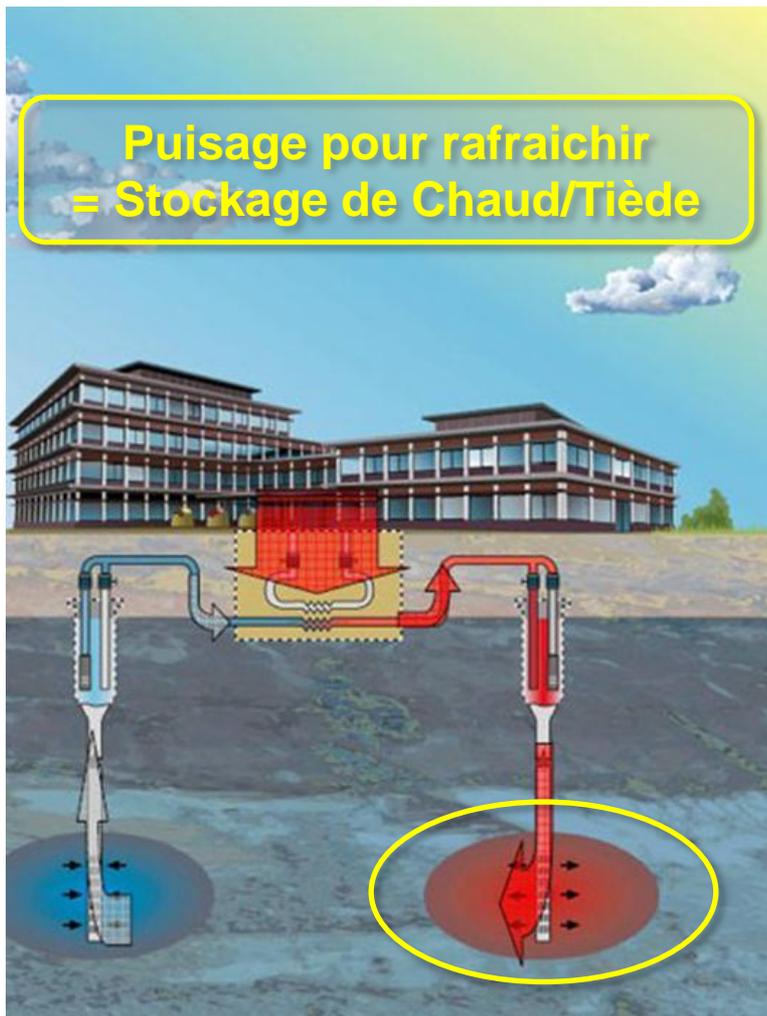


Géosciences pour une Terre durable

brgm

Stockage en aquifère superficiel

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

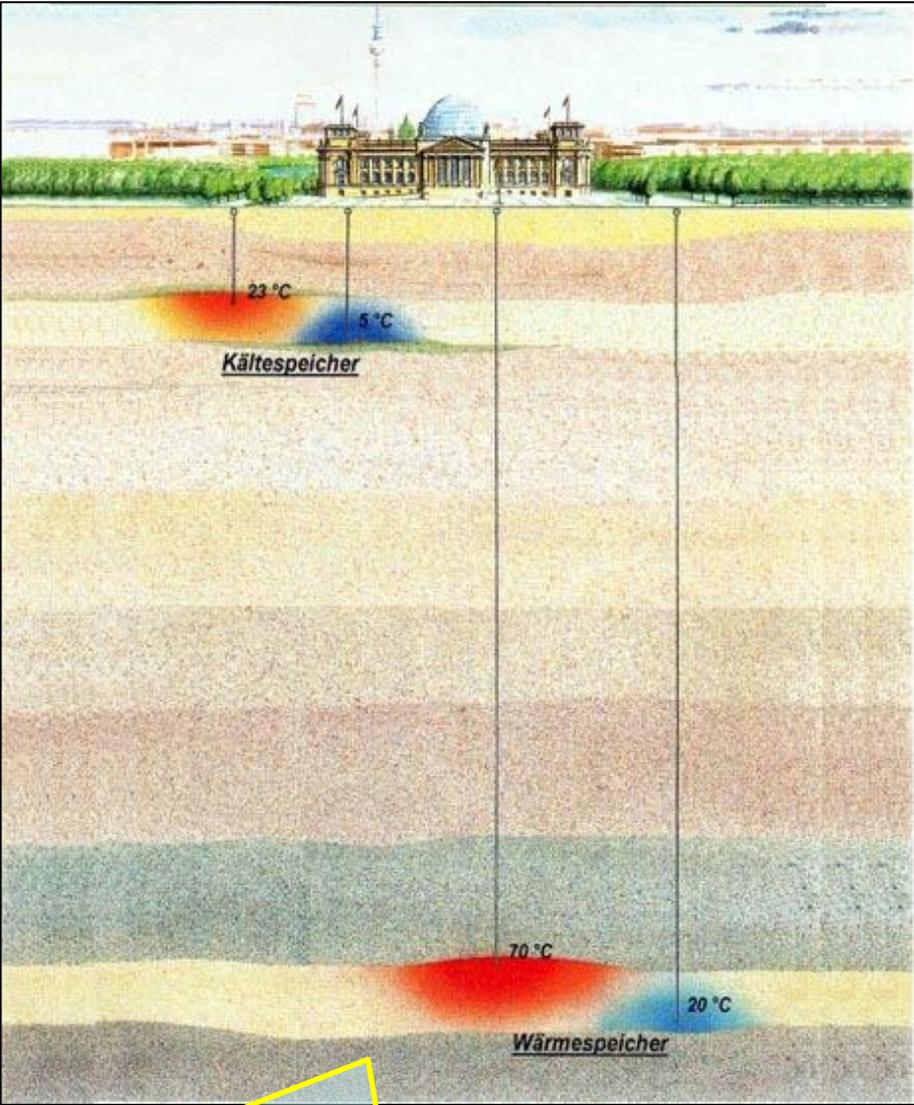


Epruvé mais pas en France

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

30 novembre 2016

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 m²
– 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)

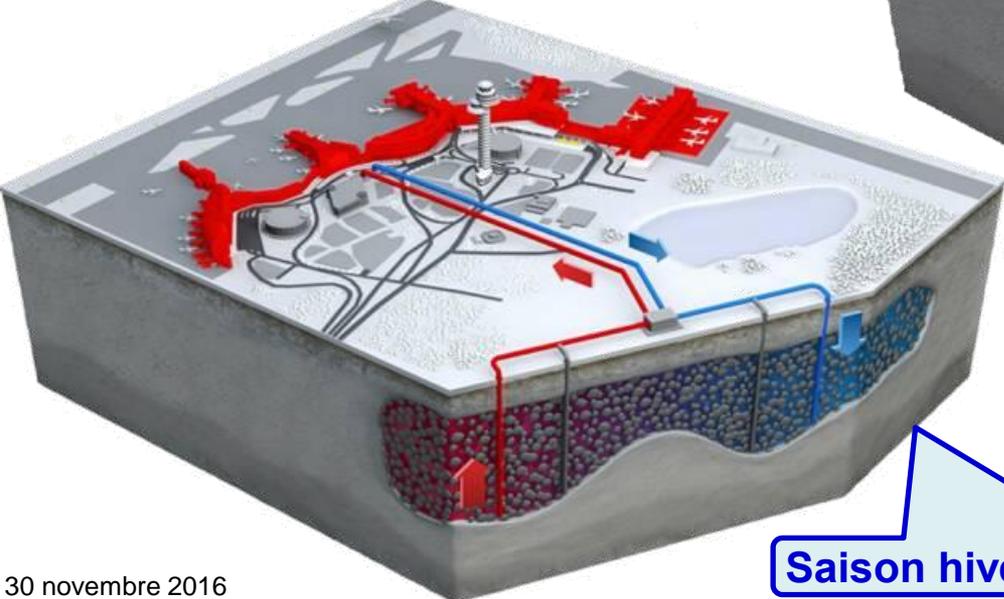
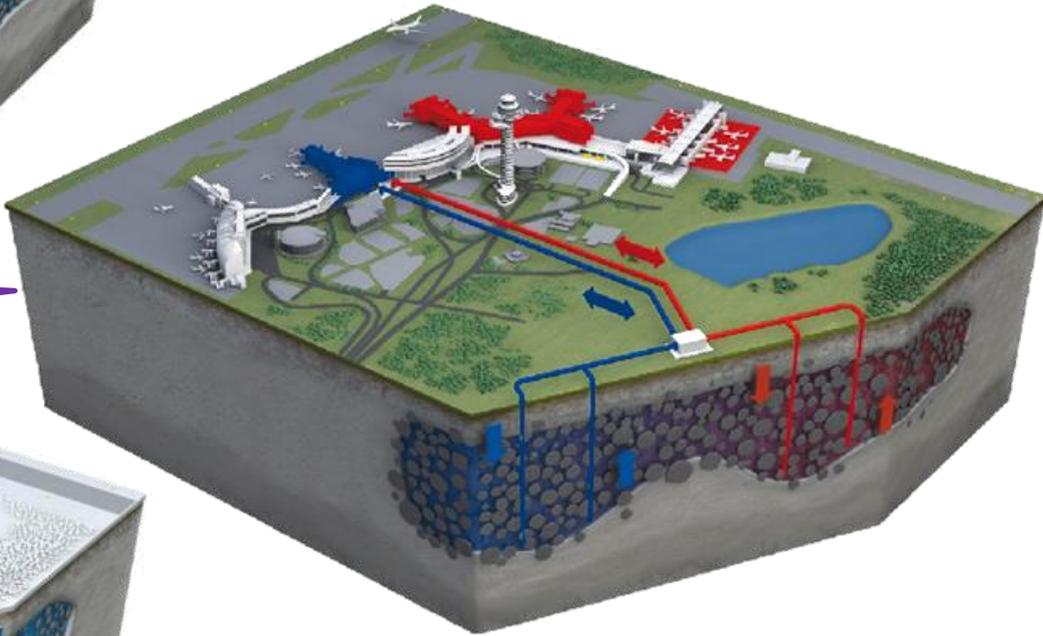
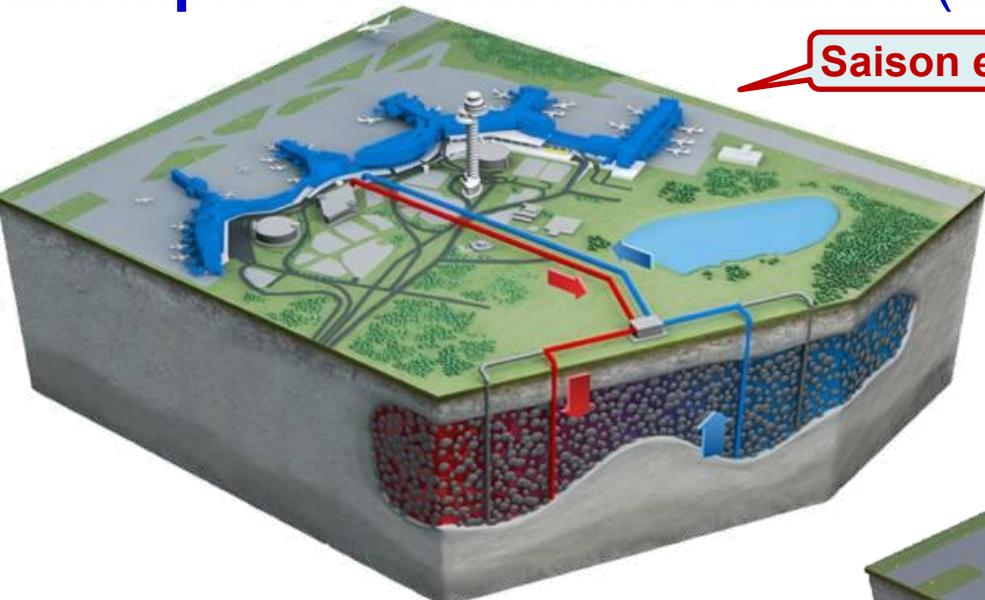


