



La chaleur solaire collective performante et durable



# Livret technique

## Le stockage de chaleur



[www.solaire-collectif.fr](http://www.solaire-collectif.fr)



## Rédaction :

**Philippe PAPILLON** – Ingénieur  
En butinant l'énergie  
[philippe@enbutinantlenergie.fr](mailto:philippe@enbutinantlenergie.fr)  
06 02 19 42 98

## Coordination :

**Edwige PORCHEYRE**  
Enerplan  
[edwige.porcheyre@enerplan.fr](mailto:edwige.porcheyre@enerplan.fr)  
06 13 95 64 25

## Contributions :

**Claire Dutilleul, Nathan Fournier, Pierre Garcia, Benjamin Moné (NEWHEAT)**  
**Quentin Barral (AFPG)**  
**Hervé Lautrette (AGES)**

Ce document a été réalisé avec le soutien de l'ADEME et de GRDF



## Table des matières

Table des matières.....	3
Introduction - Contexte .....	5
A. Quelques définitions utiles .....	6
B. Les technologies de stockage adressées dans ce livret.....	7
C. Technologie 1 : Cuve d'eau sans pression.....	8
C.1. Volet technique.....	8
C.2. Volet réglementaire .....	8
C.3. Volet technologique.....	8
C.4. Volet gestion du stockage thermique .....	10
C.5. Volet économique .....	10
C.6. Des projets de référence au niveau national .....	11
C.7. Des projets de référence au niveau international.....	11
C.8. Références bibliographiques.....	11
D. Technologie 2 : Cuve d'eau pressurisée .....	12
D.1. Volet technique.....	12
D.2. Volet réglementaire .....	12
D.3. Volet technologique.....	12
D.4. Volet gestion du stockage thermique .....	13
D.5. Volet économique .....	14
D.6. Des projets de référence au niveau national .....	14
D.7. Références bibliographiques.....	14
E. Technologie 3 : Stockage en fosse (Pit Thermal Energy Storage) .....	15
E.1. Volet technique.....	15
E.2. Volet réglementaire .....	15
E.3. Volet technologique.....	16
E.4. Volet gestion du stockage thermique .....	19
E.5. Volet économique .....	19
E.6. Des projets de référence au niveau national .....	19
E.7. Des projets de référence au niveau international.....	19
E.8. Références bibliographiques.....	20
F. Technologie 4 : Stockage souterrain par forage (BTES – Borehole Thermal Energy Storage) .....	21
F.1. Volet technique.....	24
F.2. Volet réglementaire .....	24
F.3. Volet technologique.....	26



F.4.	Volet gestion du stockage thermique .....	26
F.5.	Volet économique .....	27
F.6.	Des projets de référence au niveau national .....	27
F.7.	Des projets de référence au niveau international .....	28
F.8.	Références bibliographiques.....	28
G.	Technologie 5 : Stockage souterrain sur aquifère (ATES – Aquifer Thermal Energy Storage) .....	29
G.1.	Volet technique.....	32
G.2.	Volet réglementaire .....	32
G.3.	Volet technologique.....	34
G.4.	Volet gestion du stockage thermique .....	35
G.5.	Volet économique .....	35
G.6.	Des projets de référence au niveau international .....	35
H.	Des programmes de l'Agence Internationale de l'Energie .....	37
I.	Des références bibliographiques .....	38
I.1.	Références bibliographiques génériques en lien avec le stockage thermique .....	38
I.2.	Références bibliographiques en lien avec les réseaux de chaleur .....	38
I.3.	Références bibliographiques en lien avec la modélisation thermique des stockages	39
	Conclusion .....	40
	Références.....	41



## Introduction - Contexte

---

Le stockage thermique est un maillon essentiel de la décarbonation, qui permet, dans ses fonctions principales, de lisser les puissances appelées et/ou pallier l'intermittence des besoins et/ou des ressources.

Alors qu'il est souvent indispensable avec les utilisations des énergies renouvelables et de récupération, il est cependant régulièrement négligé voire méconnu. Parmi les raisons qui conduisent à cette négligence ou cette méconnaissance, nous pouvons citer :

- Que le stockage est disponible sous de multiples technologies
- Que la technologie de stockage adaptée est souvent liée au moyen de production/génération
- Qu'il se situe à l'interface entre besoins de chaleur et génération
- Que le modèle économique n'est pas toujours simple à appréhender.

Ce livret n'a pas pour objectif de réaliser une étude exhaustive de l'ensemble des dispositifs de stockage thermique, mais de fournir une revue simplifiée des technologies les plus couramment rencontrées actuellement, complétée par des fiches de référence.



## A. Quelques définitions utiles

En préalable à la présentation des différentes technologies de stockage, il apparaît utile de définir certains termes couramment utilisés pour caractériser les stockages. Pour la plupart, ces définitions sont reprises de travaux menés au sein de l'Agence Internationale de l'Energie, notamment au travers du programme de travail collaboratif « Technologie de Stockage de l'Energie » [1], et en particulier la tâche 39 « Large Thermal Energy Storages for District Heating » et l'annexe 30 « Thermal Energy Storage for Cost-Effective Energy Management & CO2 Mitigation », au travers des références [2] et [3].

Terme	Définition	Unité
$P_{\text{nom.charge}}$	Puissance nominale des dispositifs d'échange lors de la charge du stockage	[kW], [MW] ou [kW/m <sup>3</sup> ]
$P_{\text{nom.décharge}}$	Puissance nominale des dispositifs d'échange lors de la décharge du stockage	[kW], [MW] ou [kW/m <sup>3</sup> ]
$E_{\text{décharge}}$	Energie délivrée par le stockage lors des phases de décharge sur une période définie (mois ou année)	[kWh], [MWh]
$E_{\text{charge}}$	Energie injectée dans le stockage lors des phases de charge sur une période définie (mois ou année)	[kWh], [MWh]
$E_{\text{aux}}$	Energie auxiliaire indispensable au fonctionnement du stockage sur une période définie (mois ou année) i.e correspond principalement aux circulateurs/ventilateurs et tout accessoire indispensable au fonctionnement du stockage	[kWh], [MWh]
$DT_{\text{sys}}$	Plage de fonctionnement en température du stockage, obtenue par la différence entre les températures uniformes maximale et minimale auxquelles le média de stockage sera conservé dans les états « chargé » et « déchargés ».	[°C], [K]
ESC	Capacité de stockage = quantité totale de chaleur pouvant être restituée au système pendant la décharge dans des conditions nominales de fonctionnement sur la plage de température $DT_{\text{sys}}$	[kWh], [MWh]

Tableau 1. Quelques définitions utiles

A partir de ces différentes valeurs, un certain nombre d'indicateurs peut être calculé.

Terme	Définition	Unité
$e_{\text{sys}}$	Efficacité du système de stockage définie par le ratio entre l'énergie délivrée par le stockage $E_{\text{décharge}}$ et l'énergie injectée dans le stockage $E_{\text{charge}}$ . Nota : pour les stockages saisonniers, il est fréquent d'intégrer la variation d'énergie interne au calcul de l'efficacité.	[%]
$f_{\text{aux}}$	Ratio entre l'énergie auxiliaire $E_{\text{aux}}$ et l'énergie délivrée par le stockage $E_{\text{décharge}}$ .	[%]
$N_C$	Nombre de cycles défini comme le ratio entre l'énergie délivrée par le stockage $E_{\text{décharge}}$ (sur une période annuelle) et la capacité de stockage ESC	[-]

Tableau 2. Quelques indicateurs

Cette liste est volontairement limitée aux définitions et indicateurs semblant les plus importants, et le lecteur pourra se reporter aux références [2] [3] pour avoir une vision plus exhaustive.



Il est à noter qu'aucun indicateur économique n'est ici mentionné. En effet, il apparaît délicat de fournir des définitions unifiées et homogènes quels que soient la typologie du stockage et son contexte de mise en œuvre.

## B. Les technologies de stockage adressées dans ce livret

multiples sont les technologies de stockage, comme illustré sur la Figure 1, correspondant notamment à des niveaux de température différents et des durées de charge/décharge variant d'une heure à une saison. Chaque technologie aura donc son domaine d'application adaptée en fonction du contexte, du process visé, et des objectifs assignés au stockage.

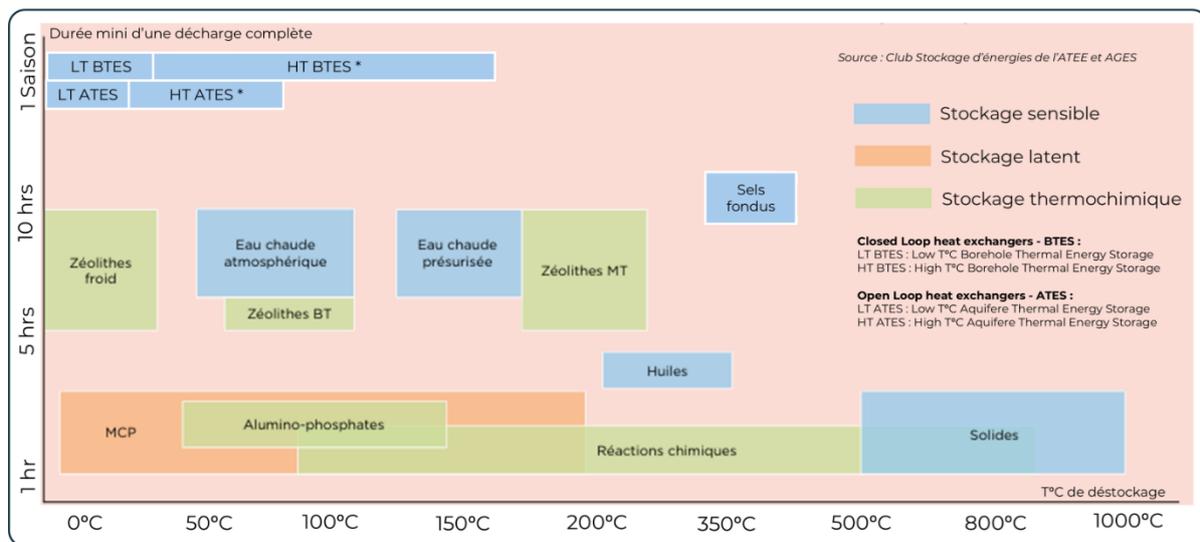


Figure 1. Positionnement des différentes technologies de stockage en fonction du niveau de température et de la durée de décharge (source : ATEE et AGES)

De plus, les niveaux de maturité technologique (TRL) sont également très différents d'une technologie à l'autre : de la diffusion massive d'un côté aux technologies encore au stade de la R&D.

Visant à favoriser le déploiement industriel des solutions de stockage, ce livret est volontairement limité aux technologies les plus courantes, qui bénéficient de retours d'expériences en France ou en Europe. Ces différentes technologies sont :

- Cuve d'eau sans pression
- Cuve d'eau pressurisée
- Stockage en fosse
- Stockage souterrain par forage
- Stockage souterrain par aquifère

## C. Technologie 1 : Cuve d'eau sans pression

Largement développé, notamment dans le chauffage des serres horticoles et maraichères, le stockage en cuve d'eau sans pression (également connu sous l'acronyme TTES pour « Tank Thermal Energy Storage ») est également utilisé en association avec des installations solaires thermiques pour les process industriels et les réseaux de chaleur.

Cette technologie est relativement simple et « low-cost », mais n'est adaptée que pour des températures inférieures à 100°C.

### C.1. Volet technique

Type de média de stockage	Eau
Plage de volume	De 500 à plusieurs dizaines de milliers de m <sup>3</sup>
Plage d'énergie stockée par cycle	De l'ordre de 50 MWh pour un stockage de 1000 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 50 et 95°C De l'ordre de 12 MWh pour un stockage de 1000 m <sup>3</sup> fonctionnant sur une plage de température de 10°C
Puissance de charge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de charge et/ou du générateur
Puissance de décharge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de décharge et/ou du consommateur
Plage de température Charge et Décharge	Température maximale du stockage : 90 à 95°C Température minimale : 5°
Pression de travail	Pression atmosphérique

### C.2. Volet réglementaire

Pas de contrainte réglementaire connue pour le stockage en tant que tel, hormis des contraintes d'urbanisme (hauteur maxi notamment).

### C.3. Volet technologique

Le stockage en cuve d'eau sans pression, plus connu sous le terme anglais « open buffer », est couramment rencontré dans le chauffage des serres horticoles et maraichères avec 2 fonctions essentielles, à savoir lisser les appels de puissance de chauffage, mais également découpler la production de CO<sub>2</sub> pour la croissance des plantes des besoins de chaleur.

Du point de vue technologique, les cuves d'eau sans pression sont donc largement matures.

Ces cuves sans pression sont préfabriquées en usine, puis assemblées sur site. Le matériau constitutif est l'acier. Une isolation, généralement assurée par une laine minérale, et protégée par une tôle d'acier complète la réalisation de la cuve.

Des canalisations hydrauliques permettent le raccordement de la cuve sans pression à l'ensemble du circuit hydraulique de charge/décharge. Ces canalisations peuvent être multiples pour adresser différentes hauteurs dans la cuve, et peuvent être complétées de divers dispositifs de stratification à l'intérieur de la cuve.

La durée de vie est supérieure à 20 ans, et atteint couramment 30 ans.





