



Les stockages géologiques de l'énergie thermique

Réalités et Promesses

8 décembre 2015

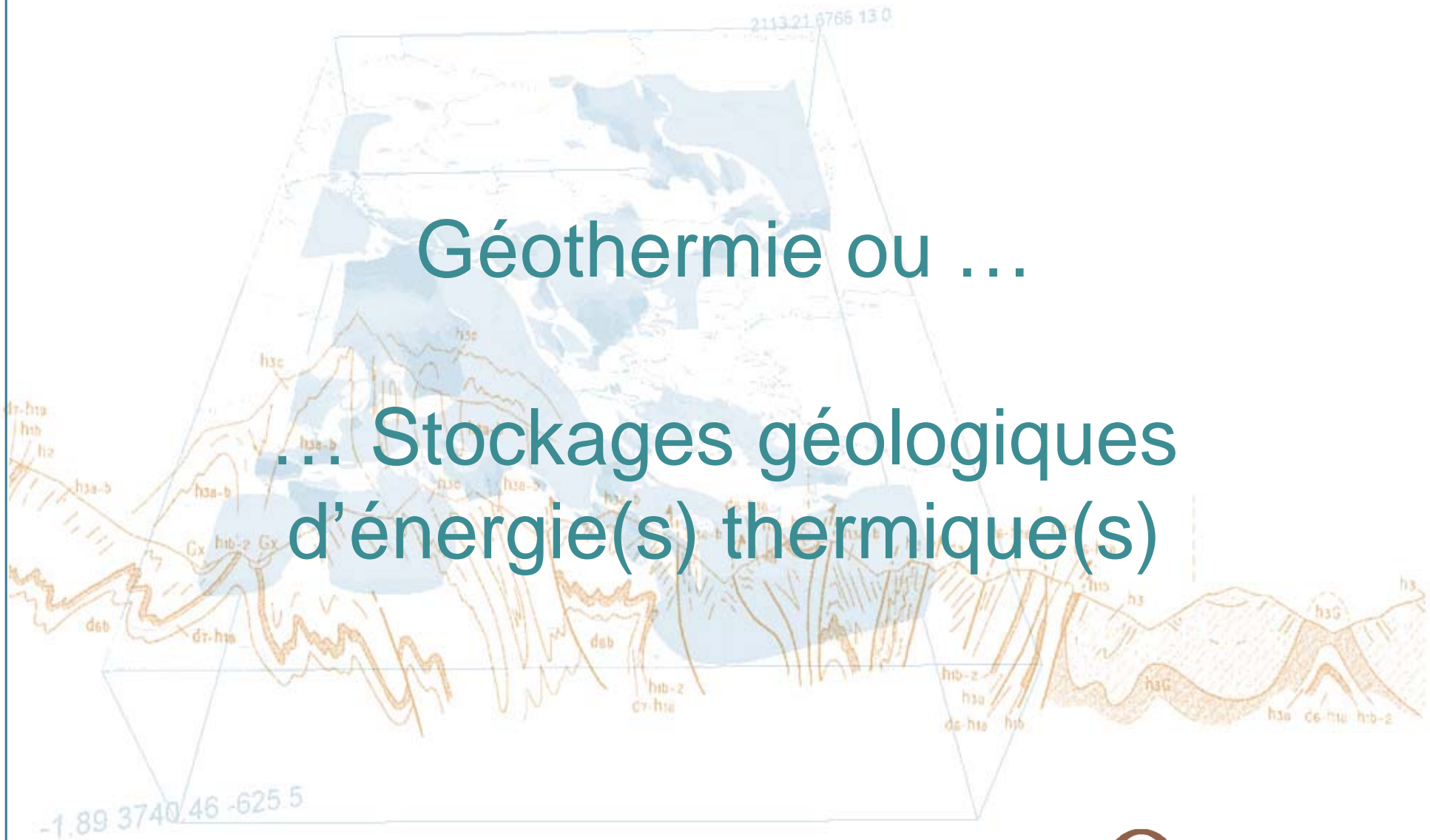
Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr





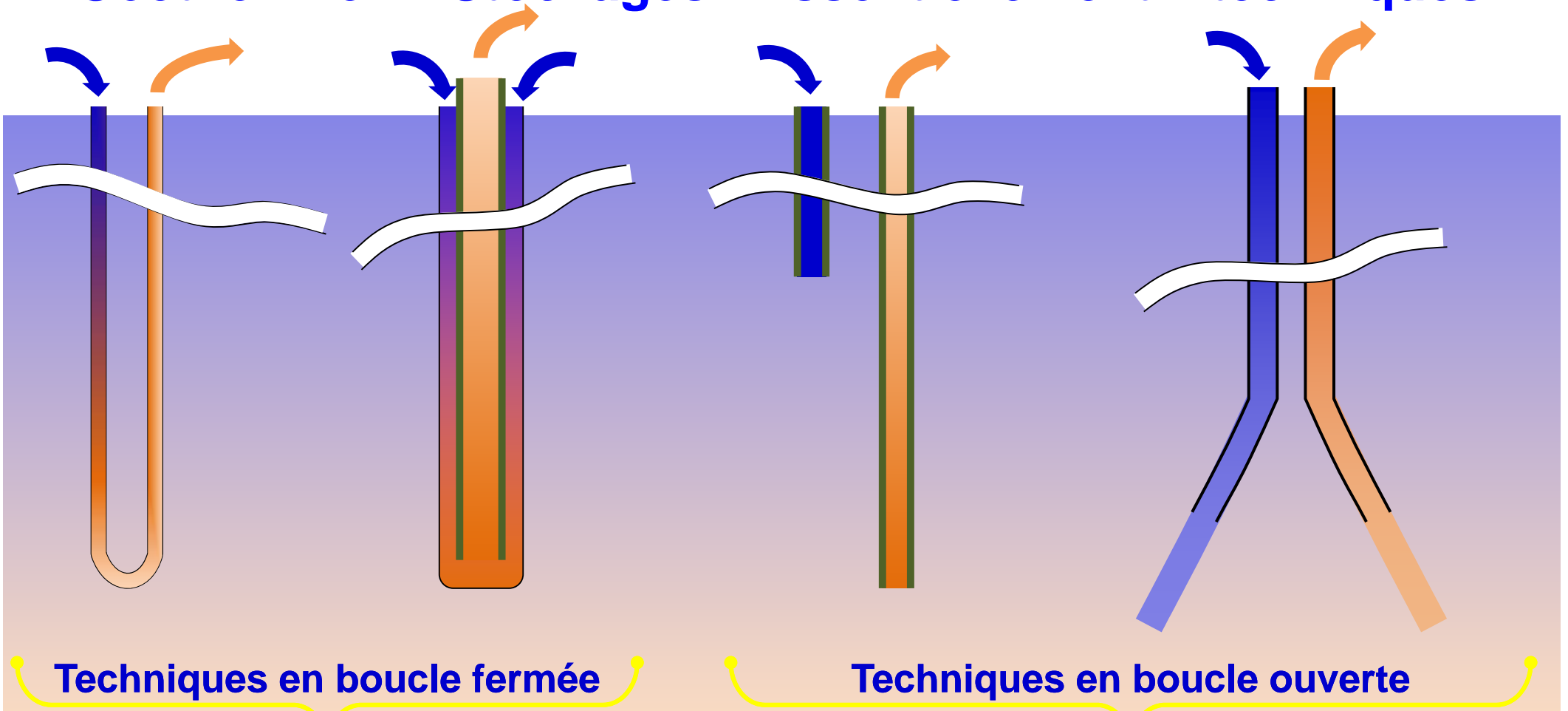
Géothermie ou ...

... Stockages géologiques
d'énergie(s) thermique(s)





Géothermie ⇔ Stockages : Essentiellement 2 techniques



Techniques en boucle fermée

Techniques en boucle ouverte

**Sondes géothermiques (U et coaxiales)
⇒ Stockages en champ de sondes**

**PACP* et Doublet géothermique (& variantes)
⇒ Stockages en aquifère**

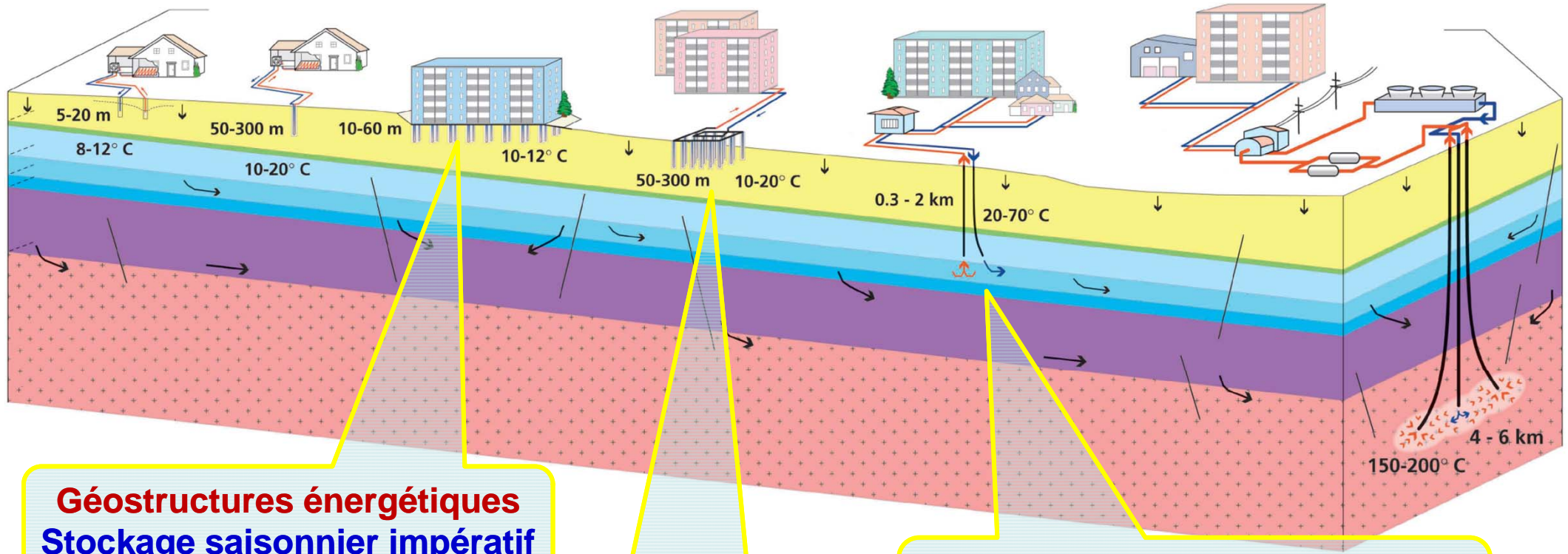




La géothermie ... du stockage sans en avoir l'air

Déphasage thermique

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



Géostructures énergétiques
Stockage saisonnier impératif

Doublet géothermique
Stockage mésestimé (en France)

Champs de sondes géothermiques
Stockage saisonnier implicite



Sans stockage ⇔ pas de géothermie durable

↳ Energie géothermique ⇔ Pas vraiment renouvelable

↳ En profondeur : 'Stocks' thermiques considérables

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

↳ Sans action de 'régénération' thermique, la ressource accessible reste modeste ou s'épuise assez vite

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

↳ GTH superficielle \approx puisage de 40 à 50 kWh/m².an pour le chauffage

↳ Définition proposée :

Exploitation géothermique = Gestion de stocks thermiques



Réalités des Stockages géothermiques

✓ Vers une moindre dépendance énergétique et moins de dépenses

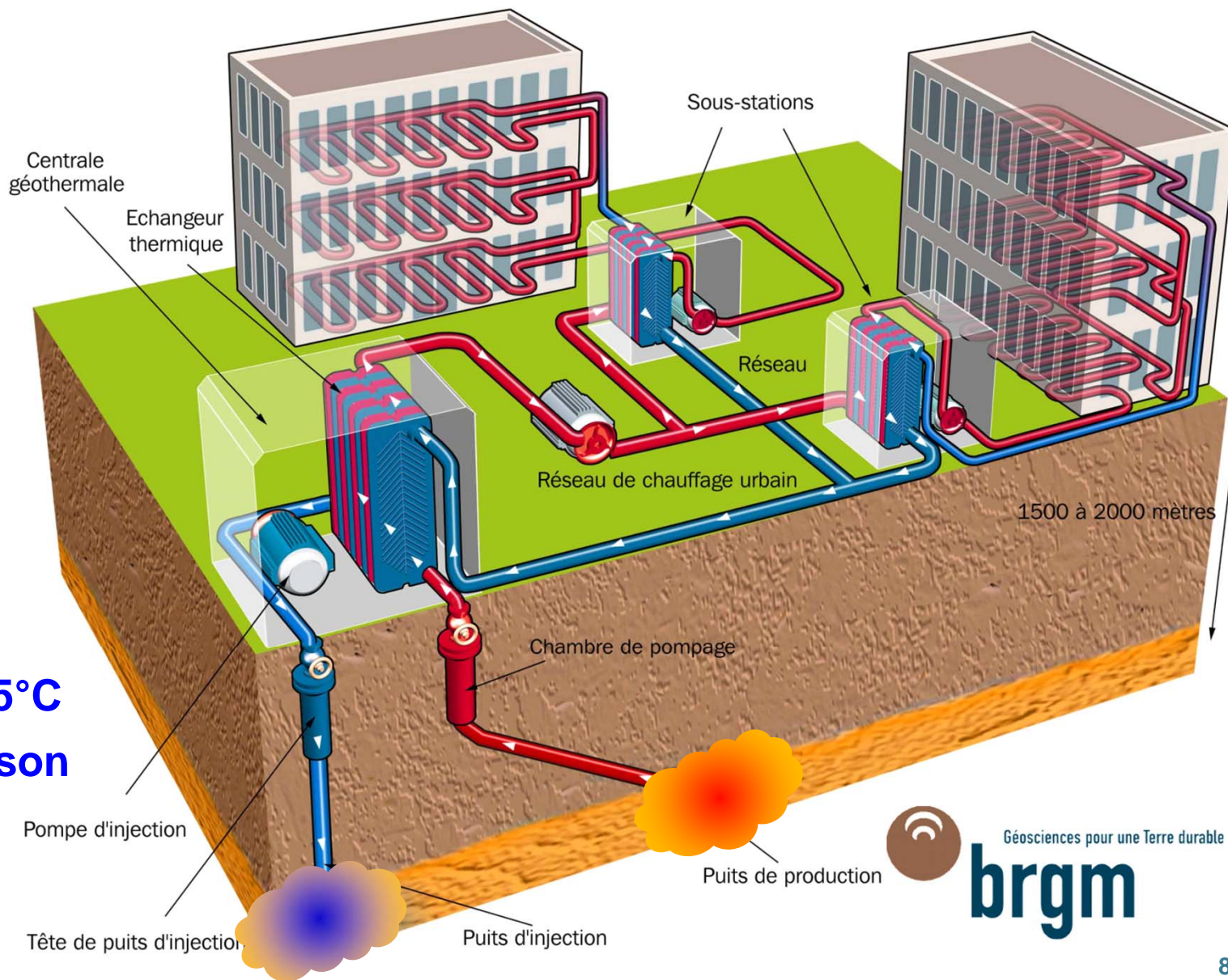
ATES : Aquifer Thermal Energy Storage



Doublet 'conventionnel'