Saison estivale : Stockage de 'chaud'

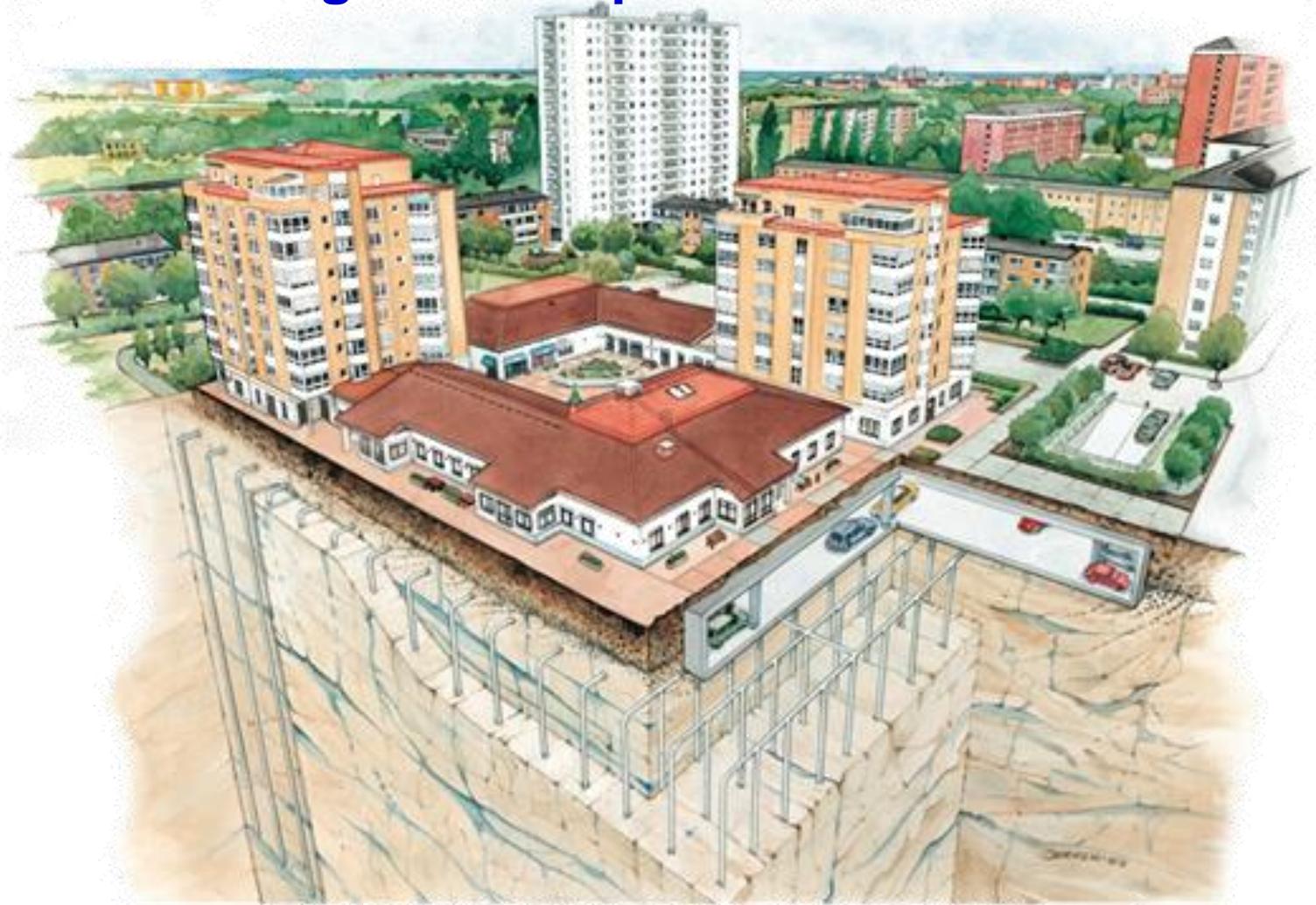
Le problème : Trouver des aquifères exploitables

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

Saison hivernale : Stockage de 'frais'

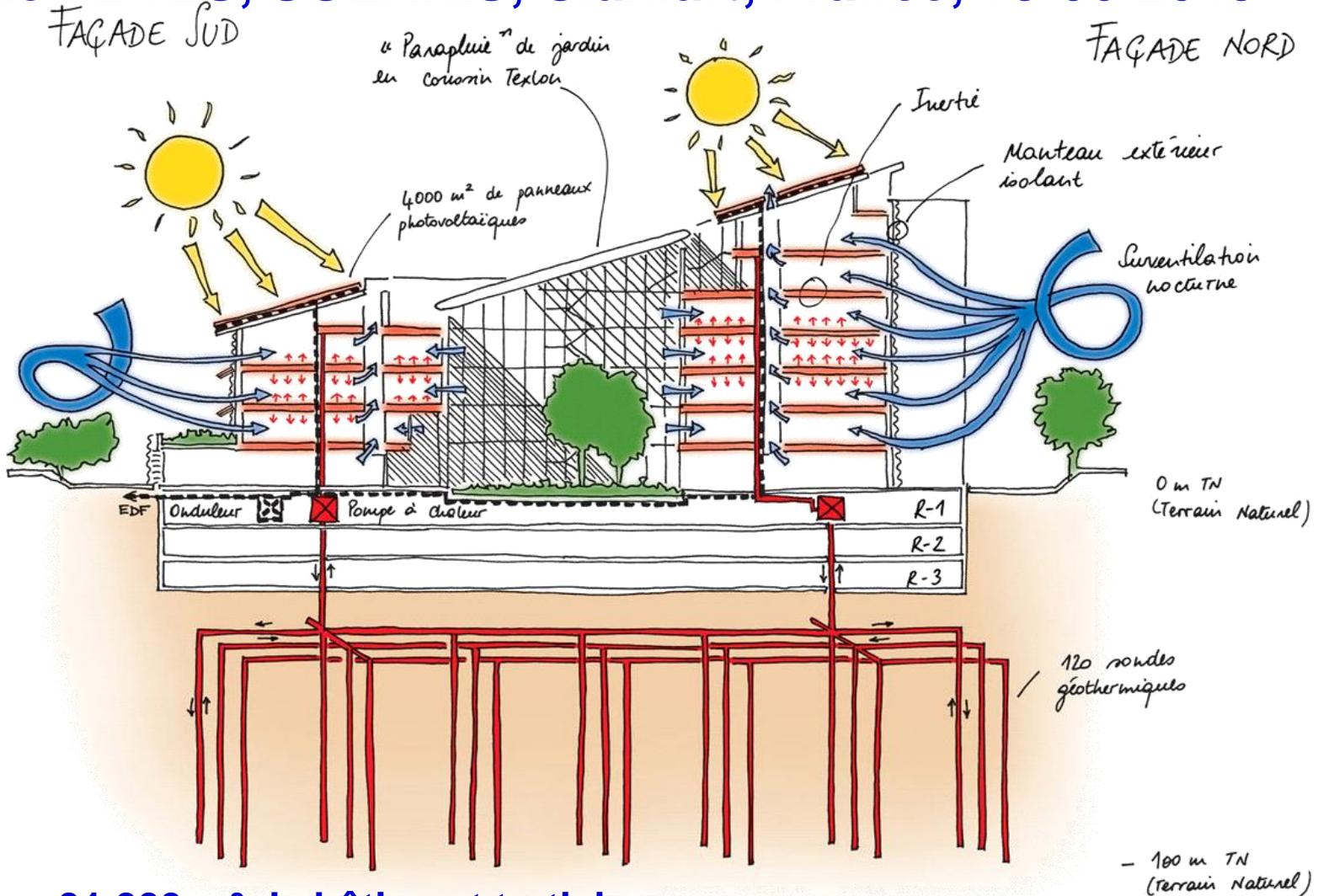


Réseau et BTES : Borehole Thermal Energy Storage (déjà en France) Champ de sondes géothermiques



Stockage en champ de sondes

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



- 31 000 m² de bâtiment tertiaire
- 4 000 m² 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

22

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

30 novembre 2016

25

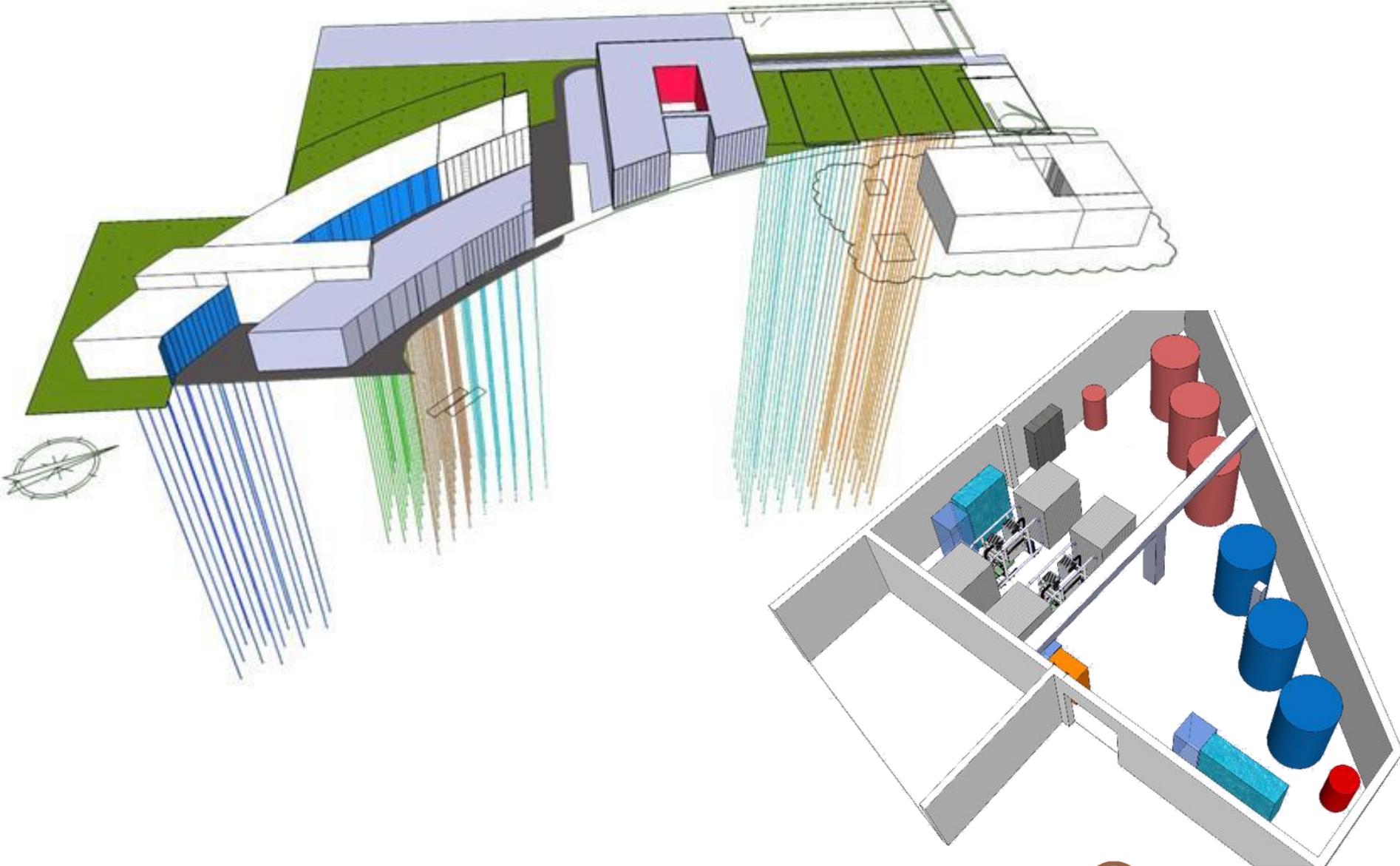
BTES – Micro-réseau à Blagnac

(source ADEME)