Figure 2. Cuve sans pression ou "open buffer" (source : <https://www.greenclimate.com.tr>)

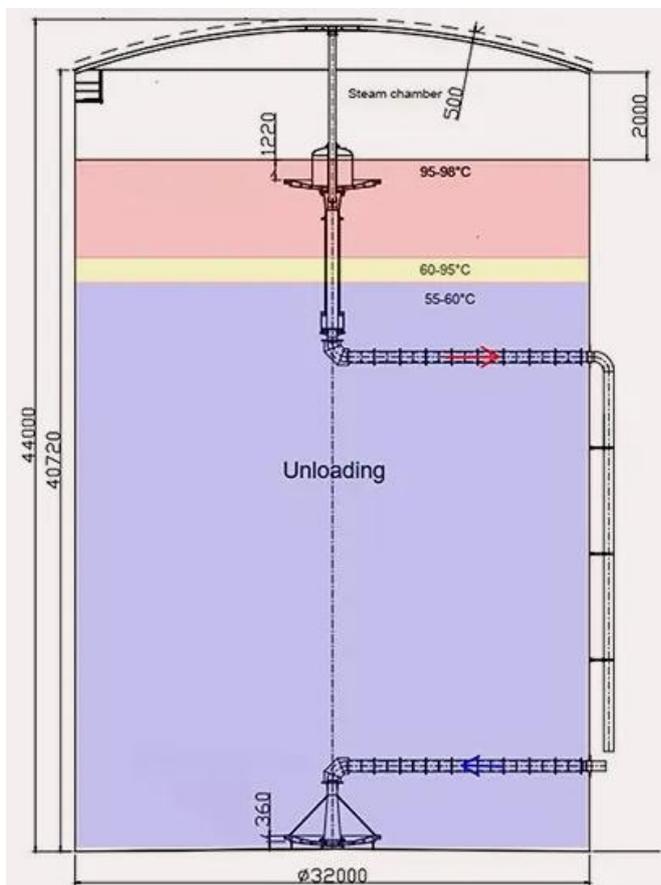


Figure 3. Coupe d'une cuve sans pression ou "open buffer" (source : <https://rodooverken.se/en/accumulators/>)

Indissociable des cuves sans pression, un générateur d'azote devra également être mis en œuvre pour maintenir un ciel gazeux dans le haut de la cuve, et ainsi maintenir la pression atmosphérique sans risque d'oxydation de la cuve de stockage.



Ci-dessous, une liste de fabricants européens :

- Rodoverken (Suède) <https://rodoverken.se>
- FW (Danemark) <https://www.fw.dk>
- SteelTank AS (Danemark) <https://steeltank.dk>
- Eminel Tarim (Turquie) <https://www.emineltarim.com>

#### C.4. Volet gestion du stockage thermique

Selon les applications, différents modes de gestion du stockage thermique peuvent être mis en œuvre.

Par exemple, pour les applications « solaire thermique », le maintien d'une bonne stratification au sein de la cuve sera un élément clé de la performance du stockage associée à la production solaire : cela pourra alors être réalisé au travers de piquages à différentes hauteurs dans le stockage, ou de colonnes de stratification, et de diffuseurs à basse vitesse au sein de la cuve pour limiter les effets de jets.

Pour les applications « serre », le maintien de la stratification aura un moindre impact puisque les producteurs de chaleur fonctionnent en général à des températures de l'ordre de 70 à 80°C, et que la distribution de chaleur dans les serres est régulièrement à des températures de l'ordre de 40 à 50°C.

En conséquence, la gestion du stockage thermique devra être étudiée en prenant en compte le contexte des applications, et principalement les niveaux de température du côté de la production de chaleur et de la consommation.

#### C.5. Volet économique

En fonction de la taille du stockage et des composants nécessaires à son intégration, la plage de variation est très importante.

En première approche, on peut retenir un CAPEX de l'ordre de :

- 500 à 1000 €/m<sup>3</sup> pour des installations de 100 m<sup>3</sup>
- 250 à 500 €/m<sup>3</sup> pour des installations de l'ordre de 50 000 m<sup>3</sup>.

Les OPEX annuels peuvent être estimés à 1% de l'investissement.

Dans le cadre de la tâche 52 du programme Solar Heating and Cooling de l'Agence Internationale de l'Energie, une fonction coût [4] avait été proposé sous la forme :

$$CAPEX[€/m^3] = 11680 V_{storage}^{-0.5545} [m^3] + 130$$

Selon [4], cette fonction est valide entre 500 et 50000 m<sup>3</sup>. Considérant cette fonction, le CAPEX s'établit à 500€/m<sup>3</sup> pour une cuve de 500 m<sup>3</sup>, et de 160 €/m<sup>3</sup> pour une cuve de 50 000 m<sup>3</sup>. Cette référence a été publié en 2016, et devrait ainsi être largement réévalué.

Concernant le volet économique, il est à noter qu'une fiche CEE existe pour les projets d'installation pour les serres maraichères. Cette fiche CEE Agri Th-101 [5] valorise à hauteur de 96 kWh CUMAC/m<sup>2</sup> de serres l'installation de dispositif de stockage « Open Buffer ».



## C.6. Des projets de référence au niveau national

Site	Volume de la cuve	Lien
Réseau de chaleur de Pons	500 m <sup>3</sup>	<a href="https://newheat.com/realisations/reseau-chaleur-pons/">https://newheat.com/realisations/reseau-chaleur-pons/</a>
Réseau de chaleur de Narbonne	1000 m <sup>3</sup>	<a href="https://newheat.com/realisations/reseau-chaleur-narbonne/">https://newheat.com/realisations/reseau-chaleur-narbonne/</a> <a href="https://librairie.ademe.fr/energies/5970-grande-centrale-solaire-thermique-de-la-ville-de-narbonne-11.html">https://librairie.ademe.fr/energies/5970-grande-centrale-solaire-thermique-de-la-ville-de-narbonne-11.html</a> Voir fiche de référence en Annexe de ce livret
Usine à papier de Condat	500 m <sup>3</sup>	<a href="https://newheat.com/realisations/usine-papier-condat-lecta/">https://newheat.com/realisations/usine-papier-condat-lecta/</a>
Usine de poudre de Lactoserum	3000 m <sup>3</sup>	<a href="https://newheat.com/realisations/industrie-laitiere/">https://newheat.com/realisations/industrie-laitiere/</a>
Réseau de chaleur de Brest	1000 m <sup>3</sup>	<a href="https://www.ecochaleurdebrest.fr/le-miroir-des-energies">https://www.ecochaleurdebrest.fr/le-miroir-des-energies</a> <a href="https://www.climatelec.fr/sites/climatelec/files/2021-03/A1%20Valorisation%20Energ%C3%A9tique%20-%202016-Ballon%20de%20stockage%20ECB%20Brest%20%2829%29.pdf">https://www.climatelec.fr/sites/climatelec/files/2021-03/A1%20Valorisation%20Energ%C3%A9tique%20-%202016-Ballon%20de%20stockage%20ECB%20Brest%20%2829%29.pdf</a>

## C.7. Des projets de référence au niveau international

Site	Volume de la cuve	Lien
Réseau de chaleur de Braedstrup (Danemark)	2 000 m <sup>3</sup> Et 5 500 m <sup>3</sup>	<a href="https://www.coolheating.eu/images/downloads/3.1-Best-practice-example-Braedstrup-JimLarsen.pdf">https://www.coolheating.eu/images/downloads/3.1-Best-practice-example-Braedstrup-JimLarsen.pdf</a> <a href="https://www.braedstrup-fjernvarme.dk">https://www.braedstrup-fjernvarme.dk</a>
Réseau de chaleur de Berlin (Allemagne)	56 000 m <sup>3</sup>	Voir fiche référence en annexe de ce livret <a href="https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPA_Deliverable_A0b_Task_brochure%E2%80%93Use_cases.pdf">https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPA_Deliverable_A0b_Task_brochure%E2%80%93Use_cases.pdf</a>
Réseau de chaleur de Schwiz (Suisse)	28 000 m <sup>3</sup>	<a href="https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/10/2_District-heating-network_U.Rhyner.pdf">https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/10/2_District-heating-network_U.Rhyner.pdf</a>

## C.8. Références bibliographiques

Les cuves d'eau sans pression étant très couramment employées, les références bibliographiques, souvent des rapports de recherche, sont relativement rares. Néanmoins, le lecteur trouvera des informations spécifiques à ce type de stockage en lien avec leur intégration dans les réseaux de chaleur, tels que mentionnés dans le paragraphe I.2.



## D. Technologie 2 : Cuve d'eau pressurisée

Les cuves d'eau pressurisées (également connues sous l'acronyme TTES pour « Tank Thermal Energy Storage ») sont très largement répandues jusqu'à des volumes de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de m<sup>3</sup>. Au-delà, cette technologie est moins courante, bien que les cuves d'eau sous pression permettent de s'affranchir de la limite à 90-95°C, et permettent d'atteindre des températures jusque 150-200°C.

Cependant avec des températures croissantes et des volumes croissants, les exigences réglementaires augmentent avec notamment le passage de l'eau chaude à l'eau surchauffée et notamment le respect de la directive « Equipement Sous Pression ». En conséquence, les coûts d'investissement augmentent significativement, mais en parallèle, la plage de température utile augmente aussi.

### D.1. Volet technique

Type de média de stockage	Eau
Plage de volume	De 1 à plusieurs centaines de m <sup>3</sup>
Plage d'énergie stockée par cycle	De l'ordre de 7 MWh pour un stockage de 100 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 50 et 110°C De l'ordre de 12 MWh pour un stockage de 100 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 50 et 150°C
Puissance de charge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de charge et/ou du générateur
Puissance de décharge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de décharge et/ou du consommateur
Plage de température Charge et Décharge	Température maximale du stockage : jusque 200°C Température minimale : 5°
Pression de travail	Dépend de la température de stockage. Pression (absolue) mini de 1 bar à 100°C à 16 bars à 200°C

### D.2. Volet réglementaire

Au-delà de contraintes d'urbanisme (hauteur maxi notamment), des contraintes réglementaires liées à la directive « Equipement Sous Pression » [6] doivent être respectées. En fonction du produit « Pression x Volume », les contraintes réglementaires sont ajustées.

De même, les équipements sous pression peuvent être soumis à des exigences de maintenance et contrôle au cours de la vie de l'équipement [7].

### D.3. Volet technologique

Du point de vue technologique, les cuves d'eau sous pression sont largement matures, et leur fabrication fait appel à des savoir-faire largement éprouvés dans le domaine de la chaudronnerie.

Ces cuves sous pression sont principalement fabriquées en usine, mais cela conduit à des limitations de taille pour des raisons logistiques. La construction sur site est également possible mais conduit à des exigences de chantier importantes.

Le matériau constitutif est l'acier. Une isolation, généralement assurée par une laine minérale, et protégée par une tôle d'acier complète la réalisation de la cuve.



Des canalisations hydrauliques permettent le raccordement de la cuve sans pression à l'ensemble du circuit hydraulique de charge/décharge. Ces canalisations peuvent être multiples pour adresser différentes hauteurs dans la cuve, et peuvent être complétées de divers dispositifs de stratification à l'intérieur de la cuve.

La durée de vie est supérieure à 20 ans, et atteint couramment 30 ans.



Figure 4. Cuves sous pression de la chaufferie Biomax à Grenoble (source : <https://www.compagniedechauffage.fr>)

Ci-dessous, une liste de fabricants européens :

- Lacaze (France) <https://www.lacaze-energies.fr>
- Charot (France) <https://www.charot.com>
- Bilfinger (Allemagne) <https://www.bilfinger.com/en/markets/energy-1/heat-storage/>

#### D.4. Volet gestion du stockage thermique

La gestion du stockage thermique pour des cuves sous-pression est similaire à la gestion des cuves sans pression. En général, le maintien d'une bonne stratification au sein de la cuve sera un élément clé de la performance du stockage associée à la production solaire : cela pourra alors être réalisé au travers de piquages à différentes hauteurs dans le stockage, ou de colonnes de stratification, et de diffuseurs à basse vitesse au sein de la cuve pour limiter les effets de jets.

Comme pour les cuves sans pression, la gestion du stockage thermique devra être étudiée en prenant en compte le contexte des applications, et principalement les niveaux de température du côté de la production de chaleur et de la consommation.



## D.5. Volet économique

En fonction de la taille du stockage et des composants nécessaires à son intégration, la plage de variation est très importante.

En première approche, on peut retenir un CAPEX de l'ordre de :

- 1500 à 3000 €/m<sup>3</sup> pour des installations de 100 m<sup>3</sup>
- 700 à 800 €/m<sup>3</sup> pour des installations de l'ordre de 50 000 m<sup>3</sup>.

Mais le CAPEX sera impacté de façon significative par le niveau de température et de pression.

Les OPEX annuels peuvent être estimés à 1.5% de l'investissement, notamment en raison des exigences de maintenance et de contrôle pour les installations sous pression.

Dans le cadre de la tâche 52 du programme Solar Heating and Cooling de l'Agence Internationale de l'Energie, une fonction coût [4] avait été proposé sous la forme :

$$CAPEX[€/m^3] = 403.5 V_{stockage}^{-0.4676}[m^3] + 750$$

Selon [4], cette fonction est valide entre 0.5 et 500 m<sup>3</sup>. Considérant cette fonction, le CAPEX s'établit à 887€/m<sup>3</sup> pour une cuve de 10 m<sup>3</sup>, et de 772 €/m<sup>3</sup> pour une cuve de 500 m<sup>3</sup>. Cette référence a été publié en 2016, et devrait ainsi être largement réévalué.

