



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Stockage thermique et réseaux de chaleur

STOCKAGE THERMIQUE ET RÉSEAUX DE CHALEUR

L'électricité se stocke difficilement et se transporte facilement, la chaleur, c'est le contraire. Pour optimiser le dimensionnement et le fonctionnement d'un réseau de chaleur, le recours à une unité de stockage thermique est un moyen efficace : elle emmagasine de la chaleur quand elle est produite par une installation dans des moments où elle n'a pas de consommateurs et la restitue quand la demande de chaleur est importante. Pour stocker la chaleur, il existe aujourd'hui un nombre important de techniques, éprouvées ou en cours de validation industrielle, qui sont présentées dans la présente fiche, de leur concept à leur coût de construction et d'usage.

Note : La présente fiche est inspirée de la fiche technique de l'association AMORCE RCT 45 de juin 2016 ainsi que de la thèse de Matthieu Martinelli, « Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur », Université Grenoble Alpes, 2016

UNE MÊME DÉFINITION POUR TROIS TYPES DE STOCKAGE THERMIQUE

C'est un système qui permet d'accumuler l'excès de production de chaleur pour la restituer lorsque les circonstances le justifient : pics de consommation, lissage journalier ou inter saisonnier, opération de maintenance, ...

Trois techniques, par ordre de densité de stockage (kW.h/m³) croissante, permettent de stocker de la chaleur :

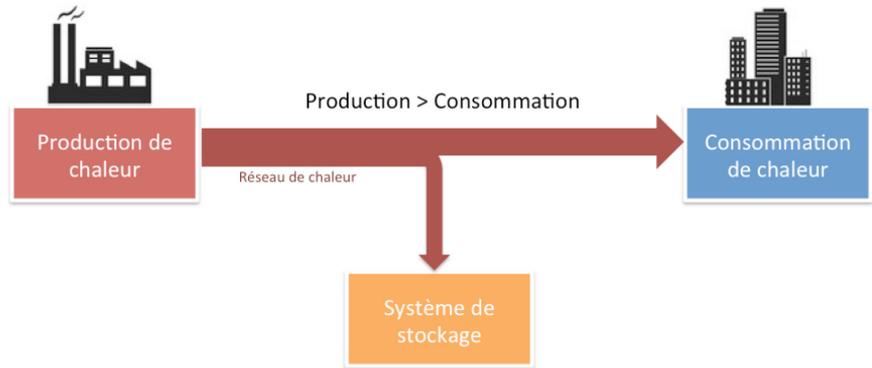
- l'élévation de température d'un matériau : **stockage sensible**,
- le changement d'état d'un matériau : **stockage latent**,
- une réaction chimique entre plusieurs composés : **stockage thermo-chimique**.

Le stockage sensible peut prendre plusieurs formes : cuve, fosse, sol, nappe aquifère, le réseau lui-même, etc.

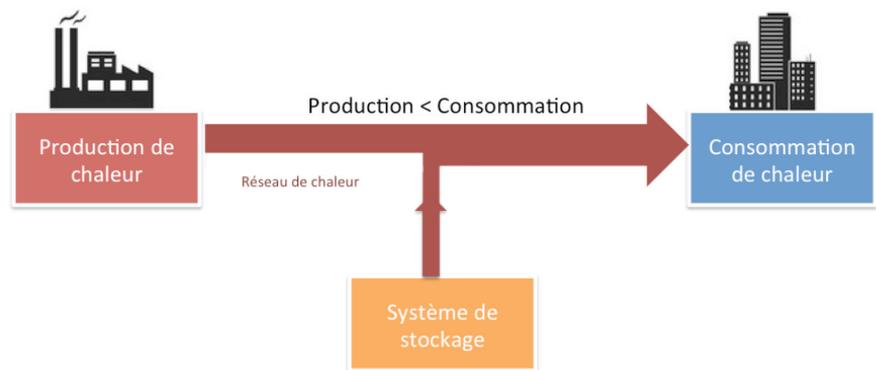
A ce jour, seul le stockage sensible a été mis en œuvre à l'échelle des réseaux de chaleur.

Le stockage de chaleur fonctionne en deux temps :

Lorsque la production de chaleur est plus forte que la demande, le système de stockage emmagasine de l'énergie.



Lorsque la demande de chaleur est plus importante que la production de chaleur, le système de stockage restitue la chaleur emmagasinée.