Nombre SGV	140
Profondeur SGV (diamètre 152 mm)	205 m (hors des argiles localisées à -260 m)
Espacement SGV	8 m (puissance spécifique : 40 W/m de profondeur)
Coûts SGV (raccordées)	2 439 k€
PAC géothermiques + Tampons	700 k€
Groupe Froid (appoints pour 10%)	340 k€
Boucle d'eau	528 k€
Ingénierie	310 k€
Puissance thermique (mode chaud)	1 973 kW (= 1845 chauffage + 128 ECS) <i>[1 144 MWh/an (100%) + 137 MWh/an (50%)]</i>
Puissance froid (tout cumulé)	1 078 kW <i>[1 071 MWh/an (90% GTH)]</i>
Raccordé	32 000 m²

BTES - Micro-réseau à Blagnac



Géostructures Énergétiques

(source Projet ANR-Gecko)

Châteauroux, 37 pieux, gymnase



Gonesse, 2013, 63 pieux à 12 mètres



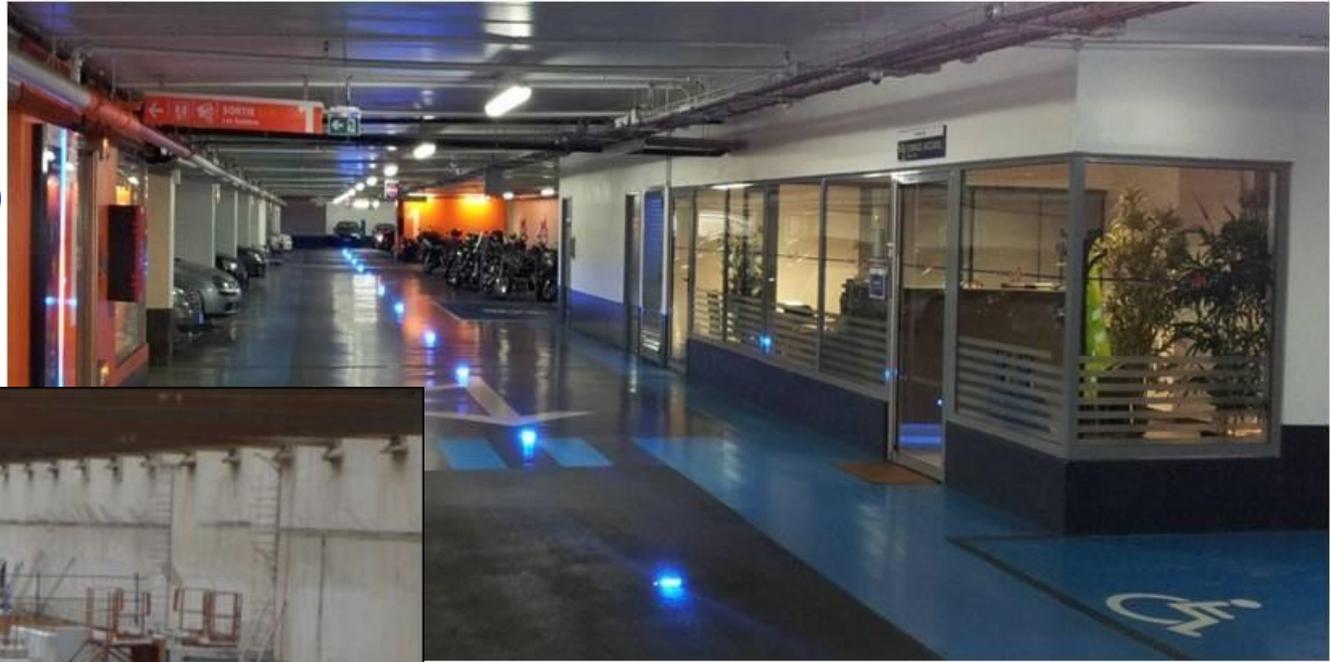
**Généralement
à l'échelle du bâtiment ...**

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



Géostructures Énergétiques

(fondations géothermiques)



... mais des bâtiments
déjà au cœur des quartiers
(Neuilly, 300m² sur 560 m², 2010)



Géosciences pour une Terre durable

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

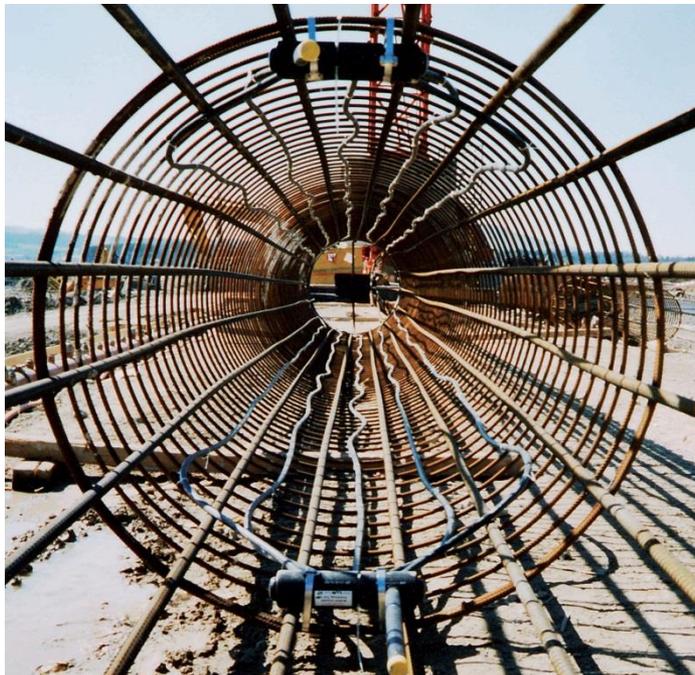
brgm

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^{ème} partie

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

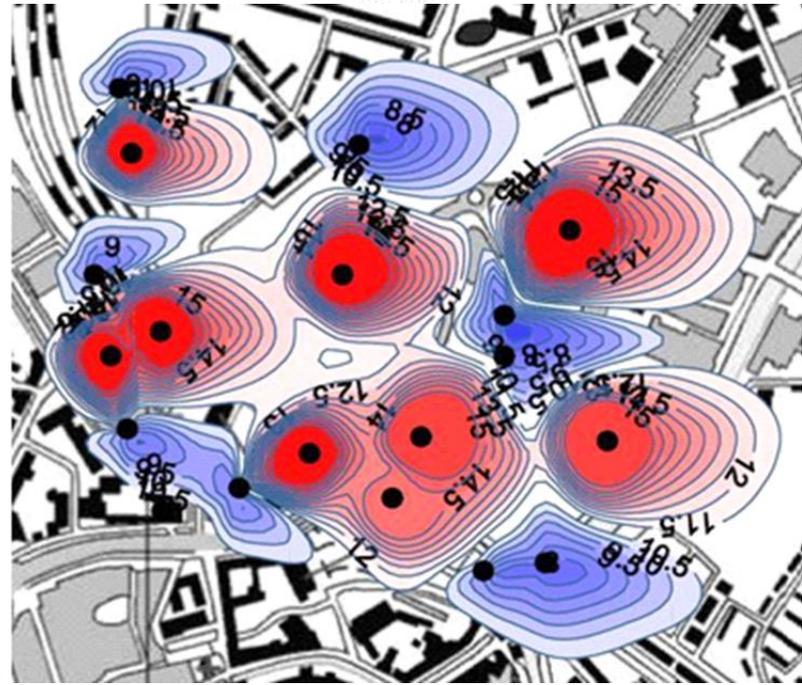
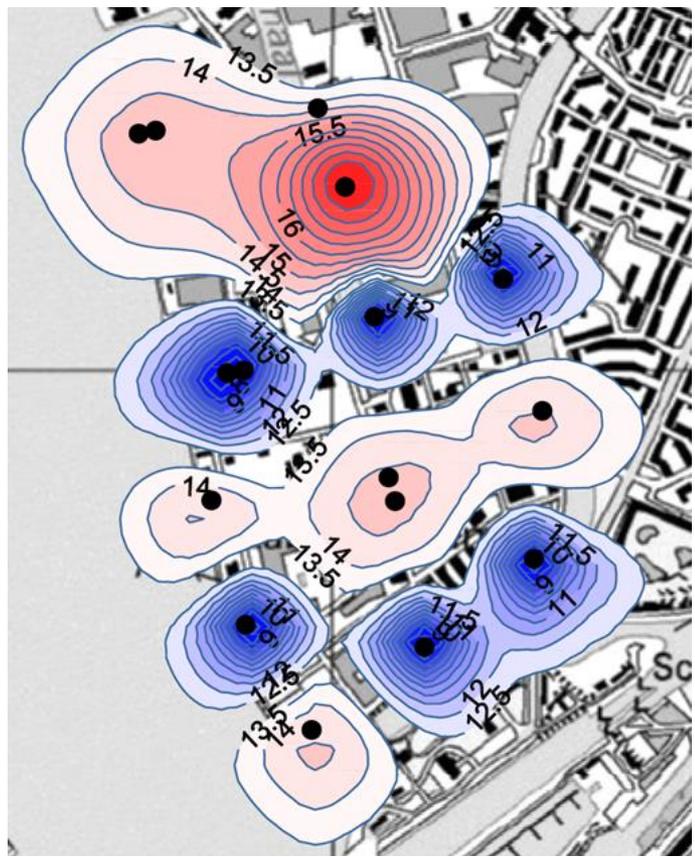
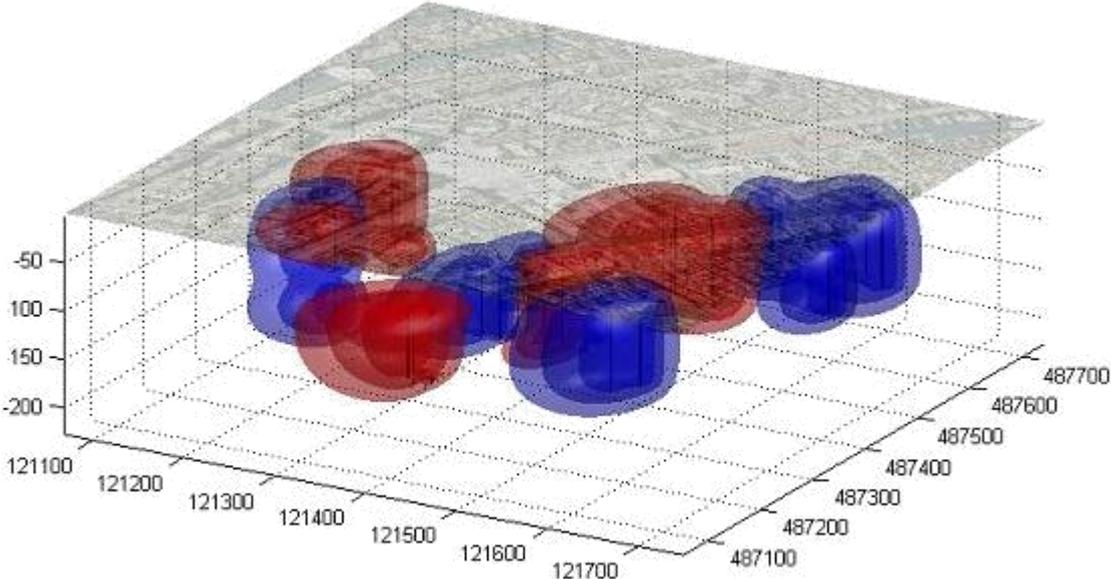
... peut-elle favoriser durablement
une moindre dépendance énergétique
et la maîtrise des dépenses ?

