



JNES-2017

*Stockages saisonniers
pour le confort thermique des locaux*

—
*Illustration avec la reconversion
de l'ancien Puits minier Y. Morandat
à Gardanne*

—
Hervé Lesueur



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Mots clefs

- **Stockage géologique saisonnier $\neq$ Géothermie**
 - ⇔ **Gestion de stocks d'énergie(s) thermique(s)**
- **Réseaux urbains : Chaud / Tiède et Frais / Froid**
 - ⇔ **Réseaux d'énergie(s) thermique(s) & Boucle tempérée**
- **Machineries thermodynamiques (pompes à chaleur)**
 - ⇔ **Hybrider / Combiner des sources ENR& R (= doper les rendements)**
Le plus évident : Solaire + Stockage géothermique (+ électricité)

Objectifs

- **Favoriser une moindre dépendance énergétique**
 - ⇔ **Revalorisation locale des énergies excédentaires ou perdues**
- **A commencer par le confort thermique des bâtiments**
 - o **A l'échelle du quartier (de 10 000 à 100 000 m² SHON)**
 - o **Stockages saisonniers (typiquement 0.2 à 1.5 GWh par saison)**
 - o **Puissance livrée : de 0.2 à 2 MW (chaud et frais)**



Géothermie

VS

Stockage géologique
d'énergie(s) thermique(s)

Géothermie ≠ Renouvelable



➤ Sans aide à la 'régénération thermique' des stocks

⇒ Baisse des puissances & énergies accessibles

⇒ Epuisement assez rapide des réserves (20 à 40 ans)

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

➤ GTH profonde $\approx$ puisage 15 à 40 kWh.an.m² (ramené à la surface)
(Au-delà risque d'épuisement rapide de la ressource)

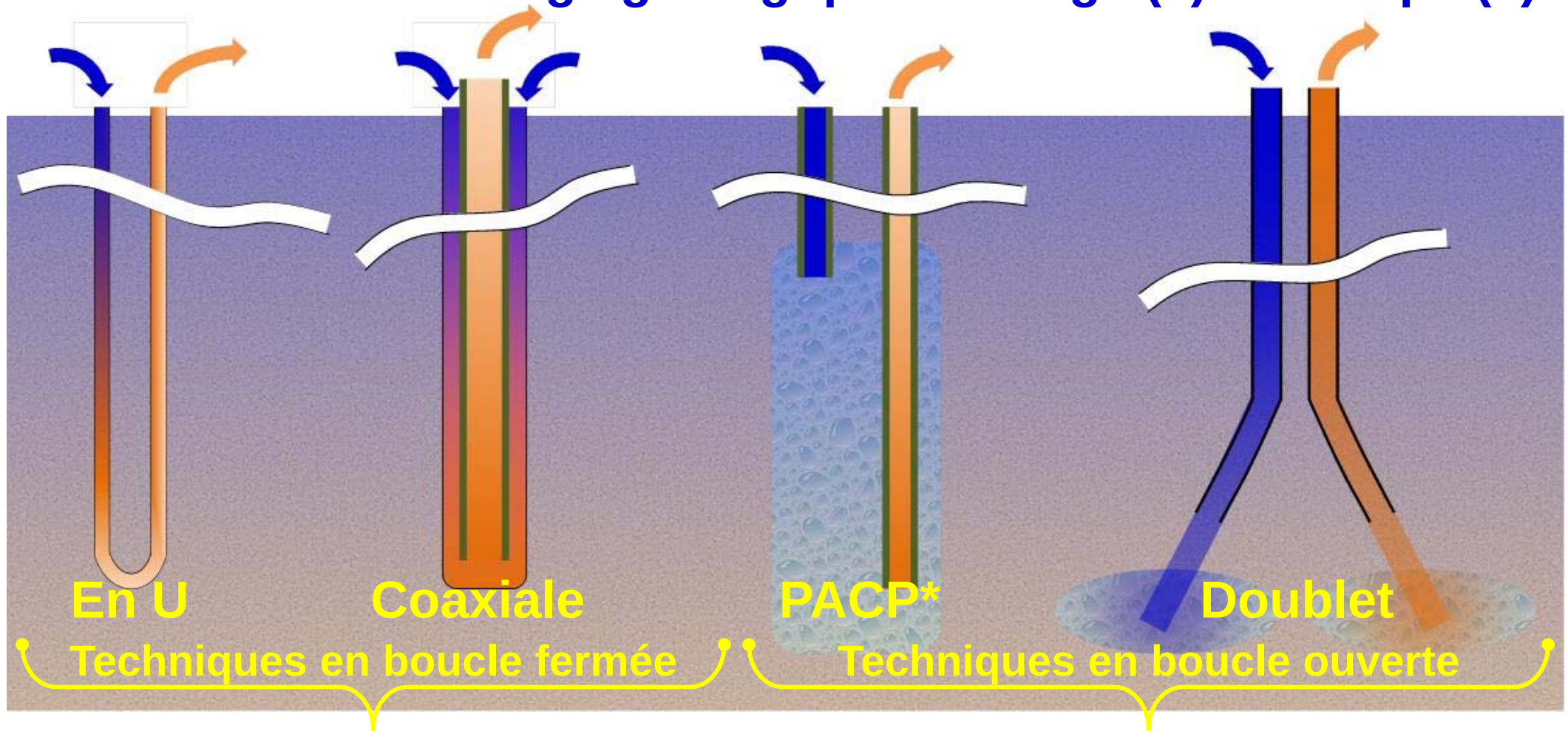
➤ GTH superficielle $\approx$ puisage 50 à 100 kWh/an.m²
(Si les échanges thermiques avec l'atmosphère restent possibles)

➤ A retenir : Géothermie $\Leftrightarrow$ Pas vraiment renouvelable
Néanmoins (sur du court / moyen terme) :

➤ En profondeur : 'Stocks' thermiques = 'considérables'
⇒ Utilisations directe pour le chauffage, voire l'électricité

➤ Proche de la surface : Echanges avec l'atmosphère $\approx$ régénération
⇒ Utilisation directe pour le rafraichissement (geocooling)
⇒ Autres usages avec des PACg (= machinerie thermodynamique)

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



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

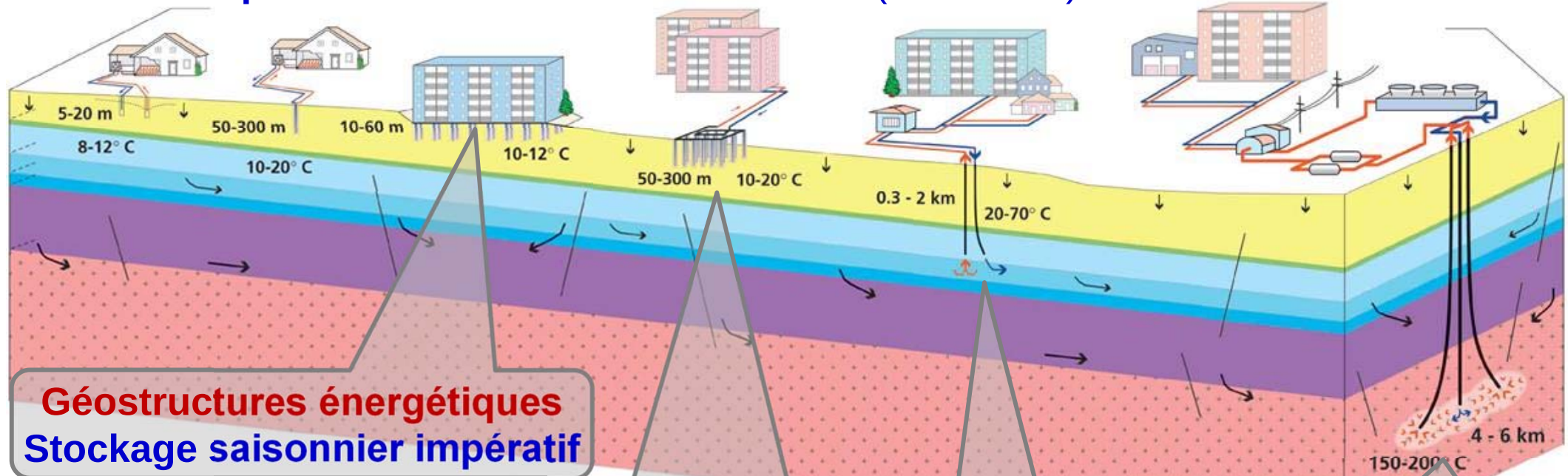
Ouvrages de pompage et réinjection
⇒ **Stockages en aquifère**
(ATES, aquifer thermal energy storage)

Les formations du sous-sol : Bonne aptitude 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
(Démarre en France)