## D.6. Des projets de référence au niveau national

Site	Volume de la cuve et pression	Lien
Réseau de chaleur de Grenoble	435 m <sup>3</sup> et 22bars	<a href="https://www.chauffage-urbain-grenoble.fr/3820-biomax-tout-savoir-sur-le-nouveau-site-de-production.htm">https://www.chauffage-urbain-grenoble.fr/3820-biomax-tout-savoir-sur-le-nouveau-site-de-production.htm</a> <a href="https://www.clevia.com/home/nos-references/area-work_inner/liste-douvrages-eiffagecom/agglomeration-de-grenoble.html">https://www.clevia.com/home/nos-references/area-work_inner/liste-douvrages-eiffagecom/agglomeration-de-grenoble.html</a>

## D.7. Références bibliographiques

Cette technologie est également bien connue, même si on constate qu'elle reste peu diffusée en raison de contraintes technologiques fortes. De fait, la littérature est réduite, et comme pour les « cuves d'eau sans pression », les approches récentes concernent principalement leur intégration dans les systèmes et réseaux de chaleur.



## E. Technologie 3 : Stockage en fosse (Pit Thermal Energy Storage)

Les stockages en fosse, largement plus connus sous le vocable anglophone Pit Thermal Energy Storage ou PTES, sont dédiés à des stockages de très grands volumes. La technologie a principalement émergé au Danemark dans le cadre du stockage intersaisonnier de l'énergie solaire thermique pour les réseaux de chaleur. Aujourd'hui, des PTES sont également en fonctionnement en Allemagne et en Chine.

En France, un projet démonstrateur est prévu à Pau dans le cadre du projet européen Treasure [8] dont l'objectif est de stocker, en période estivale, la chaleur excédentaire de l'usine d'incinération pour la valoriser en période hivernale.

### E.1. Volet technique

Type de média de stockage	Eau
Plage de volume	De 15 000 à 2 000 000 de m <sup>3</sup>
Plage d'énergie stockée par cycle	De l'ordre de 1 GWh pour un stockage de 20 000 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 50 et 95°C De l'ordre de 2 GWh pour un stockage de 20 000 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 5 et 95°C
Puissance de charge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de charge et/ou du générateur
Puissance de décharge	Pas de limitation de puissance : celle-ci dépend du dimensionnement de l'échangeur de décharge et/ou du consommateur
Plage de température Charge et Décharge	Température maximale du stockage : 90 à 95°C Température minimale : 5°
Pression de travail	Pression atmosphérique

### E.2. Volet réglementaire

Dans le rapport de l'Académie des Technologies [9] de 2020, il est mentionné qu' « il ne semble pas y avoir d'obstacle significatif au développement des PTES en France ».

Cependant, aucun projet de PTES n'ayant été réalisé à date en France, les procédures administratives à suivre pour l'obtention des autorisations administratives ne sont pas connues avec certitude.

L'étude du démonstrateur de Pau réalisée dans le cadre de la participation de Newheat, l'agglomération Pau Béarn Portes des Pyrénées et l'opérateur du réseau de chaleur Engie au projet européen TREASURE, permettra d'apporter des premiers éléments de réponse.

Ainsi, des premiers échanges avec la DREAL et la DGEC ont été entamés afin de définir le cadrage réglementaire d'un tel ouvrage au regard du Code Minier.

Newheat a également réalisé un cadrage réglementaire à l'aide du bureau d'études GINGER/BURGEAP et du cabinet de juristes Citizing, qui a permis de déterminer les autorisations nécessaires à la mise en place d'un stockage en fosse au regard des Codes de l'Environnement et de l'Urbanisme. Le cadrage conclue que les PTES seraient soumis à :

- **Evaluation environnementale au cas par cas** au titre de la rubrique n°39 (« Travaux et constructions qui créent une surface de plancher au sens de l'article



- R. 111-22 du code de l'urbanisme ou une emprise au sol au sens de l'article R. \* 420-1 du même code supérieure ou égale à 10 000 m<sup>2</sup> »)
- **Déclaration préalable au titre du code de l'urbanisme** au titre de l'article R\*421-23 (« les affouillements et exhaussements du sol dont la hauteur, s'il s'agit d'un exhaussement, ou la profondeur dans le cas d'un affouillement, excède deux mètres et qui portent sur une superficie supérieure ou égale à cent mètres carrés »).
  - **Déclaration loi sur l'eau** au titre de la rubrique IOTA 2.1.5.0 (« rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant : [...] 2° Supérieure à 1 ha mais inférieure à 20 ha (D). »)

Ce cadrage a donc notamment permis de préciser que les PTES n'entrent pas dans la catégorie des ICPE<sup>1</sup>.

Ces discussions seront alimentées par les travaux réalisés dans le cadre de la Task 45 du programme Energy Storage de l'AIE, dans laquelle une tâche vise à collecter et partager les règles existantes dans les différents pays européens afin d'aboutir à des recommandations.

### E.3. Volet technologique

Le premier PTES a été réalisé au Danemark en 1996 avec un volume de 1500 m<sup>3</sup>. Ensuite vint le projet pilote de Marstal en 2004 avec un volume de 10 000 m<sup>3</sup> dans le cadre du projet européen Sunstore2.

A ce jour, quelques dizaines de PTES existent, et un retour d'expériences significatif a pu être accumulé pour lever les points de difficultés majeurs observés sur les premiers projets.

Les PTES sont des fosses creusées dans le sol, en forme de pyramide inversée remplies d'eau (voire de mélange eau-gravier ou eau sable) et dotées d'un couvercle isolant et étanche. Sur les différentes faces, la solution standard est l'absence d'isolation spécifique, mais des actions de développement technologiques sont en cours pour assurer l'isolation des interfaces avec le sol.

---

<sup>1</sup> Installations Classées Protection de l'Environnement



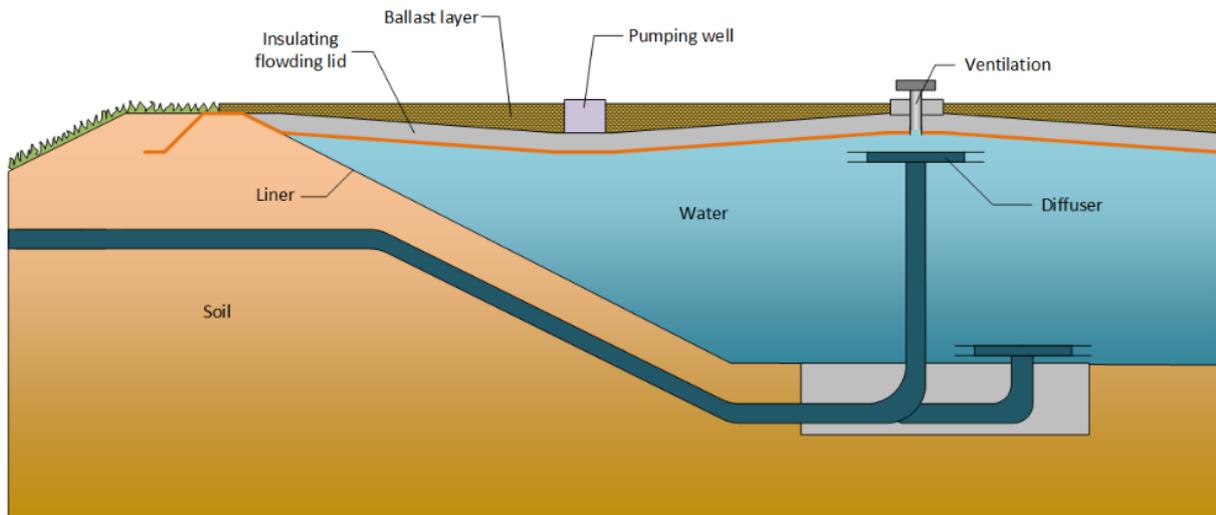


Figure 5. Coupe schématique d'un PTES (Source : <https://topsectorenergie.nl/documents/989/Factsheet-HT-PTES.pdf>)

En dehors des études géotechniques, les points de vigilance dans la conception d'un stockage en fosse sont principalement :

- L'absence d'eau souterraine circulant à proximité du stockage
- Le choix de la géomembrane pour atteindre une durée de vie de l'ordre de 30 ans avec des températures pouvant atteindre 85 à 90°C, et la qualité de la mise en œuvre, notamment la soudure entre les différents lés,
- La protection de la géomembrane,
- La conception, la mise en œuvre du couvercle également appelé couverture flottante et la sélection des matériaux associés,
- La gestion des eaux de pluie,
- La conception et la mise en œuvre des diffuseurs,
- Le traitement de l'eau de remplissage du stockage.

Des recommandations pour la conception et la construction sont fournis dans [10].

Dans [11], une sélection de fabricants de géomembrane est présentée. Parmi ceux-ci, on note :

- Solmax Geosynthetics (Canada) : <https://www.solmax.com/>
- Agru Kunststofftechnik (Autriche) : <https://www.agru.at/en/>
- Layfield Group (Canada) : <https://www.layfieldgroup.com/>
- Sotrafa (Espagne) : <https://sotrafa.com/en/>
- Juta (République tchèque) : <https://www.juta.eu/>



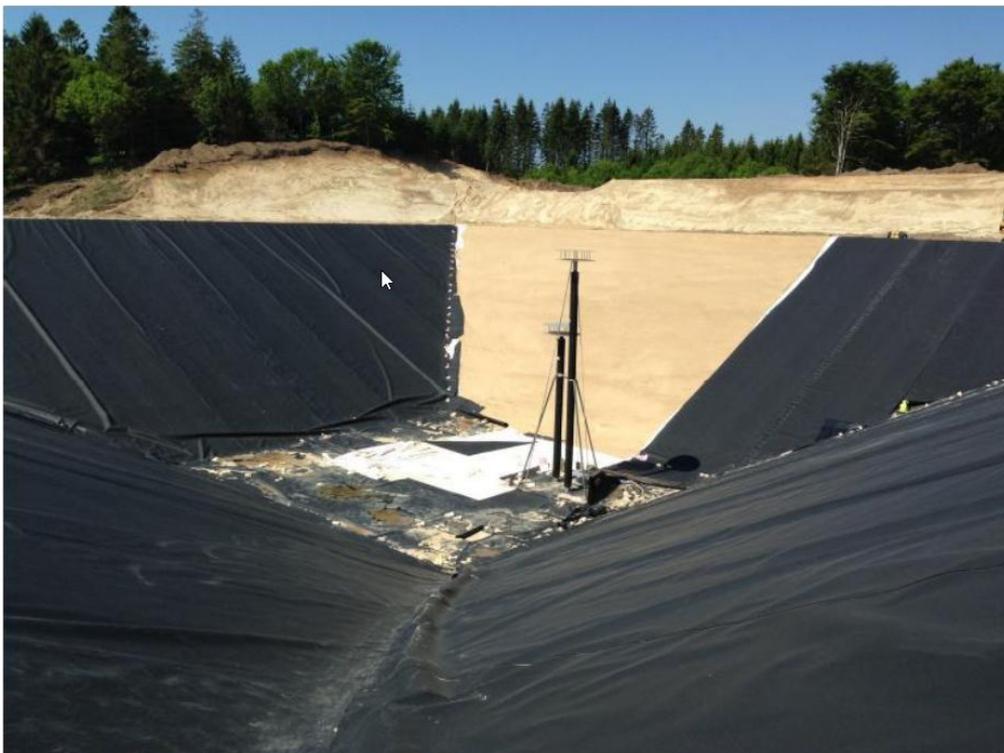


Figure 6. Le PTES de Dronninglund en construction (Source : Dronninglund Fjernvarme)



Figure 7. Mise en œuvre des diffuseurs lors de la construction du PTES de Marstal (source : Marstal Fjernvarme)



#### E.4. Volet gestion du stockage thermique

Comme pour la majorité des stockages utilisant l'eau comme médium de stockage, la stratification est un élément-clé pour la performance du stockage. Dans le cadre des PTES, ce point est d'autant plus important que les volumes de stockage sont très importants, pouvant induire des phénomènes de « dilution » du niveau de température (rendement exergetique médiocre), rendant possiblement non valorisable des quantités d'énergie stockée importante. A ce titre, la conception, la mise en place, et le nombre de diffuseurs doit être étudié avec soin.

#### E.5. Volet économique

Comme pour les stockages en cuve, une évaluation des CAPEX pour les stockages en fosse est également fournie dans [4]. Cette fonction coût s'exprime par :

$$CAPEX[\text{€/m}^3] = 15630 V_{\text{storage}}^{-0.6156}[\text{m}^3] + 25$$

Selon [4], cette fonction est valide entre 1 000 et 50 000 m<sup>3</sup>. Considérant cette fonction, le CAPEX s'établit à 80€/m<sup>3</sup> pour un PTES de 10 000 m<sup>3</sup>, et de 45 €/m<sup>3</sup> pour un PTES de 50 000 m<sup>3</sup>. Cette référence a été publié en 2016, et devrait ainsi être largement réévalué.

Plus récemment[12], des coûts de l'ordre de 30 €/m<sup>3</sup> sont évoqués pour des stockages en fosse de 100 000 m<sup>3</sup> ou plus, et dans le cadre de l'Annex XII [13] du programme District Heating and Cooling, une fonction coût, valide pour le Danemark, a également été présentée qui s'exprime par :

$$CAPEX[\text{€/m}^3] = 34146 V_{\text{storage}}^{-0.6582}[\text{m}^3] + 22$$

Cette fonction, présentée pour des volumes compris entre 10 000 m<sup>3</sup> et 2 000 000 m<sup>3</sup>, conduit à un CAPEX de 102 €/m<sup>3</sup> pour un PTES de 10 000 m<sup>3</sup> et de 50 €/m<sup>3</sup> pour un PTES de 50 000 m<sup>3</sup>. Pour l'Allemagne, les coûts sont plus élevés de l'ordre de 20%. En France, pour un PTES de volume limité, les coûts attendus seraient aussi de l'ordre de 120€/m<sup>3</sup>.