-1.89 3740.46 -625.5

Mais si chacun veut son stockage ?

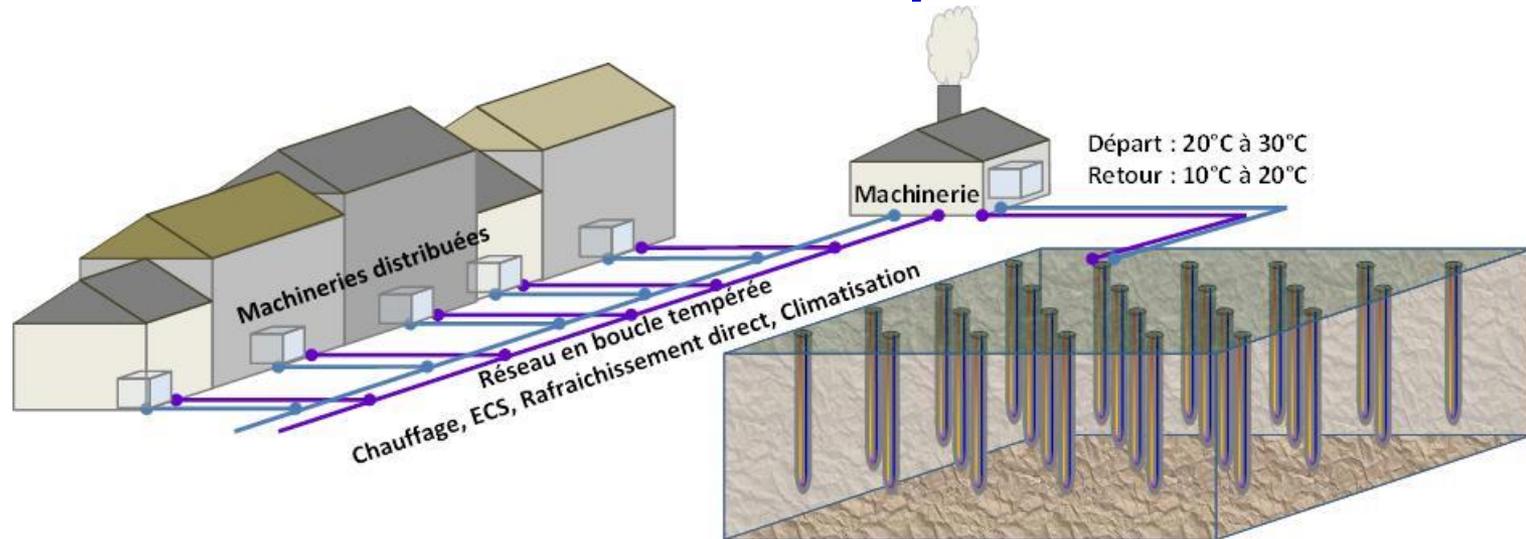


En milieu urbain, l'enjeu peut devenir très 'concurrentiel' ...

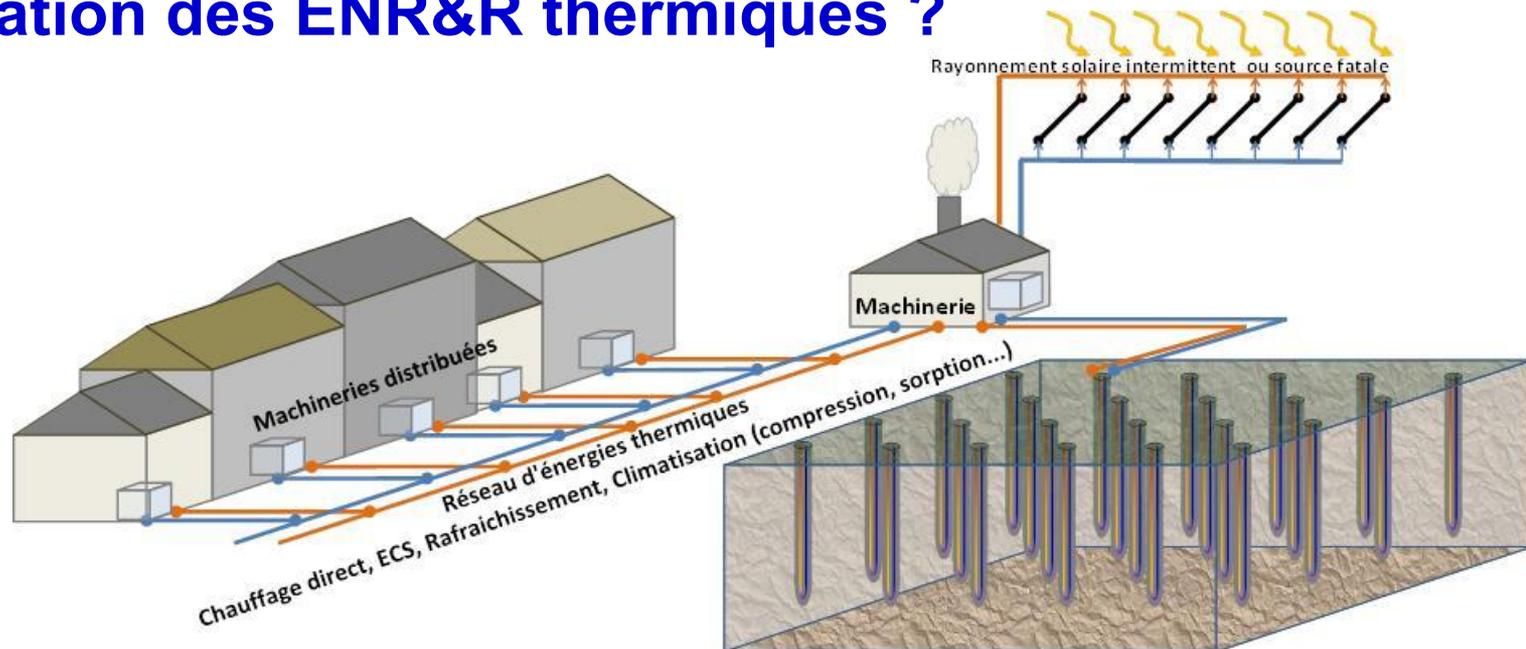


...Probablement des règles à piloter en local.

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

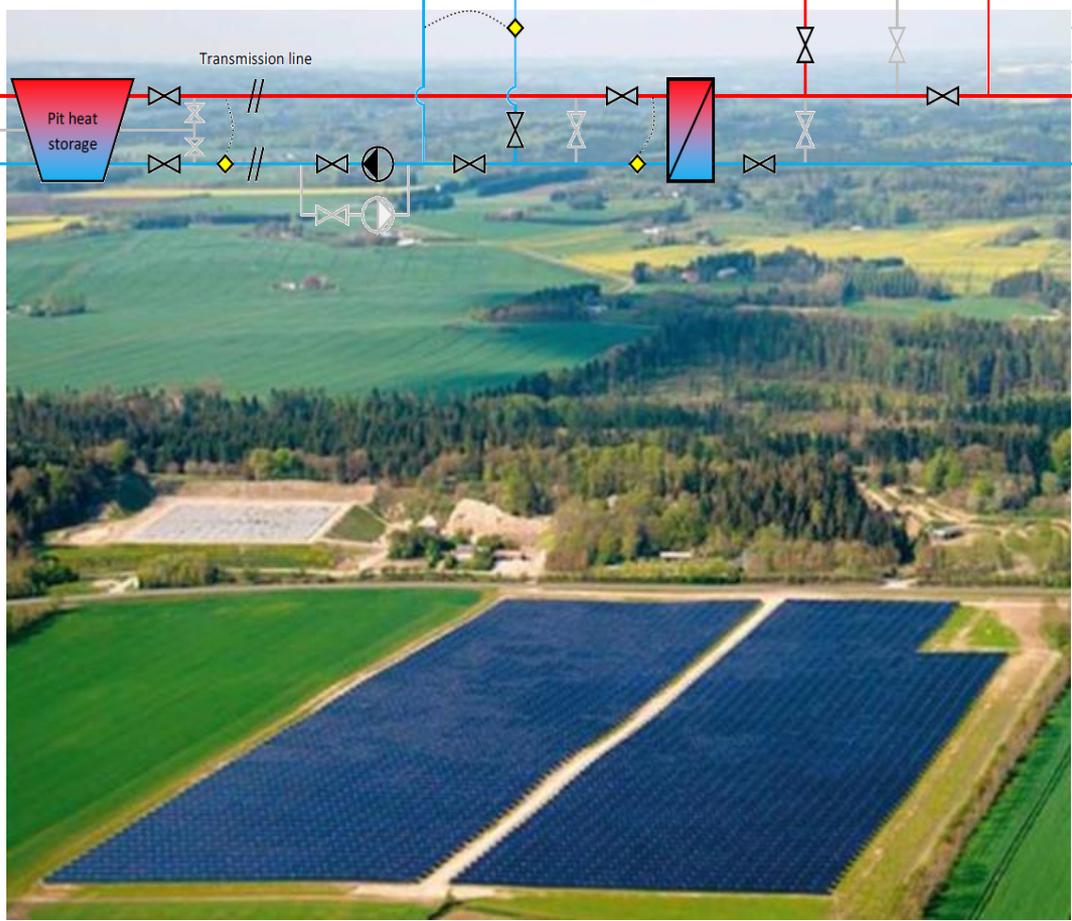
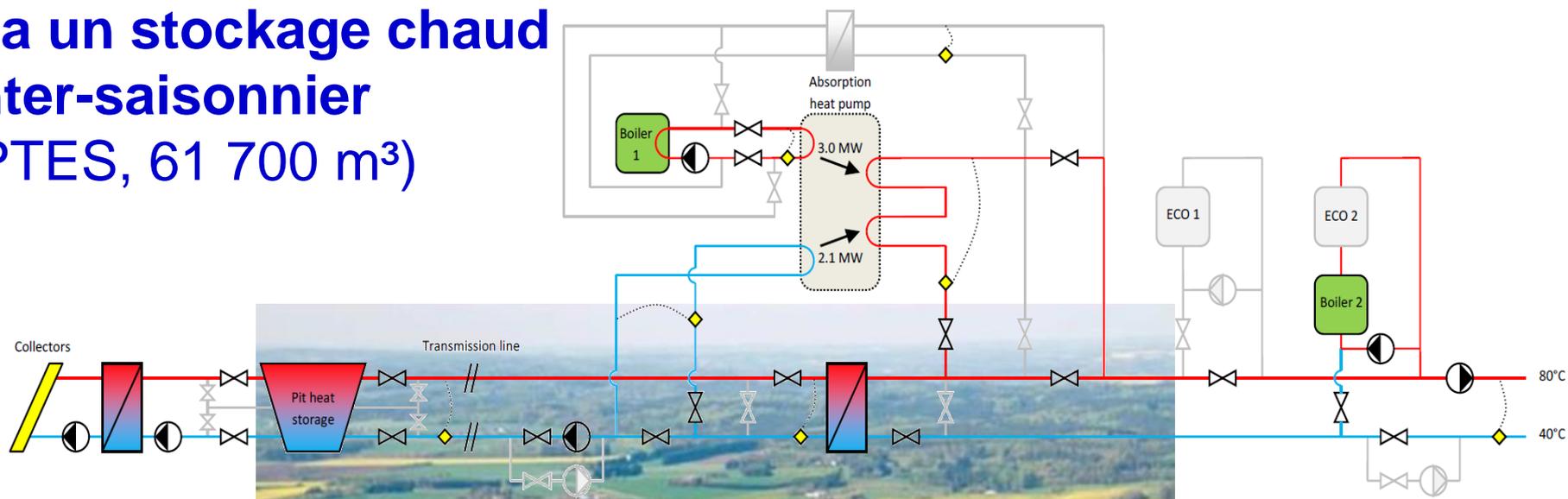