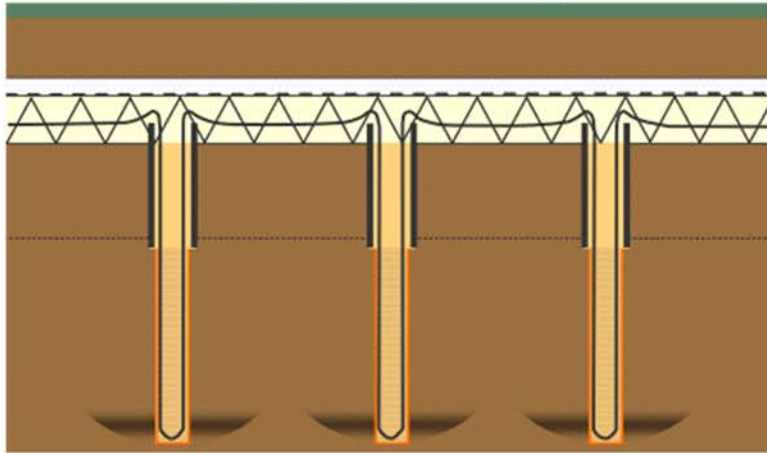
La technique EGS
Stockage à envisager
(R&D à engager)

Doublet géothermique
Stockage connu de longue date
(tout juste esquissé en France)

Stockage saisonnier ⇌ Accessible

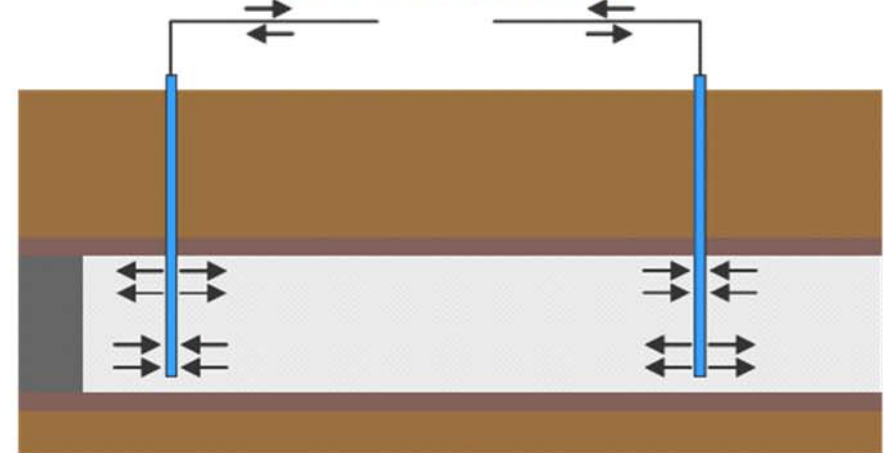


Borehole thermal energy storage (BTES)
(15 to 30 kWh/m³)



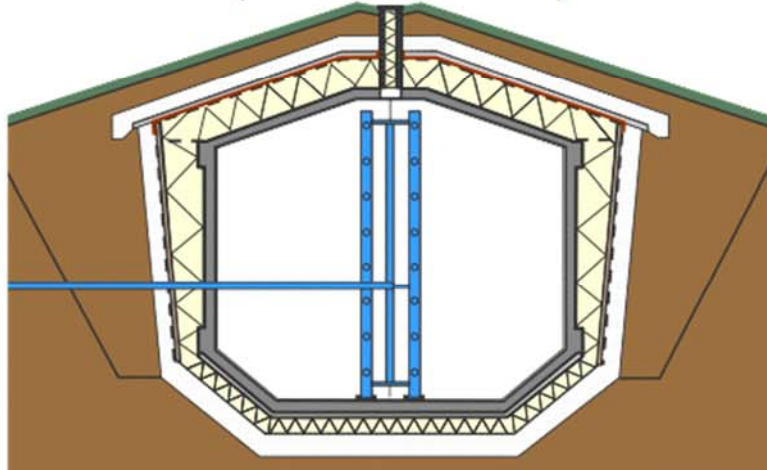
1 Stock unique : 20 000 m³ à 2 000 000 m³

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



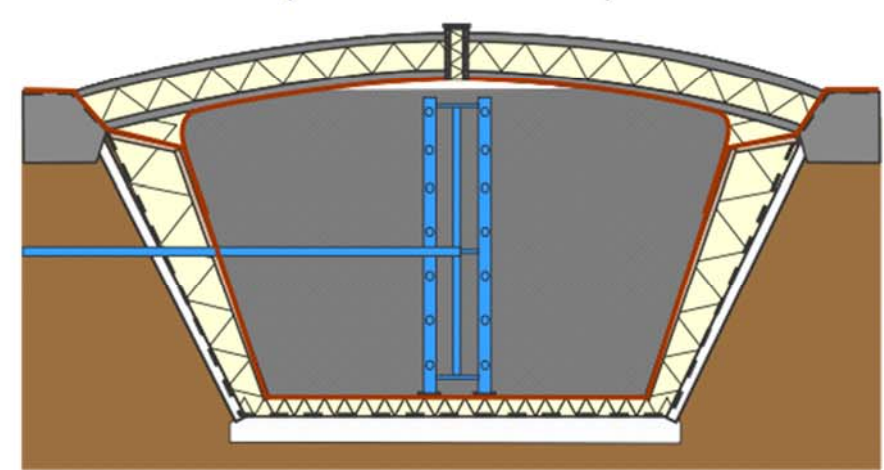
2 Stocks : 40 000 m³ à 1 000 000 m³ chacun

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



1 Stock unique : 2 000 m³ à 20 000 m³

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



1 Stock unique : 2 000 m³ à 100 000 m³

Solaire + STES = Courant en Europe du Nord



Systematiser le
stockage géologique saisonnier
est-il réaliste ?

= OUI



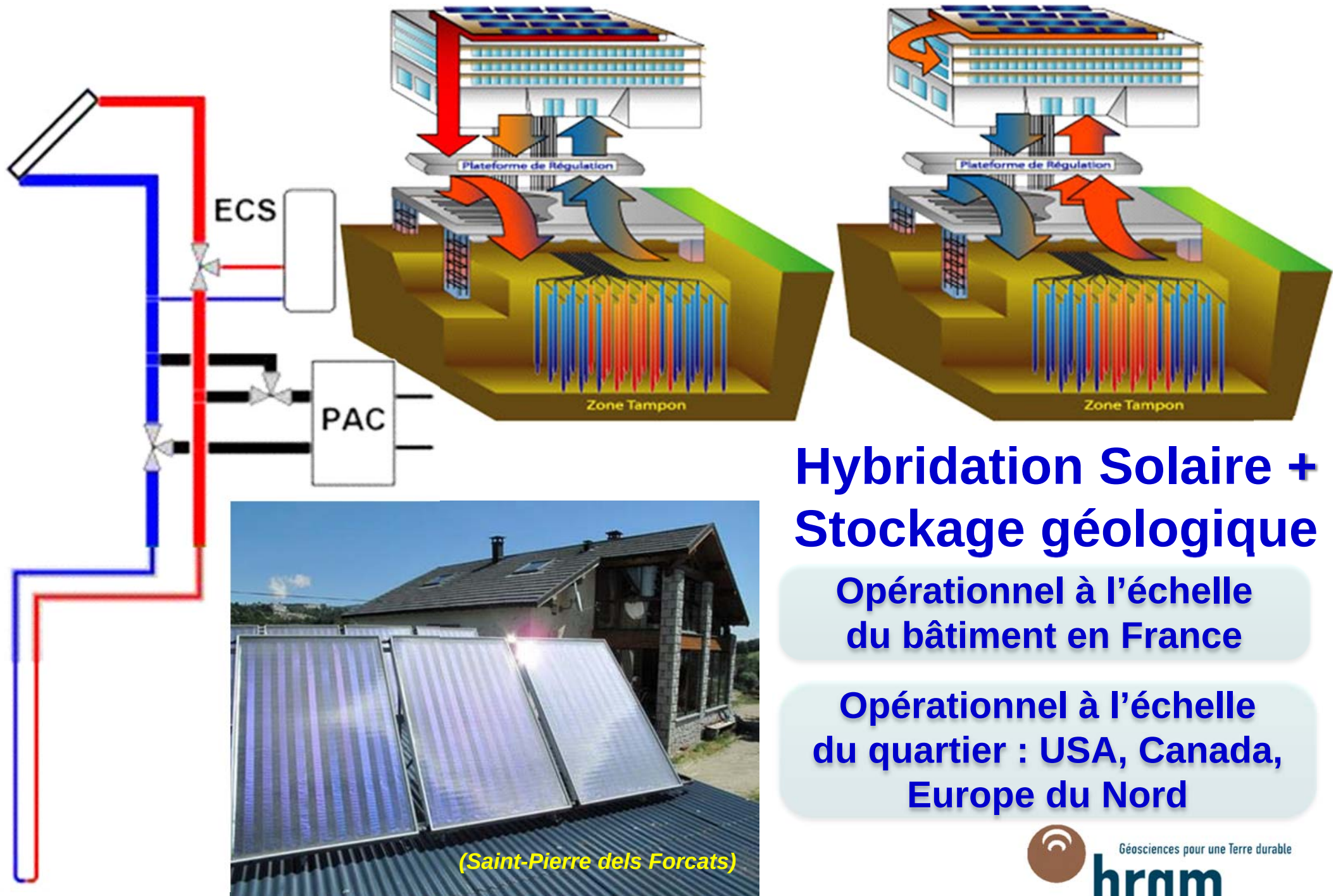
Surtout hybridé avec
du solaire thermique
(même en secteur urbain dense)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Validé à l'échelle du bâtiment