Source : AMORCE série technique RCT 45 (Juin 2016)

INTÉRÊT DU STOCKAGE POUR LES RÉSEAUX DE CHALEUR

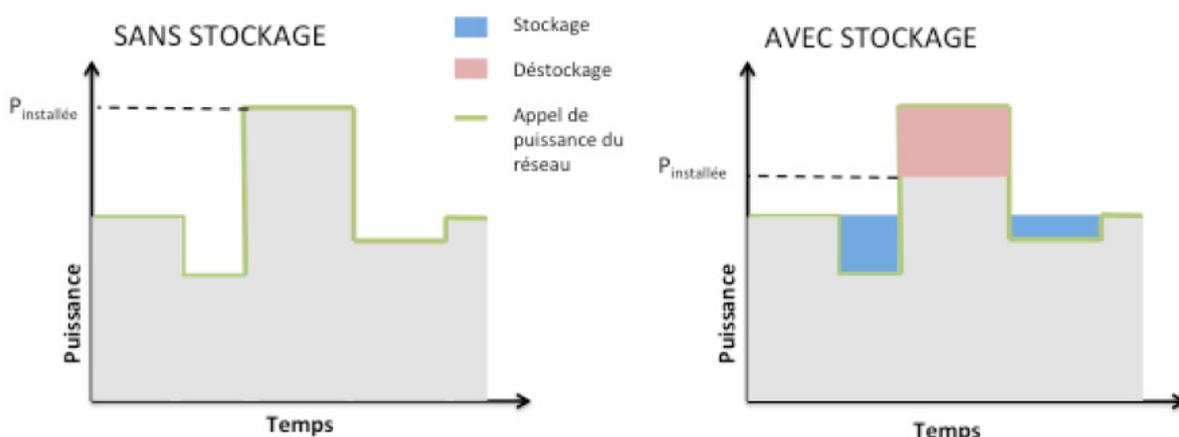
La fluctuation des besoins de chaleur constitue l'une des contraintes que doivent prendre en compte les réseaux de chaleur. Le rôle du gestionnaire du réseau est de garantir en permanence l'adéquation offre/demande. Pour cela, il doit augmenter ou diminuer la fourniture de chaleur en quasi temps réel, ce qui n'est pas sans conséquences sur la maintenance des équipements.

L'installation d'un système de stockage permet de bénéficier d'une meilleure flexibilité en proposant une chaleur presque instantanément disponible. Cela présente également un intérêt économique par la réduction des coûts d'investissement et de fonctionnement.

En effet, une fois l'investissement initial réalisé, le système de stockage est très peu coûteux en charge de fonctionnement, permet de stocker de l'énergie fatale et de diminuer la puissance totale à installer et donc, le coût d'investissement initial. Enfin, d'un point de vue environnemental, ce type de système vise à optimiser les moyens de production en supprimant le recours à une seconde chaudière en période de pointe de la demande, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'énergie primaire (pour alimenter la chaufferie) et donc les émissions de gaz à effet de serre associées.

Le stockage thermique offre plusieurs avantages¹ :

L'arbitrage énergétique : le stockage rend possible le choix de la source énergétique à utiliser parmi plusieurs disponibles en alternative à celle stockée, en fonction de leur prix par exemple. Il permet d'augmenter le taux d'utilisation d'une ressource ou d'optimiser le rapport des prix de vente et de production.



Représentation schématique de l'influence d'un stockage sur la puissance installée sur le réseau

Source : AMORCE série technique RCT 45 (Juin 2016)

Selon une étude réalisée en 2016 pour l'ADEME et l'Association Thermique Energie Environnement, le stockage est une solution économiquement intéressante par rapport à un renforcement du réseau tant que la demande supplémentaire n'excède pas 8% de la chaleur fournie. Autre avantage mis en avant par cette étude : il permet de respecter la contrainte des 60% EnR&R sans investissement supplémentaire en chaudière biomasse ni utilisation lors des périodes de faible demande.

¹ Thèse de Matthieu Martinelli pages 11-14

La valorisation d'énergies fatales : ce type d'énergie thermique est, par définition, généré par un procédé dont le but n'est pas la production de chaleur. Par conséquent, la production de cette chaleur est rarement en phase avec la demande d'énergie. Le stockage permet, là encore, de pallier le décalage entre la disponibilité et la demande en énergie.

L'optimisation des moyens de production : par le stockage des surplus de production et le déstockage lors des pointes de consommation, il est possible de mobiliser les moyens de production à leur niveau de fonctionnement nominal où le rendement est optimisé. Ainsi, la durée de vie des équipements est prolongée par un fonctionnement rendu stable et régulier.