Pour les OPEX, le taux courant de 1% du coût de l'investissement peut être retenu.

#### E.6. Des projets de référence au niveau national

Aucun à l'heure actuel.

#### E.7. Des projets de référence au niveau international

Site	Volume de la fosse	Lien
Réseau de chaleur de Dronninglund (Danemark)	60 000 m <sup>3</sup>	<a href="https://www.dronninglundfjernvarme.dk/media/2984/brochure_dronninglund_2015_booklet_eng_web_.pdf">https://www.dronninglundfjernvarme.dk/media/2984/brochure_dronninglund_2015_booklet_eng_web_.pdf</a>
Réseau de chaleur de Gram (Danemark)	122 000 m <sup>3</sup>	<a href="https://r-aces.eu/wp-content/uploads/2021/05/Gram-Fjernvarme-District-Heating-%E2%80%93-R-Aces.pdf">https://r-aces.eu/wp-content/uploads/2021/05/Gram-Fjernvarme-District-Heating-%E2%80%93-R-Aces.pdf</a>
Réseau de chaleur de	75 000 m <sup>3</sup>	<a href="https://r-aces.eu/wp-content/uploads/2021/05/Marstal-District-Heating-%E2%80%93-R-Aces.pdf">https://r-aces.eu/wp-content/uploads/2021/05/Marstal-District-Heating-%E2%80%93-R-Aces.pdf</a>



Marstal (Danemark)		
Réseau de chaleur du Grand Copenhague (Danemark)	70 000 m <sup>3</sup>	<a href="https://planenergi.eu/projects/hoje-taastrup-greater-copenhagen/">https://planenergi.eu/projects/hoje-taastrup-greater-copenhagen/</a>

Pour une liste de références plus exhaustive, un des livrables de la Task 39 de l'AIE a collecté les références des grands stockages de chaleur. Cette liste est publique (<https://planenergi.sharepoint.com/:x/g/EaQqiqziwA5Em5Ob9nLm5eMBGFJTQKj-bmbNxaKpsMPdFw?rttime=iyGAtq1g3Ug>) et couvre les technologies TTES, PTES, BTES et ATES.

### E.8. Références bibliographiques

Dans le cadre du projet Heatstore [14], de nombreuses ressources sur le PTES sont accessibles, notamment les livrables « D1.2 Underground Thermal Energy Storage (UTES)– general specifications and design » et « D1.4-4.2-4.3 Synthesis of demonstrators and case studies - Best practice guidelines for UTES development ».

Des ressources sont également accessibles dans le cadre de la Tâche 39 du programme Energy Storage de l'Agence Internationale de l'Energie. Les rapports [15] et [16] en particulier abordent des points techniques spécifiques aux PTES.

Enfin le projet TREASURE[8], lancé en 2024, a pour objectif de combler le fossé entre recherche et application, afin de rendre la technologie robuste, sécuritaire, rentable et durable. Les livrables du projet seront publiés sur le site du projet.



## F. Technologie 4 : Stockage souterrain par forage (BTES – Borehole Thermal Energy Storage)

La technologie du stockage thermique souterrain par forage, référencée par l'acronyme anglais de BTES ou « Borehole Thermal Energy Storage », exploite la capacité calorifique naturelle des roches. Le transfert d'énergie entre le sous-sol et la surface se fait sans échange de matière mais par simple conduction thermique, au travers d'échangeurs souterrains en « boucle fermée » ou « closed loop ».

La technologie de stockage souterrain par forage est scindée en deux catégories :

- les LT-BTES **basse température** ou « Low Temperature »
- les HT-BTES **haute température** ou « High Temperature » :

- LT BTES :

Les LT BTES ou « stockages thermiques souterrains par forage dits de basse température » sont assimilables à des installations de géothermie de surface du type champ de SGV (Sondes Géothermiques Verticales).

Les champs de SGV se réfèrent réglementairement à de la Géothermie dite de Minime Importance (GMI).

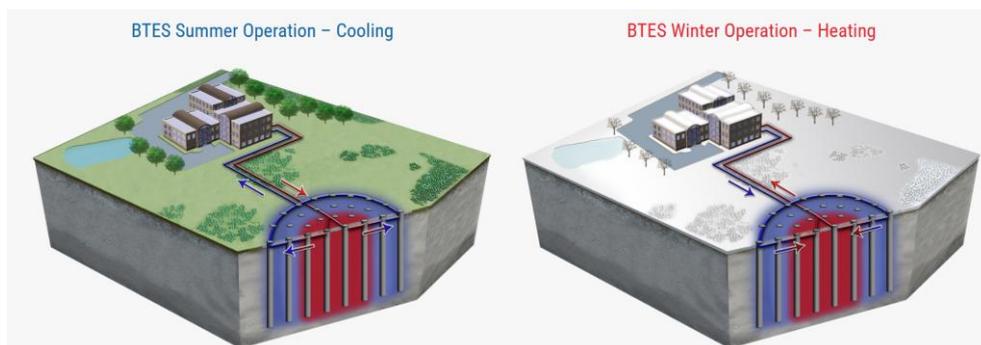


Figure 8. Champ de SGV (Sondes Géothermiques Verticales) exploité en « LT BTES » (source : Underground Energy, LLC - USA)

**Un LT BTES permet de produire du chaud et du froid qui est, soit passif (rafraîchissement), soit actif (climatisation).** Ainsi, le prélèvement des calories en hiver est suivi d'une recharge partielle ou totale de calories en été et le sous-sol est maintenu autour de sa température d'origine. Par conséquent le sous-sol subit peu de variation de température sur le long terme. C'est un stockage que l'on peut qualifier de « basse température » du fait qu'il reste dans les limites des températures prescrites par le cadre réglementaire (Code Minier - GMI) utilisant le sous-sol à des températures typiquement entre 4 et 25°C. La chaleur du sous-sol est valorisée au travers de pompes à chaleur basse température ou PAC BT<sup>2</sup>. Il s'agit alors d'exploiter la ressource géothermique à partir de la valorisation d'échanges énergétiques avec le sous-sol, tant

<sup>2</sup> PAC BT : Les Pompes à Chaleur dites de Basse Température exploitent des calories côté évaporateur jusqu'à 25°C pour délivrer une température côté condenseur comprise entre 35°C et 45°C pour une production d'eau chaude.



en extraction de chaleur (décharge) pour alimenter la PAC BT sur son évaporateur lorsqu'elle chauffe le bâtiment qu'en injection (charge) pour permettre à la PAC BT de se libérer de sa chaleur fatale du condenseur lorsqu'elle climatise. On pourra également retrouver des LT BTES avec une recharge partielle du sous-sol par des capteurs solaires ou tout autre chaleur fatale ou peu coûteuse en été.

Techniquement, un LT BTES est constitué d'une multitude de forages pouvant être implantés de façon désordonnée. Les forages sont généralement de 5" (127mm) de diamètre plus ou moins profonds (typiquement 30 à 200 mètres unitaire) et plus ou moins rapprochés (typiquement 6 à 10 mètres d'écartement). Ils sont tous équipés d'échangeurs en circuits fermés en simple U ou double U (allers-retours). Ces échangeurs sont en PEHD (polyéthylène haute densité) de 32 à 40mm de diamètre.

Le nombre de forages (sondes géothermiques) est défini à partir de la puissance thermique à couvrir, de la quantité d'énergie à exploiter, des paramètres géophysiques du sous-sol (conductivité et capacité thermiques des roches), en considérant le contexte hydrogéologique du site.

Un LT BTES doit prendre en compte l'équilibre entre les usages énergétiques exploités par le système (extraction et injection de calories) en lien avec les besoins énergétiques à couvrir par l'installation et le seuil de température d'injection toléré réglementairement de 40°C maximum.

- Les HT BTES :

Les HT BTES ou « stockages thermiques souterrains par forage haute température » sont assimilables à des installations de géothermie profonde qualifiés réglementairement de « stockage souterrain d'énergie calorifique » en tant que gîte géothermique.

C'est un stockage que l'on peut qualifier de « haute température » du fait qu'il valorise des sources d'énergies renouvelables (solaire thermique, biomasse) intermittentes ou de récupération (chaleur fatale de process industriels) à « haute température ». Les plages de température d'injection d'un HT BTES peuvent dépasser 100°C compte-tenu du circuit hydraulique fermé sous pression.

Un HT BTES permet une utilisation soit directe de la chaleur stockée dans le sous-sol, soit complétée par une élévation des températures au travers de pompes à chaleur haute température ou PAC HT<sup>3</sup>. **Un HT BTES permet une production d'eau chaude, d'eau surchauffée ou encore d'électricité selon ses cas d'application.**

L'exploitation d'un HT BTES à travers l'injection de calories à « haute température » génère une augmentation de la température du sous-sol décorrélée du gisement naturel d'un site. Cela signifie que le stockage souterrain à une profondeur définie est à une température nécessairement plus élevée que le gradient géothermique naturel des roches mobilisées<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> PAC HT : Les Pompes à Chaleur dites de Haute Température exploitent des calories côté évaporateur de 20°C à plus de 80°C pour délivrer une température côté condenseur comprise entre 55°C et 160°C pour une production d'eau chaude, d'eau surchauffée ou encore de vapeur d'eau.

<sup>4</sup> En France le gradient géothermique est en moyenne de 30°C d'augmentation par 1 000m de profondeur forée avec un sous-sol à environ 10°C à 10m de profondeur



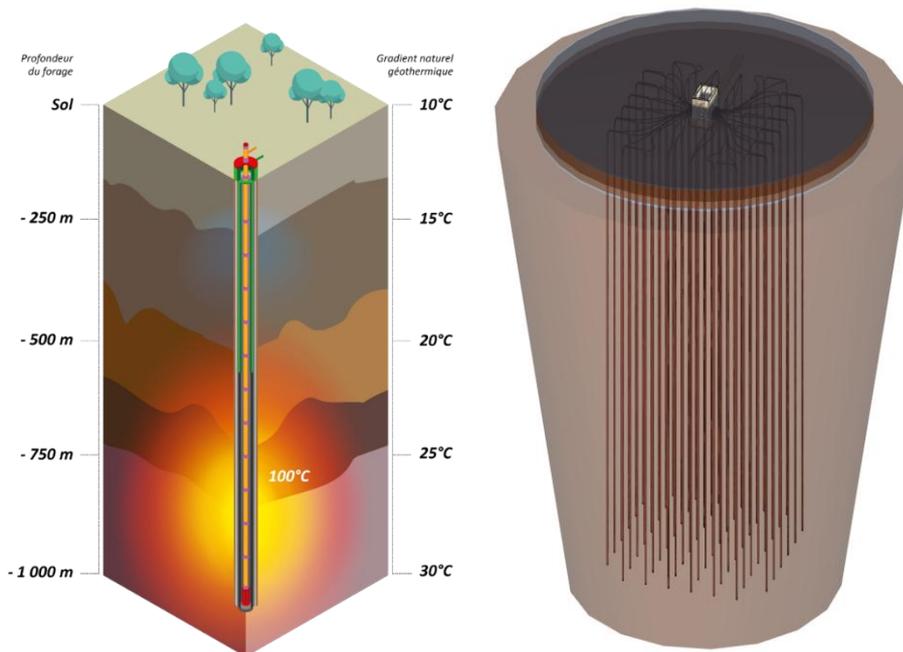


Figure 9. HT BTES - (High Temperature Borehole Thermal Energy Storage) - Echangeurs en boucle fermée - Augmentation de la température du sous-sol décalée du gradient géothermique naturel (source : AGES)

Techniquement un HT BTES se compose d'une multitude de forages nécessitant une implantation très stricte afin de constituer un volume de terrain le plus homogène possible thermiquement. Les forages sont de diamètre 5" (127mm) à 12" (304.8mm), plus ou moins profonds (de 30 à 2000 mètres unitaire) et nécessairement rapprochés (typiquement 3 à 10 mètres d'écartement). Les forages sont équipés d'échangeurs en circuits fermés en simple U ou double U (allers-retours) ou en sondes coaxiales. Ces échangeurs peuvent être en PERT (Polyéthylène résistant en température) ou en PEX (polyéthylène réticulé), en matériaux composites ou encore en acier, de 32mm de diamètre à plus de 9"1/2 (241.3mm) de diamètre.

Le nombre de forages (sondes géothermiques) est défini à partir de la puissance thermique, de la quantité d'énergie à valoriser et extraire (charge et décharge), du type d'échangeurs souterrains mis en œuvre, de l'écartement entre forage, du volume de stockage à constituer, du rapport de forme du stockage souterrain mis en œuvre, en prenant en compte les paramètres géophysiques du sous-sol (conductivité et capacité calorifique des roches), et le contexte hydrogéologique du site.

Les plages de température d'injection supportées dans un HT BTES sont nécessairement supérieures à 40°C contrairement à un LT BTES.

Le graphique suivant, résume les différentes technologies et usages possibles pour un BTES.