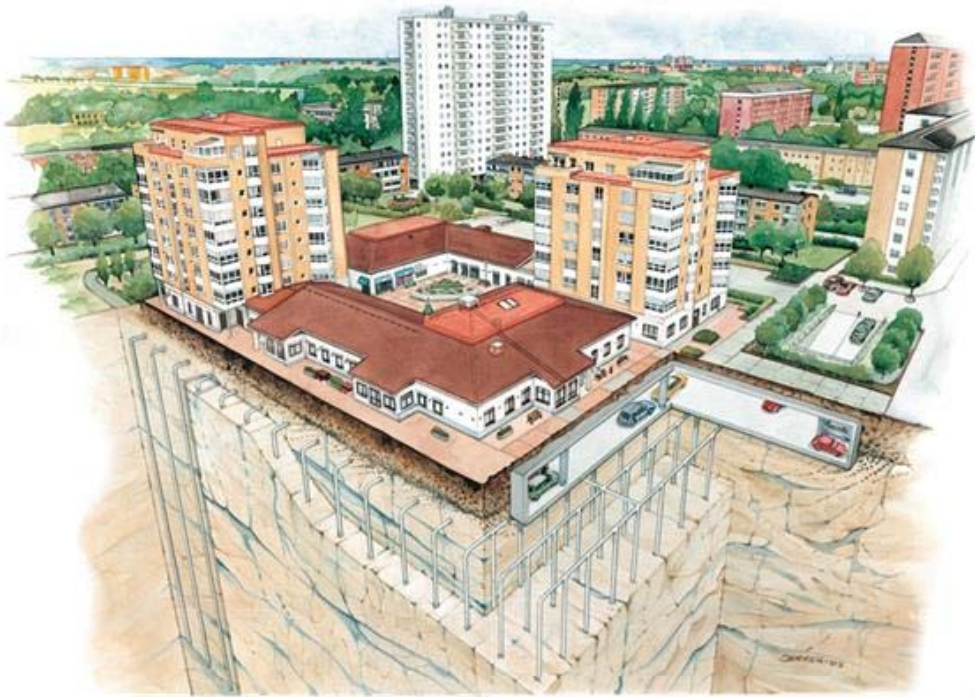
Et à très grande échelle ?



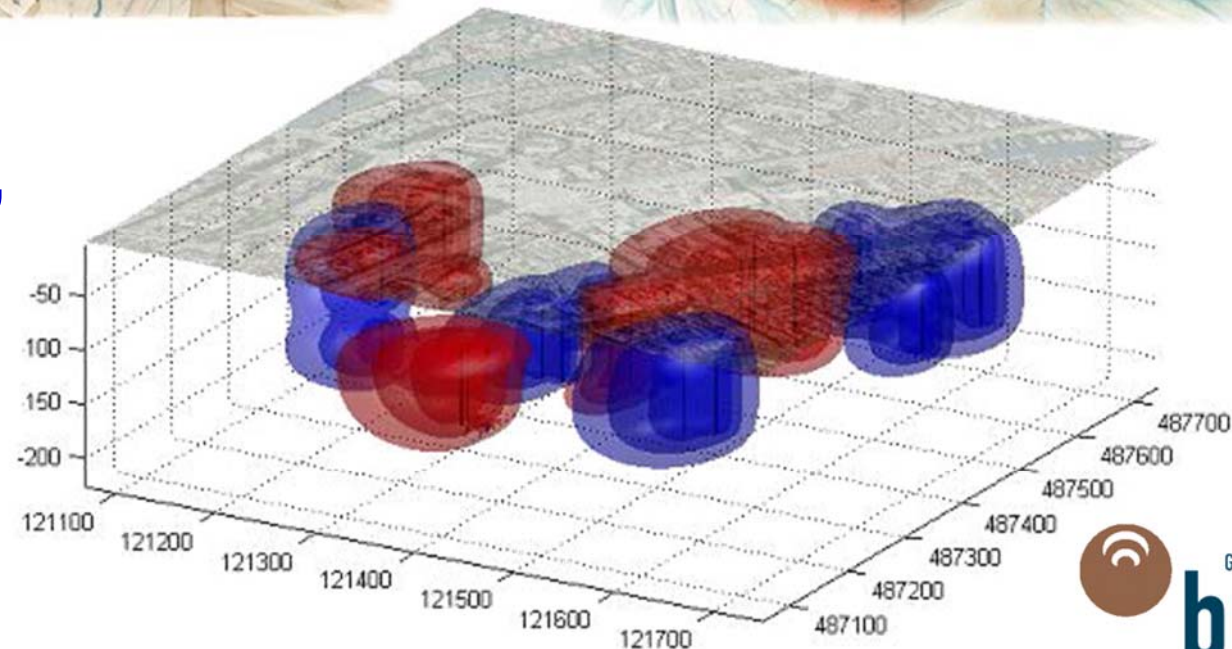
Exercice : Paris intra-muros (2.22 millions d'habitants, 105 km²)

- **Energie utile pour le confort thermique** (RT-2012, indicatif)
 - SHON habitat : 44 400 000 m² (≈ 20 m² / habitant)
 - ECS : 25 kWh/m².an ($\approx 1\,110$ GWh/an, 500 kWh/an.habitant)
 - Chauffage : 15 kWh/m².an $\Rightarrow$ (≈ 666 GWh/an)
 - Climatisation / rafraichissement : 10 kWh/m².an (≈ 444 GWh/an)
- **Solaire thermique nécessaire : 2 220 000 m²** (≈ 900 GWh/an)
 - Injection dans le sol pour compenser le déséquilibre chaud / frais
 - **1 m²/habitant en solaire thermique = 2.1% de l'aire** (5% de la SHON)
- **Stockage géothermique nécessaire : 79 000 000 m³**
 - **Epaisseur : 3m sous 100% de Paris, 30m sous 10%, 300m sous 1%**
- **Indicateurs du fonctionnement du réseau intelligent**
 - Consommation électrique : 315 GWh/an (TFP + pompage)
 - Puisage géothermique : Chauffage + ECS ≈ 310 MW thermique
 - Stockage géothermique : Froid ≈ 70 MW (hors TFP sur ECS)
 - Stockage géothermique : Injection Solaire ≈ 250 MW
 - **ΔT moyen Eté / Hiver du stockage $\approx 15^\circ\text{C}$**

Sous l'existant, subsisteront des difficultés, notamment de mise en place des stockages ...



... mais aussi pour 'organiser' durablement les stockages dans le sous-sol ...



Géosciences pour une Terre durable

brgm

... et alors que peuvent survenir



de possibles conflits d'usage :

- Voies de circulation
- Eau potable
- Carrières
- ...



⇒ Il devient urgent
d'anticiper la mise
en place de moyens
de stockage

A detailed geological map of the area around Monte Regine. The map shows various geological units in different colors: pink for the main area, green for the right side, and blue for the top. Topographic features include Monte Regine (1313m), Monte di Felice (1195m), and Monte di Pozzo (1064m). The map also shows the location of Casa Martignola and the town of Todi. The map is oriented with North at the top.

Machinerie(s) thermodynamique(s)

Stockage(s) périodique(s)



Revalorisation locale des énergies thermiques excédentaires ou perdues



Valorisation locale des ENR&R



⇔ Réseau + Machinerie(s) thermodynamique(s)

➤ **En hiver : des excédents récupérables sont froids**

➤ Usage direct : Energie livrée $\approx$ Energie disponible ou achetée

➤ Pompes à chaleur : Energie livrée $\approx$ Energie disponible ou achetée
(60% à 75% du chaud livré) + **électricité** (compresseur des PACg)

➤ **En été : des excédents récupérables sont chauds**

➤ Usage direct : Energie disponible $\approx$ Energie prélevée dans le bâtiment = rafraichissement (geocooling)