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



Le stockage

- ↻ 10 à 15 M€
- ↻ 10 à 15 MW
- ↻ Typiquement 95°C
- ↻ 1 à 1.5 Mm³/saison

Stockage en aquifère superficiel

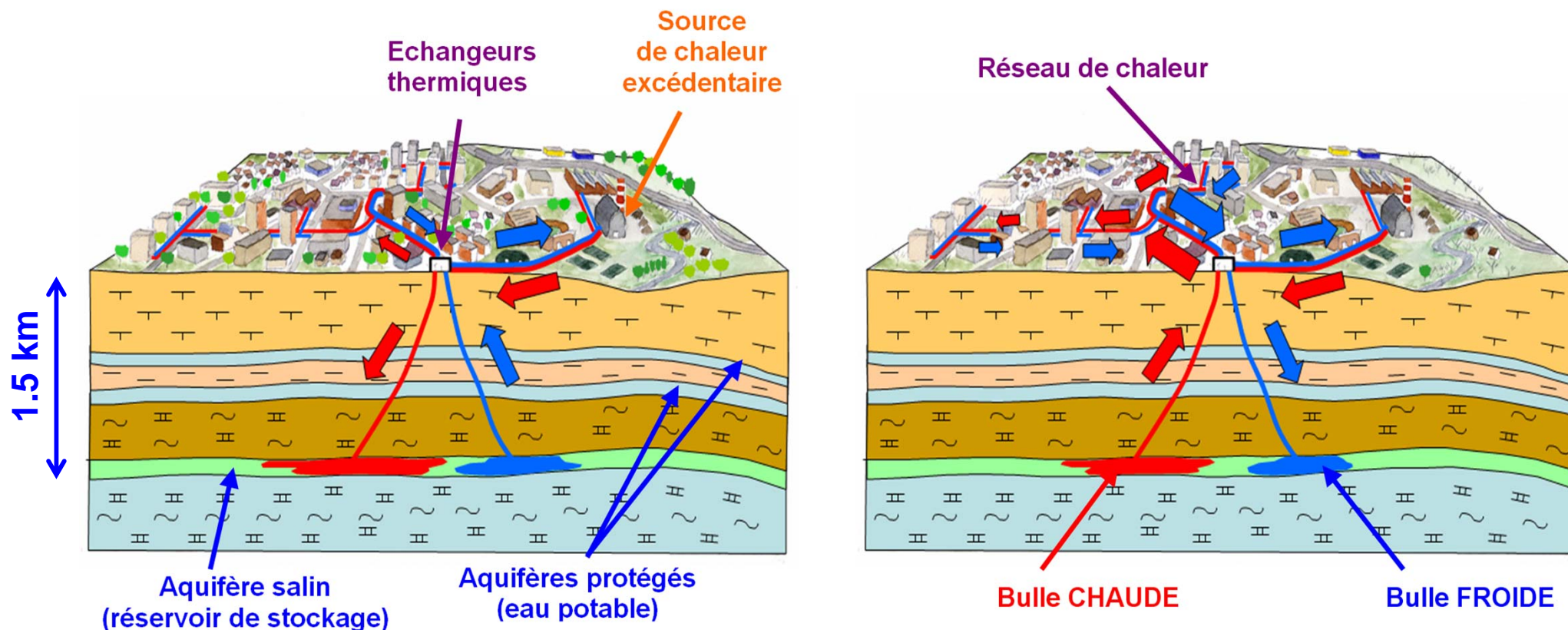
=> Au moins 2 stocks à gérer : **Stock chaud & Stock froid**



Epruvé mais pas en France

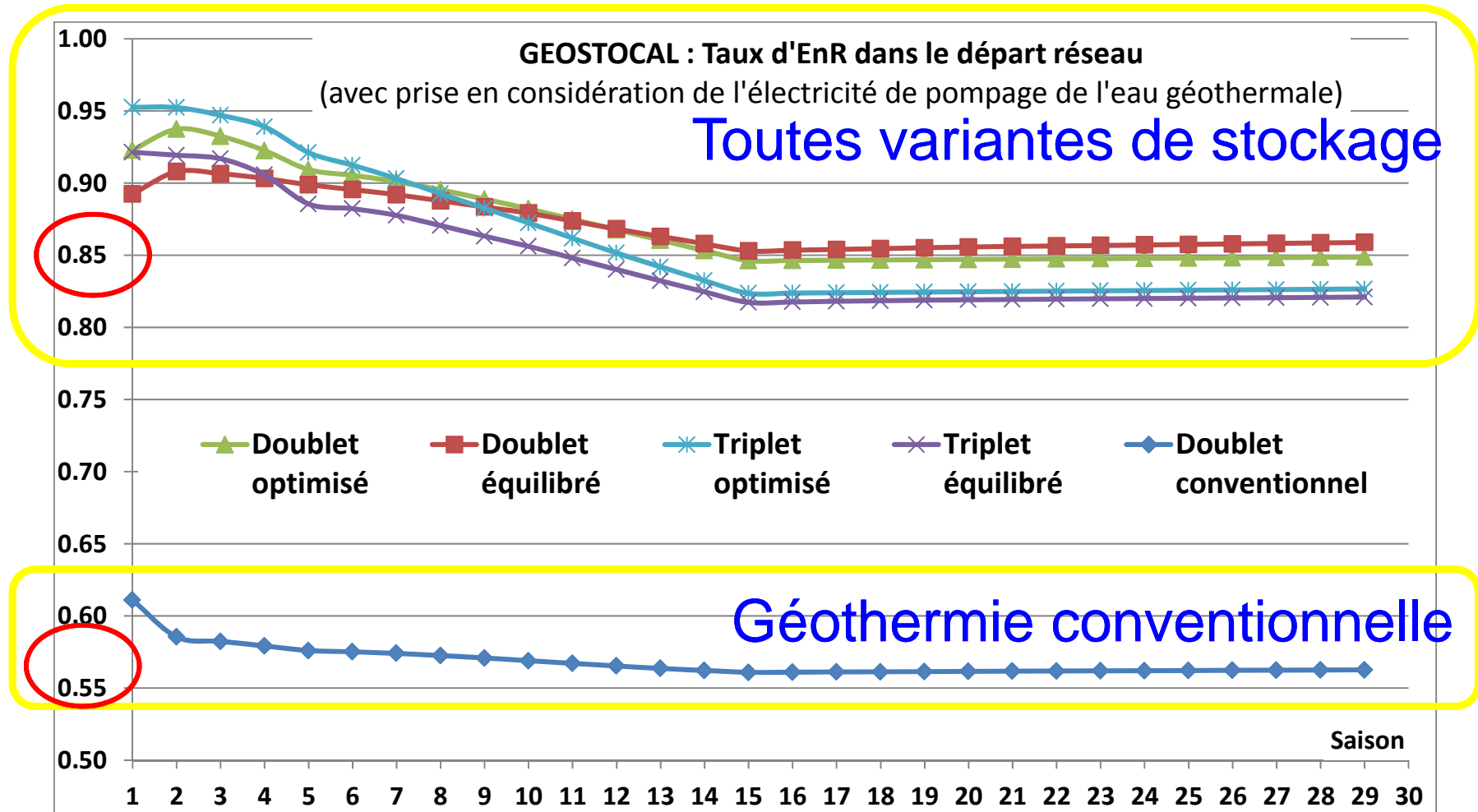
- > Stockage inter-saisonnier Eté / Hiver
- > Puissances significatives : de 100 kW à 4 MW

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



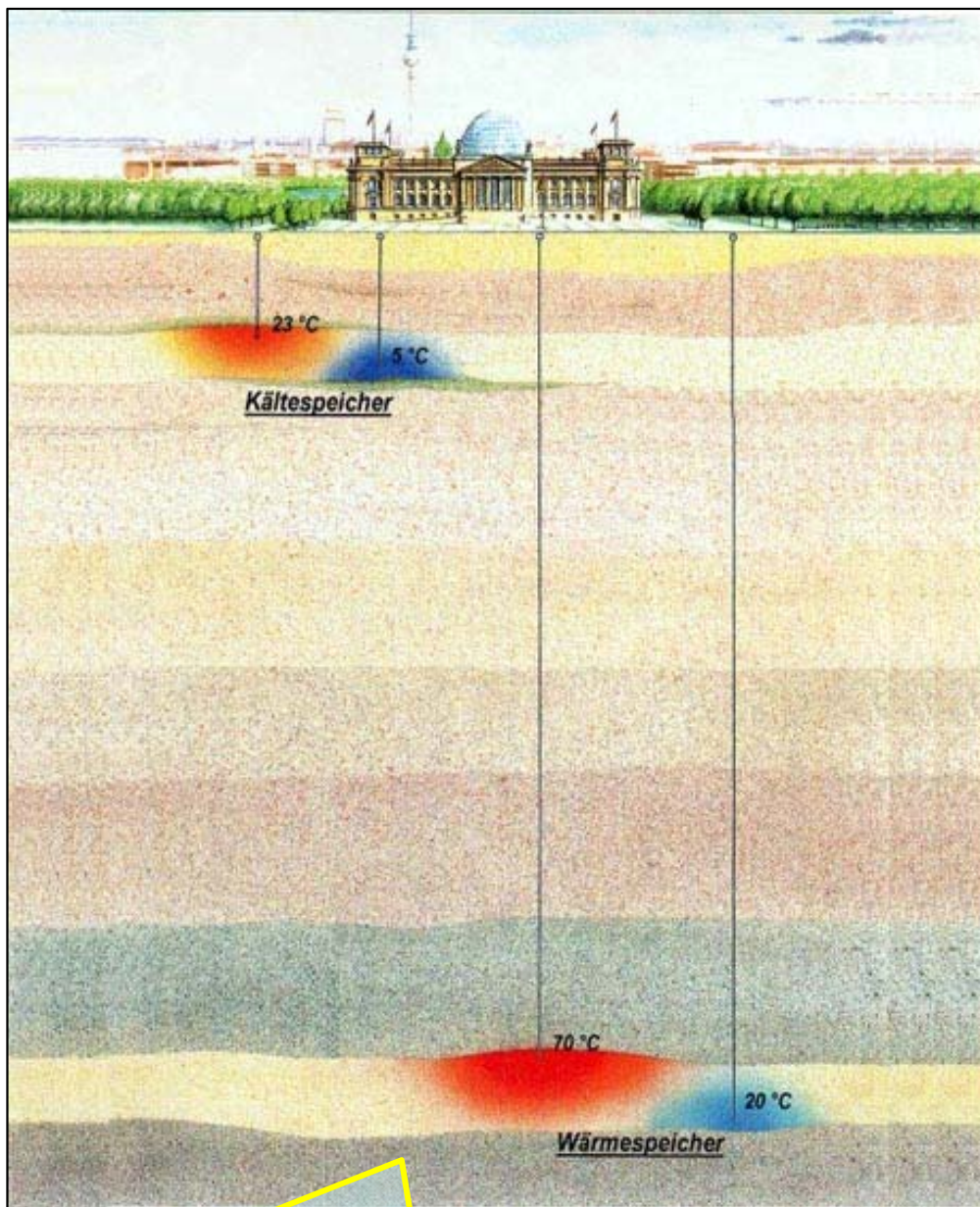
- Stocker de la chaleur en période estivale (vue de gauche)
- Déstocker l'énergie en période hivernale (vue de droite)
- Puissance thermique indicative : 10 MW (40-60 GWh/an)

Performances attendues



- > **Livré : 58 GWh/an** (2.5 M€/an en dépenses de fonctionnement)
- > **Taux d'EnR dans le réseau : 85%** (après extension du RCU)
- > **Volumes en jeu : jusqu'à 1 500 000 m³/saison**
- > **Stockage : Typiquement 95°C**
- > **Déstockage : 65°C en fin de saison hivernale**

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 m³/h

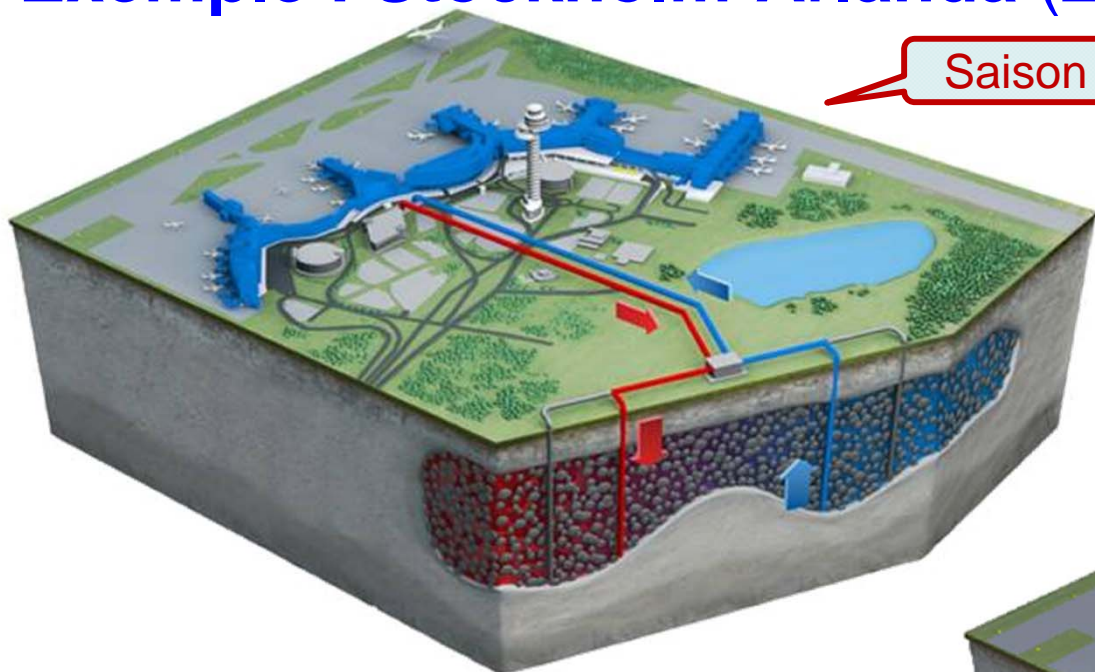
Stock Chaud (excédent cogénération)

- ↪ 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

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

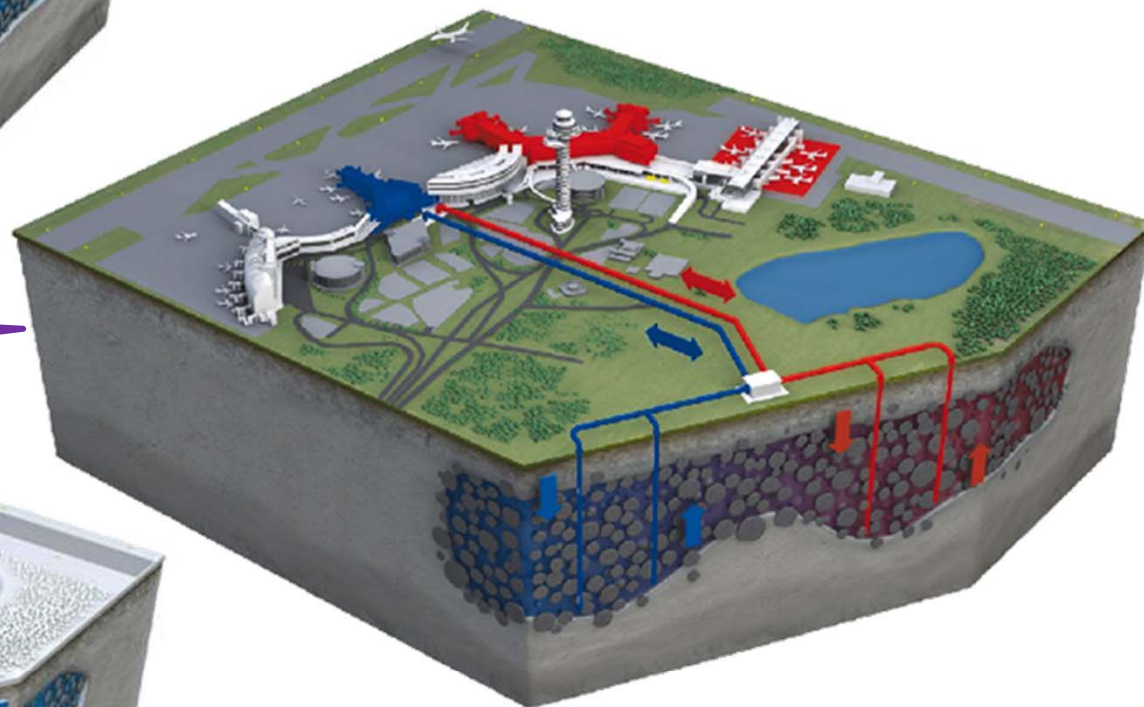
Stockage en aquifère superficiel

Exemple : Stockholm-Arlanda (2009)

