

Le stockage souterrain inter-saisonnier

Charles Maragna, BRGM



Sommaire

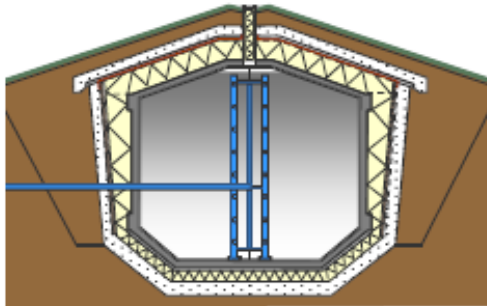
- Les usages du stockage
- Les technologies de stockages
- Exemples de stockage haute température
- Exemples de stockage très basse température

Les usages

- **Stockage annuel** : Un cycle / an.
 - Stockage d'une énergie avec un coût marginal très faible (solaire thermodynamique, chaleur industrielle/incinérateur, PAC avec des prix d'électricité très faibles l'été ou alimenté par PV).
- **Stockages haute température (HT) pour des applications de chauffage** :
 - Stockage de chaleur excédentaire en été (par ex. solaire) à 60-80 °C
 - Restitution en hiver (parfois avec une PAC) jusqu'à 40 ou 30 °C
- **Stockages très basse température couplés à une PAC produisant chauffage ET rafraîchissement** :
 - Production de froid en été, éventuellement freecooling (réchauffement du stock)
 - Production de chaud en hiver (refroidissement du stock)
 - Oscillation autour de la température initiale du terrain avec une amplitude de 10 à 20 °C

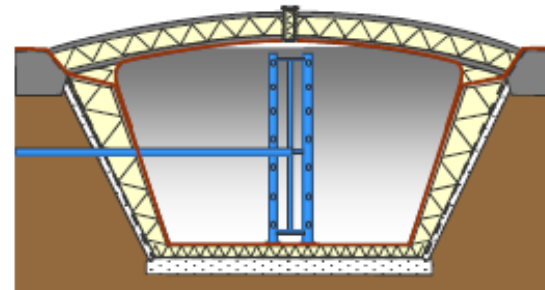
Les technologies de stockage

Tank Thermal Energy Storage (TTES)



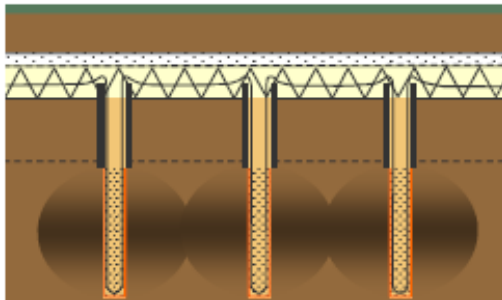
Réservoir enterré

Pit Thermal Energy Storage (PTES)



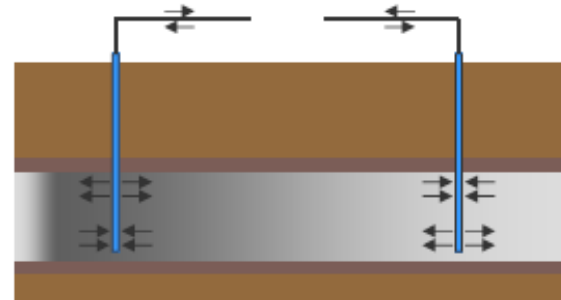
Puits / cavernes

Borehole Thermal Energy Storages (BTES)



Champ de sondes

Aquifer Thermal Energy Storages (ATES)

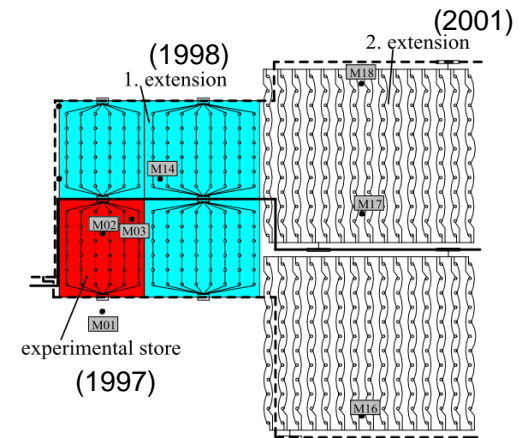
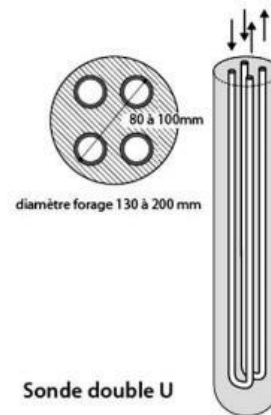


Aquifère

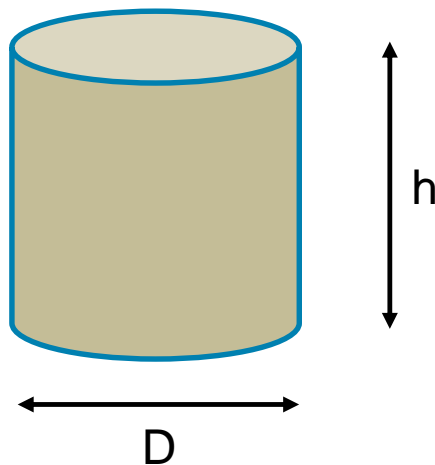
Source: Solites, Solar district heating guidelines, 2012