... ni valorisation des ENR&R thermiques ?



Ex. : Dronninglund, Danemark

Valorisation de la chaleur solaire (37 573 m²) via un stockage chaud Inter-saisonnier (PTES, 61 700 m³)



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

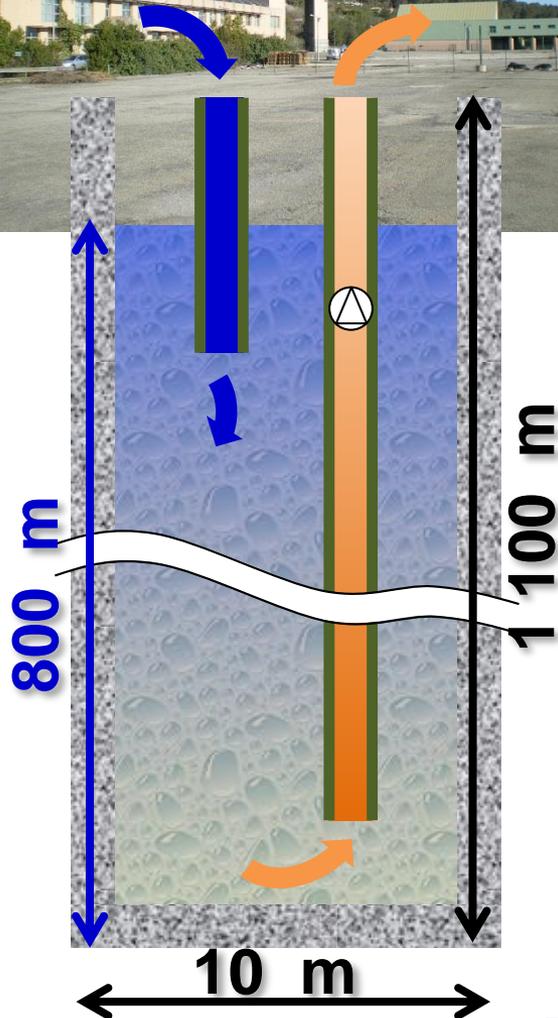
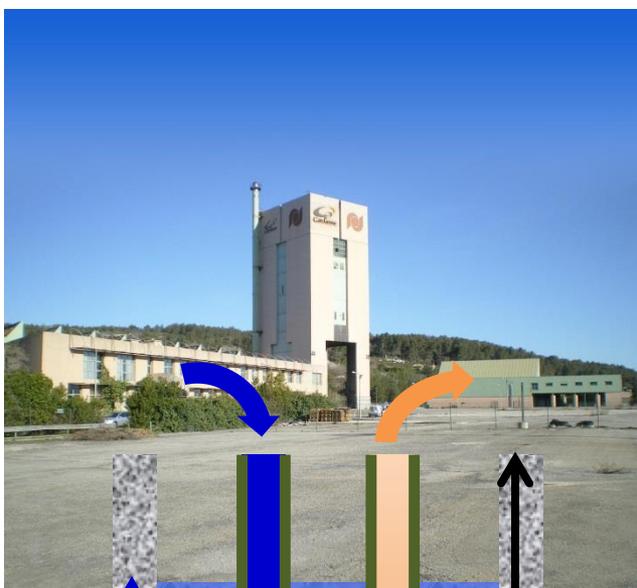


Géosciences pour une Terre durable

brgm



Utiliser un puits minier en stockage

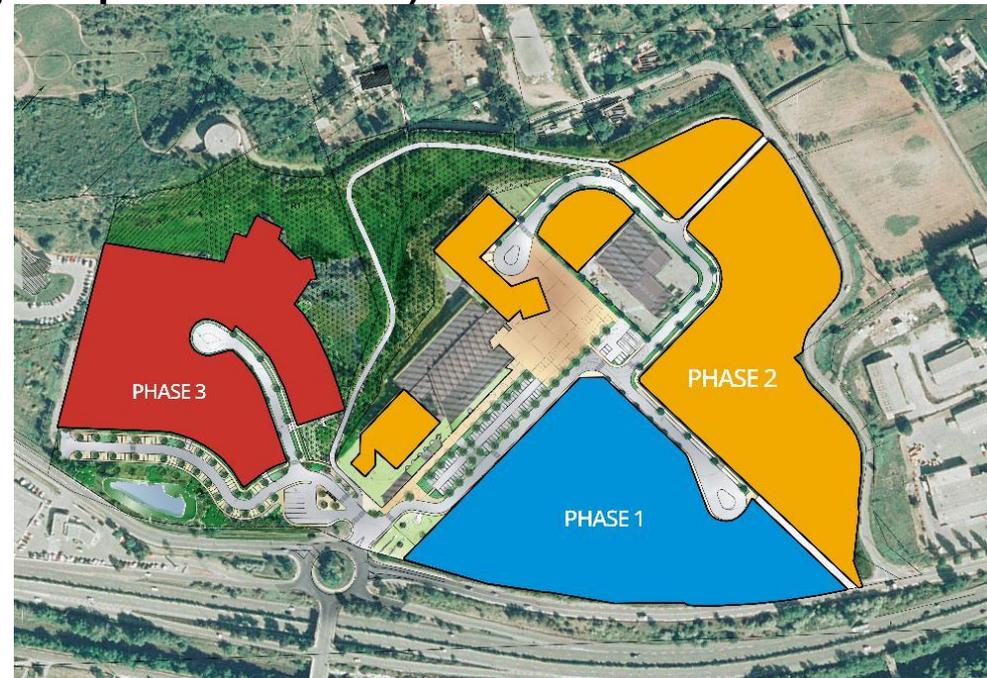


- > L'ancien Puits Y. Morandat :
un des plus profonds en Europe
= patrimoine industriel
- > Plus de 60 000 m³ d'eau
(puits ≈ étanche)
- > Stock saisonnier envisageable :
 - Eau : 1.1 GWh (ΔT moyen 15°C)
 - Encaissant : 0.2 GWh (ΔT moyen 5°C)
 - Total stock saisonnier : 1.3 GWh

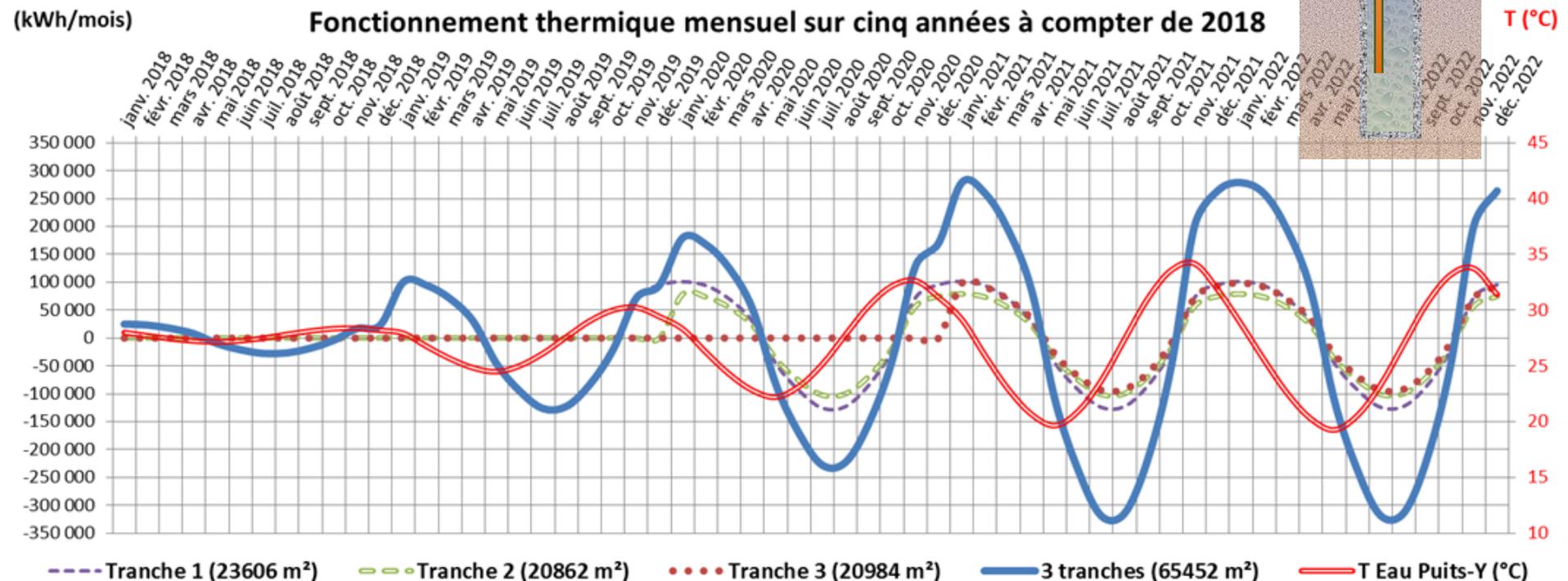
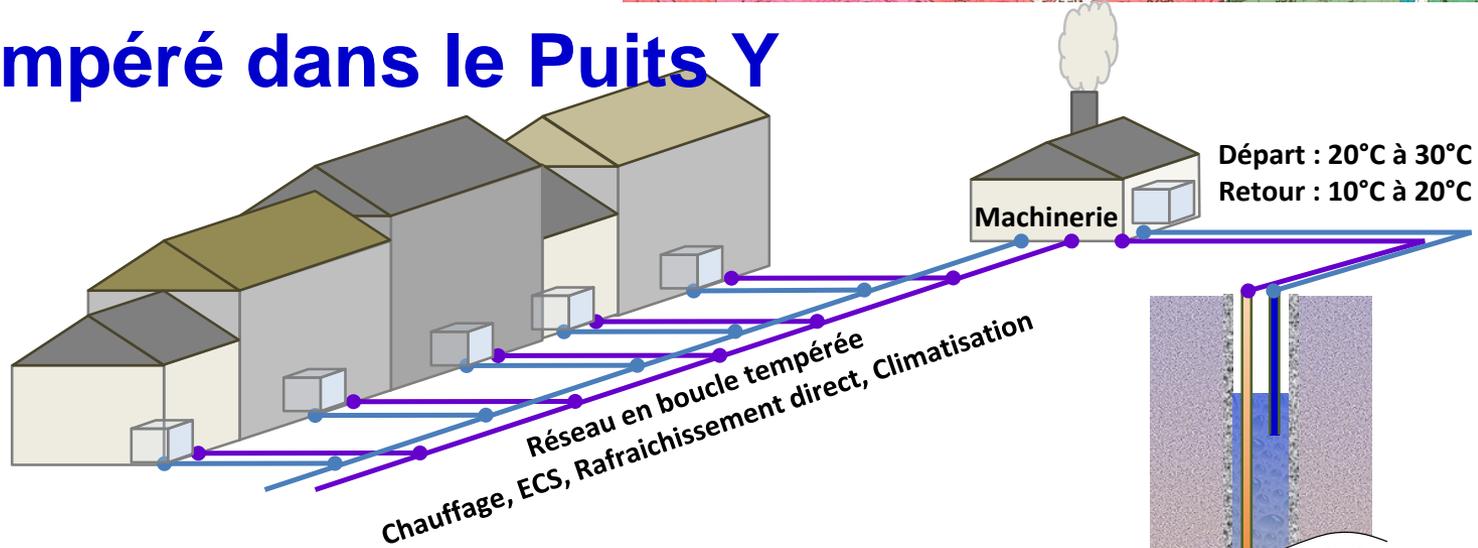
Pré faisabilité technique