L'intégration d'énergies renouvelables intermittentes : le stockage permet de pallier le problème de décalage entre la disponibilité et la demande en énergie, ce qui est généralement le cas pour le solaire thermique par exemple (production durant la journée pour des besoins le matin ou le soir).

La dispense d'investissement dans une seconde chaudière : la gestion des pointes de consommation implique généralement d'avoir recours à une seconde chaudière pour assurer la production d'énergie. Le système de stockage peut se substituer à celle-ci sans surcoût d'investissement.

Le couplage à une centrale de cogénération : en exploitation, le gestionnaire donne la priorité à la production de chaleur même si le marché de l'électricité est économiquement plus favorable que la vente de chaleur. Le stockage permet alors d'avoir le choix de produire de la chaleur ou de l'électricité afin d'optimiser économiquement le fonctionnement de ce type de centrale. En effet, il va pouvoir emmagasiner l'énergie lorsque le prix du marché de l'électricité est bas (la cogénération produit alors de la chaleur) et restituer la chaleur au réseau lorsque le marché de l'électricité est le plus intéressant (la cogénération produit alors de l'électricité).

TROIS FONCTIONNEMENTS TEMPORELS, DEUX LOCALISATIONS POSSIBLES

Selon les besoins des bâtiments raccordés au réseau de chaleur, le système de stockage peut être mobilisé à différentes échelles de temps :

journalière : stockage de l'énergie sur une échelle de quelques heures. Ce système est généralement employé pour stocker de la chaleur la nuit et la restituer en journée pour passer les pics de consommation du matin et du soir ;

hebdomadaire : stockage de l'énergie à l'échelle de quelques jours. Ce système est généralement employé pour stocker de la chaleur le week-end afin de passer le pic de consommation du lundi matin ;

inter-saisonnière : stockage de l'énergie à l'échelle de quelques mois. Ce système est généralement employé pour stocker de la chaleur l'été afin de la restituer en début de saison de chauffe.

Le système de stockage peut être :

centralisé : le système de stockage est installé près des centrales de production, sur le réseau primaire de production de la chaleur et de froid. L'avantage principal de ce système est de pouvoir installer plus facilement une importante capacité de stockage grâce au foncier généralement disponible sur le site de la chaufferie principale ;

décentralisé : le système de stockage est installé au plus près des consommateurs, généralement au niveau de la sous-station ou sur le réseau secondaire. L'avantage principal de ce système est la réactivité de la livraison de chaleur due à la proximité du stockage par rapport à la chaufferie centrale ;

La combinaison de ces deux systèmes sur le même réseau est bien évidemment possible, combinant alors leurs avantages.

PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS DE STOCKAGE DISPONIBLES

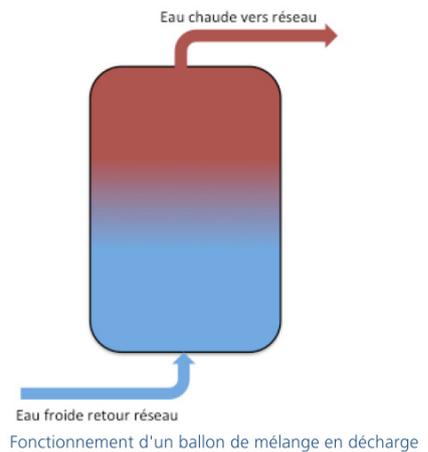
A l'exception du stockage par changement de phase et du stockage thermochimique qui n'ont pas encore vu de réalisation à l'échelle d'un réseau de chaleur, toutes les autres technologies ont fait l'objet d'application concrète.

La cuve de stockage thermocline

Principe : Les cuves thermoclines permettent de stocker la chaleur du réseau dans un réservoir isolé thermiquement, aérien ou enterré, pressurisé ou à pression atmosphérique. Le fonctionnement de ces installations est basé sur la stratification entre la couche d'eau chaude et la couche d'eau froide, appelée thermocline, dans laquelle un gradient de température est présent. Ainsi l'eau chaude, plus légère, est soutirée ou injectée par le haut et l'eau froide par le bas, en fonction des cycles de charges/décharges. Ce système est plutôt dédié au stockage journalier et hebdomadaire.

Avantages : conception simple, possibilité de décharge rapide, faible maintenance, stockage supérieur à 100°C pour les cuves pressurisées, intégration foncière et paysagère aisée.