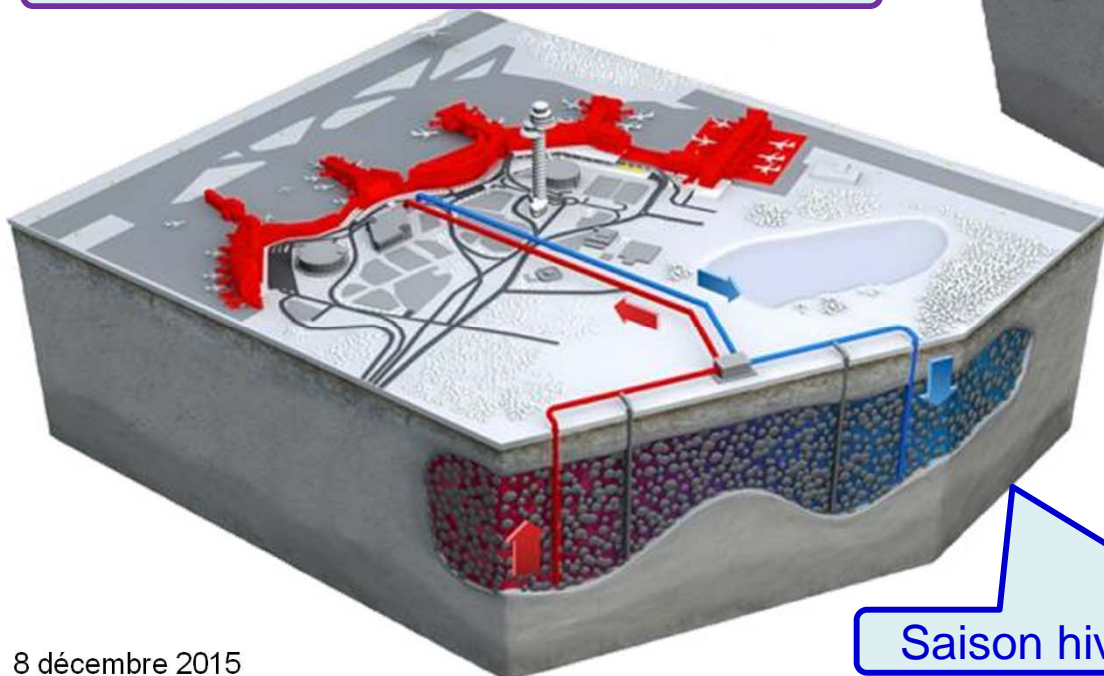


Saison estivale : Stockage de 'chaud'

Le problème : Trouver des aquifères exploitables



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



Saison hivernale : Stockage de 'frais'

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

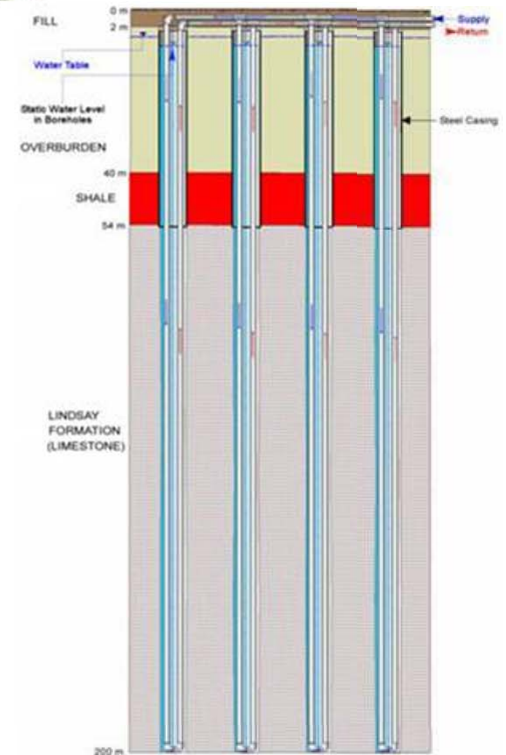
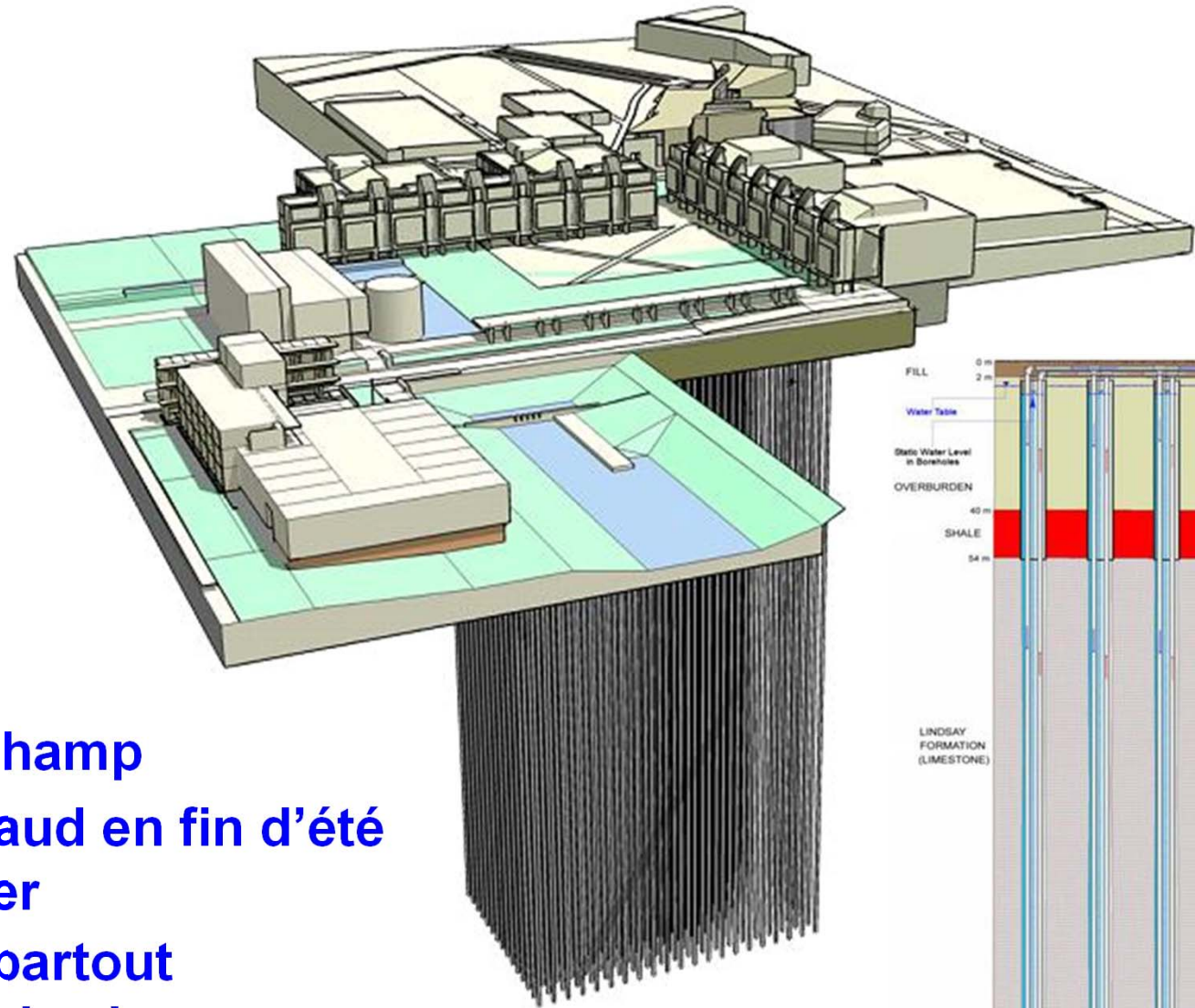
Production d'énergie
– Chaud : 11 GWh
– Frais & Clim : 11GWh

BTES : Borehole Thermal Energy Storage



Stockage en champ de sondes

Exemple : BTES, Oshawa, Toronto, Ontario, Canada



- > Un **seul stock** par champ
- > Alternativement chaud en fin d'été et froid en fin d'hiver
- > Possible (presque) partout
- > (très) longue durée de vie
- > Peu d'interférence avec le voisinage
- > Des puissances significatives : de 50 kW à 4 MW
- > (Oshawa : 384 sondes de 220 m de profondeur espacées de 4.2 m)

Stockage en champ de sondes

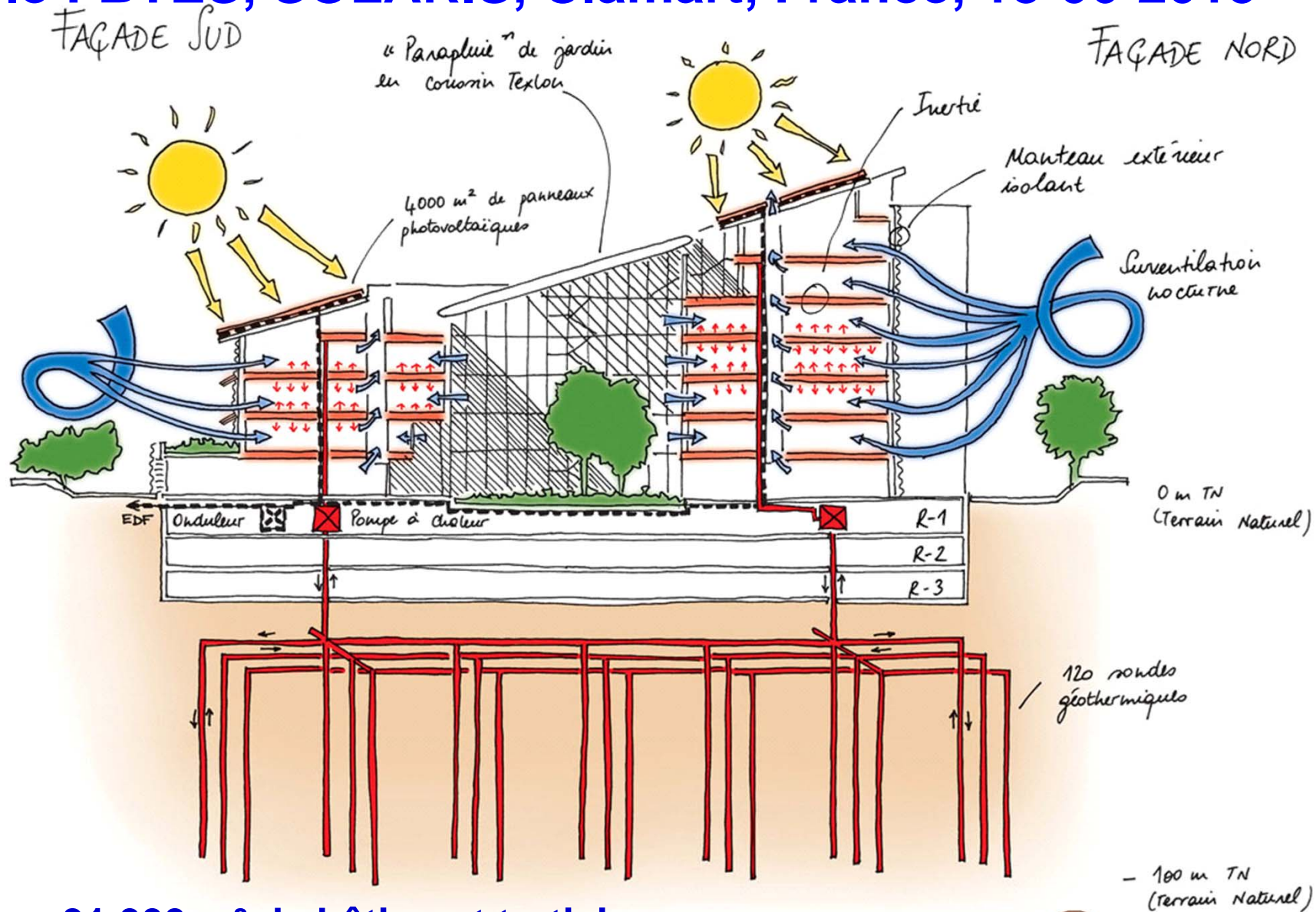
Exemple : BTES, Emmaboden, Sweden, 2010



- 140 sondes géothermiques, 150 m de profondeur, espacement de 4 m
- Stockage : 3 800 MWh (énergie fatale d'une fonderie)
- Température du stock en fin de stockage : 60°C
- Déstockage : 2 600 MWh pour du chauffage de bâtiments
- Température du stock en fin de déstockage : 40°C

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 - Clamart



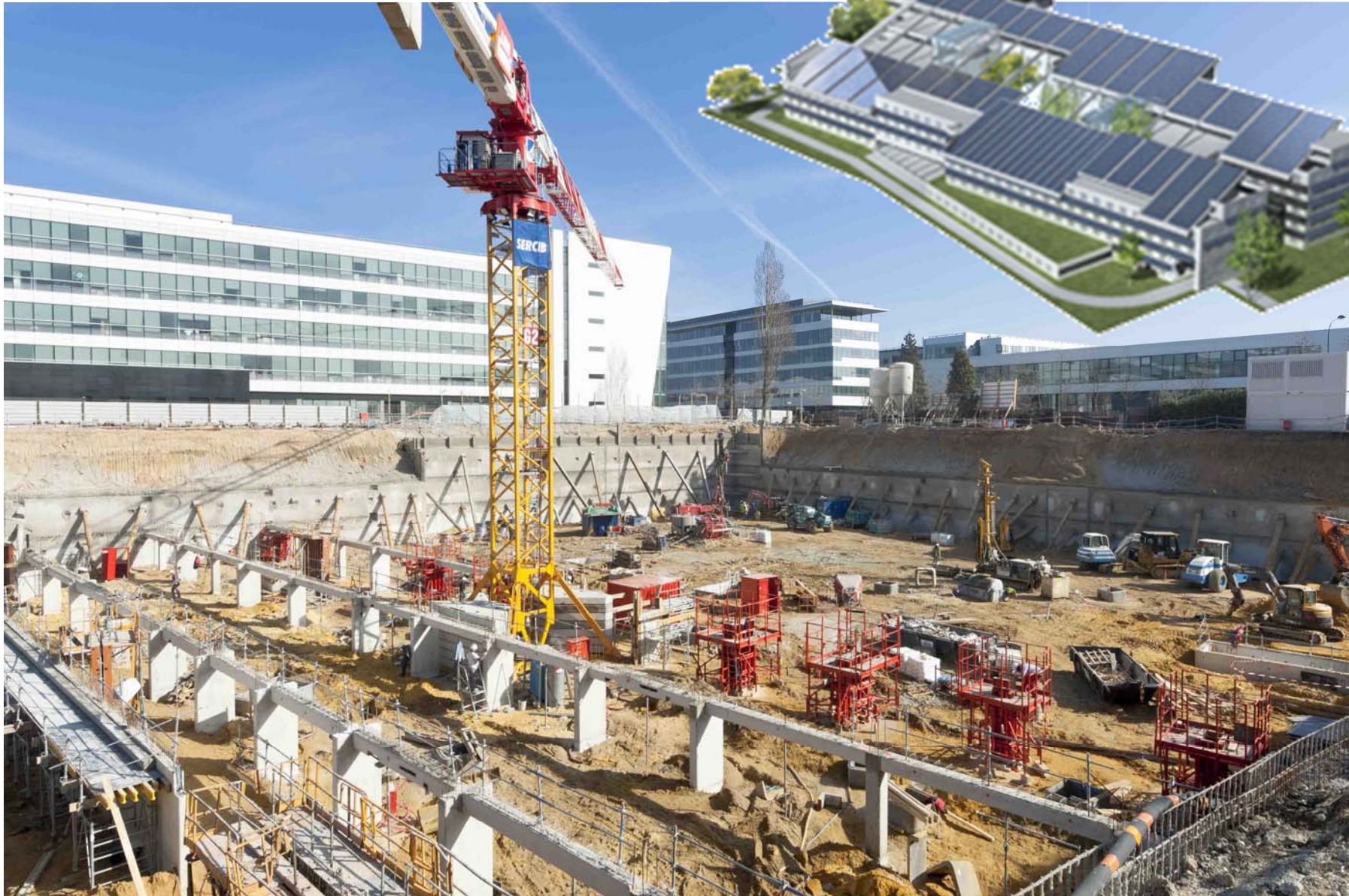
Recherches pour une terre durable

brgm

BTES - Clamart



BTES - Clamart



Stockage en champ de sondes

Exemple : Campus Airbus Group à Blagnac (travaux en cours)