- **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 m² à 80 000 m² (jusqu'à 50 lots)**
- **Réseau primaire**
- **Machineries distribuées**
- **Revalorisation des rejets**
(chaud ou frais)
- **Appoints centralisés**
(chaud ou frais)

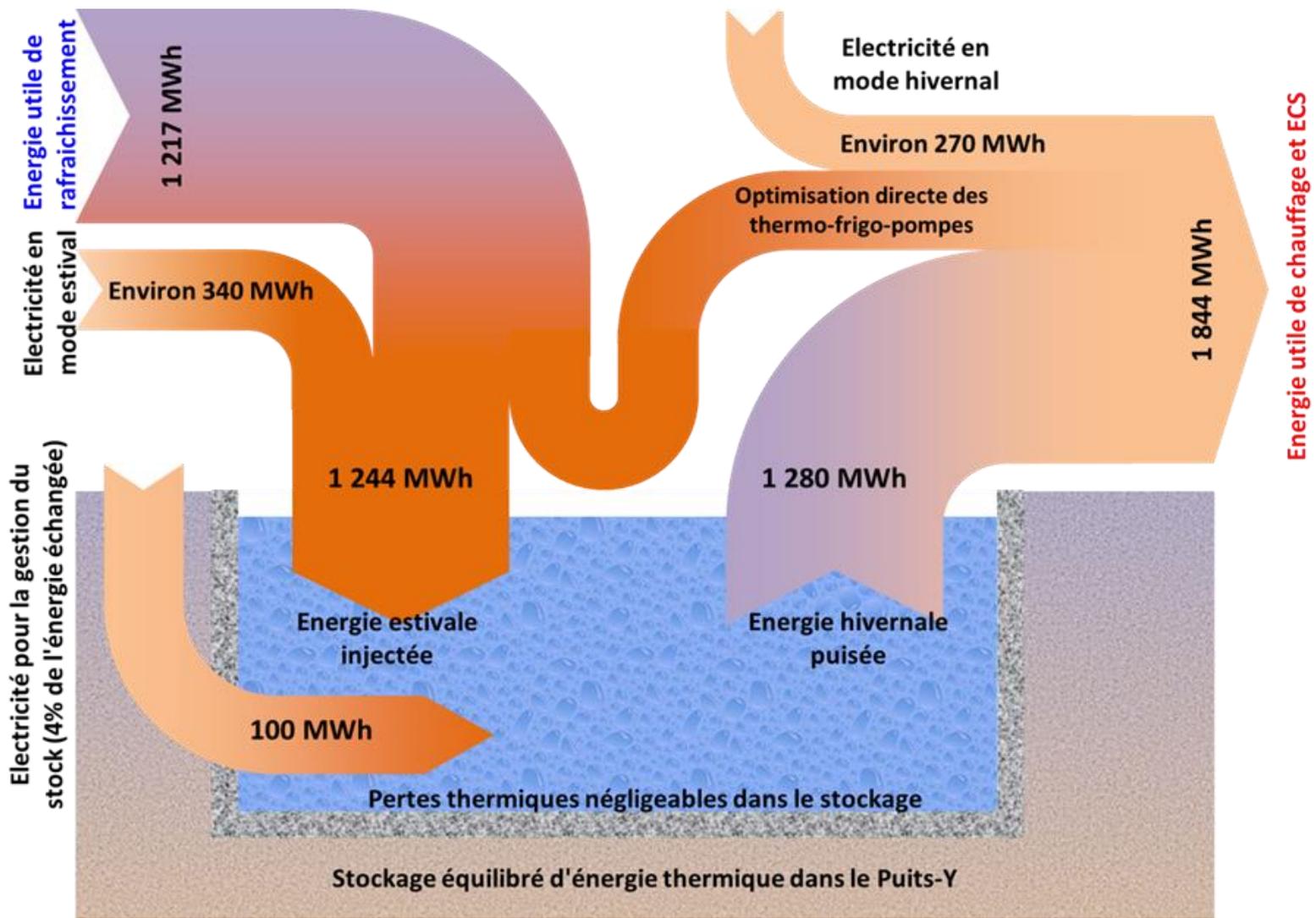


Scénario 1 : Stockage tempéré dans le Puits Y

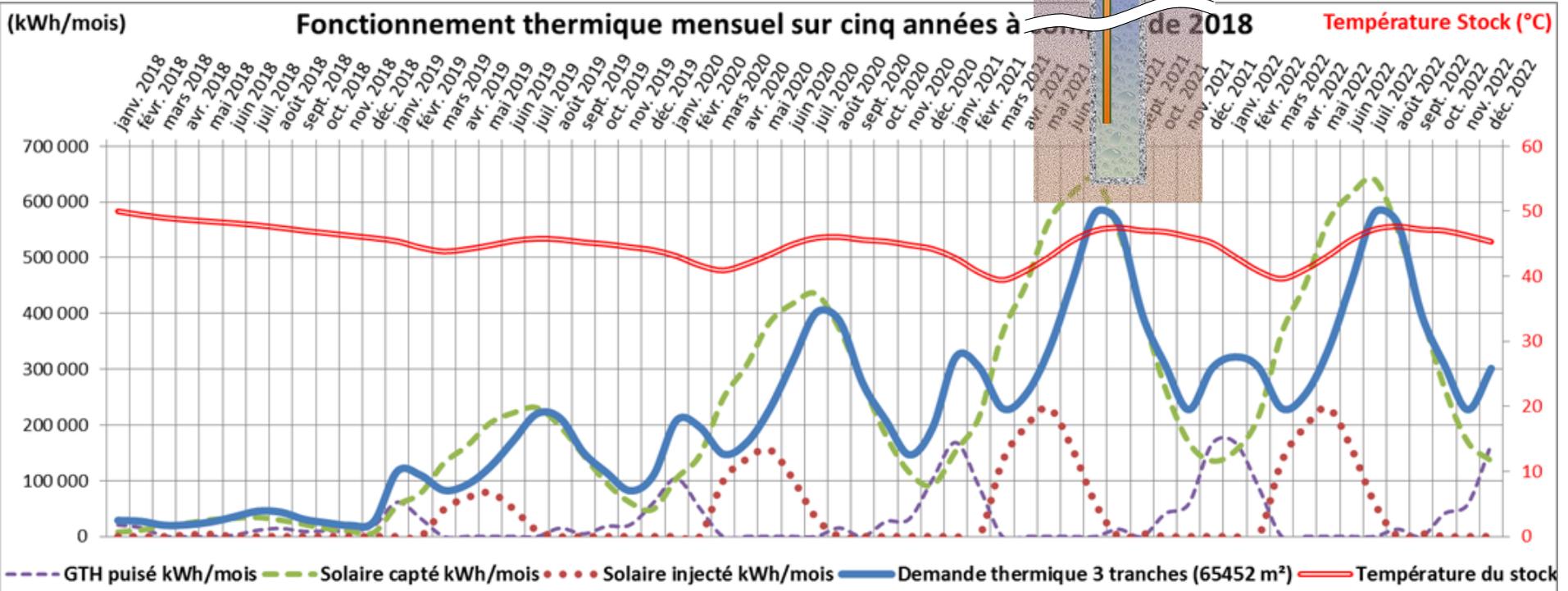
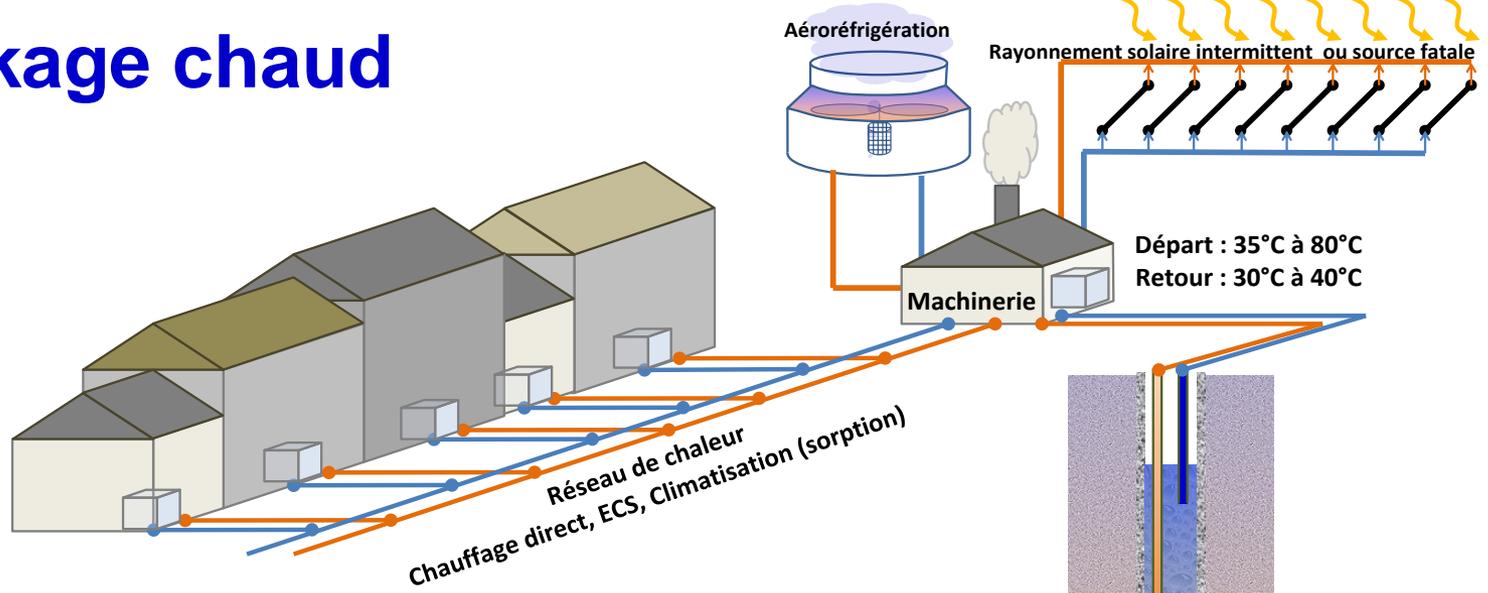