Inconvénients : régime réglementaire ICPE² des équipements sous pression pour les cuves pressurisées, risque de température de décharge non constante et de perturbation de la stratification naturelle de l'eau dans le réservoir au moment de l'utilisation.



Le Miroir des énergies situé à Brest est un exemple de stockage en cuve. Sa capacité est de 2500MWh/an, soit l'équivalent de la consommation d'environ 400 logements. Il permettra une réduction des émissions de CO² de 12 700 tonnes sur 20 ans.

Source : Dalkia



² ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

Cuves de stockage thermique de la Villeneuve (Compagnie de Chauffage de Grenoble)



Stockage en sous-station dans le quartier de La Villeneuve à Grenoble

La Compagnie de Chauffage de Grenoble s'est dotée des six premières cuves de stockage thermique en eau surchauffée de France. Ces équipements, basés sur la technologie de stockage par chaleur sensible, permettent de déphaser la production de chaleur de la demande du réseau de Grenoble et donc d'améliorer son taux d'énergie renouvelable.

Installées stratégiquement en deux endroits du réseau (les sites de Biomax et de La Villeneuve), ces cuves, d'un volume total d'environ 1200 m³, ont une capacité de stockage de 90 MWh et une puissance nominale de 30 MW. Elles permettent de déphaser 11 GWh annuels de chaleur, assurant ainsi une rehausse du taux d'énergie renouvelable de près de 2%.

Le stockage dans le sol

Principe : le sol peut être utilisé en tant que matériau de stockage à part entière. Les sols très rocheux ou les sols saturés en eau sans écoulement sont généralement les plus appropriés. Le système fonctionne par stockage ou déstockage de la chaleur dans le sol par l'intermédiaire de sondes géothermiques (30 à 100 m de profondeur). Ce système est plutôt dédié au stockage inter-saisonnier.

Avantages : stockage possible du froid, faible coût du système, volumes mobilisables importants, modularité (ajout ou suppression de sondes), emprise au sol très faible.

Inconvénients : forte inertie, densité énergétique faible, nécessité de conditions géologiques spécifiques, pertes thermiques importantes, température restituée inférieure à la température de charge.

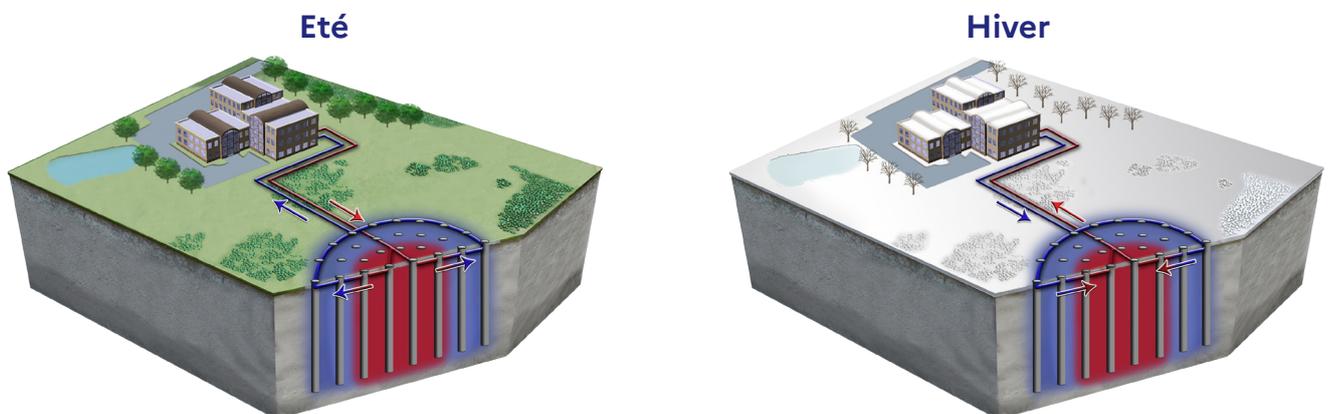
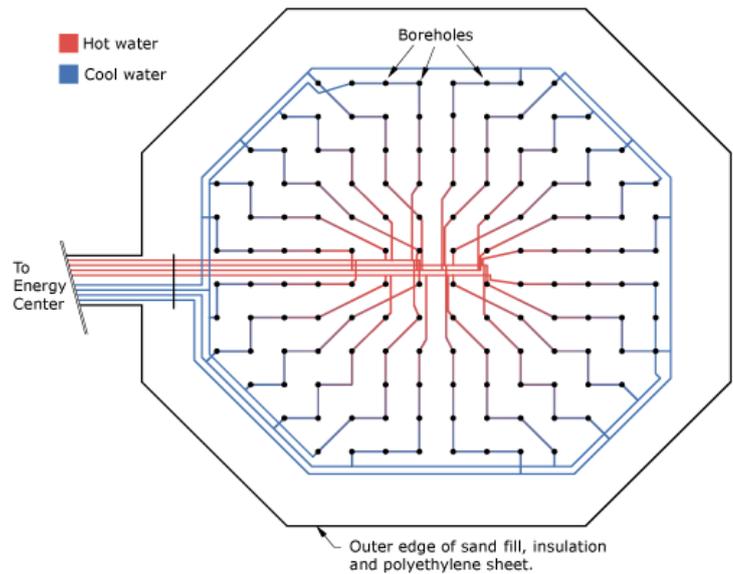