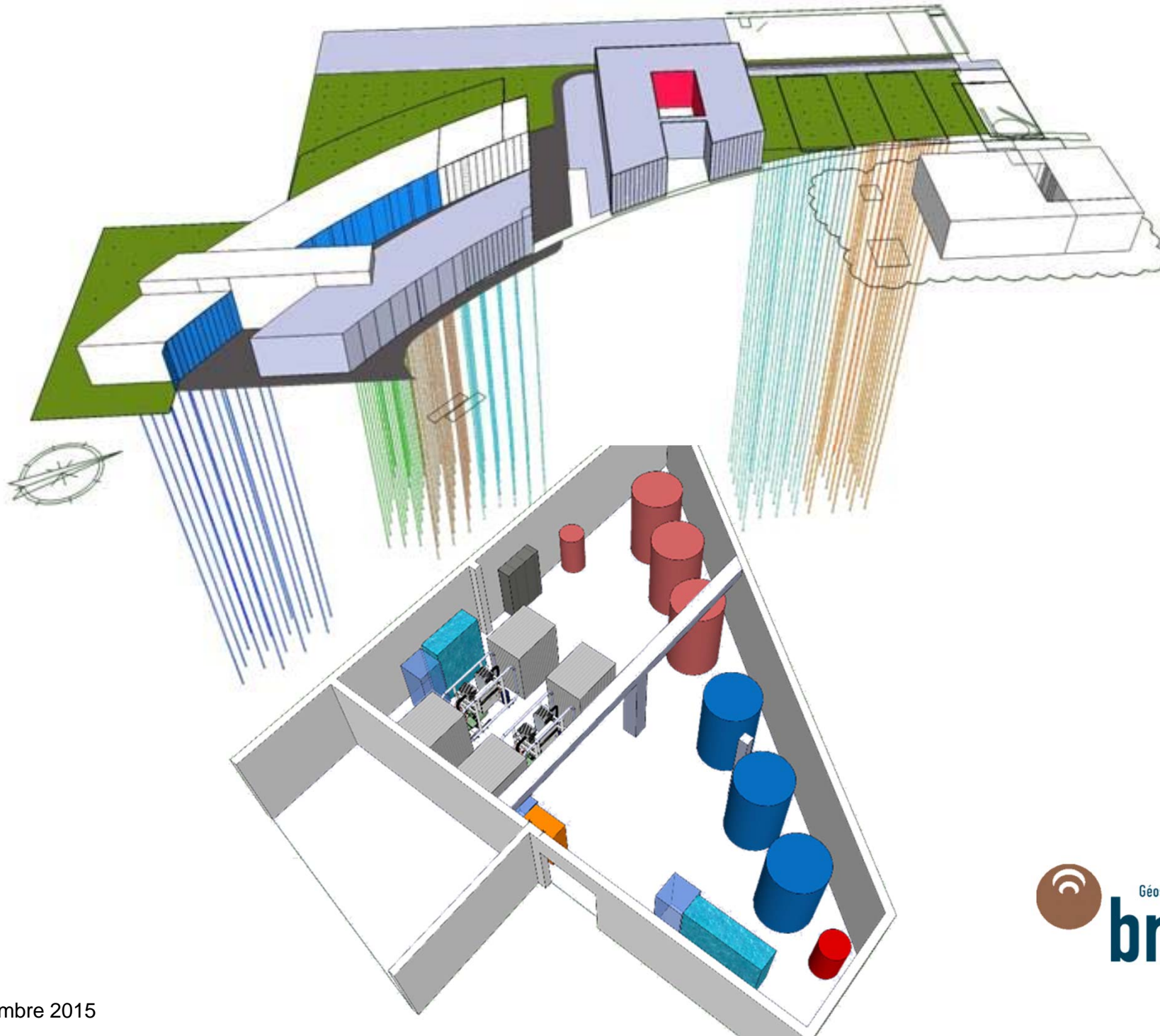
Stockage en champ de sondes



Nombre SGV	140
Profondeur SGV (diamètre 152 mm)	205 m (hors argiles 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 [1 071 MWh/an (90% GTH)]
Raccordé	32 000 m²

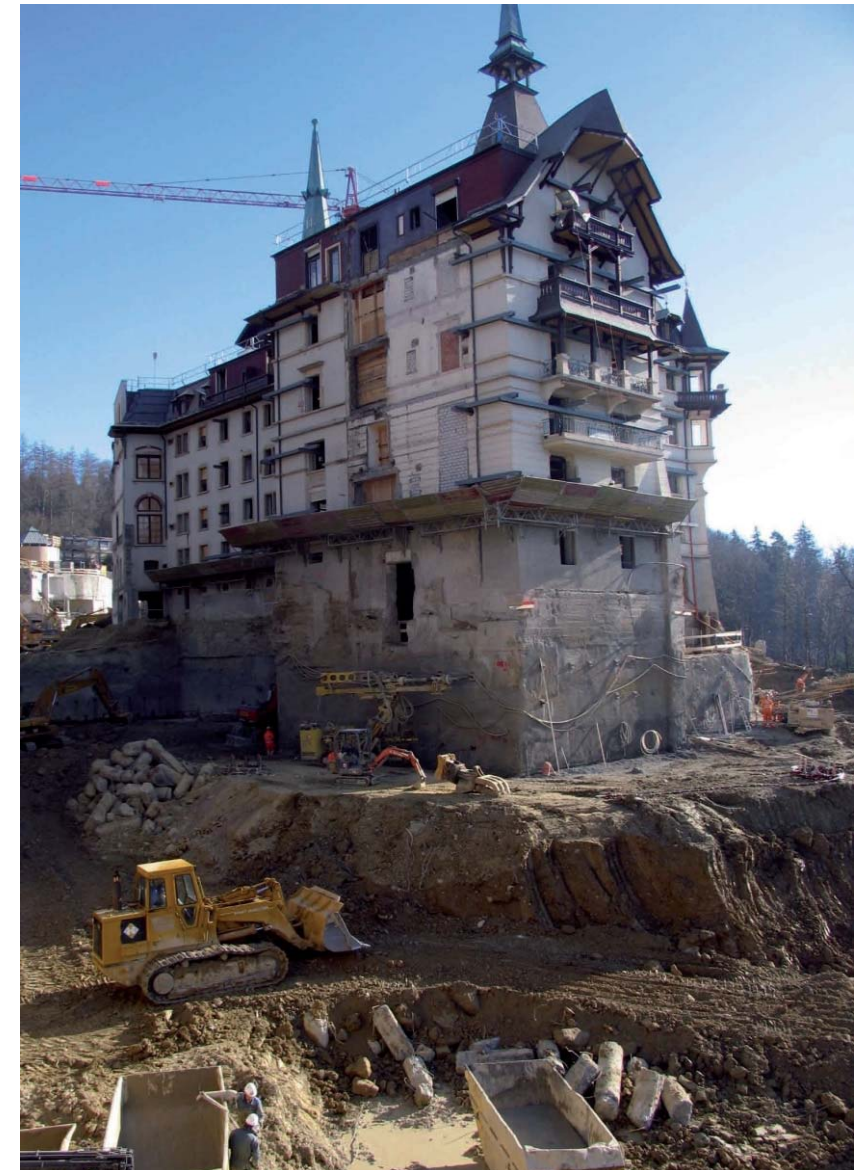
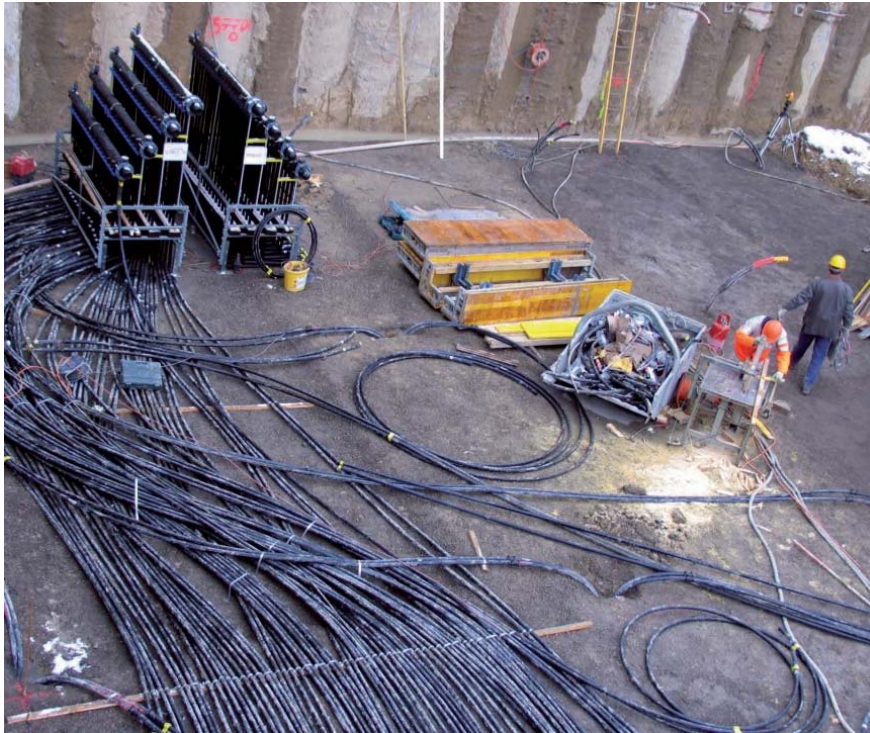


Stockage en champ de sondes



BTES / ATES

Possible même en requalification

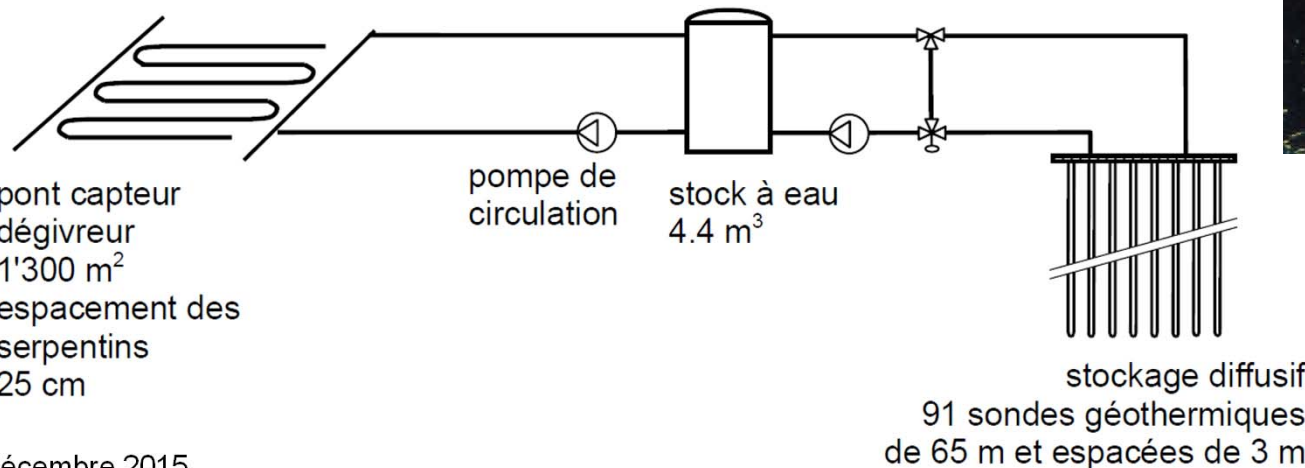


Hôtel 'Dolder Grand', Zurich
70 sondes de 152 m de profondeur

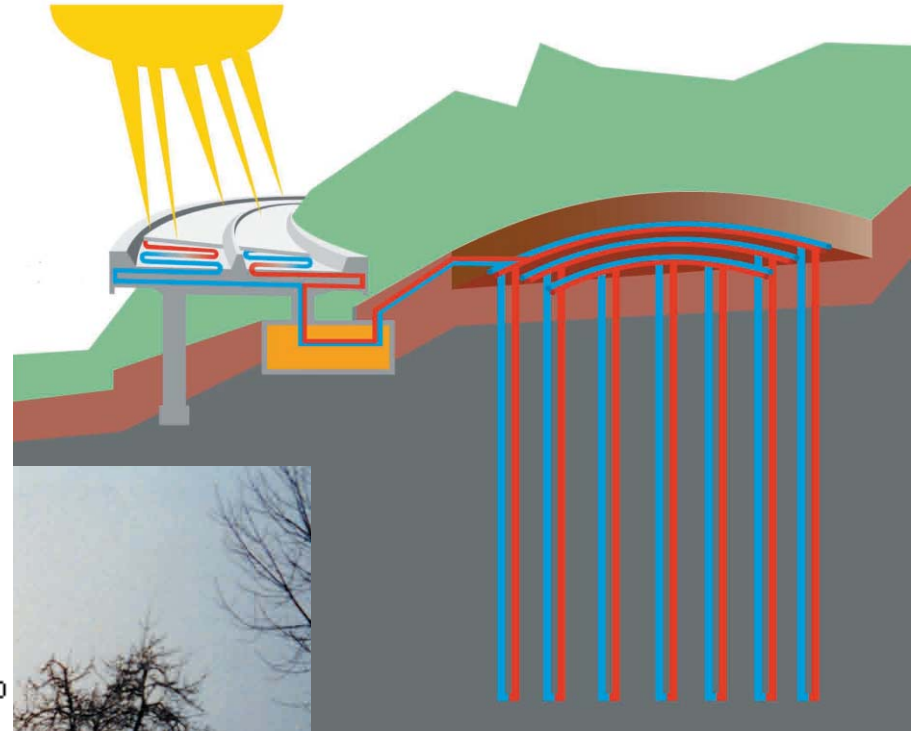
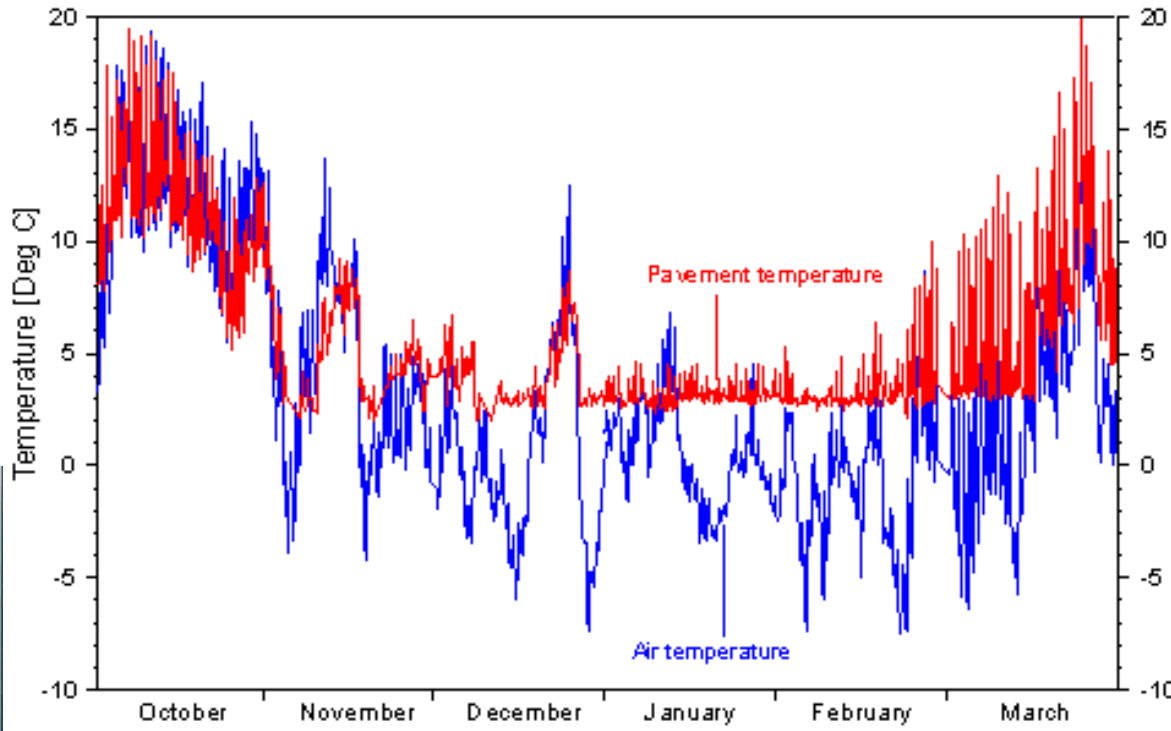
'Deicing' : Serso, Suisse