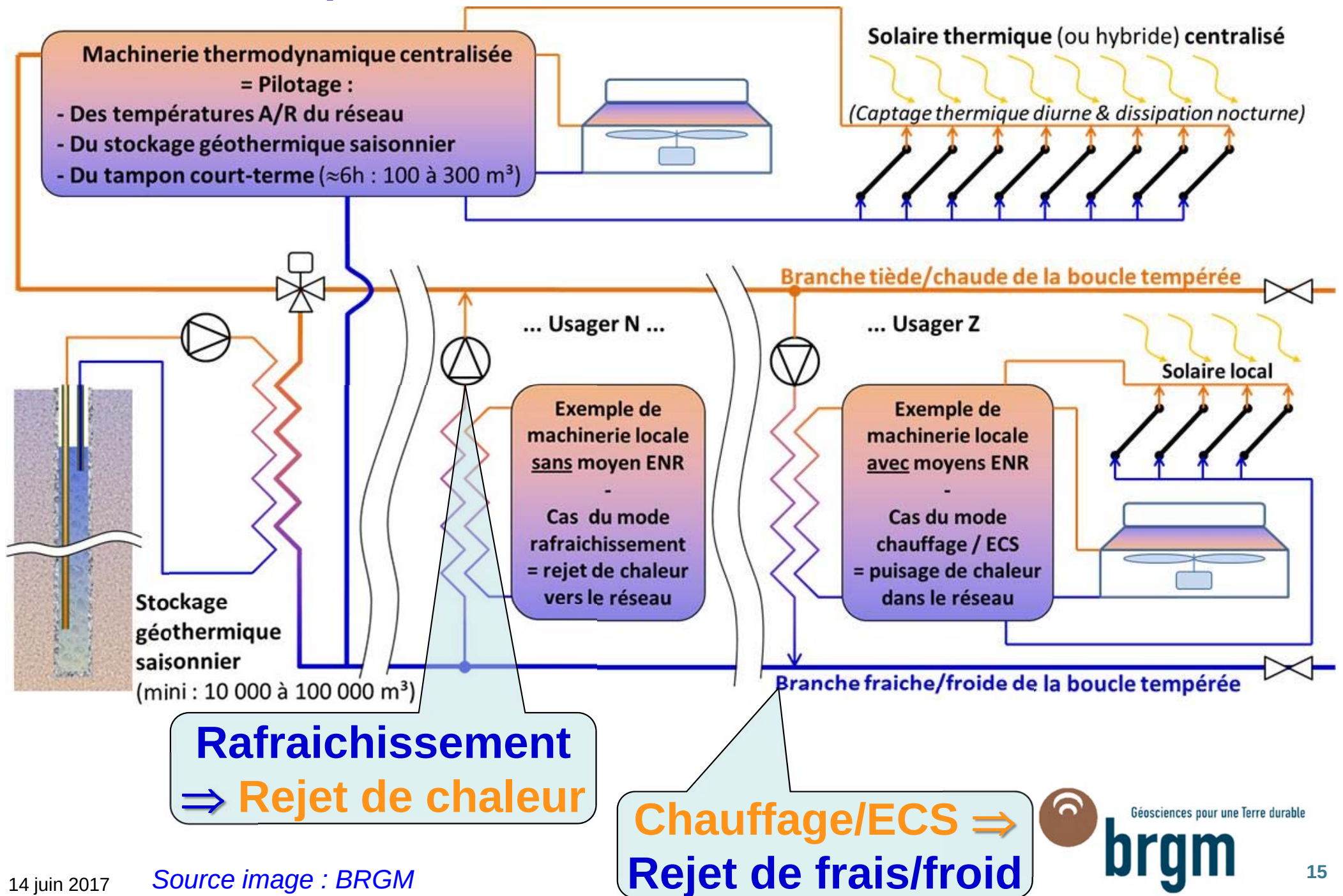
➤ Avec des groupes (PACg) : Energie disponible $\approx$ Energie prélevée dans le bâtiment + **électricité** (= 125% à 140% du froid livré)

➤ **‘Smart energy network’ : Revaloriser en local l’énergie disponible avant de stocker dans le sous-sol**
⇔ **il faut donc des ‘clients’**

⇒ **Concevoir un réseau ‘malin’**

Réseau 'malin' pour un quartier

⇔ 'Boucle tempérée' ⇔ Redistribution des excédents





Actualité

-

Nouvelle zone d'activité Yvon Morandat à Gardanne (requalification urbaine)

-

(infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65723-FR.pdf)

Valoriser le patrimoine local :

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



www.ville-gardanne.fr/Parc-d-activites-du-Puits-Morandat



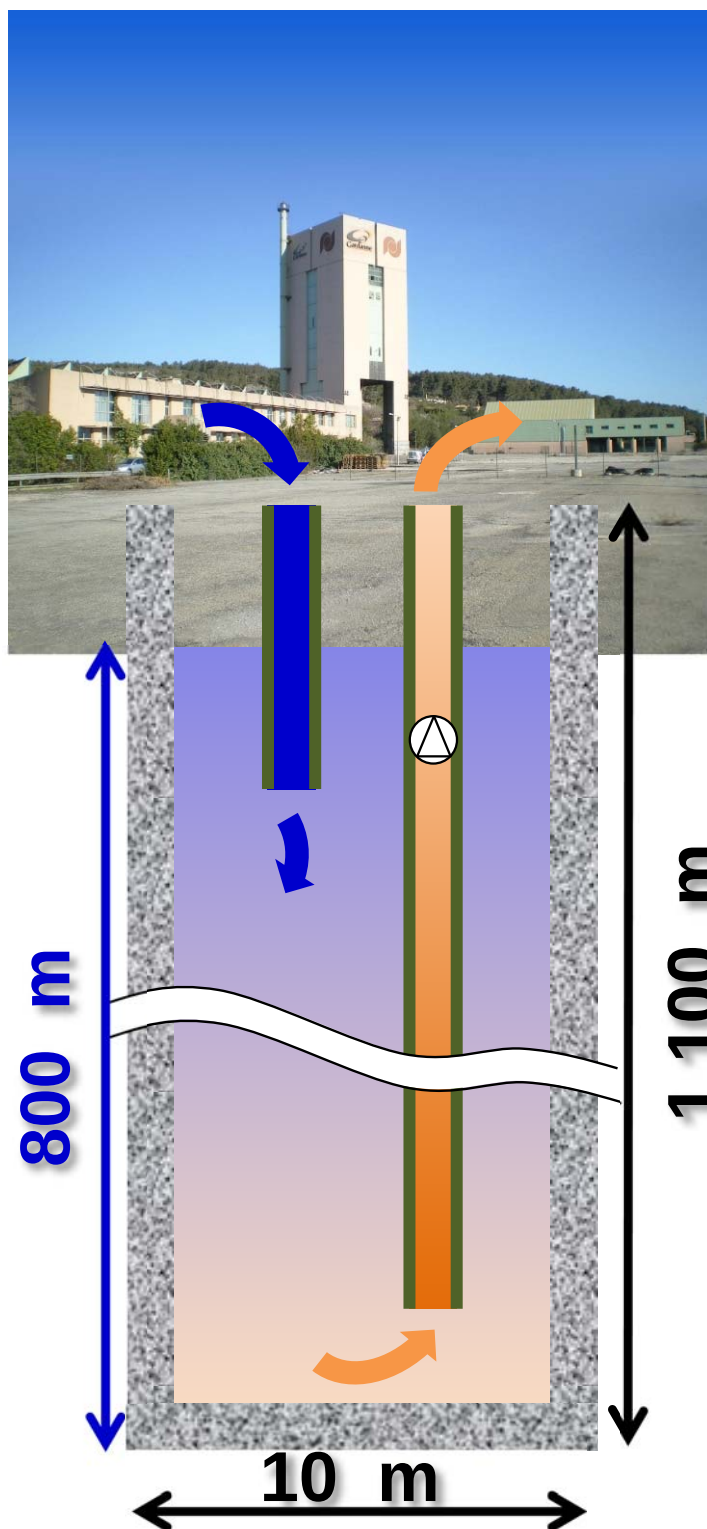
Utiliser un ancien puits minier en stockage (une première mondiale)

➤ L'ancien Puits Yvon Morandat :
un des plus profonds en Europe
= patrimoine industriel

➤ Plus de 60 000 m³ d'eau
(puits ≈ étanche)

➤ Stock saisonnier disponible :

- Eau : 1.1 GWh (ΔT saisonnier 15°C)
- Encaissant : 0.2 GWh
- Total stock saisonnier : 1.3 GWh



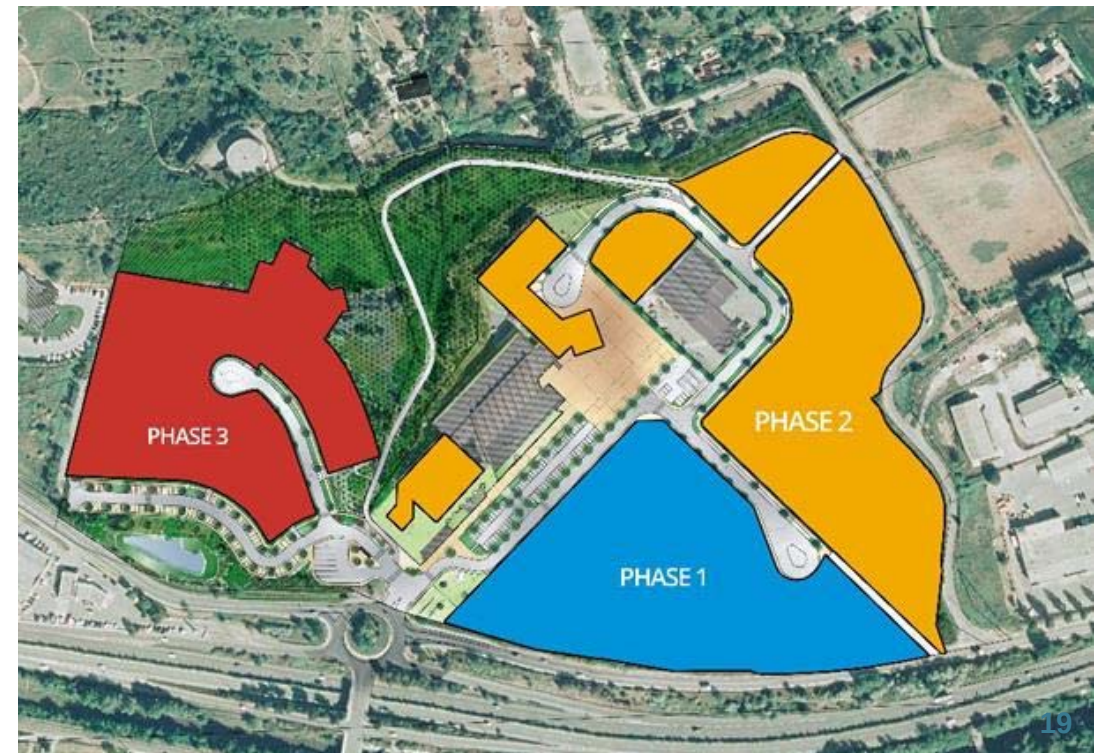
Pré faisabilité technico-éco



- **Scénario 1 : Boucle primaire tempérée**
- **Scénario 2 : Boucle chaude & 7 200 m² Solaire thermique**
- **Scénario 3 (=Repli) : Champ de sondes géothermiques**
(≈ idem scénario 1 mais transposable ailleurs)