Schéma illustratif d'un stockage au sol

source : <https://underground-energy.com/our-technology/btes/>

La Drake Landing Solar Community dans l'Alberta a mis en place un système de stockage d'énergie dans le sol. Celui-ci alimente en hiver plus de 50 maisons grâce à la chaleur solaire stockée en été dans un ensemble de puits allant jusqu'à 35m de profondeur.

<https://www.dlsc.ca/borehole.htm>



Le stockage en aquifère

Principe : Les aquifères sont des formations géologiques contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau dans le sous-sol. Le stockage repose sur l'utilisation de deux puits ou plus, à partir desquels l'eau est soit injectée, soit reprise. Lors du stockage, l'eau froide est soutirée aux puits froids, chauffée par les systèmes de production du réseau de chaleur, puis injectée dans les puits chauds, et vice-versa pour la décharge. Ce système est plutôt dédié au stockage inter-saisonnier.

Avantages : faible coût, important volumes mobilisables, emprise au sol très faible

Inconvénients: vigilance quant aux risques de modification de la géologie de l'aquifère et de la composition de l'eau (dégradation du système de stockage), température limitée, faible densité énergétique, efficacité faible.



Schéma illustratif d'un stockage en aquifère « Aéroport de Stockholm-Arlanda

source : <https://underground-energy.com/our-technology/ates/>

La ville de Neubrandenburger en Allemagne a mis en service en 2004 un système de stockage sur un aquifère situé autour de 1 200 m de profondeur. L'installation dispose d'une puissance de 4 MW à une température située entre 60 et 80°C, couplée à une centrale à gaz et à vapeur.



Le stockage en fosse ou en mine.

Principe : Ce stockage thermique consiste à accumuler la chaleur au sein d'une fosse contenant de l'eau ou une matière minérale (sable ou graviers) associée à un fluide caloporteur. La fosse est à même le sol, après couverture de celui-ci par un isolant thermique et une membrane imperméable. Un couvercle isolant est ensuite posé afin de limiter les pertes thermiques. Ce système est plutôt dédié au stockage inter-saisonnier.

Avantages : moins coûteux qu'en réservoir, facilité de maintenance, couvercle isolant peu coûteux si stockage minéral, efficacité élevée pour un stockage intersaisonnier.

Inconvénients : forte inertie si stockage minéral, empreinte au sol élevée.

La ville de Vojens au Danemark a mis en service en 2014 un système de stockage en fosse d'une capacité de 200 000m³ d'eau portée à environ 80°C pour alimenter 2000 logements via un réseau de chaleur. La chaleur est produite par une installation solaire thermique de 70 000m².



Source : <https://ramboll.com/services-and-sectors/energy/district-energy>

Le stockage en mine de Mijnwater à Heerlen (Pays_Bas) : <https://mijnwater.com/?lang=en>.