## F.1. Volet technique

Type de média de stockage	Sol
Plage de volume	De 10 000m <sup>3</sup> à plusieurs millions de m <sup>3</sup> de roche
Plage d'énergie stockée par cycle	De l'ordre de 1 GWh pour un stockage de 33 000 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 20 et 65°C De l'ordre de 1 GWh pour un stockage de 80 000 m <sup>3</sup> fonctionnant entre 45 et 65°C
Puissance de charge	La puissance de charge/décharge dépend fortement du type d'échangeurs souterrains mis en œuvre, du nombre de forages et des paramètres géophysiques et hydrogéologiques du site
Puissance de décharge	
Plage de température Charge et Décharge	Température maximale du stockage : > à 100°C pour les HT-BTES Température maximale du stockage : < à 30°C pour les LT-BTES Température minimale : 45° pour les HT-BTES Température minimale : 10° pour les LT-BTES
Pression de travail	Pression de quelques bars dans les boucles hydrauliques du forage à plusieurs dizaines de bars de pression.

## F.2. Volet réglementaire

Le cadre réglementaire qui légifère les solutions dites de « stockage souterrain » se réfère au Code Minier. En l'état, le **Code Minier actuel** traite le sujet du « **stockage souterrain d'énergie** » de la manière suivante :

Au titre du livre I<sup>er</sup> du Code Minier, la recherche et l'exploitation des **stockages souterrains d'énergie calorifique** sont régis par les dispositions suivantes :

**Titre II** « La recherche », **Chapitre VI** « La recherche d'un stockage d'énergie calorifique » :

- Article L.126-1 : « Les activités de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique sont soumises aux dispositions relatives aux gîtes géothermiques à basse température des articles L. 124-4 à L. 124-9 » ;
- Article L.126-2 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions de l'article L. 126-1 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre III** « L'exploitation », **Chapitre V** « L'exploitation des stockages d'énergie calorifique » :

- Article L.135-1 : « L'exploitation d'un stockage souterrain d'énergie calorifique est soumise aux dispositions des articles L. 134-4 à L. 134-10 relatifs aux gîtes géothermiques à basse température » ;
- Article L.135-2 : « L'arrêté autorisant l'exploitation du stockage mentionné à l'article L. 135-1 précise notamment la quantité maximale d'énergie calorifique dont le stockage est autorisé » ;
- Article L.135-3 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions des articles L. 135-1 et L. 135-2 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre V** « Droits et obligations liés à l'activité minière », **Chapitre VII** « **Dispositions propres aux stockages souterrains d'énergie calorifique** » :



- Article L.157-1 : « Les dispositions du présent titre sont applicables aux stockages souterrains d'énergie calorifique » ;

**Titre VI** « Travaux Miniers », **Chapitre V** « Dispositions propres aux stockages souterrains d'énergie calorifique » :

- Article L.165-1 : « Les travaux de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique et les travaux d'exploitation d'un tel stockage sont soumis aux dispositions du présent titre » ;
- Article L.165-2 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions de l'article L. 165-1 pour des stockages de minime importance compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre VII** « Surveillance administrative et police des mines », **Chapitre VIII** « Dispositions applicables aux stockages souterrains d'énergie calorifique » :

- Article L.178-1 : « Les dispositions du présent titre sont applicables aux travaux de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique et les travaux d'exploitation d'un tel stockage selon des modalités fixées par décret en Conseil d'Etat » ;

En l'état le code minier dit ceci : **"Il convient de rappeler que plusieurs articles du Code Minier précisent qu'un décret en Conseil d'État fixent les conditions et les modalités d'application et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions pour des stockages d'énergie calorifique de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée. Actuellement ce décret n'existe pas. En l'absence d'un tel décret, les dispositions applicables aux gîtes géothermiques basse température doivent s'appliquer pour tout type de projet de stockage"**.

Tout projet de Géothermie faisant valoir du « stockage souterrain » se réfère réglementairement à l'exploitation d'un gîte géothermique basse température à défaut de disposer de la publication des décrets en Conseil d'Etat fixant les conditions et les modalités d'application où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions des articles L. 135-1 et L. 135-2 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée.

Pour rappel – Cadre réglementaire de la Géothermie de Minime Importance :

**Dès lors qu'une installation de Géothermie exploite le sous-sol à partir de cycles d'extractions et d'injections de calories (charge/décharge) pour assurer son bon fonctionnement et optimiser son efficacité, un système de Géothermie quel qu'il soit valorise la capacité calorifique des roches et donc développe une forme de « stockage souterrain d'énergie ».**

Selon les quantités d'énergies calorifiques échangées avec le sous-sol (« **Energies calorifiques injectées** »), l'exploitation des installations de Géothermie considérées (*en boucle fermée*) comme relevant du régime de la GMI et telles que définies par les décrets n°2015-15 du 8 janvier 2015 et n° 78-498 du 28 mars 1978 permet une valorisation de la capacité de stockage intrinsèque au sous-sol et donc de « stockage souterrain de Minime Importance ».

Pour rappel, les systèmes **en boucle fermée** (sur Sondes Géothermiques Verticales ou SGV), doivent répondre aux critères suivants :

- Une profondeur comprise entre 10 et 200 mètres ;



- Une puissance thermique échangée avec le sous-sol ne dépassant pas 500 kW ;
- Dont la température du fluide caloporteur qui retourne vers les échangeurs géothermiques fermés est comprise entre - 3 °C et + 40 °C.

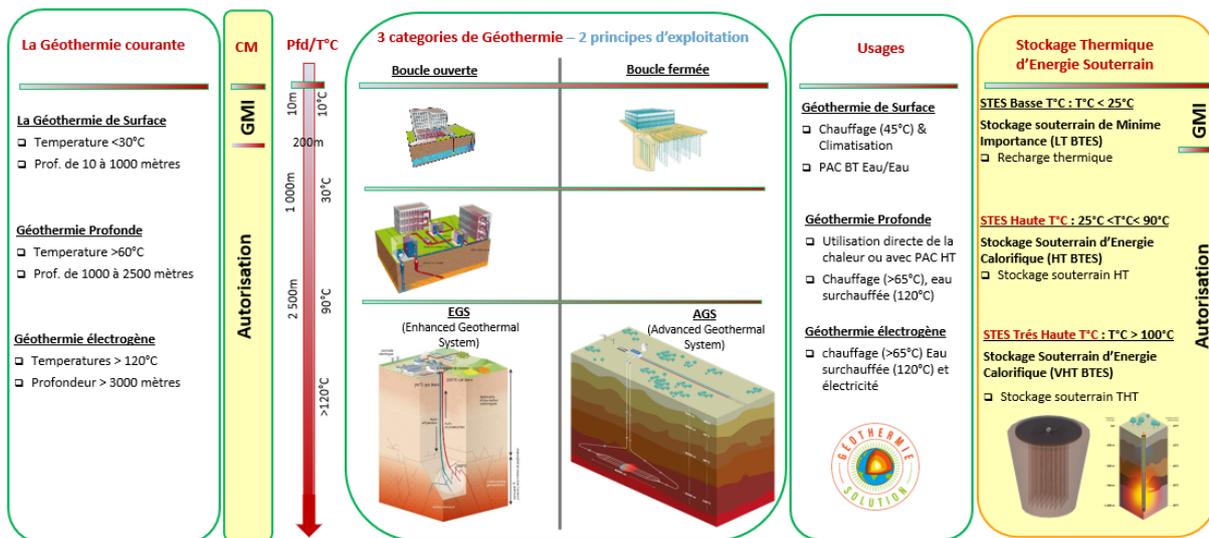


Figure 10 : Inventaire de la filière Géothermie et ses technologies par rapport au stockage souterrain sur forage (BTES) en interface du cadre réglementaire (Code Minier) – (source : AGES)

### F.3. Volet technologique

Il s'agit de distinguer les différentes formes de stockage souterrain sur boucle fermée entre « basse température » et « haute température » telles que décrites en introduction.

Les LT-BTES sont très répandus et ne relèvent plus d'une avancée technologique particulière dans leur version simple (par exemple un bâtiment ayant des besoins de chauffage et de climatisation fait sa propre recharge thermique en été). Le rapport final [17] de l'Annex 27 « Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems » du programme IEA ECES fournit une littérature conséquente au travers de ses 273 pages.

Un des plus anciens et emblématiques projets de HT-BTES est le projet de Drake Landing Solar Community (DLSC) [18] au Canada, qui a malheureusement été démantelé [19], après une quinzaine d'années de fonctionnement. Les raisons du démantèlement sont notamment dues aux coûts de mise à niveau du projet, au regard du coût actuel du gaz naturel.

Mais, nombre de projets moins emblématiques sont actuellement en service, avec notamment le projet de Cadujac [20] en France, qui est le premier projet français visant à stocker de la chaleur solaire à « haute température » (de l'ordre de 70 à 80°C) l'été pour la réutiliser directement ou via une PAC HT en hiver. Le HT BTES est composé de 60 sondes géothermiques haute température en PEX de 32m de profondeur, espacées de 2m50. Le volume de stockage souterrain s'apparente à 10 000m<sup>3</sup>.

### F.4. Volet gestion du stockage thermique

Dans le cas d'un HT-BTES, les sondes devront être intégrées dans un réseau hydraulique de surface de façon adaptée pour optimiser les échanges thermiques. Des recommandations pour la conception et la construction sont fournis dans [21].

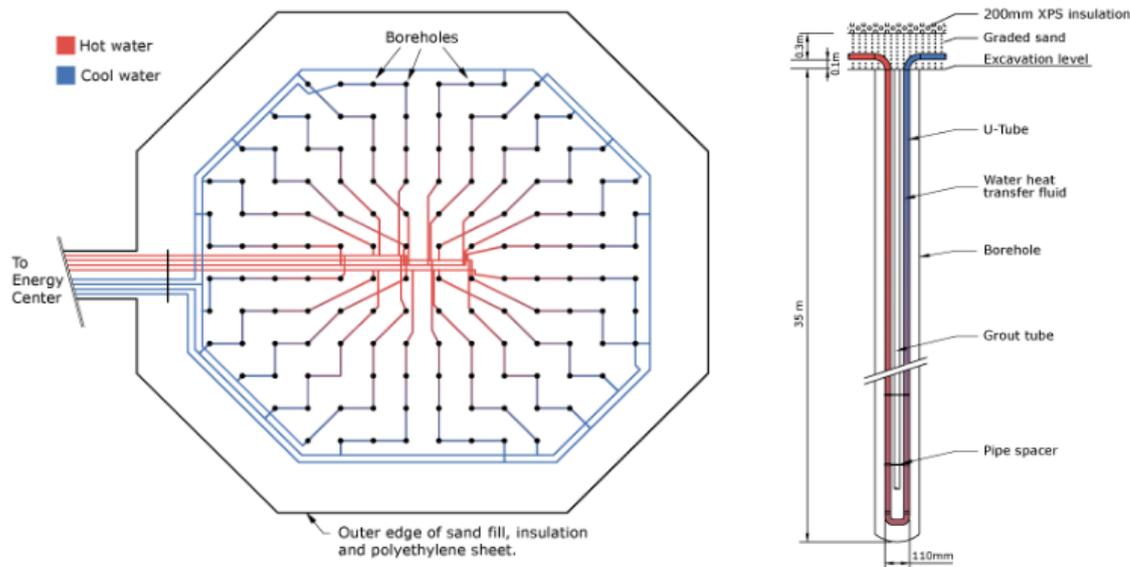


Figure 11. Vue de dessus d'un BTES et coupe selon un forage (source : [21])

Dans le cas des stockages souterrains de minime importance ou dit de « basse température » (LT BTES) il s'agit plutôt de gérer les cycles d'injection et d'extraction de calories dans le sous-sol afin de garder l'équilibre thermique sur le long terme imposé par le cadre réglementaire et défini en conception par rapport à la balance énergétique annuelle projetée (ratio Energie injectée sur Energie extraite).

### F.5. Volet économique

Comme pour les stockages TTES et PTES, une évaluation des CAPEX pour les stockages BTES est également fournie dans [4]. Cette fonction coût s'exprime par :

$$CAPEX[\text{€}/\text{m}^3] = 25330 V_{\text{storage}}^{-0.685} [\text{m}^3] + 30$$

Selon [4], cette fonction est valide entre 5 000 et 100 000 m<sup>3</sup>. Considérant cette fonction, le CAPEX s'établit à 76€/m<sup>3</sup> pour un BTES de 10 000 m<sup>3</sup>, et de 45 €/m<sup>3</sup> pour un BTES de 50 000 m<sup>3</sup>. Cette référence a été publiée en 2016, et devrait ainsi être largement réévalué. Il est à noter que les références, toutes fournies en coût spécifique au regard du volume, ne sont pas comparables entre elles, dans la mesure où les capacités de stockage sont très différentes d'une part, et sur des échelles de température différentes également.