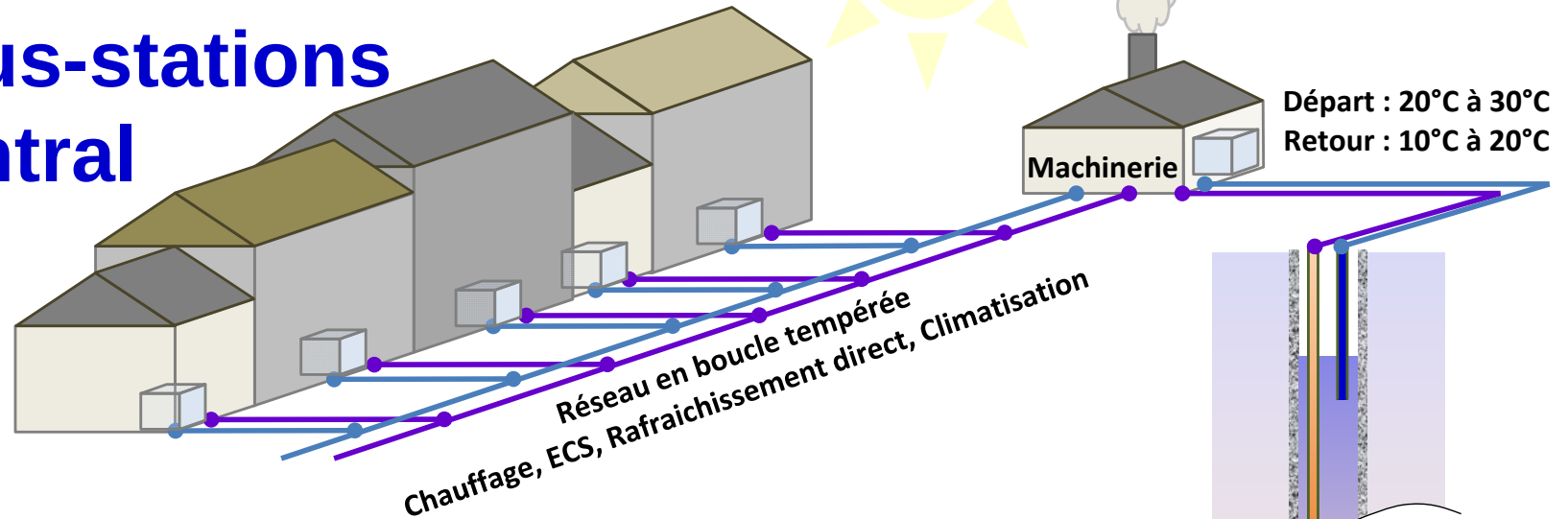
Conditions communes

- **De 65 000 m² à 80 000 m² SHON (jusqu'à 50 lots)**
- **Trois grandes phases de mises en service**
- **Réseau(x) primaire(s) et machineries distribuées**
- **Revalorisation en local des rejets (chaud & frais)**
- **Appoints centralisés au niveau du stockage dans le Puits Y (chaud & frais)**
- **Solaire PV (auto conso.) et/ou solaire hybride**



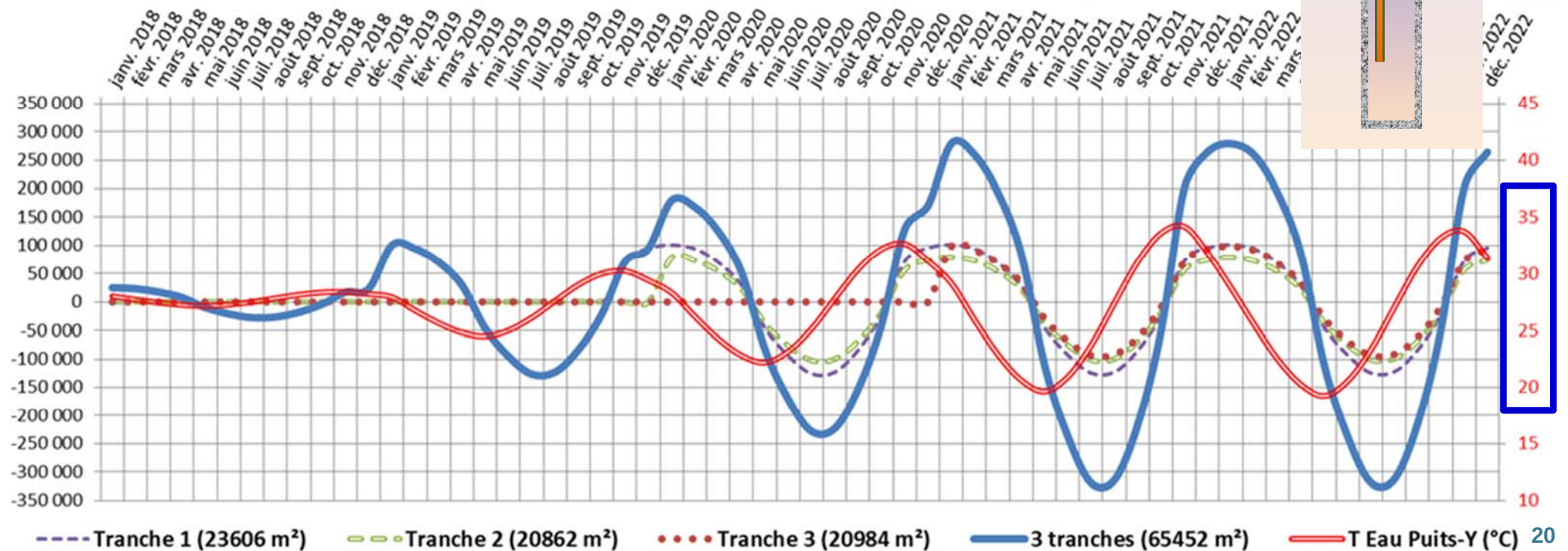
Scénario 1 : Stockage tempéré dans le Puits Y

- TFP en sous-stations
- TFP en central
- Solaire PV ou hybride ($\approx 300 \text{ m}^2$)



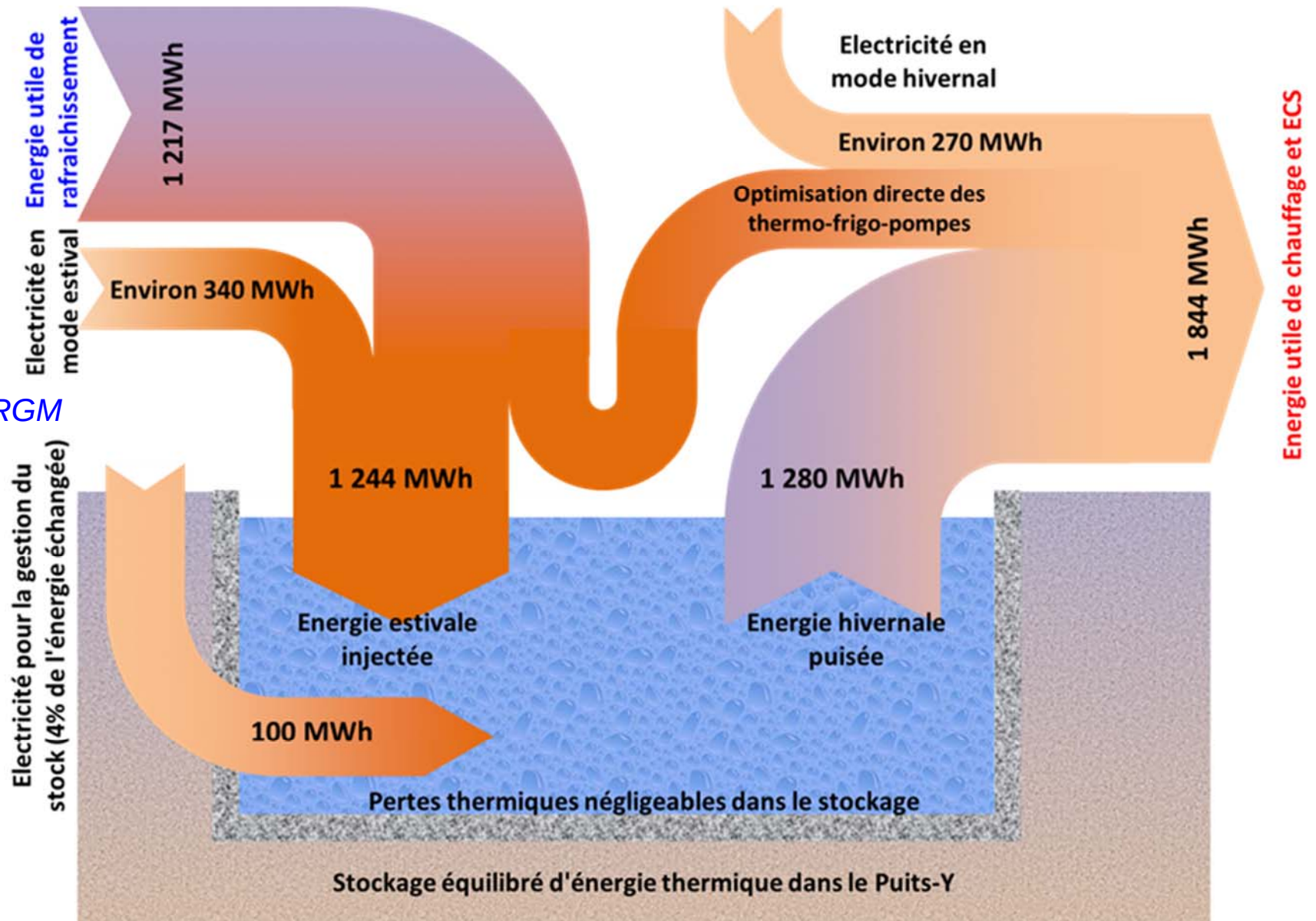
(kWh/mois)