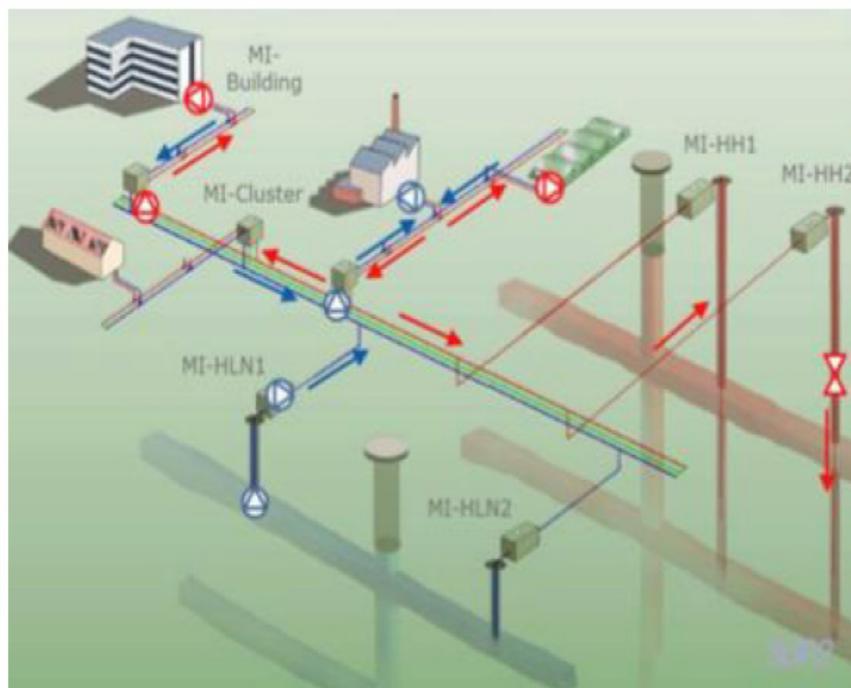


Figure 1 Simple graph to indicate the three levels of energy exchange, and three levels of control, where they connect: the energy station at the buildings (MI-Building), the Cluster Installation (MI-Cluster), and the wells that connect the backbone directly to the mine (MI-Wells).

Légende : Schéma simplifié qui montre les trois niveaux d'échange d'énergie, et trois niveaux de contrôle : la sous-station au niveau des immeubles (MI-Building), le réseau (MI-cluster) et les puits qui connectent le réseau primaire directement à la mine (MI-Wells)

Source : Mijnwater Heerlen : Roadmap to 2040

Le Cerema a contribué, dans le cadre du projet européen HeatNetNWE à la création d'un modèle de réseau de chaleur transférable pour le développement de projets de chaleur bas carbone. Ce projet propose une feuille de route pour la transition vers la 4ème génération de réseaux de chaleur avec les nouvelles dispositions techniques, institutionnelles et organisationnelles à prévoir. L'ensemble des données est disponible en accès libre sur <https://guidetodistrictheating.eu>

Le stockage en réservoir (ou cuve de grande dimension)

Principe : intermédiaire entre le stockage en fosse et en cuve thermocline, cette solution permet de stocker la chaleur en injectant de l'eau chaude dans un grand volume isolé, disposé en aérien ou enterré. Ce système est plutôt dédié au stockage à long-terme, hebdomadaire, voire inter-saisonnier.

Avantages : efficacité, pertes thermiques minimales, bonne densité énergétique

Inconvénients : coût élevé d'installation, risque technologique éventuel lié à la pression du réservoir

Veolia a réalisé un réservoir de stockage à Borås en Suède d'une capacité de 37 000m³ en 2010, dénommé «Le Thermos». Ce réservoir est alimenté en chaleur par l'incinérateur de la ville ainsi que par une chaudière biomasse. Ce stockage permet de limiter le recours aux énergies fossiles et ainsi d'économiser près de 7700t de CO₂ par an.



AUTRES SYSTÈMES DE STOCKAGE EN COURS D'ÉTUDE

Le stockage par changement de phase

C'est l'objet de la thèse de Matthieu Martinelli citée ici.

Principe : Ce type de stockage fonctionne en apportant de l'énergie à un matériau, ce qui va le faire changer de phase. C'est en faisant circuler de l'eau froide que la réaction inverse est provoquée pour récupérer l'énergie emmagasinée par le matériau. Il existe deux types de systèmes à changement de phase (MCP) utilisables dans les réseaux de chaleur : solide/solide, solide/liquide.

Tout le procédé reposant sur les caractéristiques du matériau à changement de phase, le choix de la solution à installer dépend du fonctionnement souhaité sur le réseau de chaleur. Cela est vrai pour tout type de stockage mais encore davantage pour les MCP. Par exemple, en fonction du régime de température, certains matériaux

ne pourront changer de phase car la température appliquée serait trop faible. En revanche, plusieurs matériaux organiques ou des sels hydratés, étudiés pour cette faculté, ont des températures de fusion situées entre 40° et 90°C.