### F.6. Des projets de référence au niveau national

Site	LT/HT BTES	Volume du stockage	Lien
Cadaujac (33)	HT BTES	10 000 m <sup>3</sup> 60 sondes	<a href="#">2024 Subdivision Solar and BTES - Cadaujac, France.pdf - Google Drive</a>
Thiverval-Grignon (78)	LT BTES	150 000 m <sup>3</sup> 52 sondes	<a href="https://www.accenta.ai/studies/decarbonation-liberty-country-club/">https://www.accenta.ai/studies/decarbonation-liberty-country-club/</a>
Blagnac (31)	LT BTES	47 500 m <sup>3</sup> 19 sondes	



## F.7. Des projets de référence au niveau international

Site	LT/HT BTES	Volume de la cuve	Lien
Crailsheim (Allemagne)	HT BTES	39 000 m <sup>3</sup> 80 sondes	<a href="https://www.stw-crailsheim.de/wp-content/uploads/2021/02/210204-Solar-Broschuere-EN.pdf">https://www.stw-crailsheim.de/wp-content/uploads/2021/02/210204-Solar-Broschuere-EN.pdf</a> <a href="https://hs.geoenergi.org/xpdf/erfaringer_fra_andre_projekter_opstartmode.pdf">https://hs.geoenergi.org/xpdf/erfaringer_fra_andre_projekter_opstartmode.pdf</a>
Braedstrup (Danemark)	HT BTES	19 000 m <sup>3</sup> 32 sondes	<a href="https://www.coolheating.eu/images/downloads/3.1-Best-practice-example-Braedstrup-JimLarsen.pdf">https://www.coolheating.eu/images/downloads/3.1-Best-practice-example-Braedstrup-JimLarsen.pdf</a> <a href="https://www.braedstrup-fjernvarme.dk">https://www.braedstrup-fjernvarme.dk</a> <a href="https://energiforskning.dk/files/slutrapporter/64-012-0007slutrapport_1_16072013_1252.pdf">https://energiforskning.dk/files/slutrapporter/64-012-0007slutrapport_1_16072013_1252.pdf</a> <a href="https://hs.geoenergi.org/xpdf/erfaringer_fra_andre_projekter_opstartmode.pdf">https://hs.geoenergi.org/xpdf/erfaringer_fra_andre_projekter_opstartmode.pdf</a>
Emmaboda (Suède)	HT BTES	322 000 m <sup>3</sup> 140 sondes	<a href="https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/wp-content/uploads/sites/60/2022/01/anderssonetal2021case-study-report-annex-52ht-btes-xylemswedenfinal.pdf">https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/wp-content/uploads/sites/60/2022/01/anderssonetal2021case-study-report-annex-52ht-btes-xylemswedenfinal.pdf</a>
Salo (Finlande)	HT BTES	2 338 000m <sup>3</sup> 6 Sondes	<a href="#">Heat stored in 2,000-meter-deep geothermal wells in Salo - Lounavoima</a>

Pour une liste de références plus exhaustive, un des livrables de la Task 39 de l'AIE a collecté les références des grands stockages de chaleur. Cette liste est publique (<https://planenergi.sharepoint.com/:x/g/EaQgqziwA5Em5Ob9nLm5eMBGFJTQKj-bmbNxaKpsMPdFw?rttime=iyGAtq1g3Uq>) et couvre les technologies TTES, PTES, BTES et ATES.

## F.8. Références bibliographiques

On trouvera dans [22] un récent état de l'art des connaissances sur les BTES incluant les aspects dimensionnements, modélisation, évaluation économique et impact environnemental.

Dans le cadre du projet Heatstore [14], de nombreuses ressources sur le BTES sont accessibles, notamment les livrables « D1.2 Underground Thermal Energy Storage (UTES)– general specifications and design » et « D1.4-4.2-4.3 Synthesis of demonstrators and case studies - Best practice guidelines for UTES development ».

La littérature est riche d'exemples et de rapports, comme [23], [24] et [25].



## G. Technologie 5 : Stockage souterrain sur aquifère (ATES – Aquifer Thermal Energy Storage)

La technologie du stockage thermique souterrain sur aquifère, référencée par l'acronyme anglais de ATES ou « Aquifer Thermal Energy Storage », exploite la capacité calorifique naturelle des eaux souterraines.

L'exploitation d'un ATES impose que les puits de pompage et d'injection soient réversibles, ce qui signifie que les puits injecteurs puissent devenir producteurs selon la période de l'année choisie et inversement. Le transfert d'énergie entre l'aquifère et la surface se fait par pompage et obligatoirement réinjection sans modification du volume d'eau exploité.

Un ATES exploite le sous-sol à partir d'échangeurs souterrains qualifiés de « boucle ouverte » ou « open loop ».

La technologie de stockage souterrain sur aquifère est scindée en deux catégories :

- les **LT-ATES** dits de **basse température** ou « Low Temperature »
- les **HT-ATES** dits de **haute température** ou « High Temperature » :

- **LT ATES :**

Les LT ATES ou « stockages thermiques souterrains sur aquifère dits de basse température » sont assimilables à des installations de géothermie de surface du type doublet sur nappe superficielle.

Les doublets géothermiques se réfèrent réglementairement à de la Géothermie dite de Minime Importance (GMI).

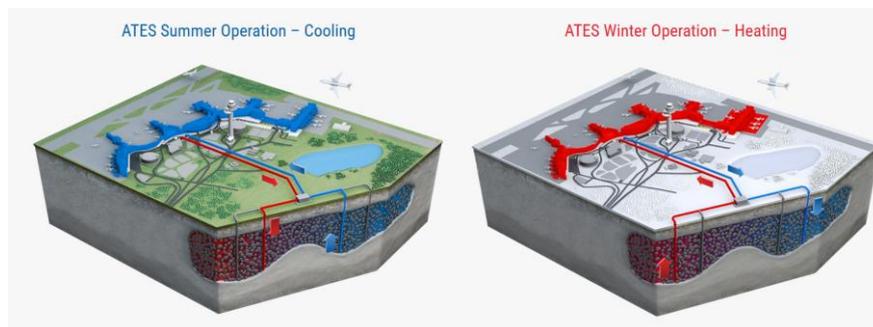


Figure 12. Doublet géothermique exploité en « LT-ATES » (Low Temperature Aquifer Thermal Energy Storage) (source : Underground Energy, LLC - USA)

Un LT ATES permet de produire du chaud et du froid qui est, soit passif (rafraîchissement), soit actif (climatisation). Ainsi, le prélèvement des calories en hiver est suivi d'une recharge partielle ou totale de calories en été et la nappe d'eau souterraine est maintenue autour de sa température d'origine. Par conséquent le réservoir subit peu de variation de température sur le long terme. C'est un stockage que l'on peut qualifier de « basse température » du fait qu'il reste dans les limites des températures prescrites par le cadre réglementaire (Code Minier - GMI) utilisant le sous-sol à des températures typiquement entre 4 et 25°C. La chaleur des eaux souterraines est valorisée au travers de pompes à chaleur basse température ou PAC



BT<sup>5</sup>. Il s'agit alors d'exploiter la ressource géothermique à partir de la valorisation d'échanges énergétiques avec l'aquifère, tant en extraction de chaleur (décharge) pour alimenter la PAC BT sur son évaporateur lorsqu'elle chauffe le bâtiment qu'en injection (charge) pour permettre à la PAC BT de se libérer de sa chaleur fatale du condenseur lorsqu'elle climatise. On pourra également retrouver des LT ATES avec une recharge en calories via de la chaleur fatale ou peu coûteuse et disponible en été.

Techniquement un « LT ATES » est constitué à minima de deux forages sur nappe superficielle, typiquement de 30 à 200 mètres de profondeur équipés d'échangeurs en circuits ouverts. Les puits de production où est pompée l'eau souterraine (présente dans l'aquifère) et les puits d'injection où l'eau réchauffée/refroidie est injectée dans la nappe ne doivent pas dépasser un débit de 80 m<sup>3</sup>/h. Le nombre de puits est défini selon la puissance thermique à couvrir en lien avec les paramètres hydrogéologiques de l'aquifère exploité, les paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques de la nappe captée.

Un LT ATES doit prendre en compte l'équilibre entre les usages énergétiques exploités par le système (cycles de charge et de décharge de calories dans la nappe) en lien avec les besoins énergétiques à couvrir en surface. Les seuils de température d'injection tolérés réglementairement pour l'exploitation d'un LT ATES sont de 32°C maximum. La température de l'eau prélevée par un LT ATES doit être inférieure à 25 °C et respecter un panache thermique induit par l'exploitation de la nappe d'eau souterraine inférieure à 4°C dans un rayon de 200 mètres ;

- HT ATES :

Les HT ATES ou « stockages thermiques souterrains sur aquifère dits de haute température » sont assimilables à des installations de géothermie profonde qualifiés réglementairement de « stockage souterrain d'énergie calorifique » en tant que gîte géothermique.

C'est un stockage que l'on peut qualifier de « haute température » du fait qu'il valorise des sources d'énergies renouvelables (solaire thermique, biomasse) intermittentes ou de récupération (chaleur fatale de process industriels) à « haute température ». Un HT ATES exploite des températures entre 25 et 90°C.

---

<sup>5</sup> PAC BT : Les Pompes à Chaleur dites de Basse Température exploitent des calories côté évaporateur jusqu'à 25°C pour délivrer une température côté condenseur comprise entre 35°C et 45°C pour une production d'eau chaude.



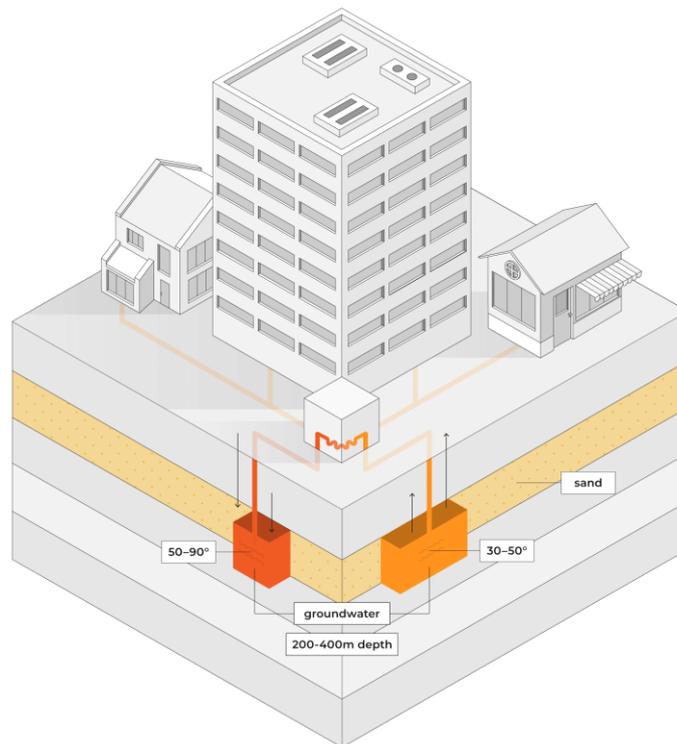


Figure 13. Doublet géothermique exploité en « HT ATES » (source : PUSH-IT)

Un HT ATES permet une utilisation soit directe de la chaleur stockée dans le réservoir souterrain, soit complétée par une élévation des températures au travers de pompes à chaleur haute température ou PAC HT<sup>6</sup>. **Un HT ATES permet une production d'eau chaude ou d'eau surchauffée.**

L'exploitation d'un stockage souterrain à travers l'injection de calories à « haute température » génère une augmentation de la température du réservoir décorrélée du gisement naturel d'un site. Cela signifie que le stockage souterrain à une profondeur définie est à une température nécessairement plus élevée que le gradient géothermique naturel<sup>7</sup>.

Techniquement un HT ATES est constitué à minima de deux forages sur nappe d'eau souterraine, de 30 à plus de 200 mètres de profondeur équipés d'échangeurs en circuits ouverts. Les puits de production où est pompée l'eau souterraine et les puits d'injection où l'eau réchauffée/refroidie est injectée dans la nappe ne sont pas soumis à une restriction de débit de pompage si ce n'est la productivité et la perméabilité du réservoir. Le nombre de puits est défini selon la puissance thermique à couvrir en lien avec les paramètres hydrogéologiques du réservoir exploité, les paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques de la nappe captée.

Un HT ATES n'est pas soumis à un seuil de température d'injection réglementairement pour permettre son exploitation.

<sup>6</sup> PAC HT : Les Pompes à Chaleur dites de Haute Température exploitent des calories côté évaporateur de 20°C à plus de 80°C pour délivrer une température côté condenseur comprise entre 55°C et 160°C pour une production d'eau chaude, d'eau surchauffée ou encore de vapeur d'eau.

<sup>7</sup> En France le gradient géothermique est en moyenne de 30°C d'augmentation par 1 000m de profondeur forée avec un sous-sol à environ 10°C à 10m de profondeur



## G.1. Volet technique

Type de média de stockage	Eaux souterraines
Plage de volume	De 15 000 à 1 000 000 m <sup>3</sup>
Plage d'énergie stockée par cycle	De l'ordre de 0.6 GWh à 40 GWh
Puissance de charge	La puissance de charge/décharge dépend des paramètres hydrogéologiques du réservoir (De 1 à 15 MW)
Puissance de décharge	
Plage de température Charge et Décharge	Température maximale du stockage : 90°C pour les HT-ATES Température maximale du stockage : 25°C pour les LT-ATES Température minimale : 25° pour les HT-ATES Température minimale ; 4°C pour les LT-ATES
Pression de travail	En fonction de la profondeur des aquifères

## G.2. Volet réglementaire

Le cadre réglementaire qui légifère les solutions dites de « stockage souterrain » se réfère au Code Minier. En l'état, le **Code Minier actuel** traite le sujet du « **stockage souterrain d'énergie** » de la manière suivante :

Au titre du livre I<sup>er</sup> du Code Minier, la recherche et l'exploitation des **stockages souterrains d'énergie calorifique** sont régis par les dispositions suivantes :

**Titre II** « La recherche », **Chapitre VI** « La recherche d'un stockage d'énergie calorifique » :

- Article L.126-1 : « Les activités de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique sont soumises aux dispositions relatives aux gîtes géothermiques à basse température des articles L. 124-4 à L. 124-9 » ;
- Article L.126-2 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions de l'article L. 126-1 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre III** « L'exploitation », **Chapitre V** « L'exploitation des stockages d'énergie calorifique » :

- Article L.135-1 : « L'exploitation d'un stockage souterrain d'énergie calorifique est soumise aux dispositions des articles L. 134-4 à L. 134-10 relatifs aux gîtes géothermiques à basse température » ;
- Article L.135-2 : « L'arrêté autorisant l'exploitation du stockage mentionné à l'article L. 135-1 précise notamment la quantité maximale d'énergie calorifique dont le stockage est autorisé » ;
- Article L.135-3 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions des articles L. 135-1 et L. 135-2 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre V** « Droits et obligations liés à l'activité minière », **Chapitre VII** « **Dispositions propres aux stockages souterrains d'énergie calorifique** » :

- Article L.157-1 : « Les dispositions du présent titre sont applicables aux stockages souterrains d'énergie calorifique » ;

**Titre VI** « Travaux Miniers », **Chapitre V** « Dispositions propres aux stockages souterrains d'énergie calorifique » :



- Article L.165-1 : « Les travaux de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique et les travaux d'exploitation d'un tel stockage sont soumis aux dispositions du présent titre » ;
- Article L.165-2 : « Des décrets en Conseil d'Etat fixent les conditions et les modalités d'application du présent chapitre et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions de l'article L. 165-1 pour des stockages de minime importance compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée » ;

**Titre VII** « Surveillance administrative et police des mines », **Chapitre VIII** « Dispositions applicables aux stockages souterrains d'énergie calorifique » :

- Article L.178-1 : « Les dispositions du présent titre sont applicables aux travaux de recherches préalables à la constitution d'un stockage souterrain d'énergie calorifique et les travaux d'exploitation d'un tel stockage selon des modalités fixées par décret en Conseil d'Etat » ;

En l'état le code minier dit ceci : "**Il convient de rappeler que plusieurs articles du Code Minier précisent qu'un décret en Conseil d'État fixent les conditions et les modalités d'application et les cas où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions pour des stockages d'énergie calorifique de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée. Actuellement ce décret n'existe pas. En l'absence d'un tel décret, les dispositions applicables aux gîtes géothermiques basse température doivent s'appliquer pour tout type de projet de stockage**".