Fonctionnement thermique mensuel sur cinq années à compter de 2018



Objectif du Scénario 1 :

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

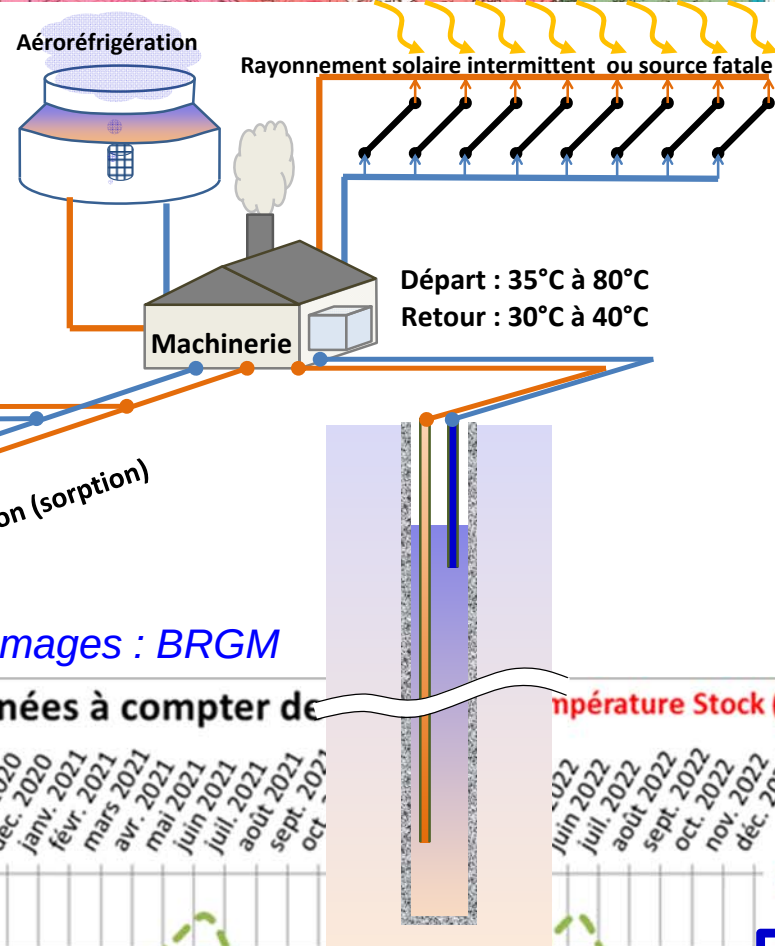
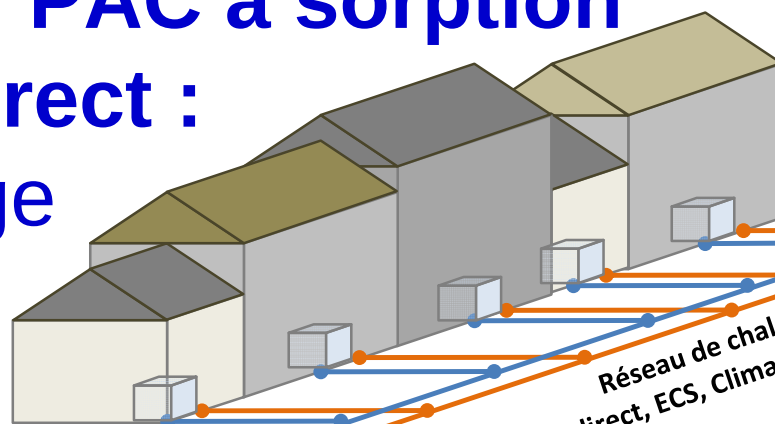


Source image : BRGM

En cours de réalisation à Gardanne

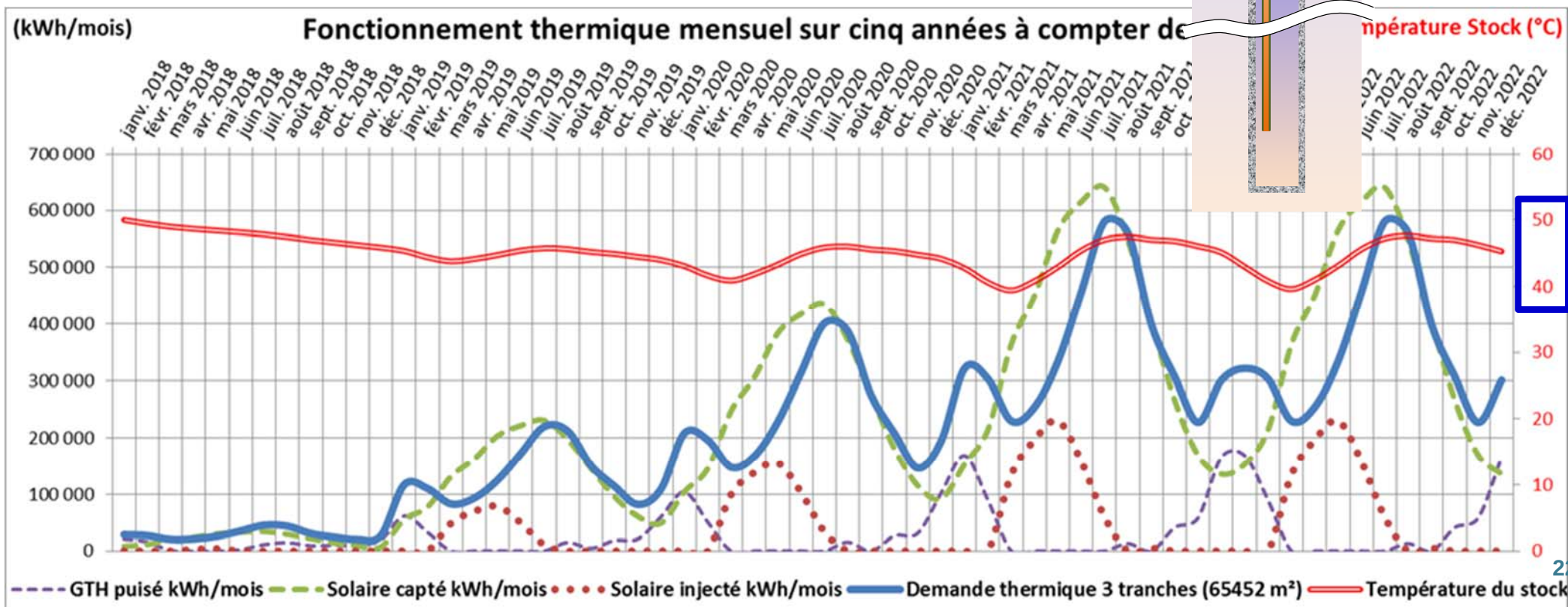
Scénario 2 : Stockage chaud

- 7 200 m² en solaire thermique
- Froid par PAC à sorption
- Chaud direct :
 - o Stockage
 - o Solaire