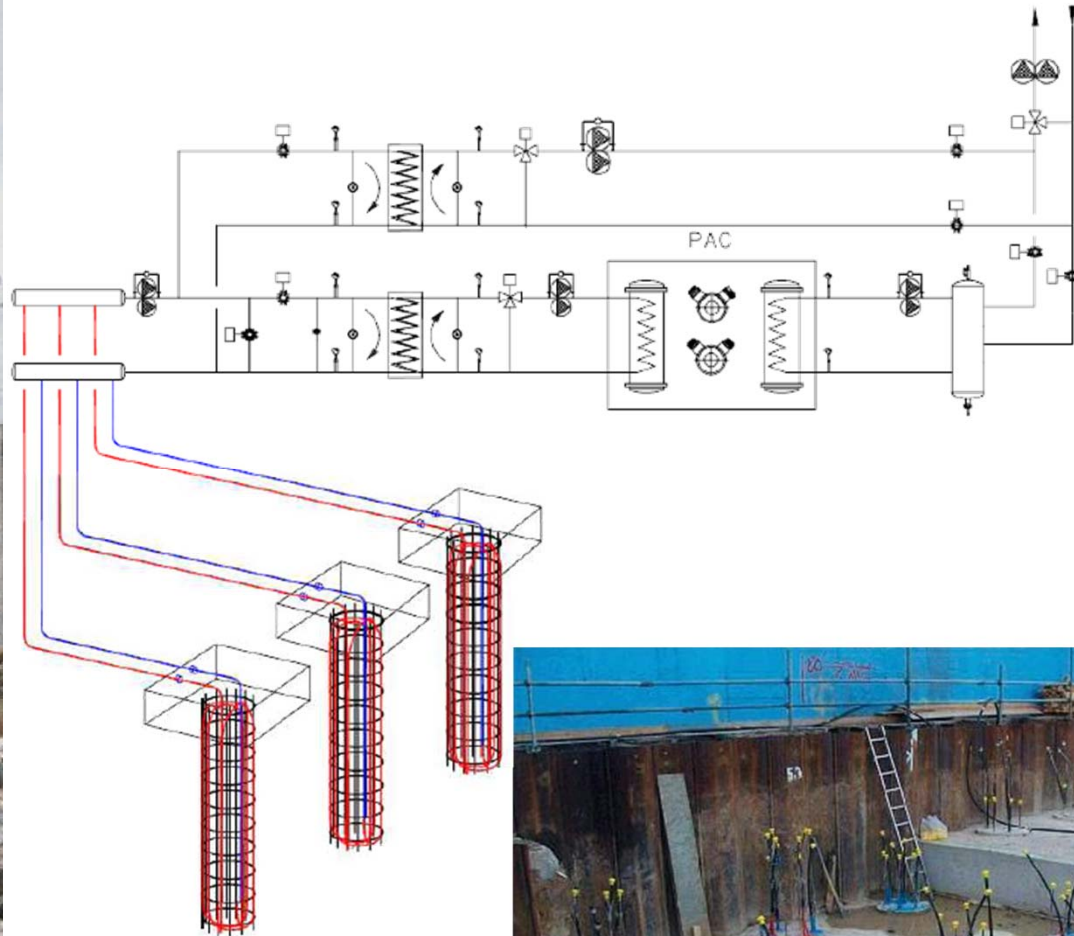
Mesures de 1998	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	7.1	23'780
Février	-	-	7.0	22'300
Mars	13.9	880	6.8	5'490
Avril	15.2	4'430	6.9	200
Mai	17.6	19'140	-	-
Juin	18.8	35'060	-	-
Juillet	20.1	27'840	-	-
Août	21.5	9'210	-	-
Septembre	-	-	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	17'960
Décembre	-	-	6.7	30'270
Année	19.0	96'560	7.1	100'000
Durée de marche annuelle		560 heures		1'050 heures



'Deicing' : Serso, Suisse



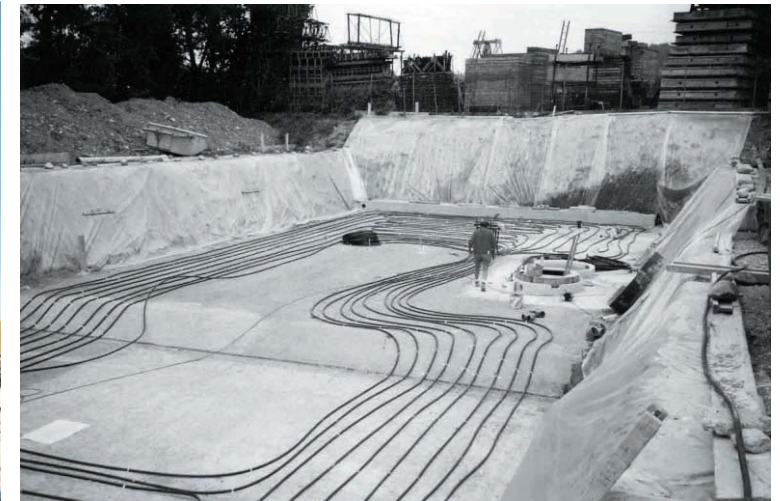
Fondations géothermiques



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

Fondations géothermiques

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



Fondations géothermiques

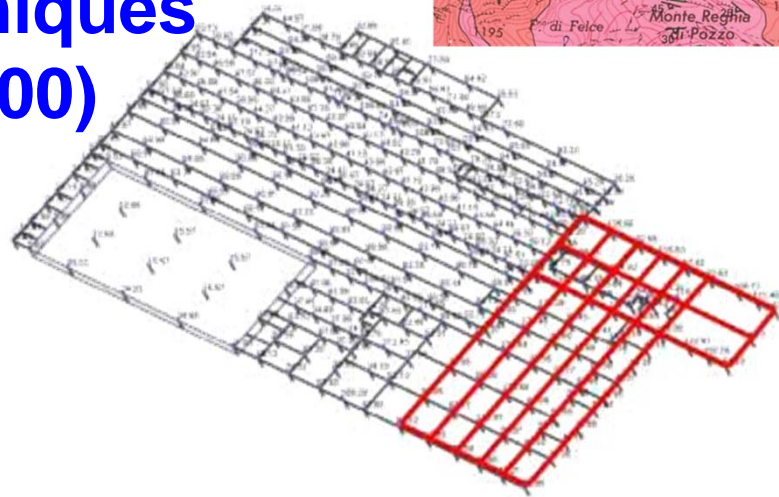
Vinci-Parc, Neuilly, 560m²

Châteauroux : 37 pieux



Fondations géothermiques

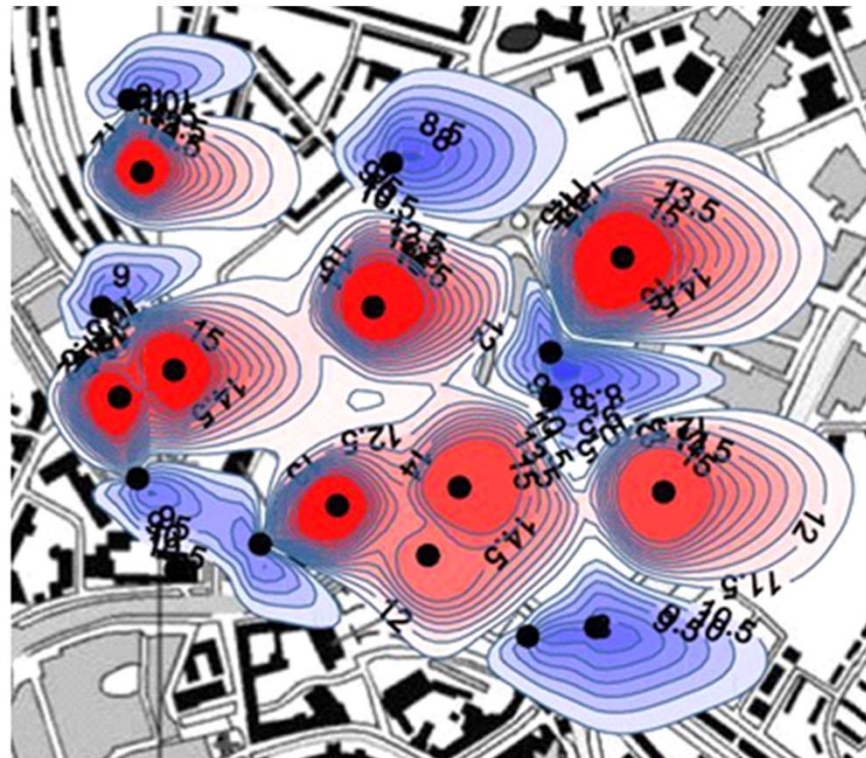
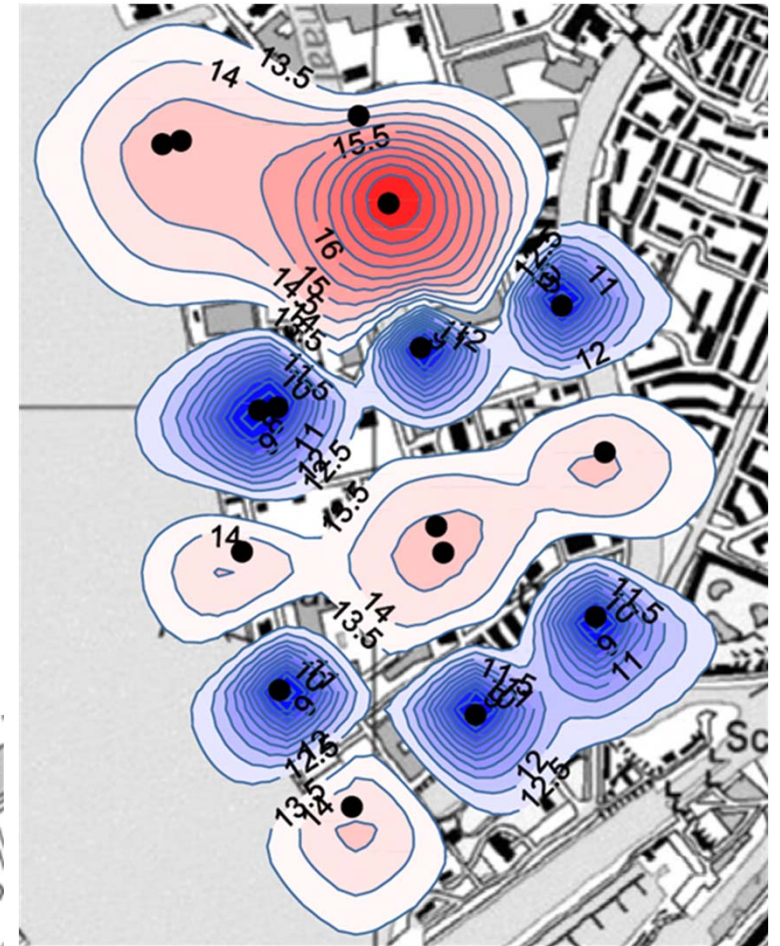
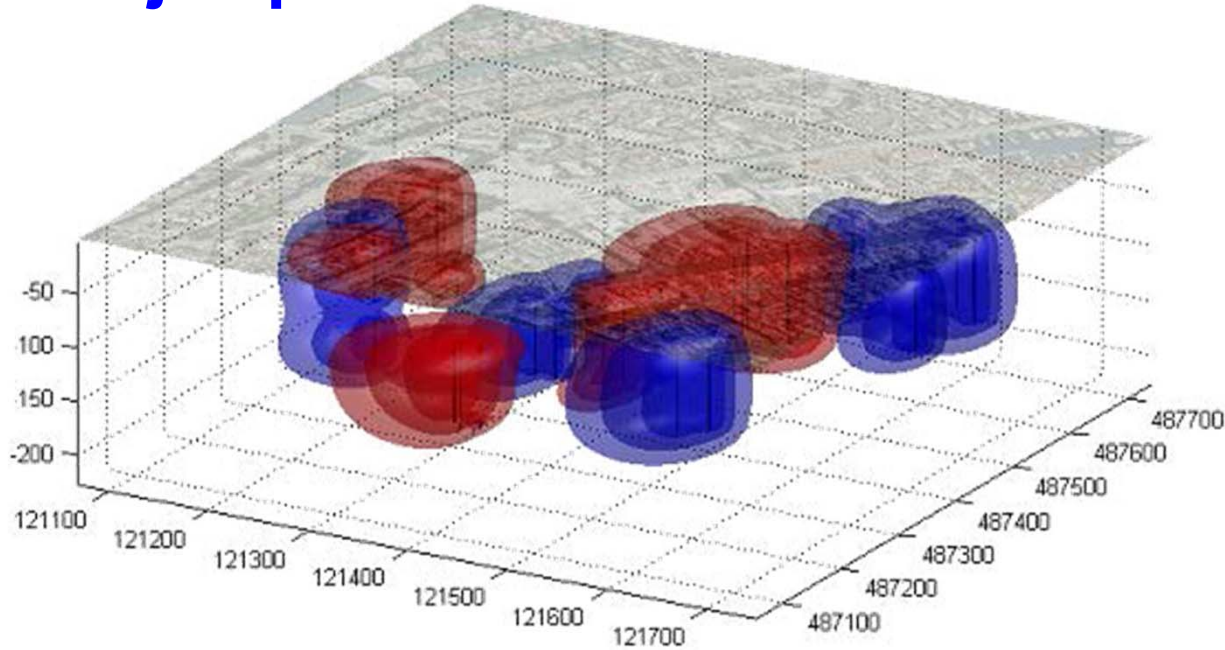
Tours 54 pieux (sur 500)



Et si chacun veut son stockage ?



En milieu urbain l'enjeu peut devenir concurrentiel





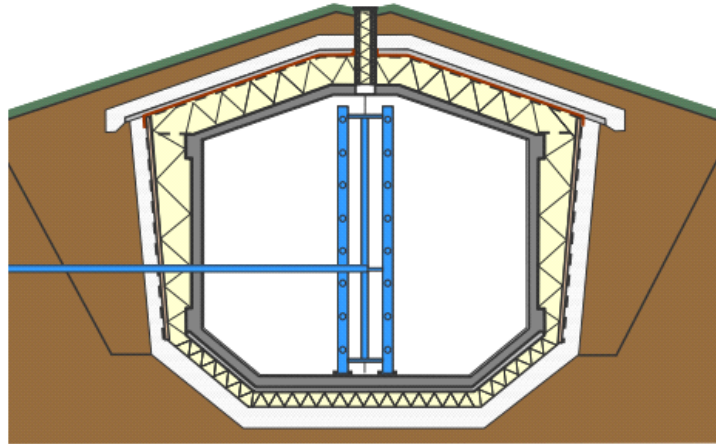
Promesses des Stockages géologiques d'énergie thermiques

Quelques pistes pour mieux valoriser les EnR&R ...