De plus, la mise en œuvre à l'échelle industrielle de ce type de stockage est encore limité par une faible conductivité thermique des MCP. Toutefois, cet inconvénient peut être compensé par des structures d'échange adéquates (ailettes, mousses métalliques...): c'est en particulier le sujet de la thèse de Matthieu Martinelli. Et dans le cas du stockage Flaubert (voir plus loin la présentation de l'installation à Grenoble), la mise en œuvre de tubes ailettés a permis d'atteindre des temps de fusion/solidification de l'intégralité du module en deux à trois heures (puissances mesurées jusqu'à 80kW) le rendant parfaitement compatible avec une utilisation journalière. Il est d'ailleurs effectivement utilisé pour passer des pics de consommation du matin.

En 2021, le stockage par changement de phase reste une solution encore au stade du démonstrateur, comme à Grenoble ou dans le quartier Meridia à Nice.

Avantages : densité énergétique jusqu'à trois fois meilleure que les solutions précédentes, encombrement très réduit.

Inconvénients : coût encore élevé avec un vrai enjeu de réduction des coûts par l'industrialisation.

Stockage en sous-station dans l'éco-quartier Flaubert à Grenoble

La Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise a installé au niveau d'une sous-station de son réseau (le deuxième plus grand de France avec 100 000 équivalents-logements raccordés) un démonstrateur de stockage de la chaleur par changement de phase. Couplé à 200m² de panneaux solaires thermiques innovants, d'une capacité de 180 kWh, opérationnel depuis mars 2019, il assure une puissance de 40kW durant trois heures en période de pointe.

Le matériau choisi pour stocker la chaleur est un mélange d'alcool gras additionné d'un faible pourcentage de paraffine.

Les deux principaux objectifs de cette installation sont :

- Stocker le surplus d'énergie solaire produite localement durant les heures de

Réservoir de stockage MCP



Source : publication scientifique 2021

haute production en été, en milieu de journée. L'énergie stockée sera ensuite libérée pendant les heures de pointe de consommation, le lendemain matin.

- Atténuer les pics de charges du réseau durant les matins d'hiver. L'énergie renouvelable provenant de sources telles que la biomasse ou l'incinération d'ordures ménagères sera stockée pendant les heures de faibles demande, la nuit, pour être utilisée le lendemain matin, limitant ainsi la consommation de combustibles fossiles.

Cette installation fait désormais l'objet d'une observation sur des cycles annuels, pour une durée de vie estimée à dix ans.

Le stockage thermochimique

Principe : Le stockage thermochimique permet de stocker la chaleur par l'intermédiaire de réactions chimiques. Ces phénomènes sont accompagnés de restitution ou de consommation de chaleur, ce qui en fait une solution de stockage thermique très intéressante. Ce système pourrait être plutôt dédié au stockage hebdomadaire, voire inter-saisonnier.

Avantages : densité énergétique jusqu'à 10 fois meilleure que les solutions précédentes, pas de pertes thermiques lors du stockage, possibilité de transporter ainsi facilement la chaleur

Inconvénients : solution non mature

Le stockage de froid

Principe : Le stockage de froid permet d'emmagasiner dans un caloporteur qui sera sollicité en période de demande de rafraîchissement en substitution à des appareils plus consommateurs d'électricité, comme les Thermofrigopompes (TFP). Dans les installations existantes, l'eau glacée assure ce service.

Avantages: fluide de stockage très peu cher, chimiquement neutre

Inconvénients : demande de gros réservoirs pour des réseaux importants

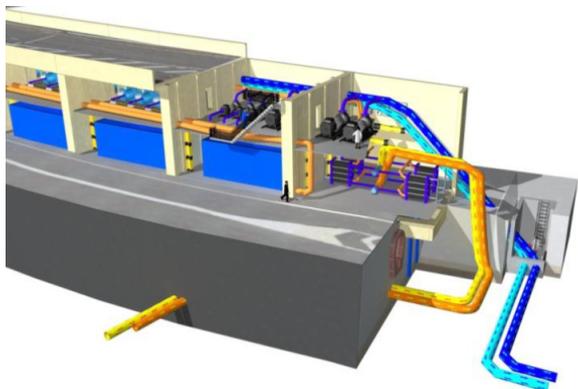
La ZAC de Seguin Rives de Seine a mis en place un système de stockage d'eau glacée dans la culée du pont de Sèvres en 2008. Cela permet au réseau de froid qui dessert 5000 logements et 500 000 m² de bâtiments tertiaires et équipements d'avoir une capacité supplémentaire de 32 MWh pour assurer les besoins de froid des abonnés.