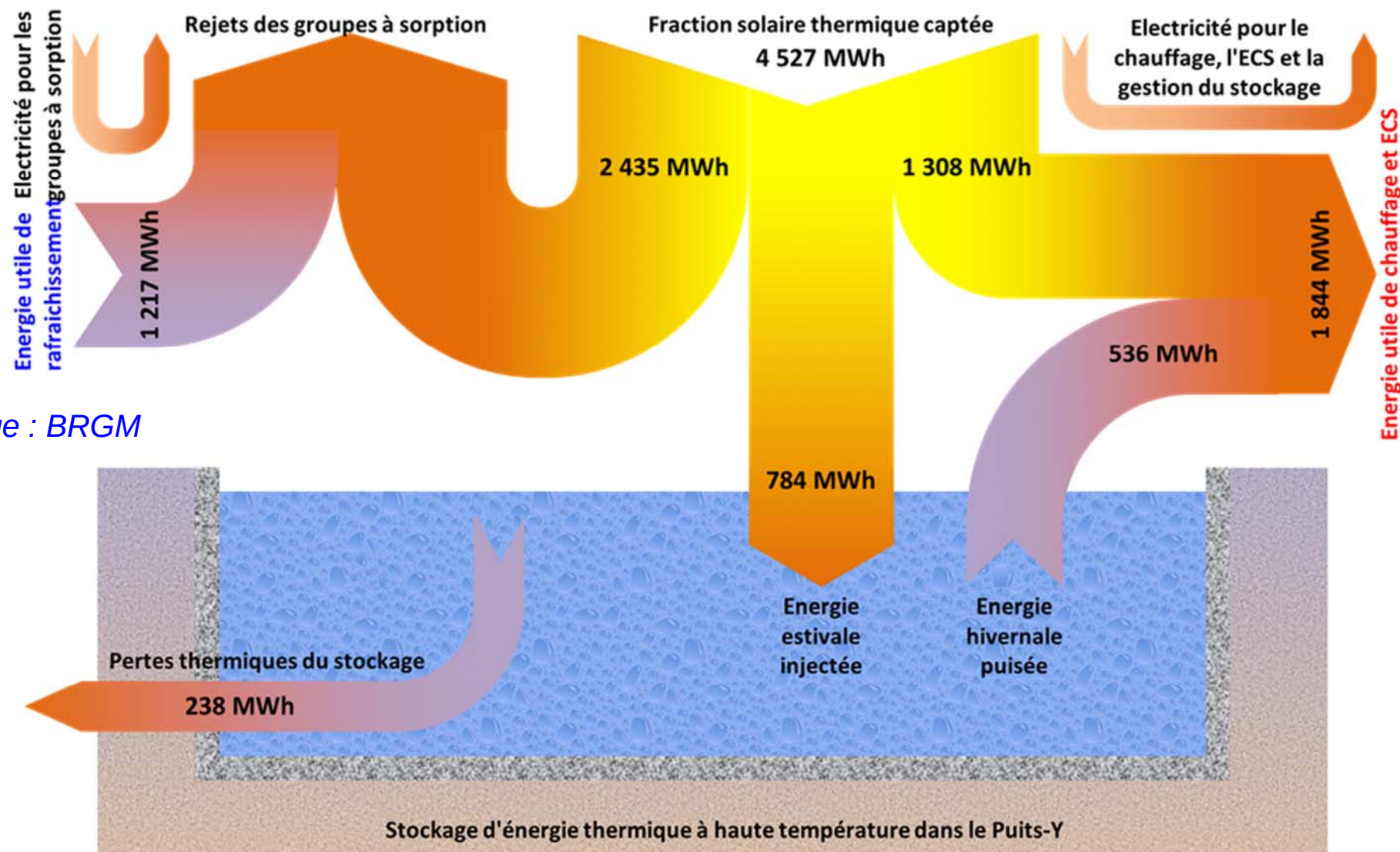
Réseau de chaleur
Chauffage direct, ECS, Climatisation (sorption)

Source images : BRGM



Objectif du Scénario 2 :

Electricité $\Leftrightarrow$ 210 MWh/an (3.5 GWh livrés = chauffage+ECS+froid)
(10% du froid, 4% de l'énergie stockée, 2.5 % du chaud solaire direct)

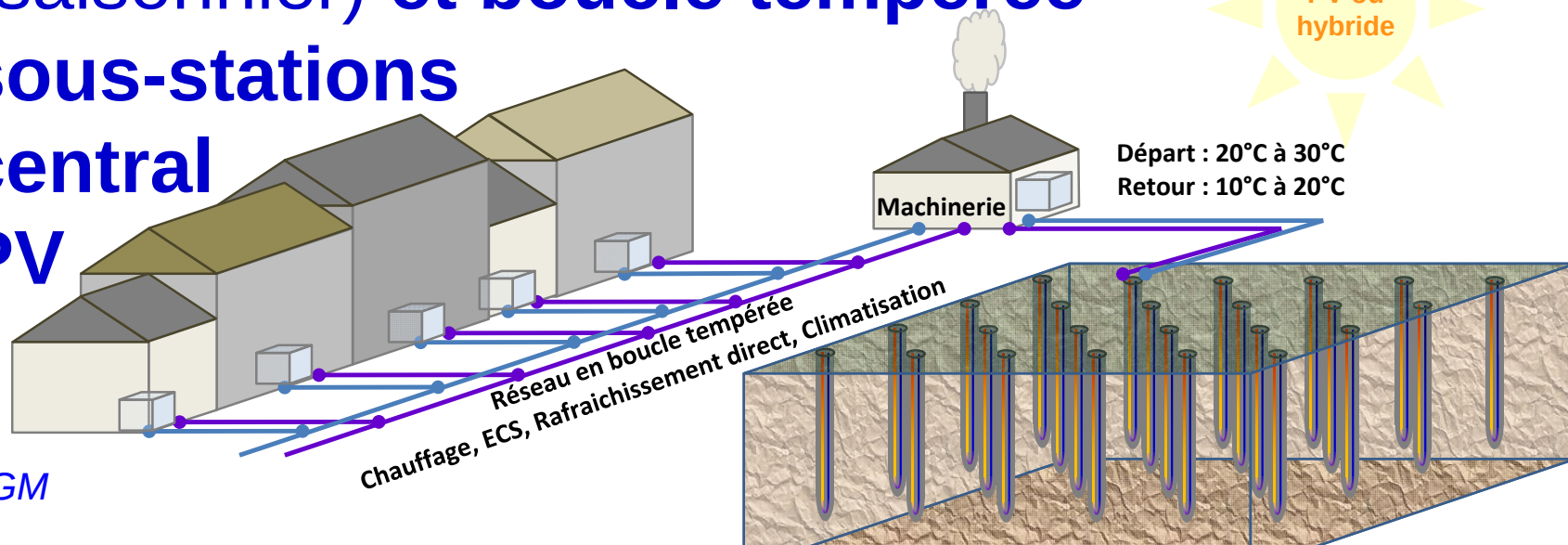


Source image : BRGM

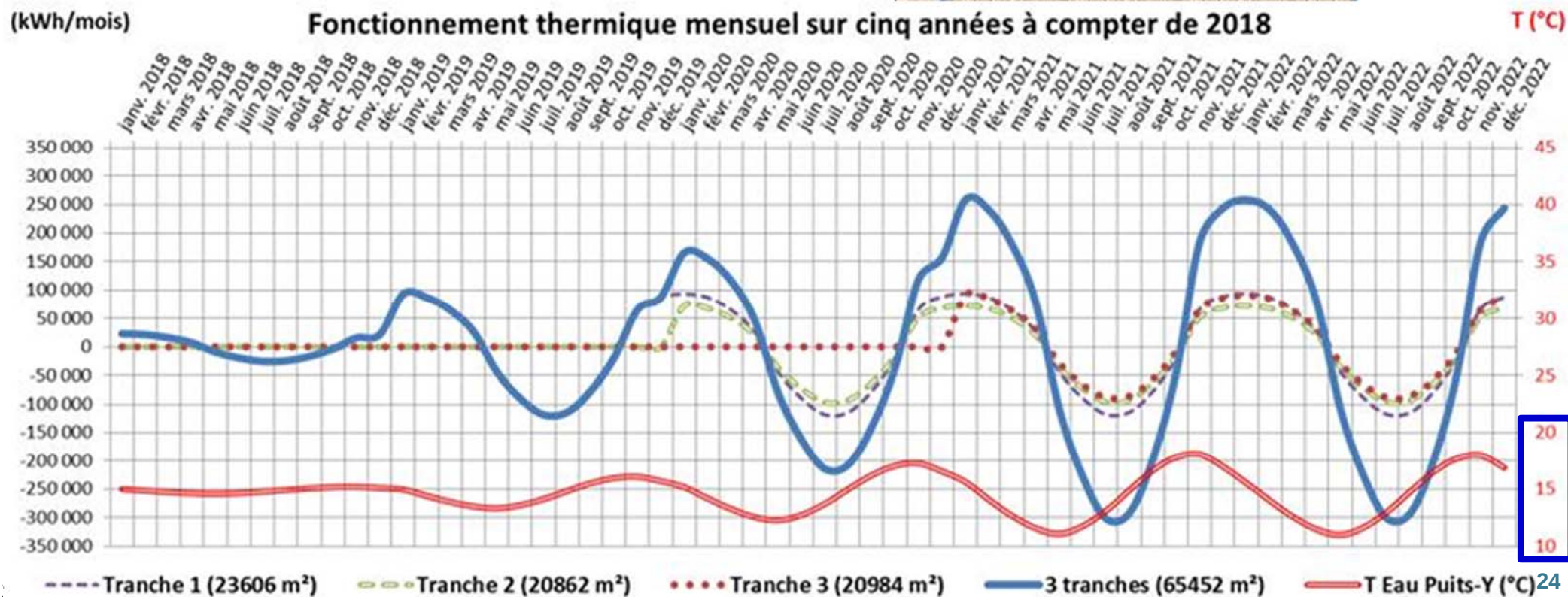
Voir réalisation de Dronninglund au Danemark
(www.dronninglundfjernvarme.dk)