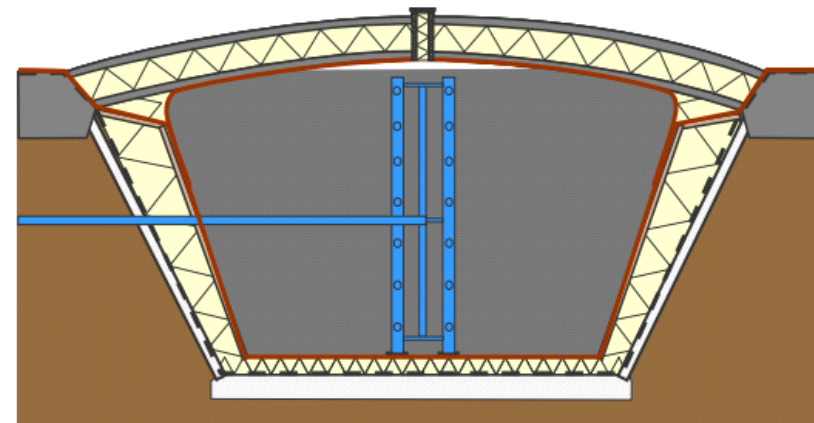
... et aussi minimiser la dépense

1ère : Stocker assez peu profond

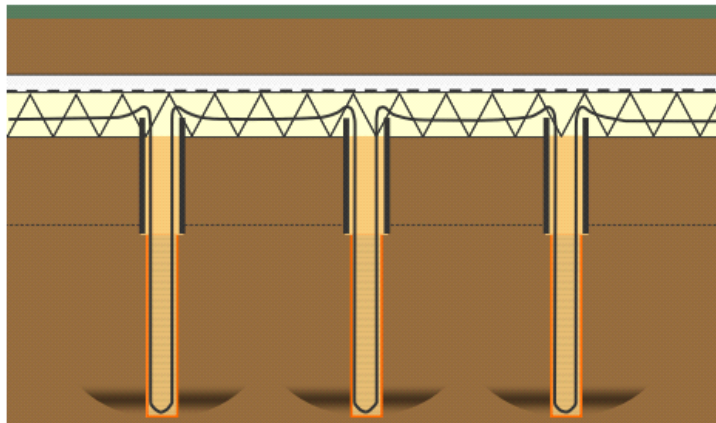
Tank thermal energy storage (TTES)
(60 to 80 kWh/m³)



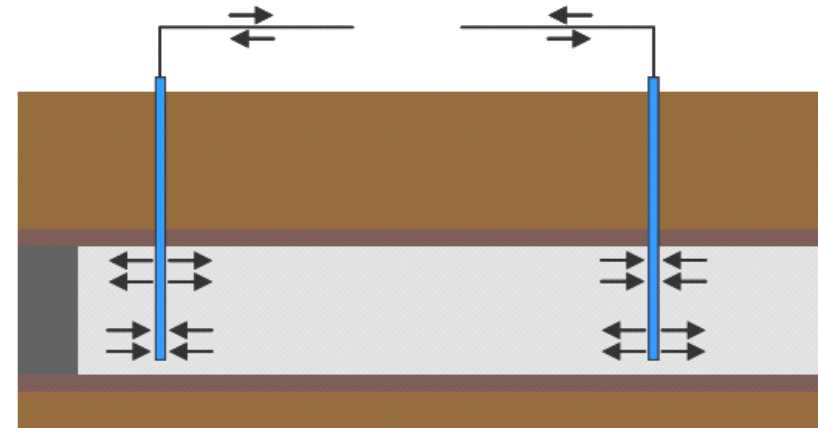
Pit thermal energy storage (PTES)
(60 to 80 kWh/m³)



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

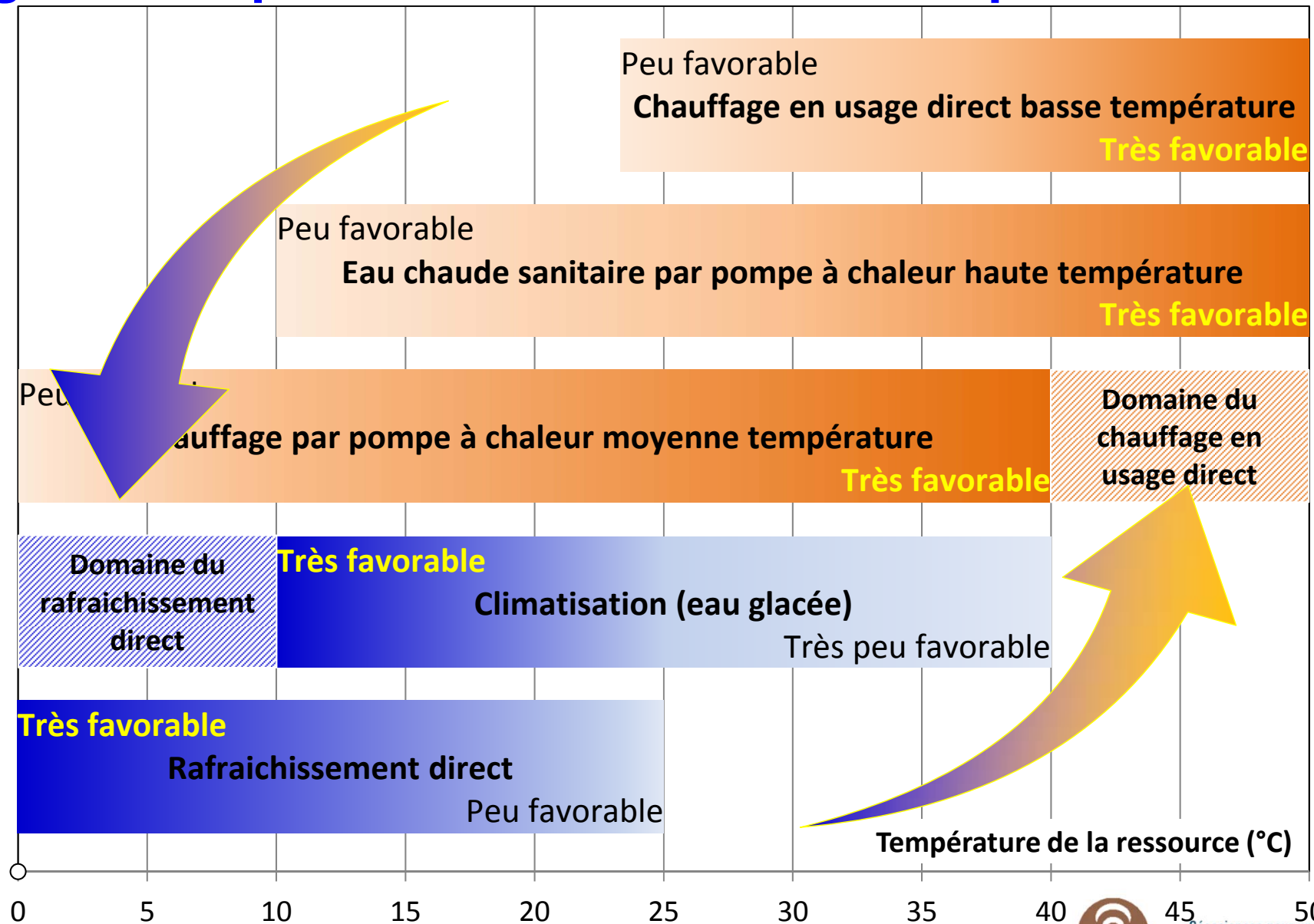


Aquifer thermal energy storage (ATES)
(30 to 40 kWh/m³)



2nde clef : Favoriser

l'usage thermique direct & les COP ou EER performants



Stocker pour favoriser l'usage thermique direct

Stocker pour le chauffage direct

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



52 logements
en 4 branches

Choix structurant

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)

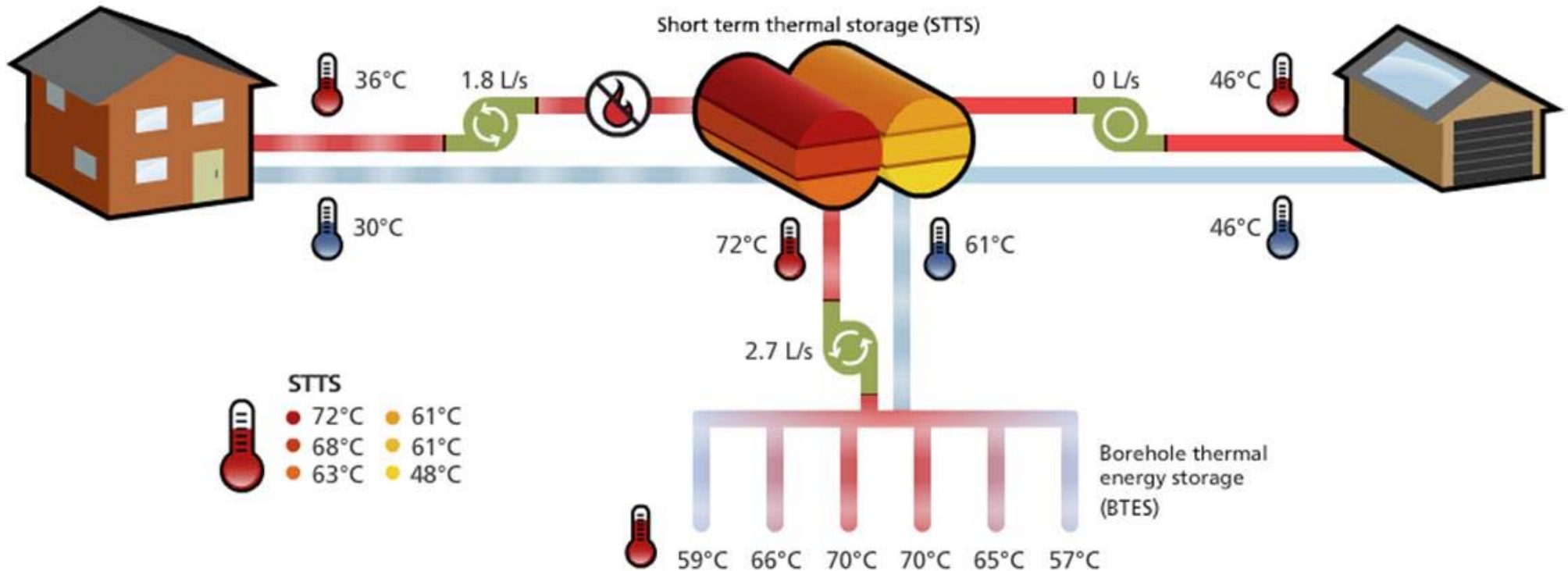
Okotoks (canada)



Current Conditions

September 30, 2015

5:30



Outdoor Temperature
5°C



Incident Solar
0 W/m²



Solar Energy Collected
0 kW



Solar Fraction
100%



Space Heating Load
39 kW

Quelques années pour
atteindre le régime de croisière



brgm

Géosciences pour une Terre durable

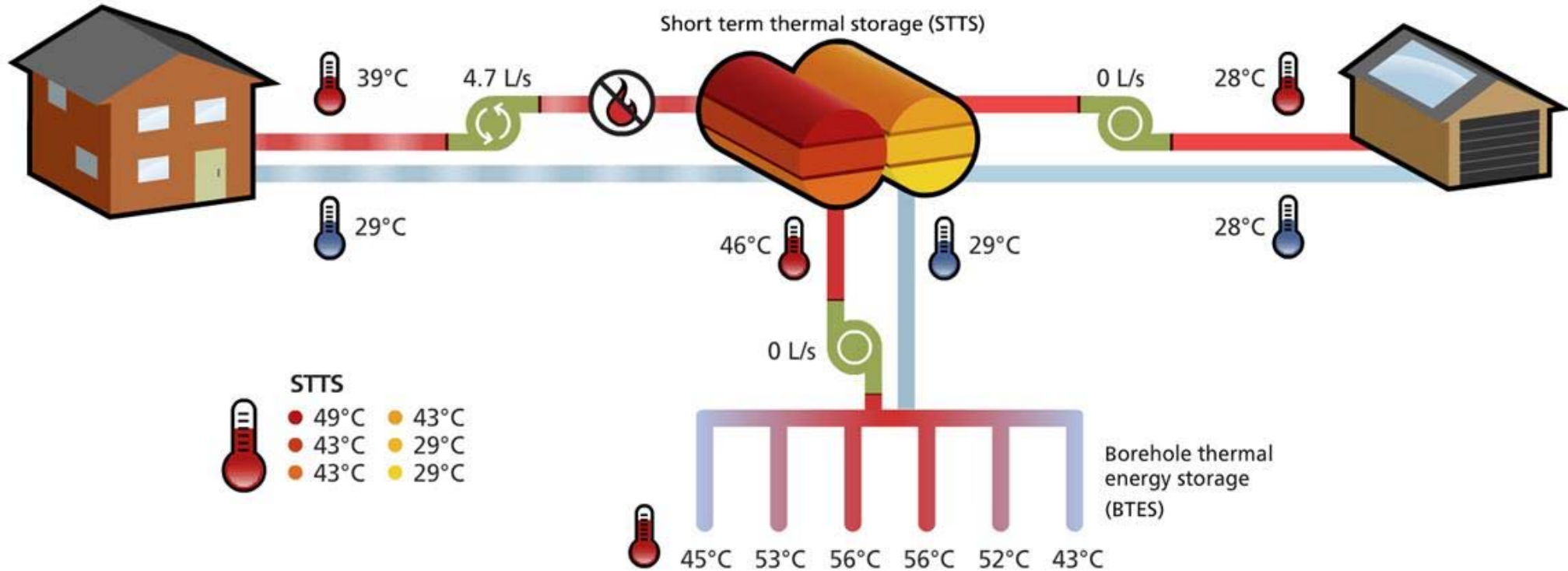
Okotoks (canada)



Current Conditions

November 30, 2015

9:00



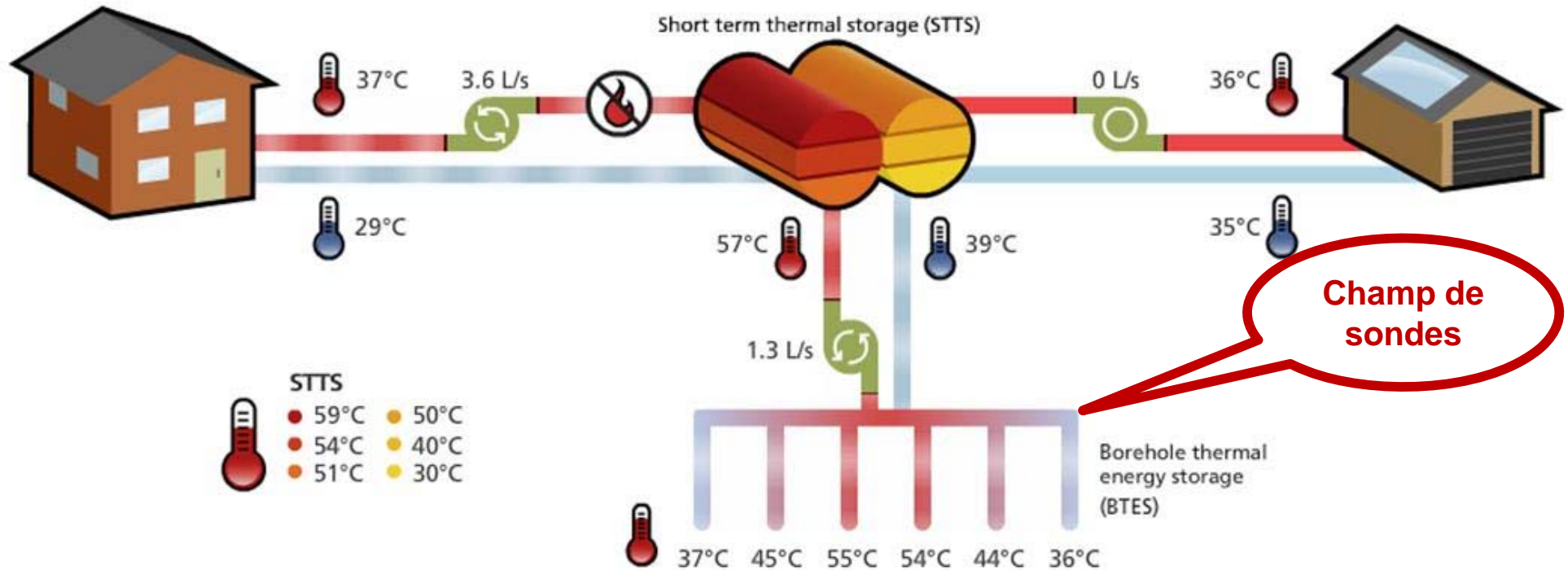
<p>Outdoor Temperature -7°C</p>	<p>Incident Solar 303 W/m²</p>	<p>Solar Energy Collected 0 kW</p>	<p>Solar Fraction 100%</p>	<p>Space Heating Load 185 kW</p>
-------------------------------------	---	--	--------------------------------	--------------------------------------

Quelques années pour
atteindre le régime de croisière

Okotoks (canada)



Current Conditions **April 25, 2013** **5:20**



<p>Outdoor Temperature 5°C</p>	<p>Incident Solar 0 W/m²</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)