Tout projet de Géothermie faisant valoir du « stockage souterrain » se réfère réglementairement à l'exploitation d'un gîte géothermique basse température à défaut de disposer de la publication des décrets en Conseil d'Etat fixant les conditions et les modalités d'application où il peut être dérogé en totalité ou en partie aux dispositions des articles L. 135-1 et L. 135-2 pour des stockages de minime importance, compte tenu de la quantité d'énergie calorifique qui y est stockée.

Pour rappel – Cadre réglementaire de la Géothermie de Minime Importance :

**Dès lors qu'une installation de Géothermie exploite le sous-sol à partir de cycles d'extractions et d'injections de calories (charge/décharge) pour assurer son bon fonctionnement et optimiser son efficacité, un système de Géothermie quel qu'il soit valorise la capacité calorifique des roches et donc développe une forme de « stockage souterrain d'énergie ».**

Selon les quantités d'énergies calorifiques échangées avec le sous-sol (« **Energies calorifiques injectées** »), l'exploitation des installations de Géothermie considérées (*en boucle fermée*) comme relevant du régime de la GMI et telles que définies par les décrets n°2015-15 du 8 janvier 2015 et n° 78-498 du 28 mars 1978 permet une valorisation de la capacité de stockage intrinsèque au sous-sol et donc de « stockage souterrain de Minime Importance ».

Pour les systèmes **en boucle ouverte** (sur nappes) doivent répondre aux critères suivants :

- Une profondeur comprise entre 10 et 200 mètres ;
- Une puissance thermique échangée avec le sous-sol ne dépassant pas 500 kW ;
- La température de l'eau prélevée doit être inférieure à 25 °C ;
- Les eaux prélevées doivent être réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes prélevés et réinjectés doit être nulle ;
- La température maximale de réinjection ne doit pas dépasser 32 °C ;
- Les débits pompés doivent être inférieurs à 80 m<sup>3</sup> /h ;



- La variation de la température induite dans la nappe dans un rayon de 200 mètres doit être inférieure à 4 °C ;

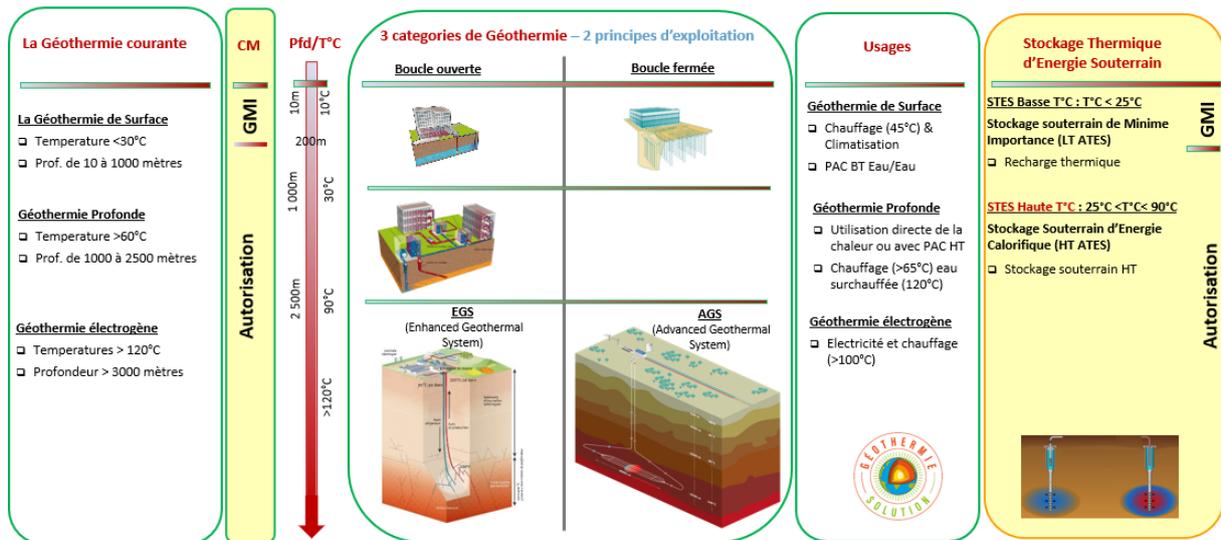


Figure 14 : Inventaire de la filière Géothermie et ses technologies par rapport au stockage souterrain sur aquifère (ATES) en interface du cadre réglementaire (Code Minier) – (source : AGES)

### G.3. Volet technologique

Il s'agit de distinguer les différentes formes de stockage souterrain sur boucle ouverte entre « basse température » et « haute température » telles que décrites en introduction.

Environ 4 000 systèmes d'ATES existent dans le monde et sont opérationnels, dont environ près de 3 500 uniquement aux Pays-Bas (Contexte hydrogéologique spécifique et avantageux : très forte perméabilité et faible gradient de nappe). La vaste majorité de ces systèmes d'ATES sont des systèmes LT-ATES, avec des températures d'injection maximales de 25 à 30 °C. Une poignée de systèmes HT-ATES peuvent gérer des températures supérieures à 50 °C. La technologie est prête pour le marché et il y a actuellement divers projets à différents stades de développement. Toutefois, la complexité liée au développement des solutions de HT ATES porte en grande partie sur les risques de modifications physico-chimiques des eaux souterraines. En effet du fait d'injecter des calories à beaucoup plus haute température que la température ambiante des réservoirs, cela peut engendrer un risque de précipitation physico-chimique et donc de colmatage des équipements.

Les LT-ATES sont rares en France en raison de la réversibilité des forages qui est imposée pour permettre l'exploitation du doublet géothermique en mode « stockage souterrain ».

Nous pouvons tout de même citer les exemples de l'ancien site d'ESSO (ExxonMobil) à Bègles (Gironde) qui disposait il y a plus de 40ans déjà d'un des tous premiers LT ATES d'Europe pour couvrir les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation de ses bureaux (6 500m<sup>2</sup>) à travers un doublet géothermique réversible constitué de 2 forages de 250m de profondeur exploitant l'aquifère de l'Eocène moyen à une température moyenne de 20°C en pompant alternativement 35 000 m<sup>3</sup>/an à raison de 30 m<sup>3</sup>/h. Plus récemment dans les années 2020 le campus d'Engie à La Garenne Colombes (Hauts-de-Seine) dispose de puits de 90 mètres de profondeur pour couvrir les besoins de chauffage et de refroidissement du site à raison d'une puissance de 1,9MW en chaud, et 1,6MW en froid mais également le projet de l'ENSEGID (Ecole Nationale Supérieure en Environnement, Géorressources et Ingénierie du Développement Durable) de Bordeaux (Gironde) qui a fait le choix de recourir à un LT ATES

pour chauffer et climatiser ses nouveaux locaux. Le système est composé de deux forages de production/injection distant de 150 m qui exploitent la nappe des calcaires oligocènes, située à une profondeur comprise entre 35 et 70 m. Ce système stocke et exploite de l'eau à une température comprise entre 10 et 20°C.

#### G.4. Volet gestion du stockage thermique

Dans le cas des stockages souterrains basses températures LT ATES il s'agit plutôt de gérer les injections et prélèvements des calories sur la ressource en eau souterraine afin de maintenir la température de l'aquifère exploité inférieur à 25°C.

Il y a près de 40 ans l'ancien site pétrolier d'ESSO REP (Exxon Mobil) à Bègles faisait le choix d'installer un système de géothermie innovant en déployant un stockage d'énergie souterrain sur aquifère pour couvrir les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation de ses bureaux (6 500m<sup>2</sup>). Ce système de Géothermie réversible comprenait :

- Un dispositif de production composée d'une PAC Géothermique Eau/Eau, développant une puissance calorifique de 410 kW en hiver et une puissance frigorifique de 340 kW en été ;
- Un dispositif de captage constitué de 2 forages de 250m de profondeur, exploitant l'aquifère de l'Eocène moyen ;
- Un dispositif de régulation permettant le contrôle/commande de l'installation.

L'Eocène est exploité à partir d'un doublet réversible composé de 2 forages de 250m de profondeur chacun (P1F et P2C). Chaque forage est équipé d'une pompe qui permet la réversibilité du doublet. L'aquifère est exploité à la température moyenne de 20°C en pompant alternativement 35 000 m<sup>3</sup>/an à raison de 30 m<sup>3</sup>/h. Les 2 forages sont distants de près de 260 m et sollicitent l'Eocène moyen constitué de calcaires et de sables à la profondeur de - 190 m / - 250 m. Ce dispositif était calibré pour prélever et réinjecter dans l'aquifère un débit calorifique annuel maximal de 40 000 thermies, pour un refroidissement de l'eau profonde de 10°C (en chauffage d'hiver) à partir du forage « froid » P2F, et pour un réchauffement de l'eau profonde de 5°C (en climatisation d'été) à partir du forage « chaud » P1C.

#### G.5. Volet économique

Les coûts d'investissements spécifiques sont très dépendants des propriétés des aquifères souterrains. La principale limitation est la puissance fournie par le système ce qui va conditionner sa capacité de stockage à travers ses cycles de charge et de décharge.

La température d'injection dans un système de stockage sur aquifère joue un rôle important dans les coûts d'investissement. Plus la température d'injection susceptible d'être valorisée en surface est élevée plus le coût d'investissement sera onéreux. Les principaux facteurs influant dans le coût des installations sont les matériaux qui composeront les équipements des puits pour des températures élevées et le système de traitement des eaux souterraines pour gérer le phénomène de modification physico-chimique.

#### G.6. Des projets de référence au niveau international

Pour une liste de références plus exhaustive, un des livrables de la Task 39 de l'AIE a collecté les références des grands stockages de chaleur. Cette liste est publique (<https://planenergi.sharepoint.com/:x/g/EaQqiqziwA5Em5Ob9nLm5eMBGFJTQKj->



[bmbNxaKpsMPdFw?rttime=iyGAtq1g3Ug](#)) et couvre les technologies TTES, PTES, BTES et ATES.



## H. Des programmes de l'Agence Internationale de l'Energie

---

Le stockage thermique est traité dans plusieurs programmes de l'Agence Internationale de l'Energie. Sans être exhaustif, nous mentionnons ci-dessous quelques-uns de ces programmes.

- Energy Storage Technology Collaboration Programme (<https://iea-es.org/>)
  - Task 45 : Accelerating the Uptake of Large Thermal Energy Storages
  - Task 39 : Large Thermal Energy Storages for District Heating
- Industrial Energy-Related Technologies and Systems (<https://iea-industry.org/>)
  - Task XXIV : Process Integration for Industry Decarbonization
  - Task XV : Industrial Excess Heat Recovery
- Geothermal Technology Collaboration Program (<https://www.iea-gia.org>)
- Solar Heating and Cooling Program (<https://www.iea-shc.org/>)
  - Task 45 : Large Scale Solar Heating and Cooling Systems
  - Task 55 : Towards the Integration of Large SHC Systems into DHC Networks
  - Task 68 : Efficient Solar District Heating Systems - Considering higher temperatures and digitalization measures
- Energy in Buildings and Communities (<https://iea-ebc.org>)
- District Heating and Cooling (<https://www.iea-dhc.org>)
  - Annex XII Project 03 : Integrated Cost-effective Large-scale Thermal Energy Storage for Smart District Heating and Cooling
- SolarPACES : Concentrating Solar Power, Thermal and Chemical Energy Systems (<https://www.solarpaces.org>)
  - TASK III: Solar Technology and Advanced Applications - Thermal Energy Storage Working Group



## I. Des références bibliographiques

La littérature en lien avec le stockage thermique est très abondante. La sélection ci-dessous est réduite et donc largement exhaustive.