Stockage en champ de sondes (BTES) haute température

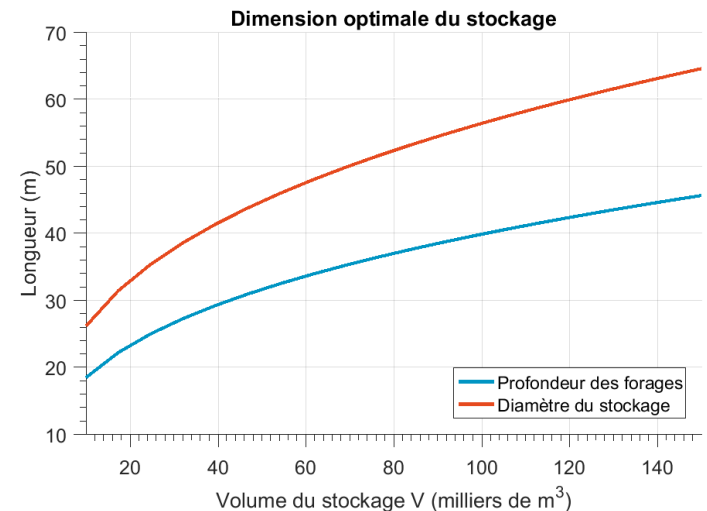
- Connection de plusieurs dizaines à centaines d'échangeurs géothermiques verticaux



- Espacement typique entre les forages : 3 à 5 m

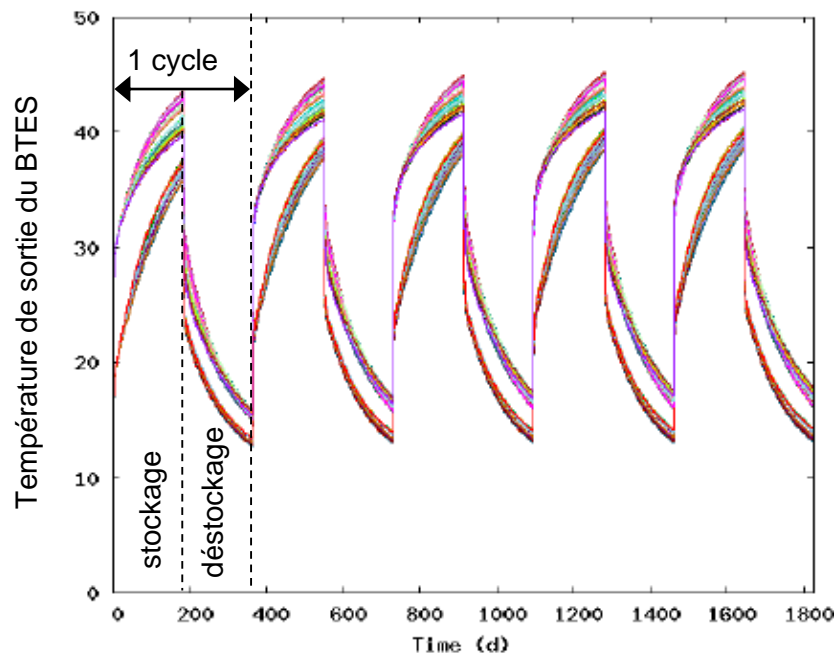


Minimisation
du ratio
surface/volume



Stockage en champ de sondes (BTES) haute température

- Principe physique : Accumulation d'énergie thermique à proximité des forages. Transfert par conduction (pas d'échange de matière avec le milieu souterrain)



Source : Feflow White Papers Vol. V

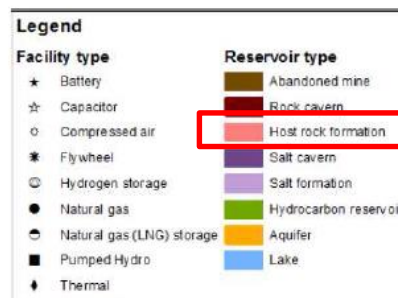
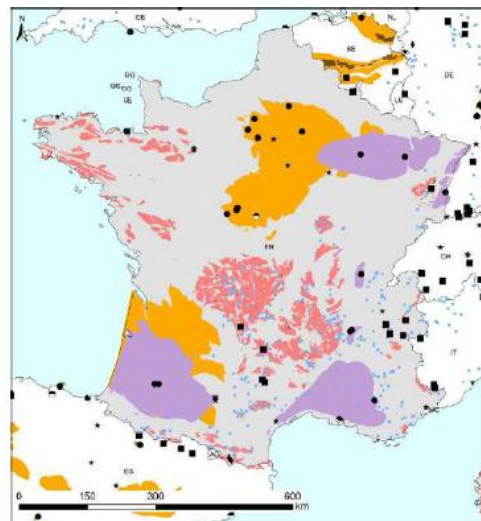
Modélisation du BTES de Crailsheim
80 sondes profondes de 55 m (37 500 m³)
Température d'entrée du BTES :
- 53 °C en stockage
- 10 °C en déstockage

Stockage en champ de sondes (BTES) haute température

- Température maximale de stockage constatée $< 80\text{ °C}$
- Plusieurs cycles (≈ 4) nécessaires à la montée en température du stock.
- Rendement η (après la 4^{ème} année) :
 - Solar Drake Landing : $V = 24\,000\text{ m}^3$, $\eta = 49\%$
 - Neckarsulm : $V = 63\,360\text{ m}^3$, $\eta = 67\%$

Stockage en champ de sondes (BTES) haute température

- Milieu géologique :
 - a priori défavorable si écoulements souterrains (à caractériser à l'échelle de la parcelle)
 - a priori favorables en roches métamorphiques et granitiques et sédimentaires si faible perméabilité.
- Pertinence de la caractérisation du comportement hydro / thermo / mécanique de la roche en laboratoire