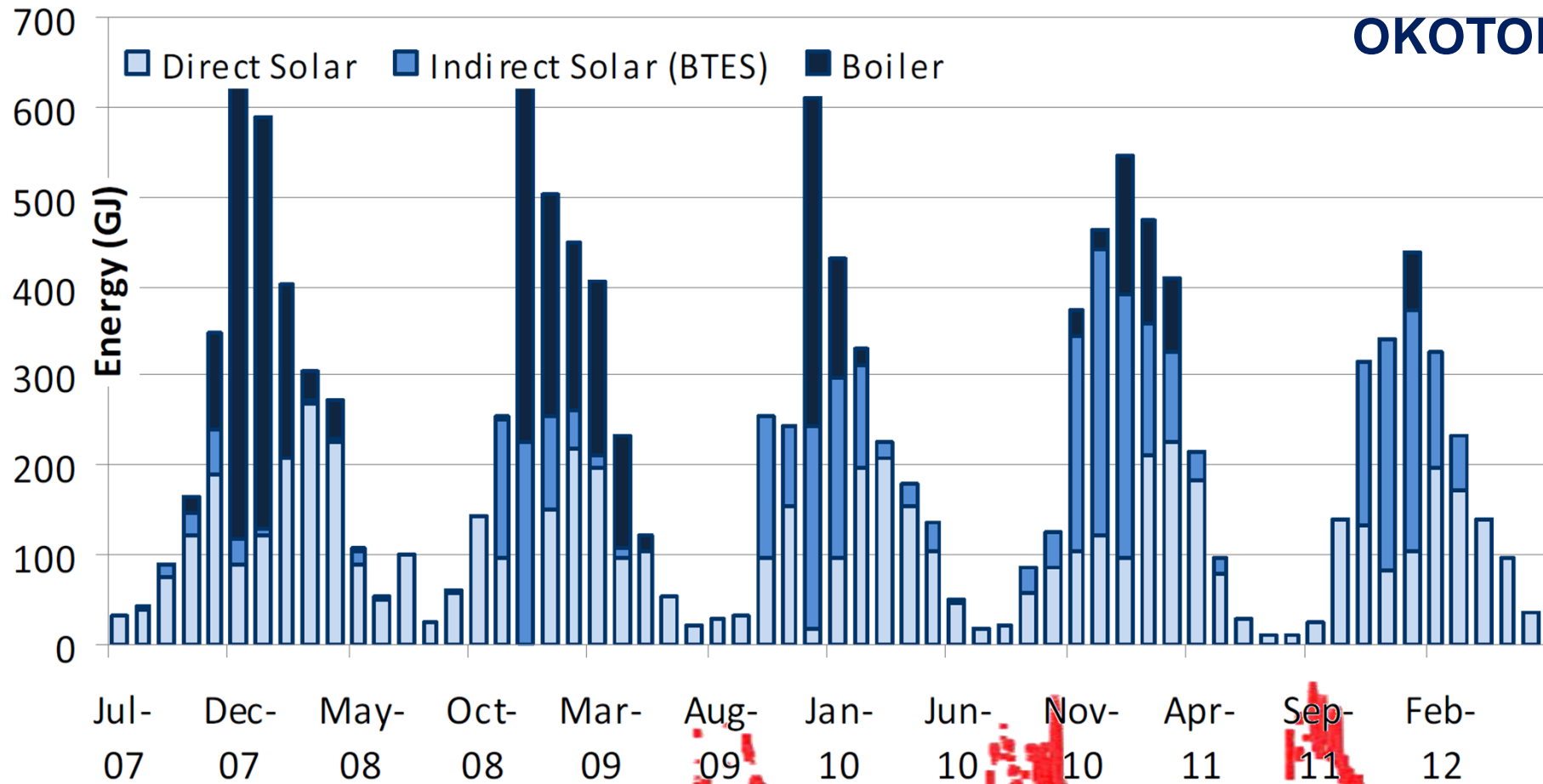


Etat en avril 2013

Okotoks (canada)



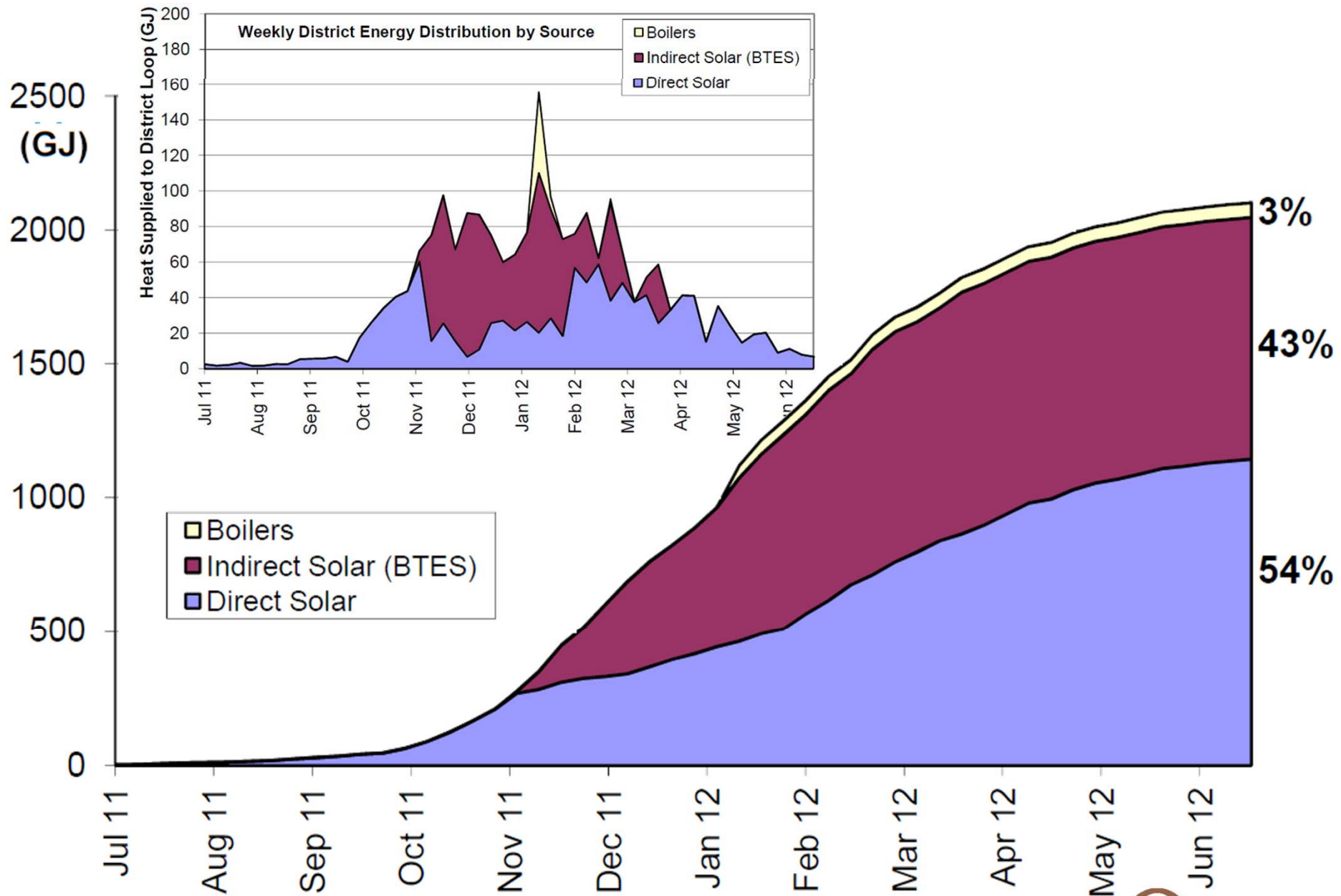
OKOTOKS



**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%)

Un exemple théorique

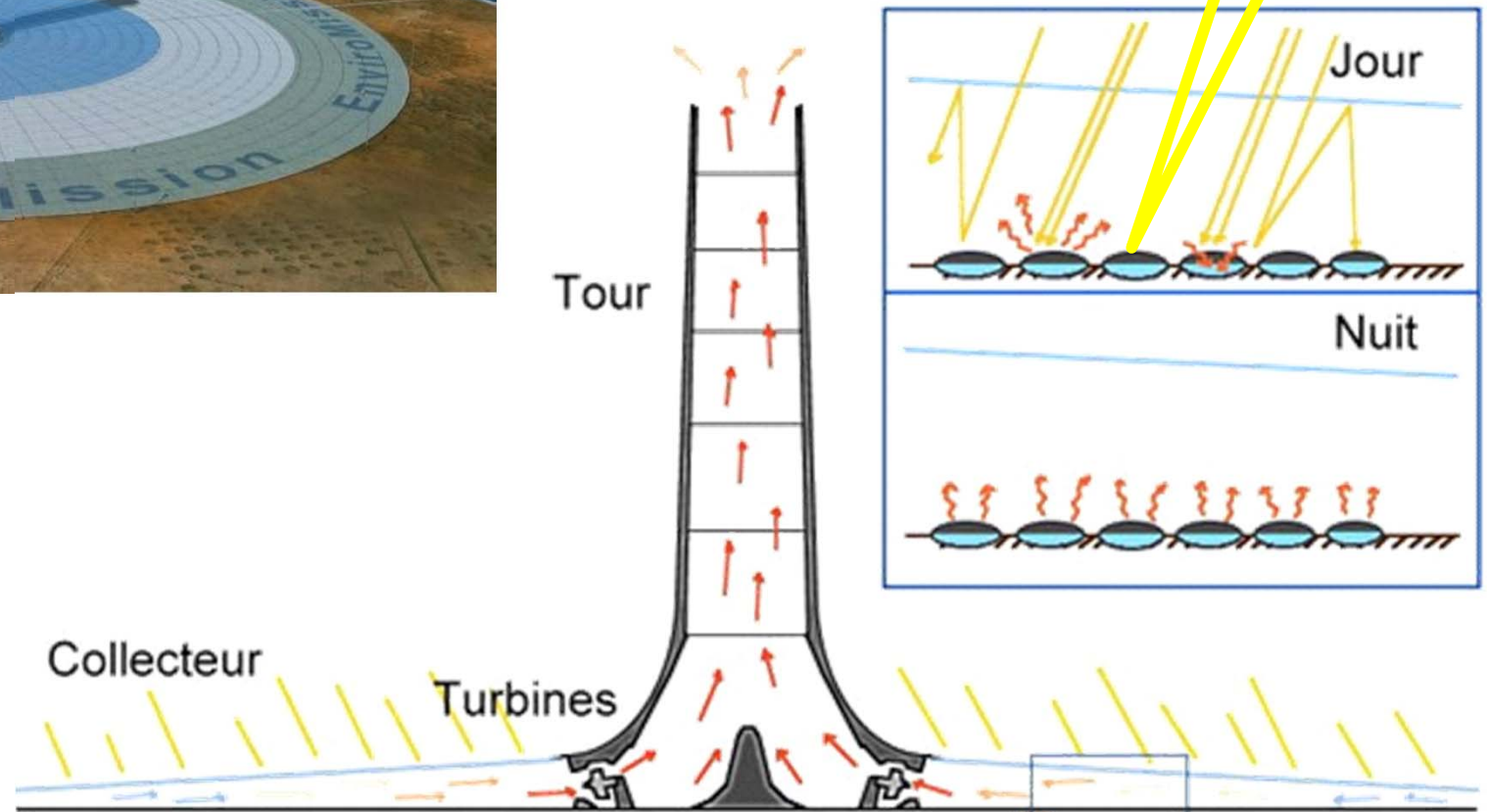


**EnviroMission
(Arizona)
750M\$
200 MWélec.
800m de haut
10 km² (r 1.8km)**

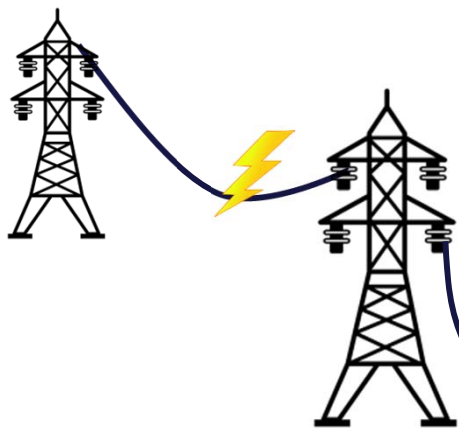
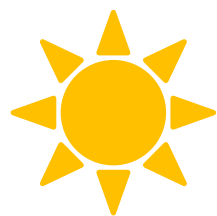
**Réservoirs
d'eau**



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



Stocker pour produire de l'électricité



Rayonnement solaire intermittent

Rayonnement solaire intermittent

Tirage continu

800 m

Stocker dans les roches plutôt que dans de l'eau

75°C

2 à 4 km

Tour aéro-solaire : Cycles quotidiens de stockage dans les roches superficielles

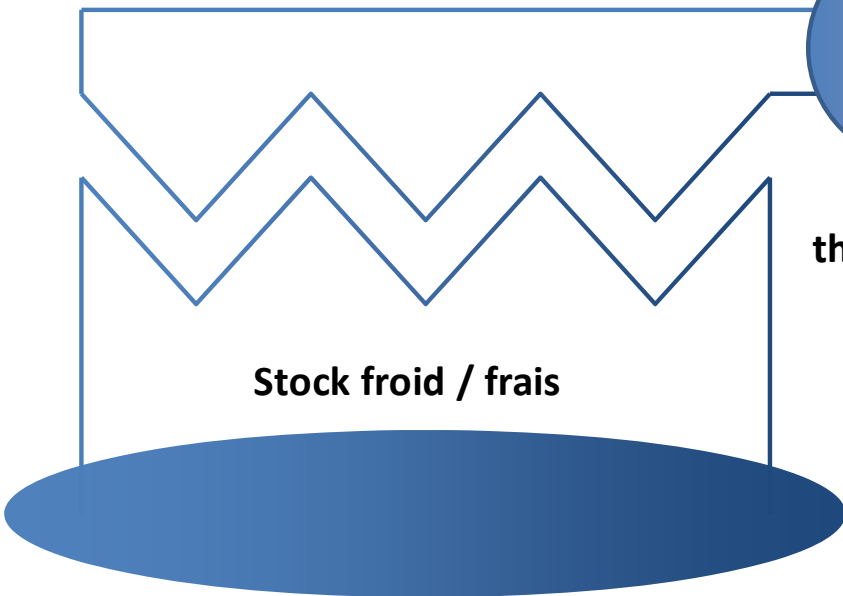
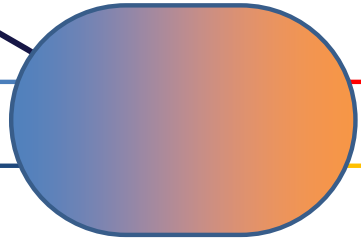
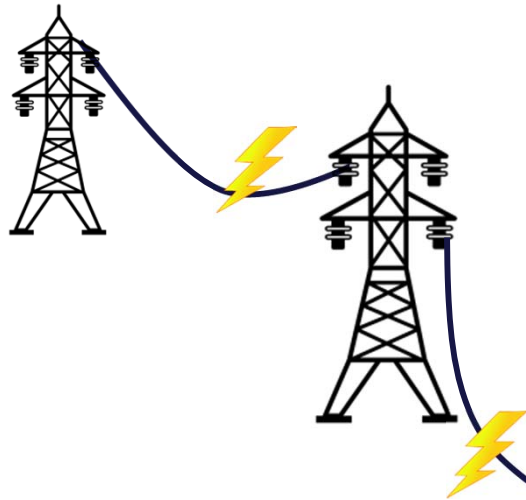
- Puissance solaire incidente : 7.5 GWth
- Energie solaire incidente (8h) : 60 GWh
- Capacité du Sol : 2.3 MJ/m³.K, si ΔT 10°C
=> 65 GWh/m de profondeur (rayon 1.8 km)