Bilan du Scénario 1 :

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

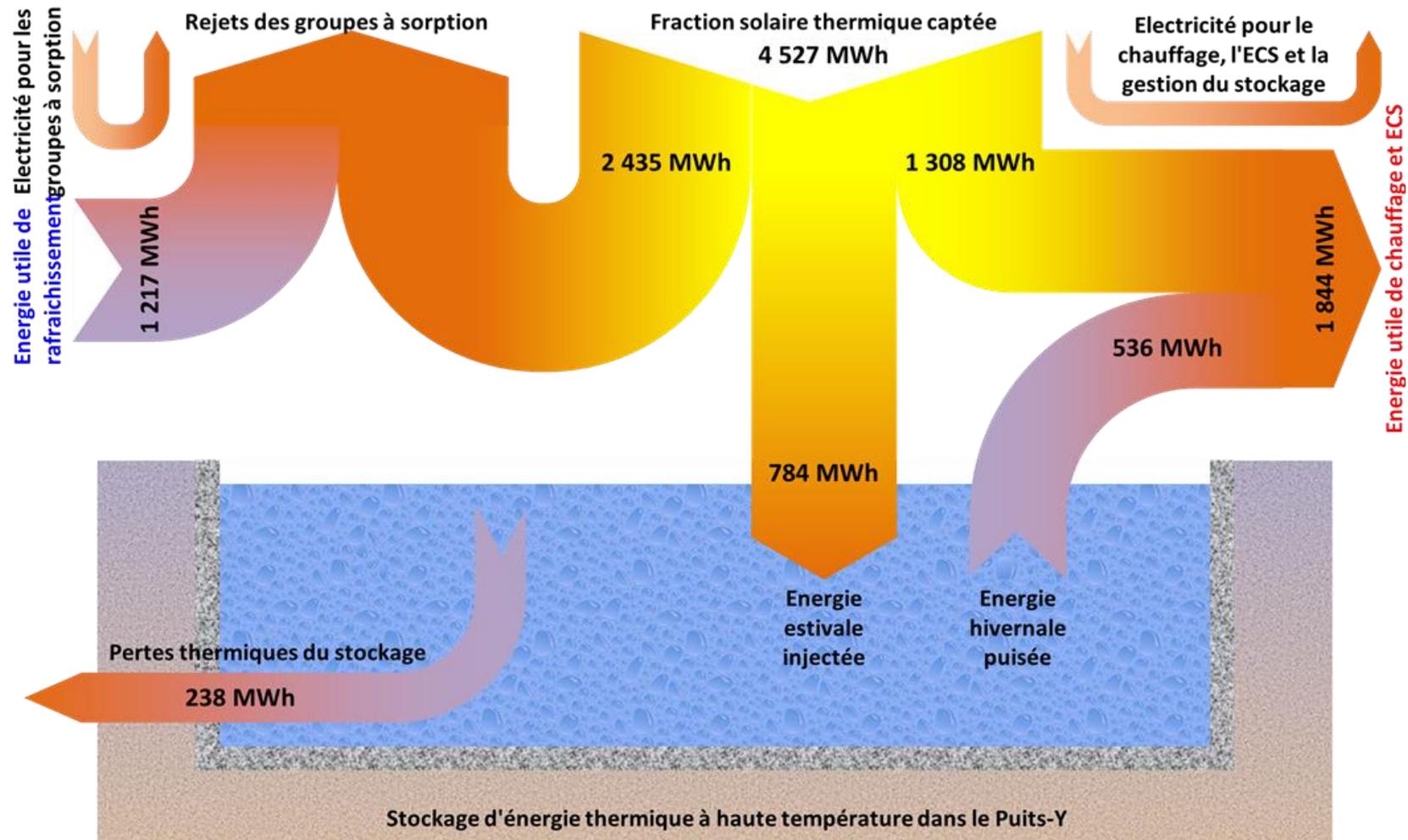


Scénario 2 : Stockage chaud

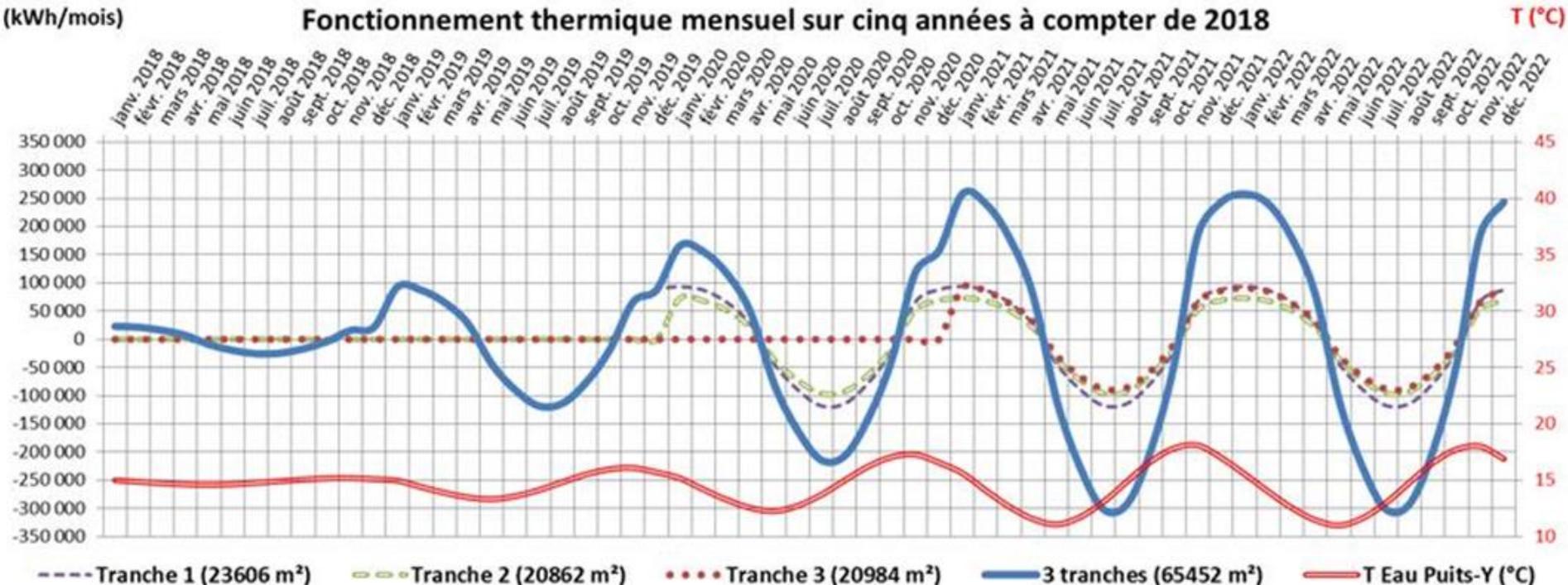
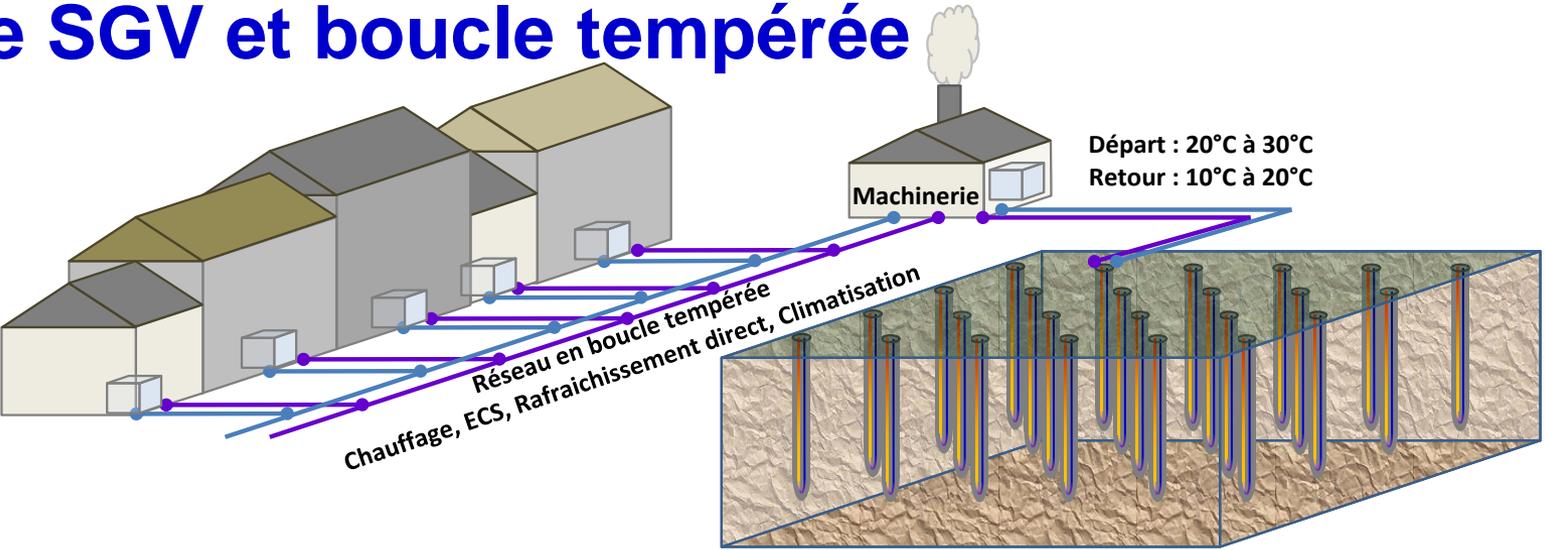


Bilan du Scénario 2 :