Scénario 3 : Champ de SGV (stockage saisonnier) et boucle tempérée

- TFP en sous-stations
- TFP en central
- Solaire PV / hybride

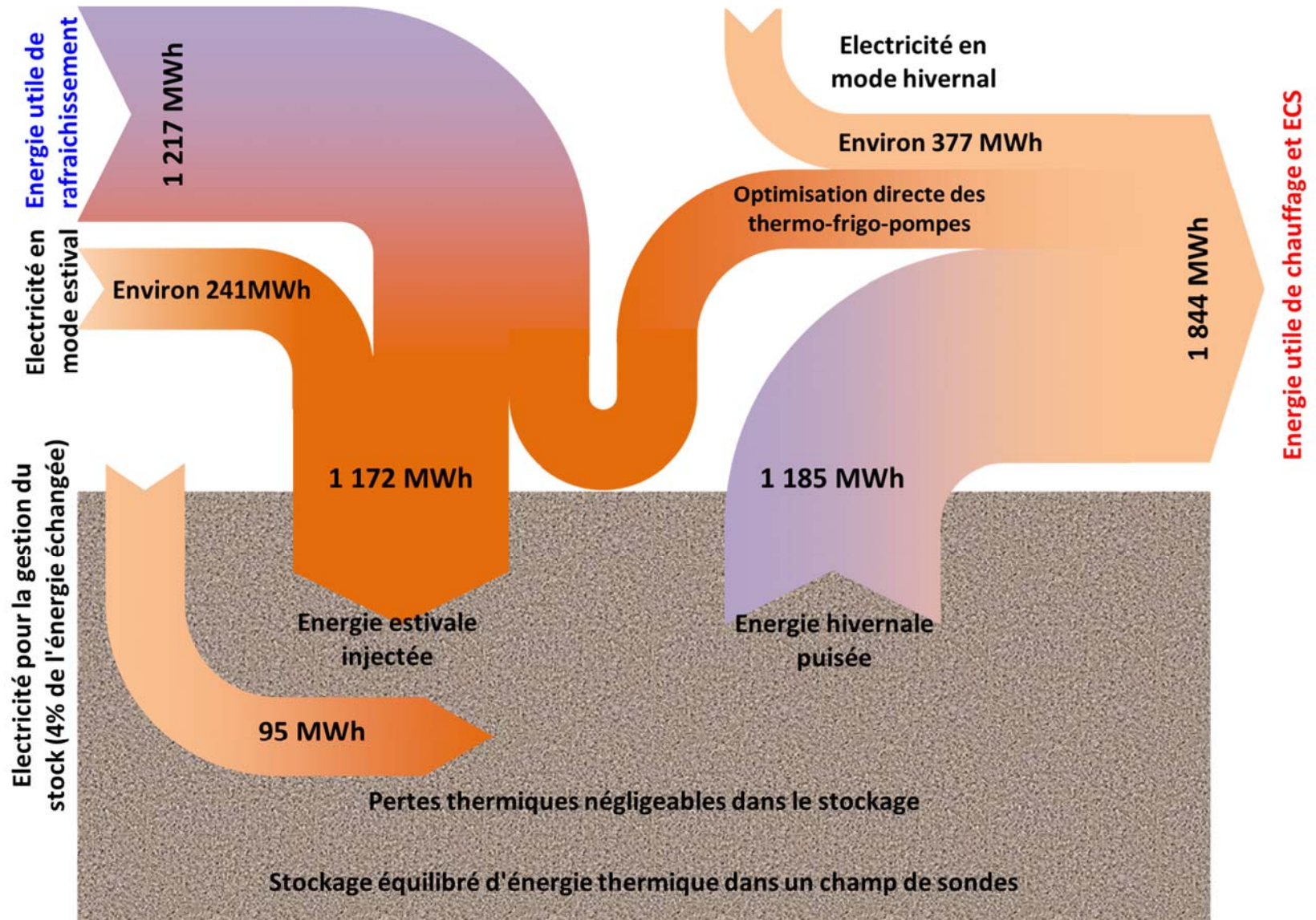


Source images : BRGM



Objectif du Scénario 3 :

Electricité $\Leftrightarrow$ 715 MWh/an $\Leftrightarrow$ $\approx$ 24 % de l'énergie livrée



Source image : BRGM

Scénario envisageable presque partout



Géosciences pour une Terre durable

brgm



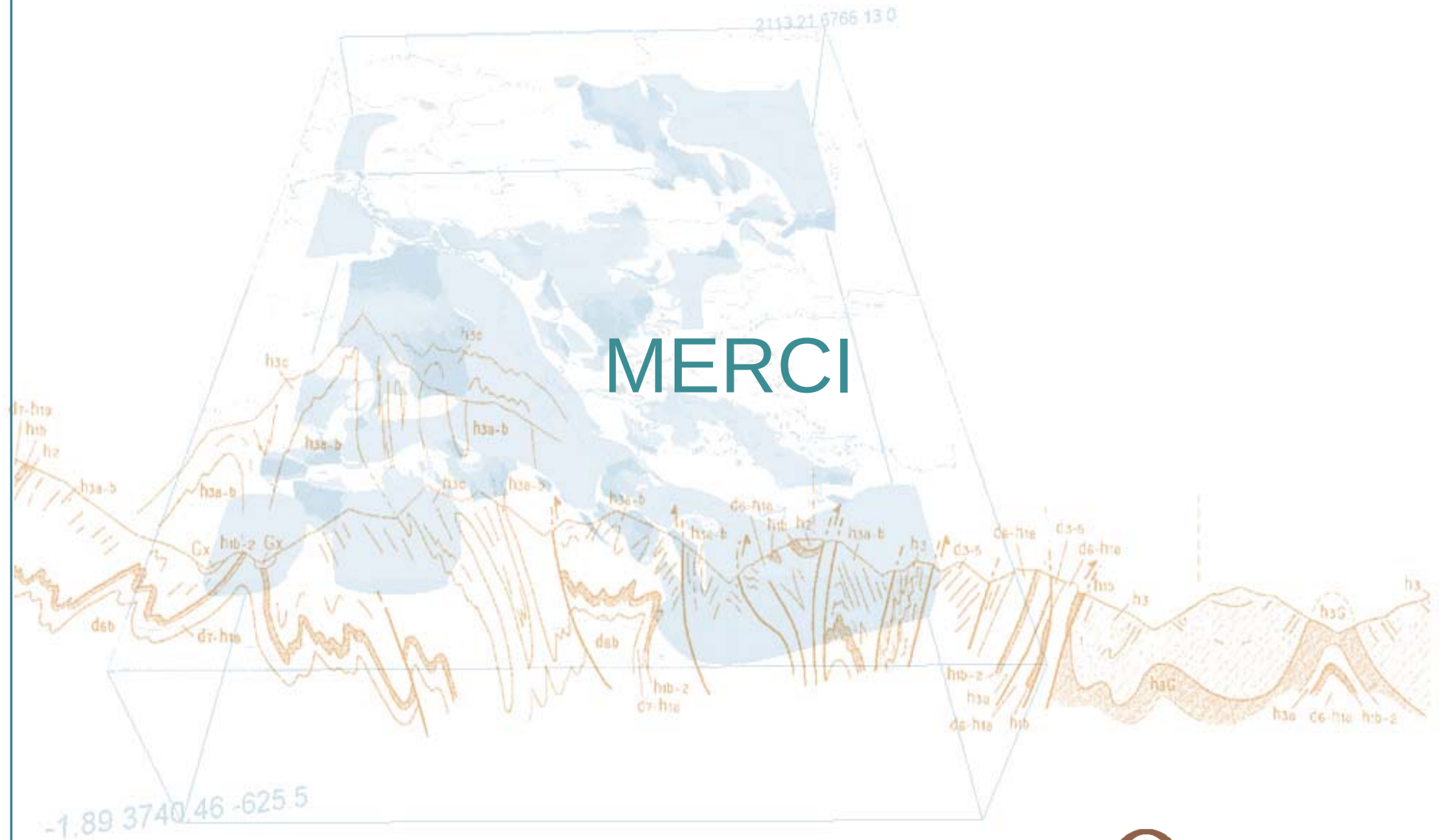
- Conclusions -

- **Le stockage souterrain massif d'énergie(s) thermique(s) est adapté à tous les contextes, même déjà urbanisés.**
- **Hybridé à du solaire thermique, la solution est pérenne et sans incertitude sur les dépenses de fonctionnement.**
- **⇒ Réserver, dès maintenant, des espaces pour les réseaux et stockages qui seront indispensables demain.**

h.lesueur@brgm.fr



MERCI



h.lesueur@brgm.fr