Autre exemple théorique

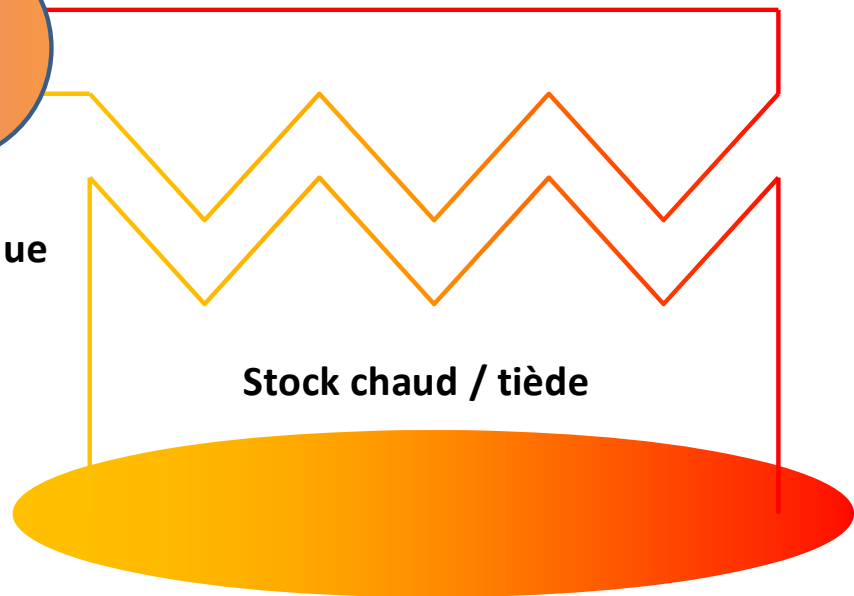
'Power to Heat' ⇔ Stockage



Electricité à prix bas



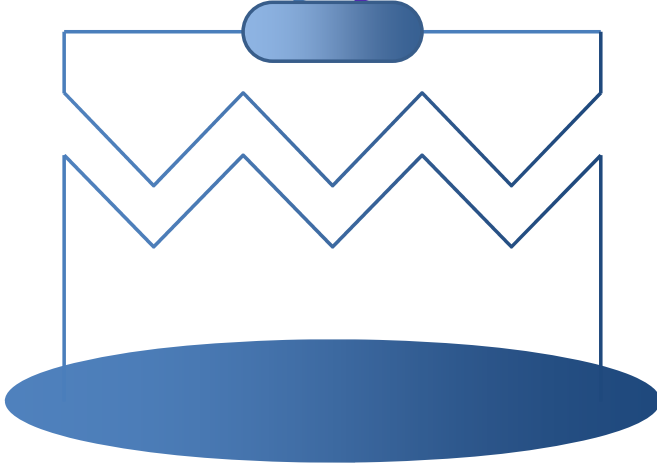
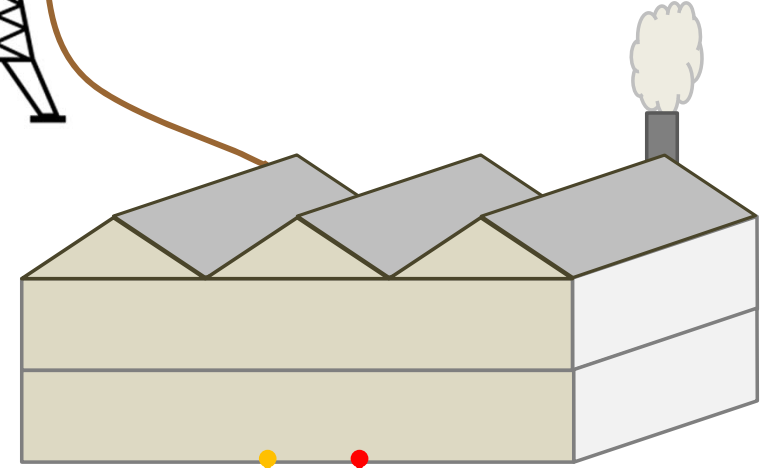
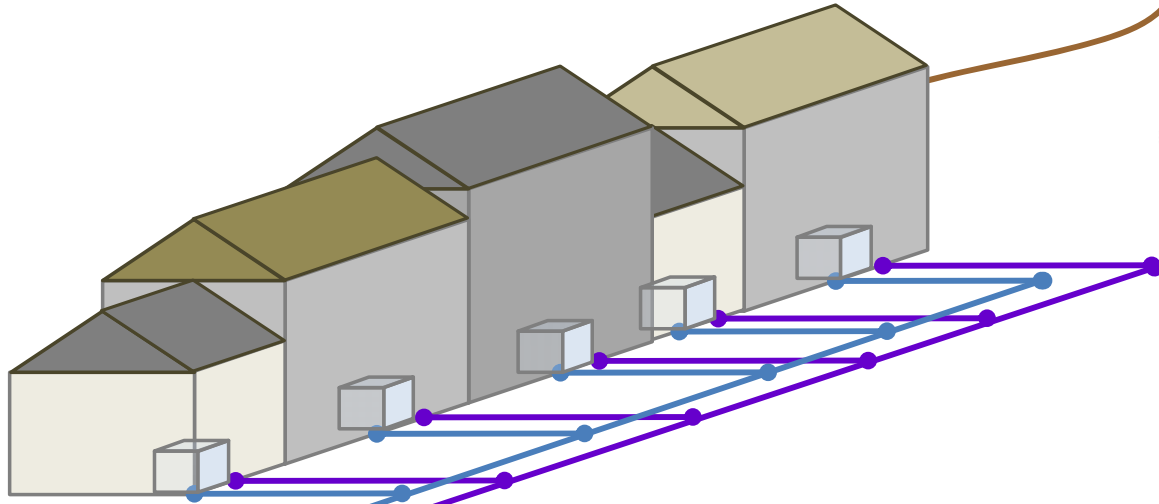
Machinerie thermodynamique



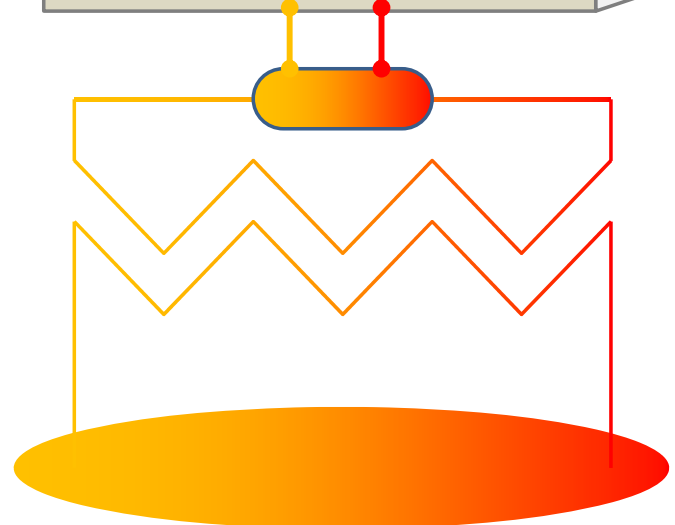
'Power to Heat' ⇔ déstockage



Electricité à prix normal



Stocks disponibles pour tous les types de demande





Stockage géologique de l'énergie thermique

Par où raisonnablement commencer
pour stimuler la filière économique ?

Une proposition

Par où commencer ?



Campus	Etat	SGV	PACP	Horiz.	Aquif.	Doublet	ATES	Autre
Yavapai College	AZ	X						
Feather River College	CA	X		X	X			
Ohlone College	CA			X				
Colorado Northwestern Community College	CO	X						
Eastern Connecticut State University	CT		X					
Fairfield University	CT	X						
Yale University	CT		X					
University of Central Florida	FL				X			
Georgia Institute of Technology	GA	X						
University of Hawaii at Manoa	HI					X		
Luther College	IA	X						
Maharishi University of Management	IA			X				
University of Northern Iowa	IA	X						
Boise State University	ID					X		
College of Southern Idaho	ID					X		
Columbia College	IL	X						
Heartland Community College	IL	X						
John Wood Community College	IL	X						
Lake Land College	IL	X						
University of Illinois, Chicago	IL	X						
University of Illinois, Rockford	IL	X						
Western Illinois University	IL	X						
Ball State University	IN	X						
Goshen College	IN	X						
University of Kansas	KS	X						
Berea College	KY	X						
Harvard University	MA	X	X					
Harford Community College	MD	X						
McDaniel College	MD	X						
Bowdoin University	ME		X					
Colby College	ME	X						
University of Maine Farmington	ME	X						
University of Southern Maine	ME		X					
Davenport University	MI	X						
Grand Valley State University - Allendale	MI	X						
Lansing Community College	MI	X						
Lawrence Technological University	MI	X						
University of Minnesota Arboretum	MN	X						
Drury University	MO	X						
University of Montana	MT					X		
University of North Carolina Chapel Hill	NC	X						
Warren Wilson College	NC	X						
Wilson Community College	NC	X						

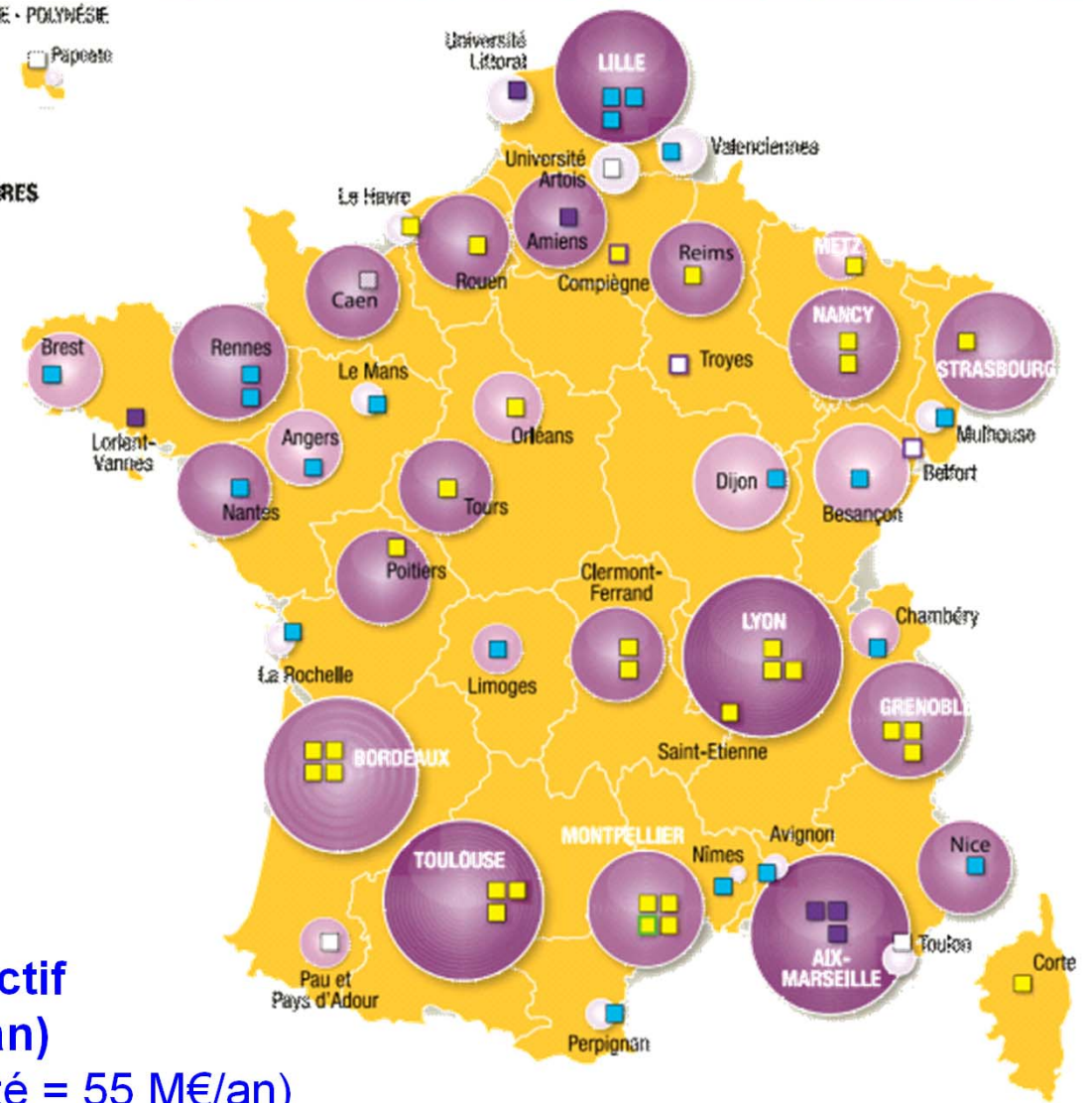
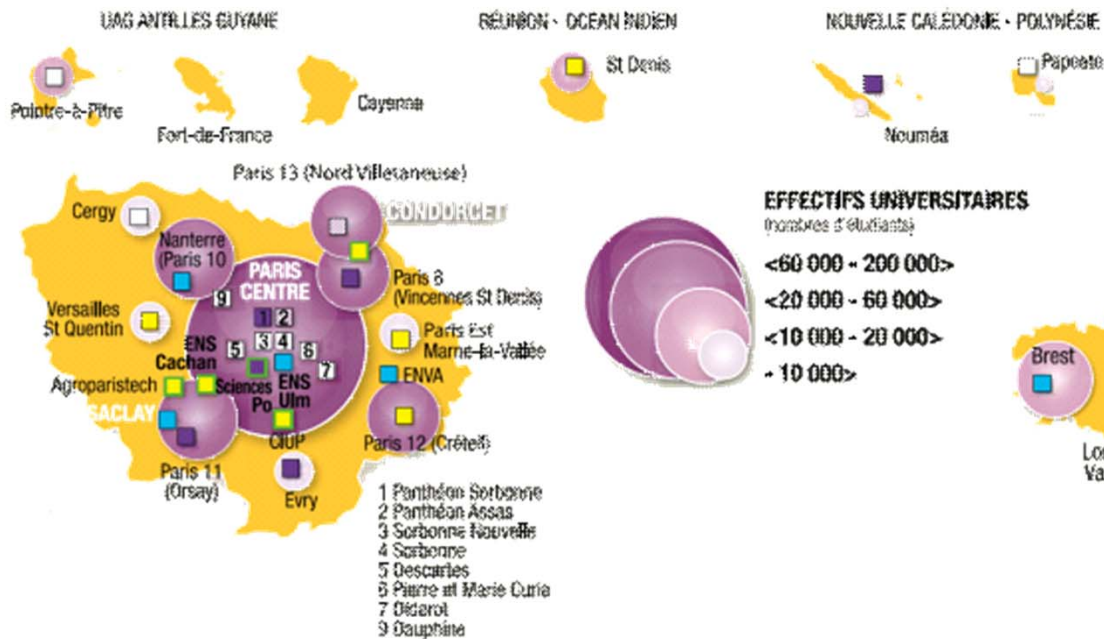
Campus	Etat	SGV	PACP	Horiz.	Aquif.	Doublet	ATES	Autre
Turtle Mountain Community College	ND	X						
Plymouth State University	NH	X						
Drew University	NJ	X						
Richard Stockton College	NJ	X					X	
New Mexico Institute of Mining and Technology	NM					X		
Adelphi University	NY	X						
Bard College	NY	X						
Columbia University	NY		X					
Cornell University	NY							X
Hamilton College	NY	X						
Ithaca College	NY	X						
Paul Smith's College	NY	X						
Skidmore College	NY	X						
SUNY Sullivan County Community College	NY	X						
SUNY Brockport	NY	X						
SUNY Dutchess Community College	NY	X						
The General Theological Seminary	NY		X					
Vassar College	NY	X						
Oberlin College	OH	X						
Rogers State University	OK	X						
Oklahoma State University	OK	X						
Oklahoma State University Institute of Technology	OK	X						
Lane Community College	OR			X	X			
Oregon Institute of Technology	OR					X		
Portland State University	OR	X						
University of Oregon	OR	X						
Allegheny College	PA	X						
California University of Pennsylvania	PA	X						
University of Pennsylvania Morris Arboretum	PA	X						
Mercyhurst College	PA	X						
Mercyhurst College - North East	PA	X						
West Chester University	PA	X						
Furman University	SC	X						
Medical University of South Carolina	SC	X						
Lipscomb University	TN	X						
Rice University	TX	X						
University of Utah	UT							X
Champlain College	VT					X		
Pacific Lutheran University	WA	X						
College of Menominee Nation	WI	X						
Northland College	WI	X						
University of Wisconsin-Madison	WI	X						
Laramie County Community College	WY	X						

En 2011, pas loin de 100 campus américains déjà sur géothermie, en majorité sur champs de sondes géothermiques verticales (SGV)

Pourquoi pas les campus français ?



Par où commencer ?



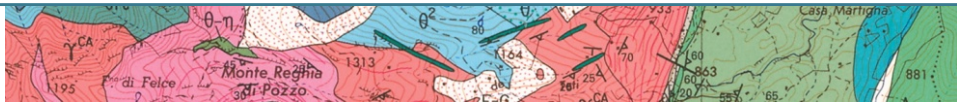
Pourquoi pas les campus français ?

- 86 établissements (certains multi-sites)
- 13.6 millions de m² SHON
- 820 MW installés pour le chauffage collectif
- 1 480 GWh/an pour le chauffage (55 M€/an)
(sans compter les 1 000 GWh/an d'électricité = 55 M€/an)
- Gains espéré si passage sur champ de sondes : plus de 25 M€/an
- Le rafraichissement serait compris

En France

- GTH-BE : 400 MW ⇔ 1 500 GWh/an
- GTH-TBE : 130 000 PACg, 1 600 GW ⇔ 2 500 GWh/an





Le stockage géologique de l'énergie thermique

Réalités et Promesses

8 décembre 2015

Hervé Lesueur – h.lesueur@brgm.fr