Sources : projet H2020 ESTMAP

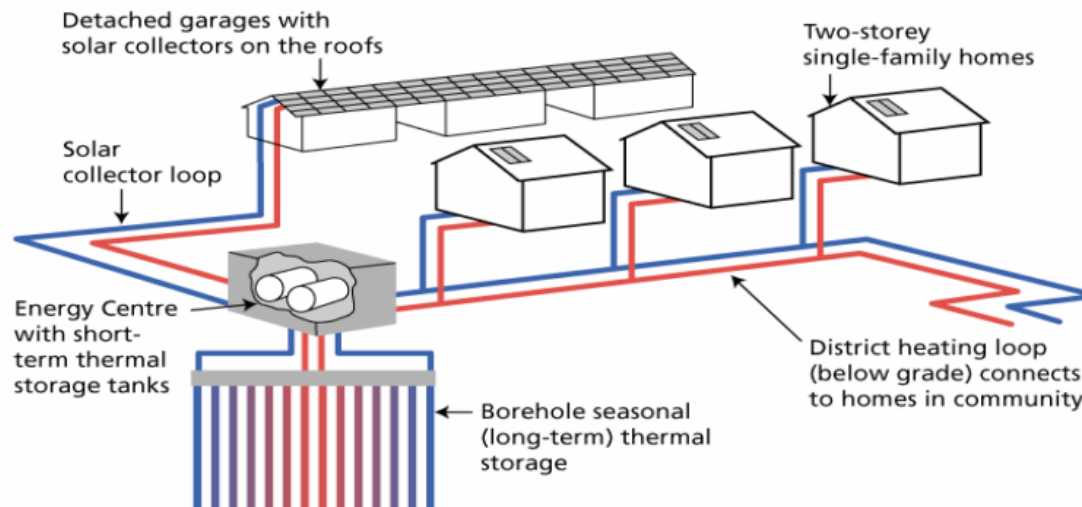
→ roches métamorphiques et granitiques

Stockage en champ de sondes (BTES)

Avantages	Inconvénients
Solution modulaire	CAPEX élevé
Outils de dimensionnement fiables (ex. TRNSYS)	Solution limitée aux terrains sans écoulements significatifs ($v_D < 1 \text{ m.a}^{-1}$)
Il existe des matériaux adaptés aux régimes de température (par ex. boucle PE-RT ou PE-Xa)	Puissance transitoire
Retour d'expérience sur plusieurs sites	
OPEX faible (consommation électrique des circulateurs + éventuellement PAC)	

Exemples de stockage haute température : BTES de Solar Drake Landing, Okotoks, Canada

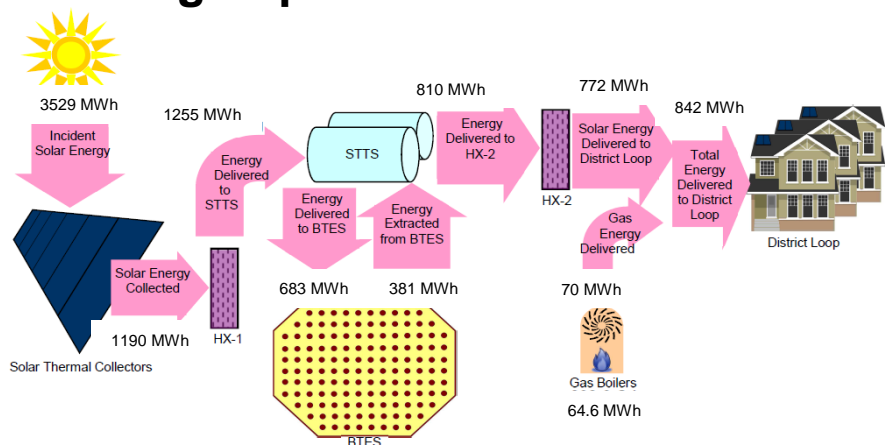
- Alimentation de 52 logements individuels via un micro-réseau de chaleur
- 2293 m² de panneaux solaires
- 144 sondes géothermiques verticales profondes 35 m ($\approx 24\,000\text{ m}^3$)
- 90% de la consommation ($\approx 750\text{ MWh/an}$) couverte par du solaire
- Climat rigoureux ($\text{DJU}_{18} = 4924\text{ °C.jours}$)



Source: The Drake Landing Solar Community Project - Early Results

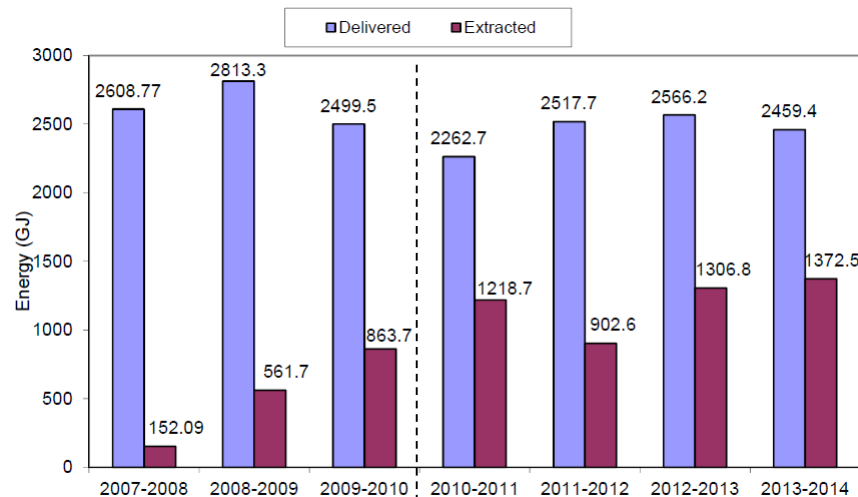
Exemples de stockage haute température : BTES de Solar Drake Landing, Okotoks, Canada

Diagramme de flux énergétiques en 2014



Source: Drake Landing Solar Community Energy Report 2014

Bilans annuels sur le BTES



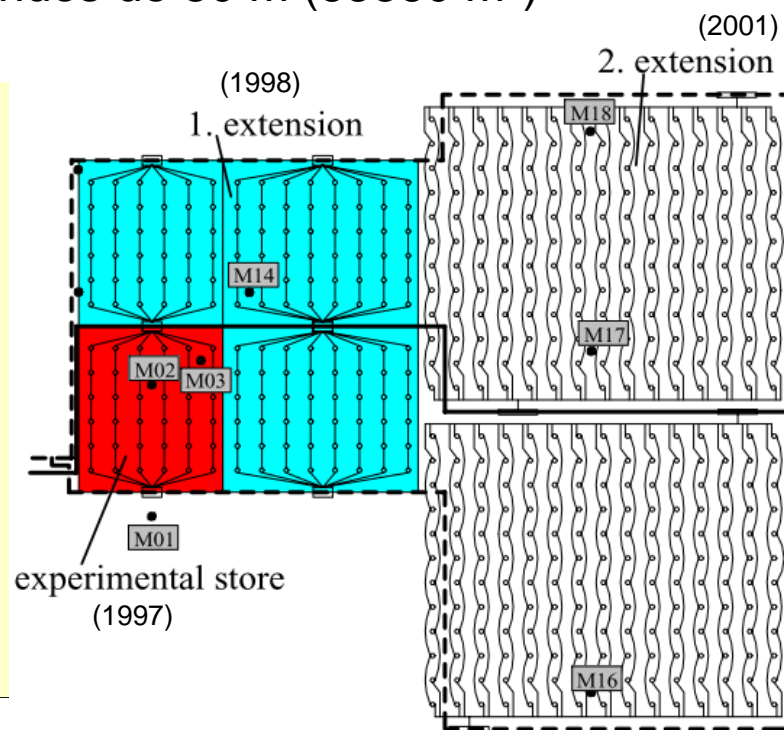
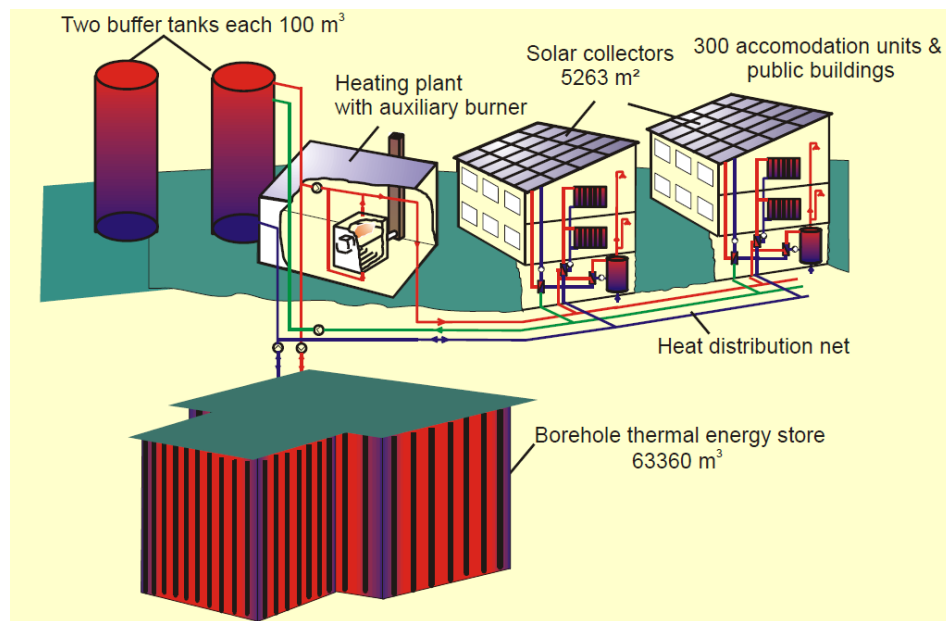
Régime transitoire

Régime périodique :
Rendement moyen = 49%

- Dimensionnement basé sur un modèle dynamique dans TRNSYS, qui a donné des prédictions fiables (par ex. fraction solaire estimée à 89% la 4^{ème} année contre 86% mesurée)

Exemples de stockage haute température : BTES de Neckarsulm, Allemagne

- Alimentation de 300 logements, une école, un centre commercial
- 5263 m² de panneaux solaires
- 528 sondes géothermiques verticales profondes de 30 m (63360 m³)

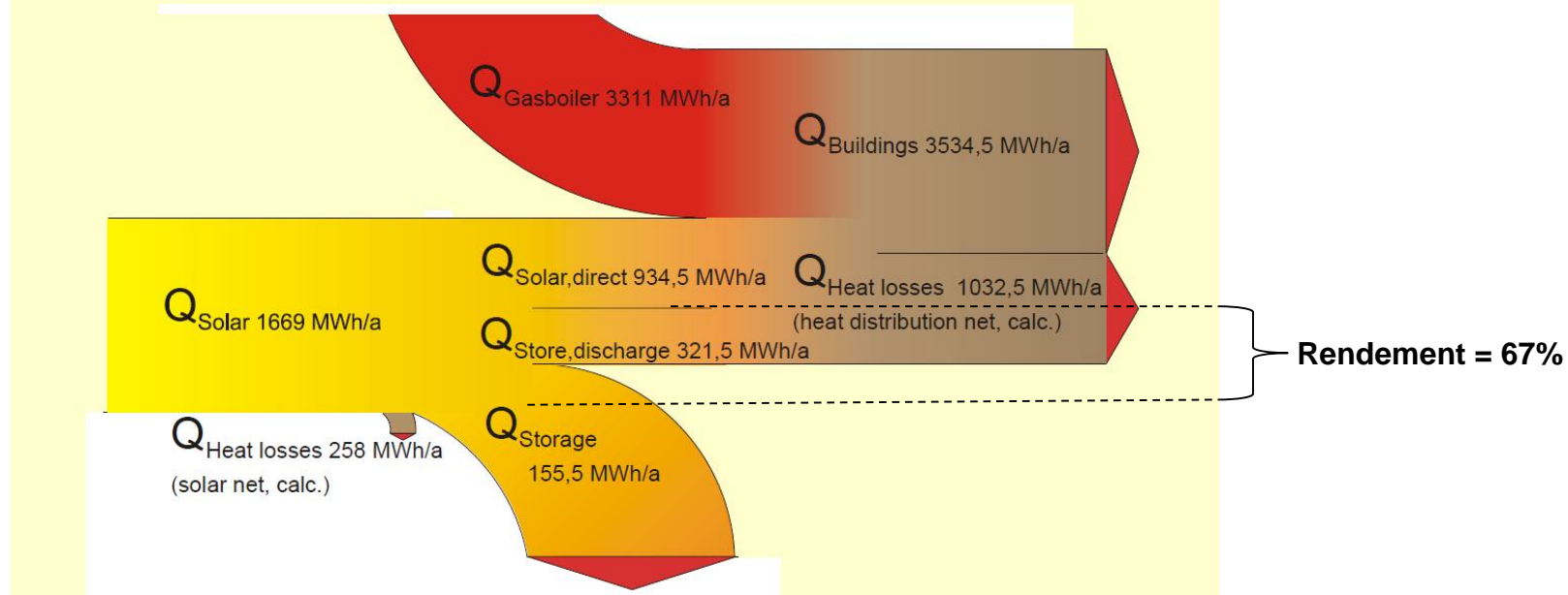


Source: Nussbicker et al. (2006). Monitoring results and operational experiences for a central solar district heating system with Borehole Thermal Energy Store in Neckarsulm (Germany).

Exemples de stockage haute température : BTES de Neckarsulm, Allemagne

- Alimentation de 300 logements, une école, un centre commercial
- 5263 m² de panneaux solaires
- 528 sondes géothermiques verticales profondes de 30 m (63360 m³)

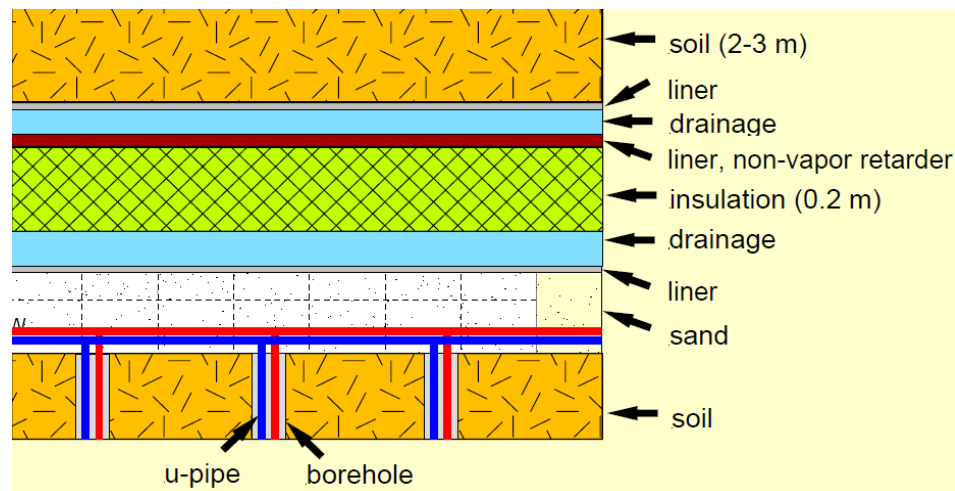
Heat balance for the district heating system (2005)



Source: Nussbicker et al. (2006). Monitoring results and operational experiences for a central solar district heating system with Borehole Thermal Energy Store in Neckarsulm (Germany).

Exemples de stockage haute température : BTES de Neckarsulm, Allemagne

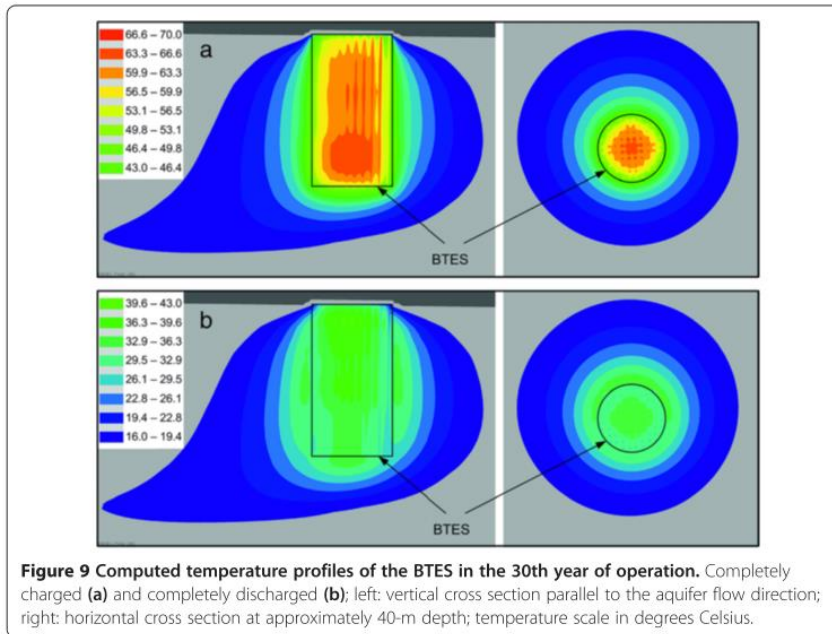
- Isolation de la surface du BTES et intégration paysagère



Source: J. Nussbicker. Monitoring results and operational experiences for a central solar district heating system with Borehole Thermal Energy Store in Neckarsulm

Exemples de stockage haute température : BTES de Crailsheim, Allemagne

- Opérationnel depuis 2008
- 7300 m² de panneaux solaires (installés de 2009 à 2012)
- 80 sondes profondes de 55 m (37 500 m³)
- BTES chargé de 2009 à 2012.
- 1^{ère} décharge via une PAC : 707 MWh injecté, 382 MWh extrait ($\eta = 54\%$)



Modélisation de l'influence
de l'écoulement souterrain sur le
panache de température et
optimisation de la profondeur

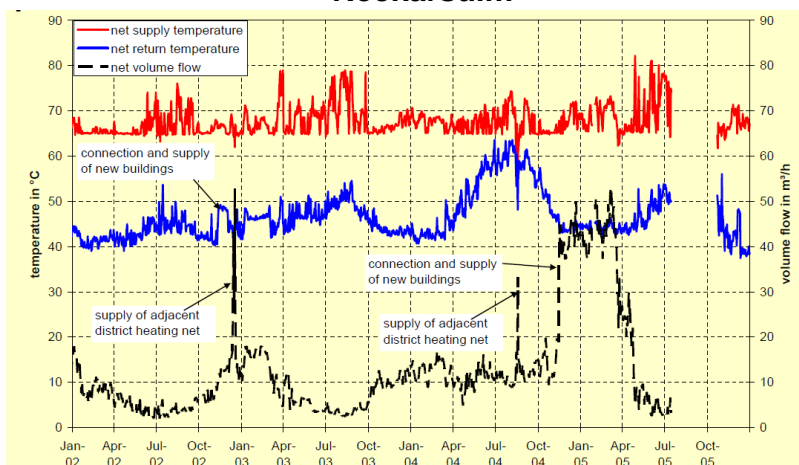
Source : Mielke et al. Geothermal Energy 2014

Exemples de stockage haute température : Décharge via 1 PAC

- Crailsheim :
 - 1^{ère} décharge via une PAC : 707 MWh injecté, 382 MWh extrait ($\eta = 54\%$)
 - Intérêt de la PAC : augmentation du ΔT sur le BTES.
- Neckarsulm : ≈ 500 MWh stocké à dans 63360 m³

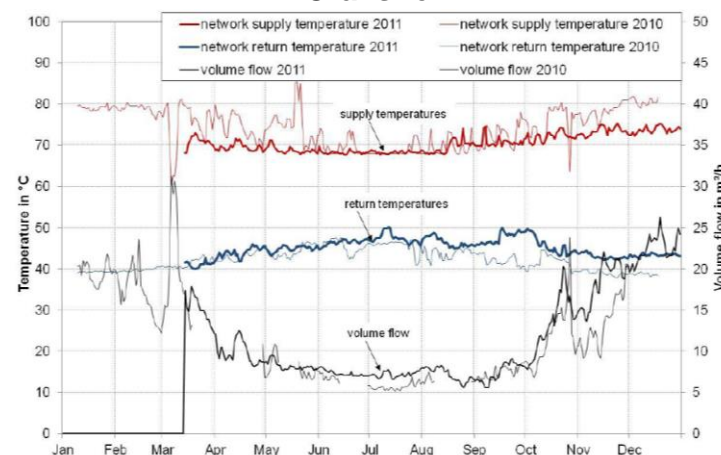
Températures et débits dans le réseau

Neckarsulm



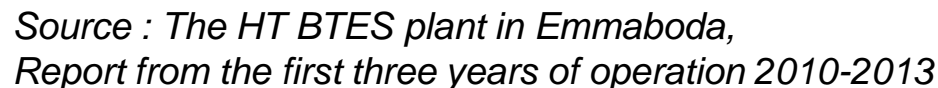
Source : J. Nussbicker

Crailsheim



Source : J. Nussbicker-Lux

- Opérationnel depuis 2010
- Récupération de chaleur fatale industrielle (usine de pompes)
- 144 sondes profondes de 150 m (322 560 m³)
- Conçu pour stocker 3800 MWh/an, avec un rendement $\approx 70\%$
- Stockage entre 55°C et 70 °C, déstockage à 40 °C

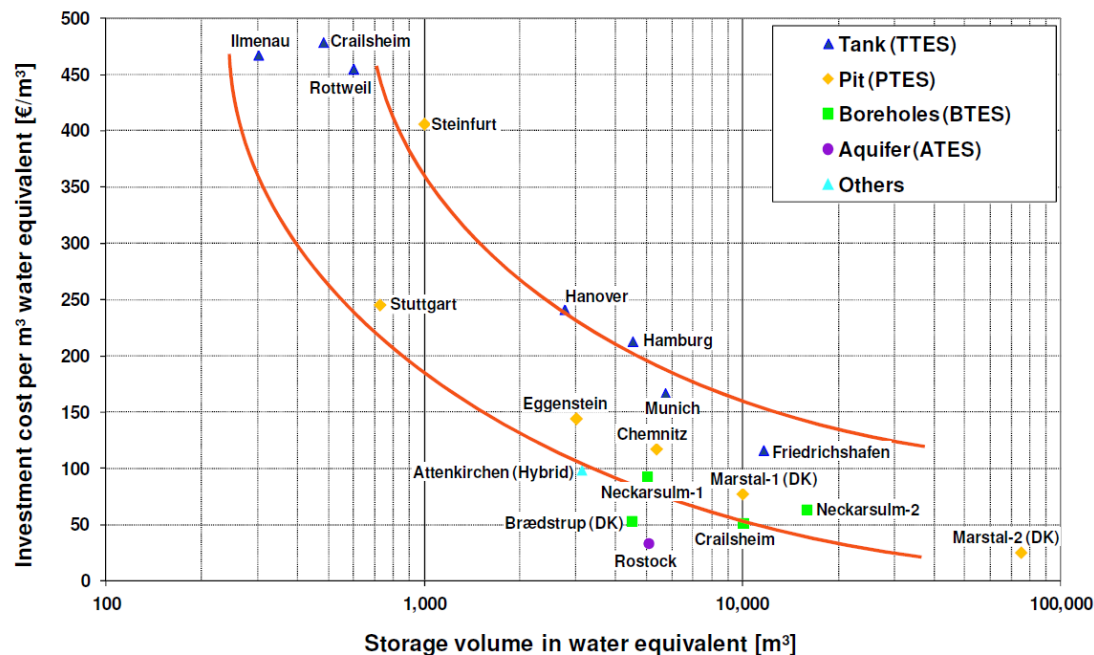


Exemples de stockage haute température

Site	Source de chaleur	Volume de stockage (m ³)	Longueur de forage (m)	Energie stockée (MWh/an)	Densité énergétique (kWh/m ³ /an)	Rendement énergétique du stockage
Solar Drake Landing	Solaire	24 000	5 040	≈ 750	≈ 31,2	≈ 49 %
Crailsheim	Solaire	37 500	4 400	≈ 380	≈ 10,1	≈ 54 %
Neckarsulm	Solaire	63 360	15 840	≈ 480	≈ 7,6	≈ 67 %
Emmabodda	Fatale industrielle	322 500	21 600	≈ 3 800	≈ 11,8	≈ 70 %

Exemples de stockage haute température

- Quelques éléments de coûts
- BTES : investissement de l'ordre de 50 à 100 €/m³ HT



Investissement de différents stockages haute température,
hors TVA (Source : Solites)

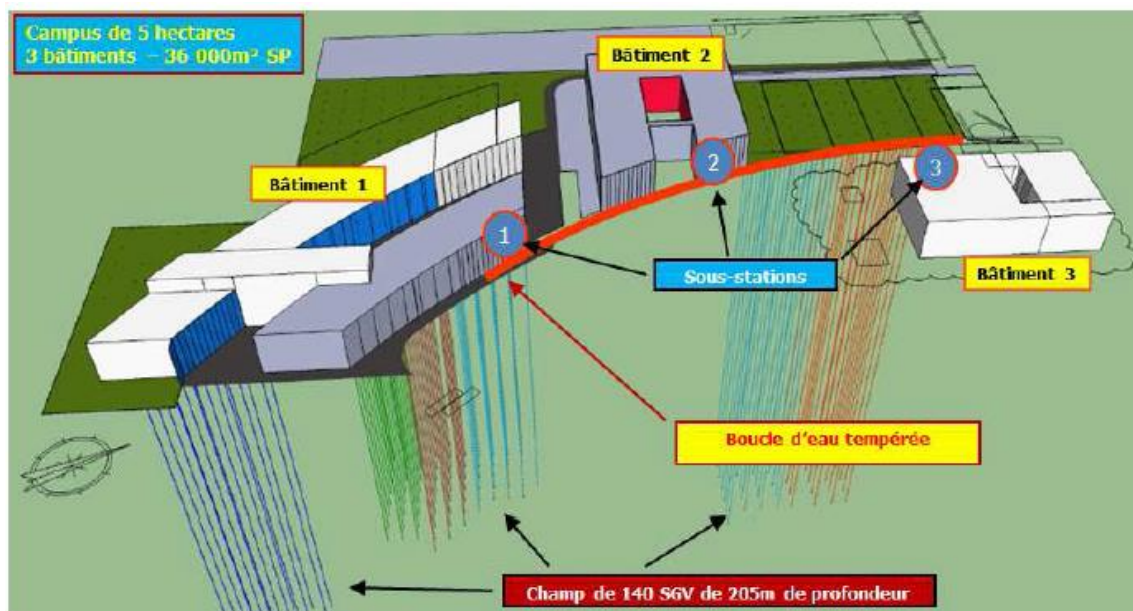
Boucle d'eau tempérée et stockages très basse température

- Principe général :
 - Réseau d'eau tempérée (5 à 30°C)
 - Production décentralisée sur PACs Géothermique Eau/Eau (par bâtiment ou à l'échelle de l'Ilot) pour du chauffage, de la climatisation, ou du géocooling,
 - Multi énergies / Multipoints
 - Un seul et unique réseau

- Les Avantages :
 - Solution multi énergies intégratrice d'EnR
 - Chaud et froid Renouvelable : > à 75% de part EnR
 - Foisonnement des besoins énergétiques
 - Mutualisation des besoins énergétiques entre bâtiments.
 - Optimisation des rendements énergétiques par Thermo Frigo Pompe
 - Stockage Inter saisonnier possible.
 - Intégration des NTIC
 - Monitoring & Supervision par télégestion intégré
 - Smart Grid Thermique

Boucle d'eau tempérée et stockages très basse température : projet Airbus Blagnac

- Principe général :
 - Boucle d'eau tempérée sur champ de 140 SGV de 205m de profondeur couplée à une production décentralisée sur PACs Géothermique délivrant 2MW de Chaud et 1 MW de Froid



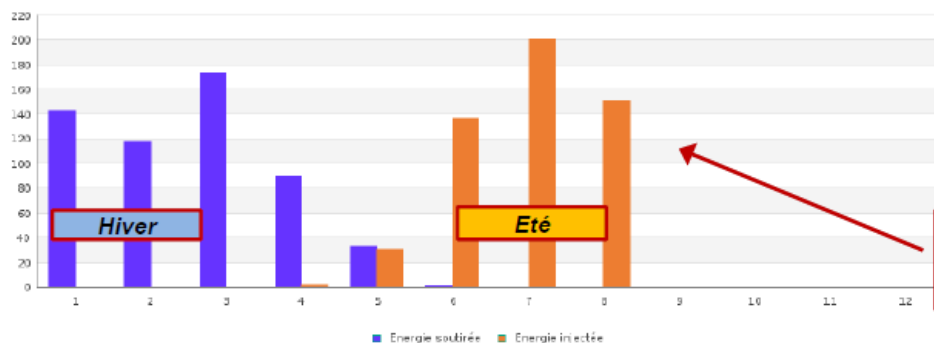
Source : Waterkotte et GINGER BURGEAP

Boucle d'eau tempérée et stockages très basse température : projet Airbus Blagnac

Le champ de SGV

5.1. Energie du champ de sondes, soutirée et injectée

Stockage Inter saisonnier



Energies délivrées : 1 429,6 MWh
Energie géothermique : 1 075,9 MWh
Part d'EnR : 75%

Poste	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Cumul annuel
E. soutirée (MWh)	143,1	118,2	173,2	89,8	32,9	0,7	0,1	0,1	-	-	-	-	558,1
E. injectée (MWh)	-	-	-	1,4	29,6	136,6	200,1	150,1	-	-	-	-	517,8

Poste	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Moyenne annuelle
moy. départ	11,3	10,9	10,7	12,5	16,5	25,1	27,8	28,5	-	-	-	-	17,9
moy. retour	12,4	12,1	12,4	13,5	14,7	18,3	20,7	21,4	-	-	-	-	15,7

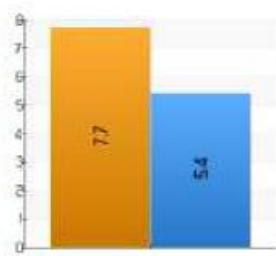
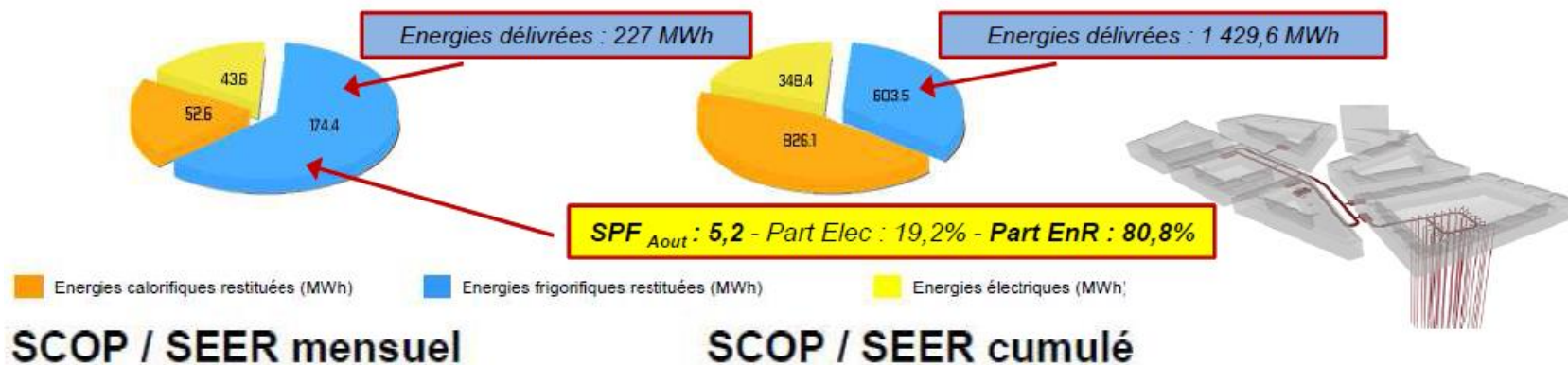
8 mois d'exploitation :
Ratio E. Inject/E. Extrait : 92,8%

Evolution des températures des SGV

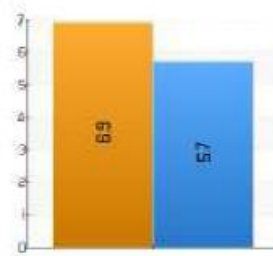
Source : Waterkotte et GINGER BURGEAP

Boucle d'eau tempérée et stockages très basse température : projet Airbus Blagnac

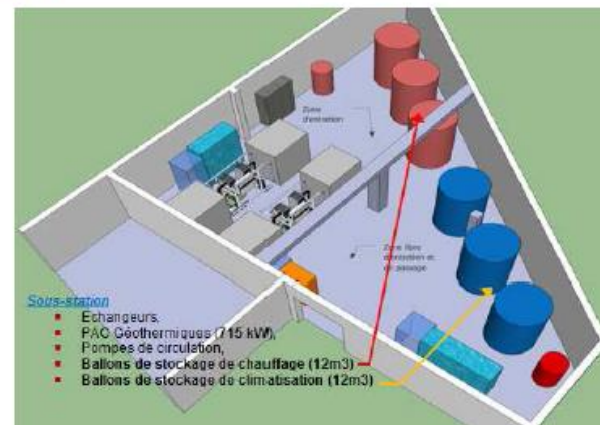
Performances Aout 2016



**Performances globales des PACs
Production Chaud et Froid**



SCOP SEER



Source : Waterkotte et GINGER BURGEAP

Conclusions : Avantages et inconvénients des BTES à haute température

Avantages	Inconvénients
Solution modulaire	CAPEX élevé
Outils de dimensionnement fiables (ex. TRNSYS)	Solution limitée aux terrains sans écoulements significatifs ($v_D < 1 \text{ m.a}^{-1}$)
Il existe des matériaux adaptés aux régimes de température (par ex. boucle PE-RT ou PE-Xa)	Puissance transitoire
Retour d'expérience sur plusieurs sites	
OPEX faible (consommation électrique des circulateurs + éventuellement PAC)	

- Etude BRGM en cours :
 - Pour estimer densité énergétique, rendement, coûts et $\text{teqCO}_2 = f(\text{Volume BTES, température du réseau, présence de PAC, ...})$
 - Cartographie de la pertinence des terrains pour les BTES (Région Nord)

Merci de votre attention

Partenaires de la journée :