### I.1. Références bibliographiques génériques en lien avec le stockage thermique

Au niveau européen, l'association européenne EASE (European Association for Storage of Energy) a publié une note de synthèse [26] sur le rôle du stockage thermique illustré de nombreux exemples, et de recommandations politiques pour massifier le recours au stockage thermique.

A l'échelle internationale, l'IRENA (International Renewable Energy Agency) a publié en 2020 un rapport sur le stockage thermique[27], intégrant de nombreuses technologies de stockage et avec également une approche sectorielle (industrie, réseaux de chaleur, bâtiment, froid, ...).

En France, ALLICE (Alliance Industrielle pour la Compétitivité et l'Efficacité Énergétique) a également publié un rapport à destination de ces adhérents sur les solutions de stockage thermique dans l'industrie.

### I.2. Références bibliographiques en lien avec les réseaux de chaleur

Le CEREMA a publié un document généraliste sur la mise en œuvre du stockage thermique [28] dans les réseaux de chaleur. Sans être spécifiquement dédié au stockage, le CEREMA a également publié un rapport d'étude sur les réseaux de chaleur au Danemark [29], avec un focus sur le stockage thermique, avec deux exemples de réseaux de chaleur associant stockage court-terme en cuve (TTES) et stockage long terme en fosse (PTES).

Plus spécifiquement orienté vers l'intégration du solaire dans les réseaux de chaleur, le site Solar-District-Heating.eu [30] offre de nombreuses ressources dont certaines sont dédiées au stockage de l'énergie thermique comme [31].

On retrouvera également de nombreuses informations sur l'intégration du solaire dans les réseaux de chaleur dans les livrables des différentes tâches AIE du programme Solar Heating and Cooling dédiées aux grandes installations solaires thermiques comme les tâches :

- Task 45 : Large Scale Solar Heating and Cooling Systems
- Task 55 : Integrating Large SHC Systems into DHC Networks
- Task 68 : Efficient Solar District Heating Systems

Parmi les livrables de ces tâches, plusieurs sont dédiés au stockage thermique, comme le Stockage en Fosse (PTES)[10], le stockage souterrain par forage (BTES)[21], l'intégration hydraulique du stockage [32].

Dans le cadre du programme District Heating and Cooling de l'AIE, l'Annex XII incluait un volet sur les technologies de « grand stockage », comme le Stockage en Fosse (PTES)[33],[13], et en Aquifère (ATES) [33].



### I.3. Références bibliographiques en lien avec la modélisation thermique des stockages

La modélisation dynamique des stockages et des systèmes associés est un élément clé des études de faisabilité et de dimensionnement. Dans le cadre des cuves d'eau pressurisées ou non, des modèles éprouvés et validés dans les environnements TRNSYS ou Modelica sont disponibles.

Pour les « grands stockages », notamment ceux en lien avec le sol comme les PTES et les BTES, un récent état de l'art des modèles disponibles [34] réalisé dans le cadre de la Tâche 39 du programme Energy Storage de l'AIE. Ces modèles ont fait l'objet d'un Round Robin Test pour évaluer leur qualité.

La comparaison entre mesures et modélisation pour des modèles TRNSYS de PTES et de BTES figure dans un rapport du projet européen Heatstore [35].



## Conclusion

---

Seules quelques technologies de stockage sont présentées dans ce livret. Ce sont des technologies matures dont les références en France sont malheureusement peu nombreuses, mais qui bénéficient d'un retour d'expériences significatif en Europe.

Que ces technologies soient destinées à lisser les appels de puissance ou à découpler la disponibilité des ressources vis-à-vis des besoins, une solution sera adaptée, et les connaissances acquises permettront de les concevoir, de les dimensionner, de les réaliser avec un niveau de risque réduit, et de suivre leurs performances et efficacité dans le temps.

Un cadre technico-économique reste encore à élaborer pour faciliter l'émergence de ces solutions de stockage, mais ce cadre devra être adapté aux différents contextes, et doit faire l'objet d'une concertation entre les différents acteurs.



## Références

- [1] IEA TCP ES, « Energy Storage Technology Collaboration Programme », Energy Storage Technology Collaboration Programme. [En ligne]. Disponible sur: <https://iea-es.org/>
- [2] J. Romani, J. Gasia, et L. F. Cabeza, « Definitions of technical parameters for thermal energy storage (TES) », IEA TCP ES, mai 2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/2018-05\\_Technical-Parameters\\_final.pdf](https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/2018-05_Technical-Parameters_final.pdf)
- [3] N. Fournier *et al.*, « Task 39 - Large Thermal Energy Storages for District Heating - Subtask A: Application Scenarios, Assessment of Concepts, Integration aspects - Deliverable A4: Method to carry out an LTES project, important questions & KPIs - Subtask A main report », IEA TCP ES, avr. 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES\\_Task39\\_WPA\\_Deliverable\\_A4\\_LTES\\_project\\_development-Subtask\\_A\\_Main\\_report.pdf](https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPA_Deliverable_A4_LTES_project_development-Subtask_A_Main_report.pdf)
- [4] F. Mauthner et S. Herkel, « Technology and demonstrators - Technical Report Subtask C - Part C1: Classification and benchmarking of solar thermal systems in urban environment », juin 2016. [En ligne]. Disponible sur: [https://task52.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task52-STC1-Classification-and-Benchmarking\\_v02.pdf](https://task52.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task52-STC1-Classification-and-Benchmarking_v02.pdf)
- [5] Ministère de l'Économie des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, « Certificats d'économies d'énergie Opération n° AGRI-TH-101 Dispositif de stockage d'eau chaude de type « Open Buffer » ». 1 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/AGRI-TH-101%20vA62-2%20%C3%A0%20compter%20du%2001-01-2025\\_1.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/AGRI-TH-101%20vA62-2%20%C3%A0%20compter%20du%2001-01-2025_1.pdf)
- [6] *Directive 2014/68/UE du Parlement Européen et du Conseil relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression*. 2014, p. 118 pages. [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014L0068-20140717>
- [7] *Arrêté du 20/11/17 relatif au suivi en service des équipements sous pression et des récipients à pression simples*. 2017, p. 38 pages. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000036128632?init=true&page=1&query=TREP1723392A&searchField=ALL&tab\\_selection=all](https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000036128632?init=true&page=1&query=TREP1723392A&searchField=ALL&tab_selection=all)
- [8] « Treasure Project: Demonstrating Large Pit Thermal Energy Storages ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.treasure-project.eu>
- [9] Académie des Technologies et B. Bourdoncle, « Le stockage intersaisonnier de chaleur dans le secteur résidentiel-tertiaire : un moyen de réduire notre empreinte carbone », déc. 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.academie-technologies.fr/wp-content/uploads/2021/10/ReseauxDChaleurWeb-.pdf>
- [10] M. V. Jensen et J. E. Nielsen, « Seasonal pit heat storages - Guidelines for materials & construction », IEA SHC, oct. 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T55-C-D.2-FACT-SHEET-Guidelines-seasonal-storages.pdf>
- [11] J. P. Meyer, « New developments in geomembranes for pit heat storages », Solar Thermal World. [En ligne]. Disponible sur: <https://solarthermalworld.org/news/new-developments-in-geomembranes-for-pit-heat-storages/>
- [12] B. Epp, « Seasonal pit heat storage: Cost benchmark of 30 EUR/m<sup>3</sup> », Solar Thermal World. [En ligne]. Disponible sur: <https://solarthermalworld.org/news/seasonal-pit-heat-storage-cost-benchmark-30-eurm3/>
- [13] D. Sveinbjörnsson, N. From, et P. A. Sorensen, « Pit Thermal Energy Storage for Smart District Heating and Cooling », IEA DHC, mars 2020.
- [14] « Heatstore: High Temperature Underground Thermal Energy Storage ». [En ligne]. Disponible sur: <https://heatstore.eu/>



- [15] B. Adl-Zarrabi, H. Navarro, G. Wallner, et A. Tosatto, « Task 39 - Large Thermal Energy Storages for District Heating - Subtask B: Components and Materials Database », IEA TCP ES, Anglais. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES\\_Task39\\_WPB\\_Deliverable\\_B\\_Components\\_and\\_Materials\\_database-Subtask\\_B\\_Main\\_report.pdf](https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPB_Deliverable_B_Components_and_Materials_database-Subtask_B_Main_report.pdf)
- [16] M. Vang Bobach, « Task 39 - Large Thermal Energy Storages for District Heating - Subtask B: Components and Materials Database -Annex 1: Requirements for water quality in pit thermal energy storages », IEA TCP ES. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES\\_Task39\\_WPB\\_Deliverable\\_B\\_Annex1\\_Requirements-for-water-quality-in-pit-thermal-energy-storages.pdf](https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPB_Deliverable_B_Annex1_Requirements-for-water-quality-in-pit-thermal-energy-storages.pdf)
- [17] H. Bjorn, « IEA ECES ANNEX 27: Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems », IEA ECES, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.ucviden.dk/ws/portalfiles/portal/111881191/IEA\\_ECES\\_ANNEX\\_27\\_Final\\_Report\\_20201118.pdf](https://www.ucviden.dk/ws/portalfiles/portal/111881191/IEA_ECES_ANNEX_27_Final_Report_20201118.pdf)
- [18] CanmetENERGY, « Drake Landing Solar Community (DLSC) ». [En ligne]. Disponible sur: [https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/DrakesLanding\(ENG\).pdf](https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/DrakesLanding(ENG).pdf)
- [19] « Drake Landing Solar Community ». octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.okotoks.ca/sites/default/files/2024-10/Drake%20Landing%20Solar%20Community%20Background.pdf>
- [20] IEA Geothermal, « Eco-subdivision heating network - Cadaujac ». [En ligne]. Disponible sur: <https://drive.google.com/file/d/1ae42c96b2bKfsN2ZIUbZE6ENWsGc9LT9/view>
- [21] B. Sibbitt et D. Mc Clenahan, « Seasonal Borehole Thermal Energy Storage – Guidelines for design & construction », avr. 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://task45.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T45.B.3.1-TECH-Seasonal-storages-Borehole-Guidelines.pdf>
- [22] H. Sadeghi, R. Jalali, et R. M. Singh, « A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, p. 14, mars 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114236.
- [23] C. Maragna, C. Rey, et M. Perreux, « A novel and versatile solar Borehole Thermal Energy Storage assisted by a Heat Pump. Part 1: System description », *Renewable Energy*, vol. 208, p. 709-725, mai 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.03.105.
- [24] S. Buffa, M. Cozzini, M. D'Antoni, M. Baratieri, et R. Fedrizzi, « 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, p. 504-522, avr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.059.
- [25] H. Sadeghi, R. Jalali, et R. M. Singh, « A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, p. 114236, mars 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114236.
- [26] European Association for Storage of Energy, « Thermal Energy Storage ». septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: [https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2023/09/2023.09.26-Thermal-Energy-Storage\\_for-distribution.pdf](https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2023/09/2023.09.26-Thermal-Energy-Storage_for-distribution.pdf)
- [27] IRENA, « Thermal Energy Storage : Innovation Outlook ». 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_TES\\_2020.pdf?rev=6950b7b9792344b5ab28d58e18209926](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf?rev=6950b7b9792344b5ab28d58e18209926)
- [28] CEREMA, « Stockage thermique et réseaux de chaleur », sept. 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2022/01/Stockage\\_thermique.pdf](https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2022/01/Stockage_thermique.pdf)
- [29] CEREMA, « Les réseaux de chaleur au Danemark », janv. 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2024/02/2024\\_RCF\\_Danemark\\_1.pdf](https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2024/02/2024_RCF_Danemark_1.pdf)



- [30] SOLITES, « Solar District Heating ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.solar-district-heating.eu>
- [31] T. Schmidt et O. Miedaner, « Solar district heating guidelines - Storage », Aout 2012. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/06/SDH-WP3\\_FS-7-2\\_Storage\\_version3.pdf](https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/06/SDH-WP3_FS-7-2_Storage_version3.pdf)
- [32] P. Leoni et F. Ochs, « Solar DH – network hydraulics and supply points », Sptembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://task55.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-T55-A-D.3.3-FACT-SHEET-Large-Scale-storages-for-ST-share-increase.pdf>
- [33] T. Pauschinger et T. Schmidt, « Design Aspects for Large-Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling », mars 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex\\_XII/2020.03.09\\_Report\\_Task\\_A\\_IEA\\_DHC\\_Annex\\_XII\\_Project\\_03.pdf](https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_XII/2020.03.09_Report_Task_A_IEA_DHC_Annex_XII_Project_03.pdf)
- [34] T. Schmidt *et al.*, « Task 39 - Large Thermal Energy Storages for District Heating - Subtask C: Round Robin Simulations Deliverable C1: Numerical models list - Overview and collection of model fact sheets », IEA TCP ES. [En ligne]. Disponible sur: [https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES\\_Task39\\_WPC\\_Deliverable\\_C1\\_Numerical\\_models\\_list-Overview\\_and\\_collection\\_of\\_model\\_fact\\_sheets.pdf](https://iea-es.org/task-39/wp-content/uploads/sites/21/IEA-ES_Task39_WPC_Deliverable_C1_Numerical_models_list-Overview_and_collection_of_model_fact_sheets.pdf)
- [35] G. Gauthier, « HEATSTORE Benchmarking, and improving models of subsurface heat storage dynamics », nov. 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.heatstore.eu/documents/HEATSTORE\\_WP2\\_D2.3-Danish%20PTES%20and%20BTES%20installations\\_Final\\_2020.11.02.pdf](https://www.heatstore.eu/documents/HEATSTORE_WP2_D2.3-Danish%20PTES%20and%20BTES%20installations_Final_2020.11.02.pdf)