Source : <https://reseau-seguin.idex.fr/web/p/comment-ca-marche>

Cette technologie illustrée par des bacs bleus sur la photo ci-dessous a permis de dimensionner les installations pour répondre aux besoins de pointes d'une journée, lisser les consommations d'énergie électrique (liées à la production de froid) et profiter des heures de faible consommation nationale (la nuit) pour produire le froid qui sera utilisé pendant les heures de forte demande. Enfin, comme pour le stockage de chaleur, cela permet aux installations de fonctionner au plus proche de leur rendement optimum.

Détails :



En synthèse : (LT = long terme, CT = court terme)

Type		Durée (LT/CT/mixte ¹)	Temp. de stockage	Volume	Densité (kWh/m ³)	Coût ²	Maturité
Cuve de stockage sensible	Eau (P _{atm})	CT	<100°C	•	35	€€€	Indus.
	Eau sous pression	CT	>100°C	•	Jusqu'à 40	€€€	Indus.
Sol	Sol/roche	LT	<90°C	••••	5-15	€	Indus.
Aquifère	Eau/sable	LT	≈ 5 à 50°C	••••	15-20	€	Indus.
Fosse	Eau (P _{atm})	LT	<90°C	•••	Proche de 35	€€	Indus.
	Eau/gravier ou Eau/sable	LT	<90°C	•••	15-25	€€	Indus.
Grand Réservoir	Eau (P _{atm} ou sous pression)	LT- Mixte	>100°C	••	35-40	€€€€	Indus.
MCP	Classique	CT- Mixte	-	-	80 - 100	-	R&D
	Surfondu	LT	-	-	≈100	-	Faible
	Solide/solide	LT	-	-	≈100	-	Très faible
Thermochimique	-	LT	-	-	300 - 500	-	Très faible

COMPARAISON ET CONCLUSION

En première approche, l'ordre de grandeur de la densité énergétique des systèmes thermochimiques est cinq fois plus important que les systèmes par changement de phase, qui ont eux-mêmes une densité de stockage de deux à trois fois plus élevée que les systèmes sensibles. A ce jour, il semble qu'aucune réalisation à l'échelle d'un réseau de chaleur n'ait mis en œuvre ces deux technologies prometteuses.

Malgré ses défauts, le stockage sensible reste le seul utilisé. Il a fait ses preuves dans l'optimisation du fonctionnement d'un réseau de chaleur. Toutefois, l'Étude de valorisation du stockage thermique et du power-to-heat réalisée en 2016 par ADEME, Atee, Artelys, Enea et le BRGM a conclu qu'au-delà d'une demande supplémentaire de 8% par rapport à un régime nominal, le coût d'un stockage dépasse celui d'un renforcement du réseau.

BIBLIOGRAPHIE



Avec le soutien technique et financier de



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

PUBLICATION

LE STOCKAGE THERMIQUE DANS LES RÉSEAUX DE CHALEUR

Série Technique
RCT 45
Juin 2016

Réseaux de chaleur



AMORCE – 18, rue Gabriel Péri – CS 20102 – 69623 Villeurbanne Cedex
Tel : 04.72.74.09.77 – Fax : 04.72.74.03.32 – Mail : amorce@amorce.asso.fr
www.amorce.asso.fr - @AMORCE



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie



ASSOCIATION TECHNIQUE ÉNERGIE ENVIRONNEMENT

Étude de valorisation du stockage thermique et du power-to-heat

Rapport d'étude



OPTIMIZATION SOLUTIONS



energy committed



Géosciences pour une Terre durable

14/11/2016 1/230



Mijnwater Heerlen: Roadmap to 2040

District heating and cooling grid Parkstad Limburg



Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur

Matthieu Martinelli

► To cite this version:

Matthieu Martinelli. Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. <NNT : 2016GREA1084>. <tel-01412771v3>

HAL Id: tel-01412771

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01412771v3>

Submitted on 22 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cette fiche a été réalisée avec l'aimable collaboration de Fabrice Bentivoglio du CEA LITEN de Grenoble et Romain Bernet de la CCIAG.

Document consultable et téléchargeable sur le site :

<http://reseaux-chaleur.cerema.fr/>

Affaire suivie par

Serge PUJOL - Département Transitions territoriales – Groupe Énergie territoire et bâtiment

Courriel : serge.pujol@cerema.fr



Cerema Ouest

MAN – 9 rue René Viviani – BP 46223 NANTES Cedex 02

Tel : 02 40 12 83 01 – mel : DTerOuest@cerema.fr

www.cerema.fr