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

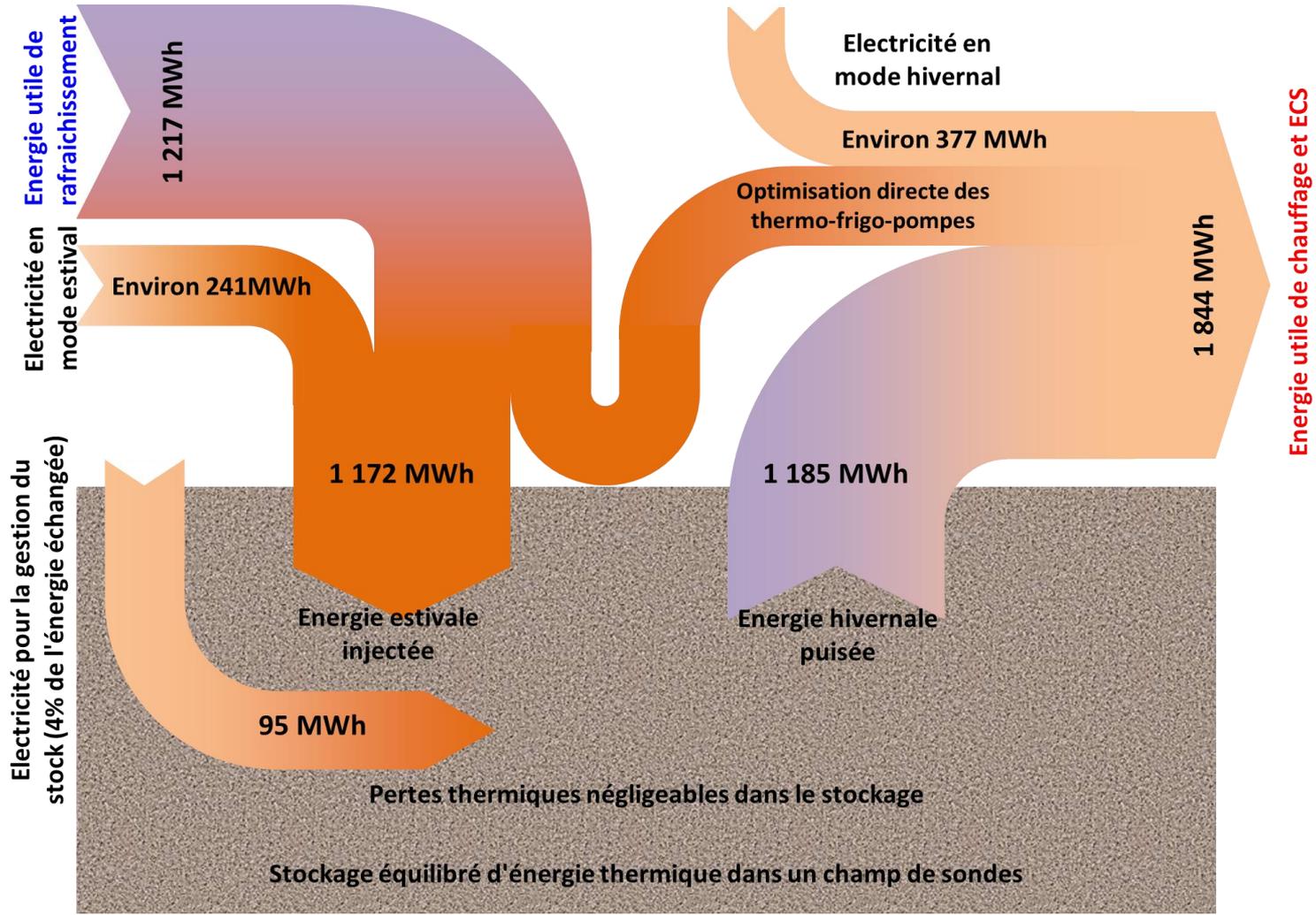


Scénario 3 : Champ de SGV et boucle tempérée



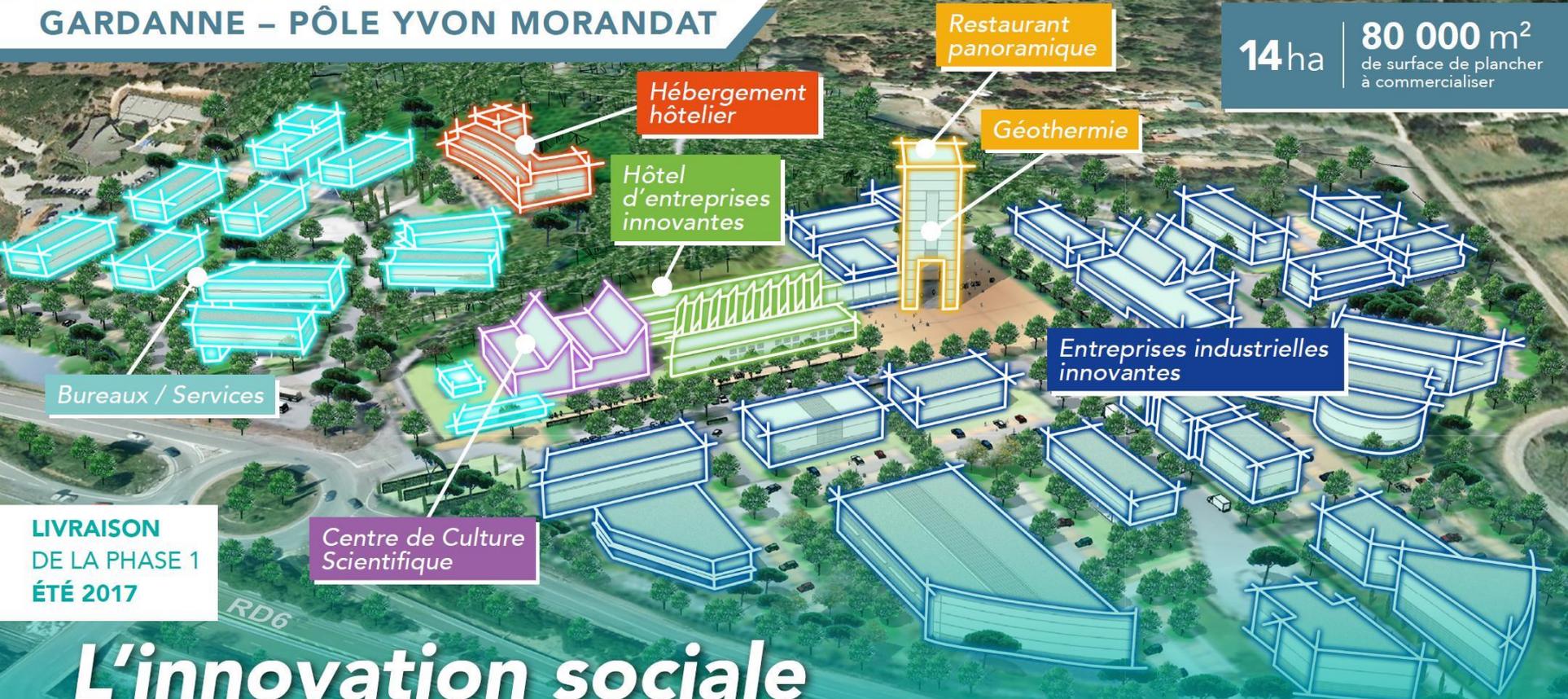
Bilan du Scénario 3 :

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



GARDANNE – PÔLE YVON MORANDAT

14 ha | 80 000 m²
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

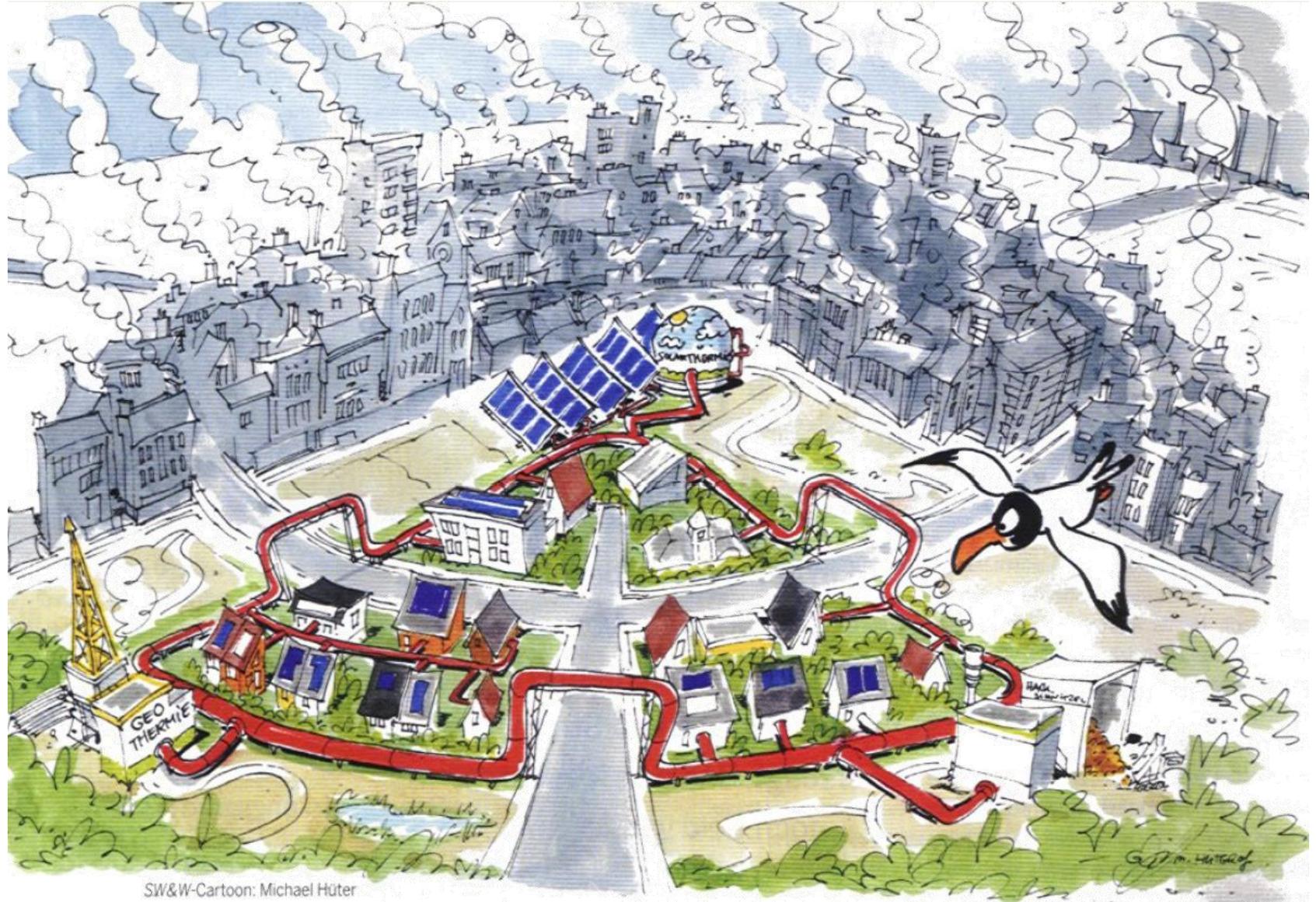


- Conclusion -

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.



SW&W-Cartoon: Michael Hüter

Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm