



Avec le soutien technique  
et financier de



PUBLICATION

# LE STOCKAGE THERMIQUE DANS LES RÉSEAUX DE CHALEUR

Série  
Technique

RCT 45

Juin 2016



Réseaux  
de chaleur

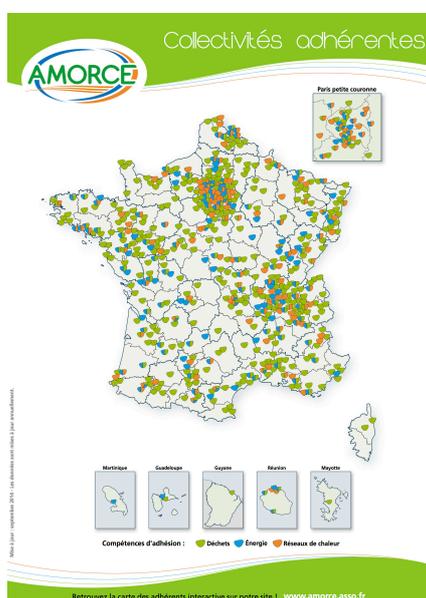
AMORCE – 18, rue Gabriel Péri – CS 20102 – 69623 Villeurbanne Cedex  
Tel : 04.72.74.09.77 – Fax : 04.72.74.03.32 – Mail : amorce@amorce.asso.fr

[www.amorce.asso.fr](http://www.amorce.asso.fr) - @AMORCE

## PRÉSENTATION D'AMORCE

Créée en 1987, AMORCE est l'association nationale des collectivités territoriales et des professionnels pour une gestion locale des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur. Au 14 juin 2016, l'association regroupe **842 adhérents** dont plus de 550 collectivités rassemblant plus de 60 millions d'habitants, ainsi que près de 270 entreprises, fédérations professionnelles et associations.

Première association spécialisée de collectivités territoriales, toutes thématiques confondues, AMORCE est à l'origine de plusieurs mesures importantes qui ont permis d'accompagner les collectivités territoriales dans la mise en œuvre des politiques publiques environnementales sur leurs territoires. Tel fut le cas notamment du Fonds chaleur, de la TVA à taux réduit sur la chaleur renouvelable, de l'éligibilité des collectivités aux CEE (Certificat d'économie d'énergie) ou encore de l'obligation de rénovation de logements sociaux énergivores au moment de la vente.



AMORCE intervient dans **3 domaines d'actions : les déchets, l'énergie et les réseaux de chaleur** en accompagnant les collectivités territoriales dans les composantes des politiques publiques environnementales qu'elles veulent mettre en œuvre. AMORCE dispose d'une solide expertise sur :

- la technique
- l'impact sur l'environnement
- la réglementation
- l'économie (coûts, financements, fiscalité)
- les modes de gestion, les marchés
- l'organisation entre les structures et les différents niveaux de collectivités
- les politiques au niveau européen, national, territorial
- l'information, la concertation, le débat public

AMORCE constitue un lieu unique de partage des connaissances et des expériences entre collectivités territoriales et professionnels sur ces compétences. Ce réseau d'élus et de techniciens permet à chacun de disposer des informations les plus récentes et les plus pertinentes.

L'association représente également ses adhérents auprès des institutions françaises et européennes, afin de défendre leurs intérêts et leurs propositions. Nos équipes travaillent au sein des commissions à l'élaboration des réglementations environnementales de demain. Nos propositions sont très souvent reprises par les parlementaires.



## PRÉSENTATION DE L'ADEME

---



**L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)** participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil.

Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans ses domaines d'activité.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

**Contact pour ce guide** : David CANAL

### **ADEME**

20, rue du Grésillé  
BP 90406 - 49004 Angers Cedex 01  
Tel : 02 41 20 41 20  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

AMORCE / ADEME – Juin 2016

Guide réalisé en partenariat et avec le soutien technique et financier de l'ADEME

## REMERCIEMENTS

---

Nous remercions l'ensemble des collectivités et des professionnels ayant participé à notre travail, dont celles qui nous ont fait part de leurs retours d'expérience ou qui nous ont fourni des documents pour illustrer cette publication.

## RÉDACTEURS

---

**Maxime ANCHISI**, [manchisi@amorce.asso.fr](mailto:manchisi@amorce.asso.fr)

**Comité de relecture** : David LEICHER, AMORCE ; David CANAL, ADEME ; Fabrice BENTIVOGLIO, CEA ; Fabien CHALLEAT, MÉTROPOLE DE LYON ; Aude ROSENER, AGENCE LOCALE DE L'ÉNERGIE ET DU CLIMAT de la Métropole bordelaise et de la Gironde

## PRÉAMBULE

---

Cette note a été rédigée en s'appuyant sur le groupe de travail « Le stockage sur les réseaux de chaleur » réalisé par AMORCE en partenariat avec l'ADEME et le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA).

Le compte rendu de cette réunion est disponible sur le site internet d'AMORCE via le lien suivant:

[http://www.amorce.asso.fr/media/filer\\_public/59/5f/595f4ea2-812a-4f2b-ba92-ab621b9cd09a/compilation\\_interv\\_ge\\_dvlpmt\\_rc\\_160310\\_cea.pdf](http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/59/5f/595f4ea2-812a-4f2b-ba92-ab621b9cd09a/compilation_interv_ge_dvlpmt_rc_160310_cea.pdf)

Intervenants lors du groupe de travail : **LITEN (CEA)**, **ADEME**, **CCIAG** (Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise), **BREST LIFE**, **Eco Chaleur de Brest (Filiale Dalkia)**, **Politecnico di Torino**, **IREN**, **Solites**, **PlanEnergi**.

## SOMMAIRE

---

<b>PRÉSENTATION D'AMORCE</b> .....	<b>1</b>
<b>PRÉSENTATION DE L'ADEME</b> .....	<b>2</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>3</b>
<b>RÉDACTEURS</b> .....	<b>3</b>
<b>PRÉAMBULE</b> .....	<b>3</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCTION AU STOCKAGE DANS LES RESEAUX DE CHALEUR</b> .....	<b>6</b>
1.1. Qu'est-ce que le stockage thermique ?.....	6
1.2. Intérêt général d'un stockage thermique sur réseau de chaleur .....	7
1.3. Enjeux : pourquoi stocker la chaleur de son réseau ?.....	8
1.4. Paramètres clés d'un projet de stockage .....	10
<b>2. TECHNOLOGIES DÉPLOYÉES</b> .....	<b>12</b>
2.1. Stockage sensible à court terme : la cuve thermocline.....	13
2.2. Stockage sensible inter-saisonnier .....	15
2.2.1. Dans le sol : sondes géothermiques.....	15
2.2.2. En aquifère .....	16
2.2.3. En fosse .....	17
2.2.4. En réservoirs / cuves de grandes dimensions.....	19
2.3. Solution de stockage en phase de R&D .....	20
2.3.1. Stockage en cuve par stratification à températures variables .....	20
2.3.2. Stockage de la chaleur latente : les matériaux à changement de phase .....	20
2.3.3. Stockage de la chaleur thermochimique.....	21
<b>3. QUELS GAINS GRÂCE A UN DISPOSITIF DE STOCKAGE ?</b> .....	<b>22</b>
3.1. Lisser les pics de production, de transport et de consommation.....	22
3.2. Intégration d'EnR&R sur le réseau.....	25
<b>4. CADRE RÉGLEMENTAIRE</b> .....	<b>27</b>
<b>5. MONTANT D'INVESTISSEMENT ET AIDES POUR UN DISPOSITIF DE STOCKAGE</b> .....	<b>29</b>
5.1. Quel montant d'investissement pour un projet de stockage ?.....	29
5.2. Quelles aides pour un dispositif de stockage ?.....	31
<b>6. RETOURS D'EXPÉRIENCES</b> .....	<b>33</b>
6.1. Quel développement en Europe?.....	33
6.2. Quel développement en France ?.....	35
<b>SYNTHÈSE</b> .....	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>37</b>

## INTRODUCTION

---

La France s'est fixé comme objectif une part de 32% d'énergie renouvelable (EnR) dans le mix de consommation finale brute en 2030, qui se décline pour le cas particulier de la production de chaleur et de froid par un objectif de 38% d'EnR&R. Pour atteindre cet objectif, le développement des réseaux de chaleur et de froid constitue un levier pour permettre une intégration plus économique et écologique des EnR&R. Ainsi, la récente loi de Transition Énergétique ambitionne de multiplier par cinq la quantité d'EnR&R distribuée par ceux-ci entre 2012 et 2030.

Cela engendrerait la distribution 3,4 Mtep d'EnR&R par les réseaux de chaleur et de froid d'ici 2030, contre 0,7 en 2012. Cet objectif ambitieux nécessiterait la multiplication par plus de 3 du rythme de développement actuel des réseaux de chaleur et conduirait au raccordement de 4 à 6 millions d'équivalent logements supplémentaires, tout en faisant passer le taux moyen d'EnR&R des réseaux de 38% en 2012 à 60% en 2030.

Pour satisfaire ces objectifs, les réseaux de chaleur pourront s'appuyer sur de nouveaux développements technologiques dans les années à venir, afin d'accompagner un déploiement massif des réseaux de chaleur, et une intégration conséquente d'EnR&R sur ces réseaux qui soit économiquement, énergétiquement et environnementalement viable. Ces développements concerneront les réseaux de chaleur eux-mêmes, mais également leurs moyens de production d'énergie, ainsi que leur gestion et leur pilotage. Ainsi, une transition vers des réseaux de chaleur plus intelligents et plus connectés (smart grid thermique) sera mieux à même d'intégrer de manière optimisée une part massive d'énergies renouvelables.

Une composante essentielle des smart grids en général réside en la capacité de stocker de l'énergie pour accommoder le décalage temporel entre une production d'EnR&R souvent intermittente et une demande fluctuante selon les heures de la journée et les saisons. Ainsi, la brique technologique « stockage de chaleur », objet de ce rapport, pourrait constituer un outil essentiel dans le développement à venir des réseaux de chaleur.

# 1. INTRODUCTION AU STOCKAGE DANS LES RESEAUX DE CHALEUR

## 1.1. Qu'est-ce que le stockage thermique ?

Fondamentalement, un stockage thermique est un composant qui permet d'accumuler de la chaleur en surplus et de la restituer lors d'un besoin par les consommateurs.

Physiquement, ce stockage peut être réalisé par élévation de température d'un matériau (stockage dit « sensible »), par changement d'état d'un matériau (stockage dit « latent ») ou par réaction chimique entre plusieurs composés (stockage dit « thermo-chimique »).

Concrètement, ce composant peut prendre plusieurs formes discutées plus loin dans ce document : une cuve, une fosse, le sol, une nappe aquifère, le réseau lui-même, les bâtiments desservis par le réseau...

De manière générale, un stockage de chaleur fonctionne de la façon suivante :

- Si la consommation de chaleur sur le réseau est inférieure à la production, une partie de l'énergie produite est alors stockée (Figure 1)

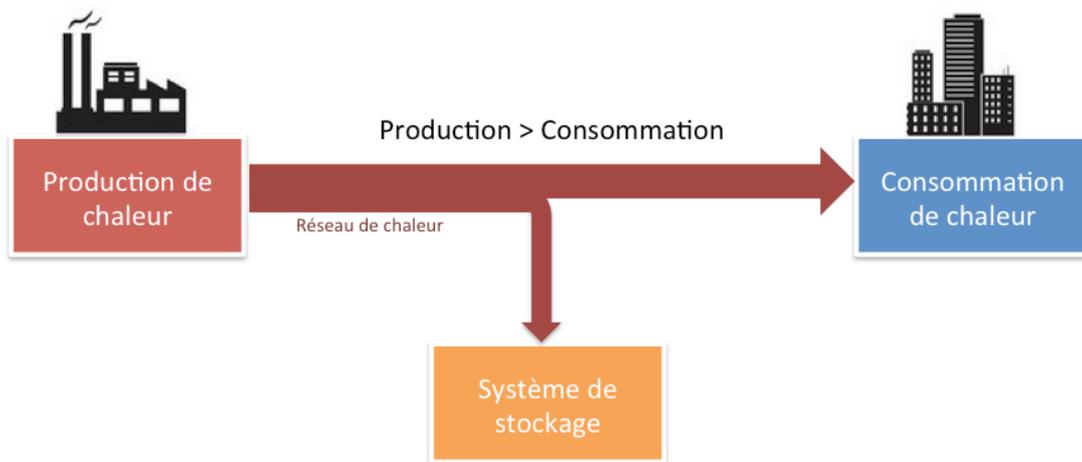


Figure 1: schéma d'un réseau en excès de production de chaleur

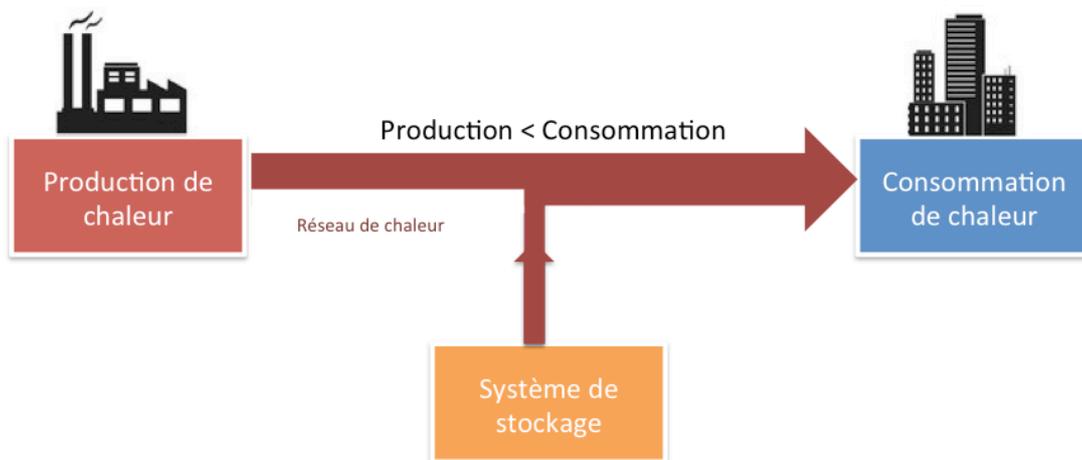


Figure 2: Schéma d'un réseau en excès de consommation de chaleur

- Si la consommation de chaleur est supérieure à la production, une partie de l'énergie stockée lors de la phase précédente peut être restituée au réseau (Figure 2)
- Entre une phase de stockage et une phase de déstockage, le stockage est en phase d'attente.

On différencie en général les différents types de stockage selon leur temporalité et selon leur localisation sur le réseau.

Pour la temporalité on différencie en général les stockages :

- Journaliers, qui stockent de l'énergie sur une échelle de quelques heures, généralement la nuit pour passer le pic de consommation du matin et la journée pour passer le pic de consommation du soir.
- Hebdomadaires, qui stockent de l'énergie à l'échelle de quelques jours, généralement le week-end pour passer le pic de consommation du lundi matin.
- Inter-saisonniers, qui stockent de l'énergie à l'échelle de quelques mois, généralement l'été pour alimenter le réseau en début de saison de chauffe.

Pour la localisation sur le réseau, on différencie en général les stockages :

- Centralisés, situés près des centrales de production, sur le réseau primaire.
- Décentralisés, situés au plus près des consommateurs, généralement dans la sous-station du côté réseau primaire ou réseau secondaire.

## 1.2. Intérêt général d'un stockage thermique sur réseau de chaleur

Pour assurer le confort des usagers d'un réseau de chaleur, la production doit être égale à la consommation énergétique des clients, au décalage près du transport calorifique dans les canalisations et d'une éventuelle possibilité de conservation de la chaleur produite dans les tuyaux. À la différence d'un réseau électrique, production et consommation ne sont pas instantanément reliées, mais sont tout de même intimement liées.

Or, la consommation de chaleur sur un réseau de chaleur est fluctuante :

- Pics de consommation quotidiens marqués le matin et le soir, dus notamment à la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS),
- Pics de consommation hebdomadaires en début de semaine, et consommation moindre le week-end
- Consommations pour le chauffage très différentes selon les saisons (forte consommation en hiver, pas de consommation pour le chauffage mais uniquement pour l'eau chaude sanitaire en été)
- Profils de consommation pour le chauffage fortement influencés par les données météorologiques (température, ensoleillement, vent)
- Type de bâtiments desservis pouvant conduire à des profils de consommation plus ou moins marqués.

Par ailleurs, la production de certaines énergies renouvelables peut également s'avérer intermittente.

Aujourd'hui, ces fluctuations de production et de consommation sont majoritairement gérées par une surcapacité de puissance de production via l'installation de générateurs de pointe ; qui ne sont utilisés que pour passer les pointes de consommation, et qui généralement brûlent des combustibles fossiles (fuel, gaz, charbon).

Le stockage de l'énergie dans un réseau de chaleur permet de mieux gérer le déphasage temporel entre production et consommation.

### 1.3. Enjeux : pourquoi stocker la chaleur de son réseau ?

Il existe un certain nombre de situations pour lesquelles un réseau de chaleur, sans stockage, n'atteint pas un optimum économique, environnemental ou énergétique. L'ajout d'une composante d'accumulation de chaleur permet, notamment, d'intégrer ou de modifier des aspects du réseau dans ce but d'optimisation.

Les principaux enjeux d'un dispositif de stockage de la chaleur sont les suivants :

- **Lissage des pointes de production**, et par conséquent diminution des puissances installées (Figure 3).

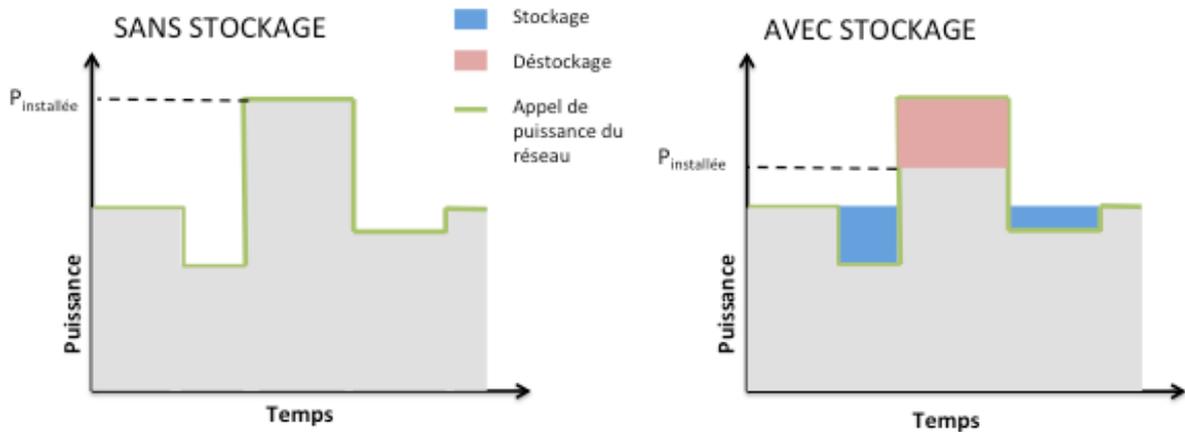


Figure 3: Représentation schématique de l'influence d'un stockage sur la puissance installée sur le réseau

- **Lissage des pointes de transport**, et par conséquent diminution des puissances à transporter sur le réseau.
- **Lissage des pointes de consommation chez les abonnés**, et par conséquent diminution de la puissance souscrite.

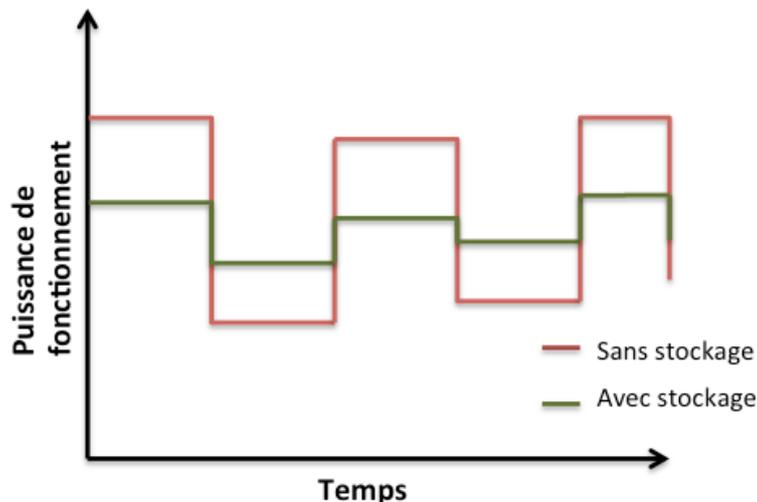


Figure 4 : Schématisation de la puissance de fonctionnement avec et sans stockage

- **Amélioration des rendements des générateurs**, grâce à un fonctionnement à puissance nominale plus régulier dans le temps et une réduction de la fréquence des mises en route et arrêts (Figure 4)
- **Intégration des EnR&R et des procédés intermittents**, par stockage lors des moments de production, non contrôlés, et restitution de l'énergie aux moments opportuns (Figure 5)

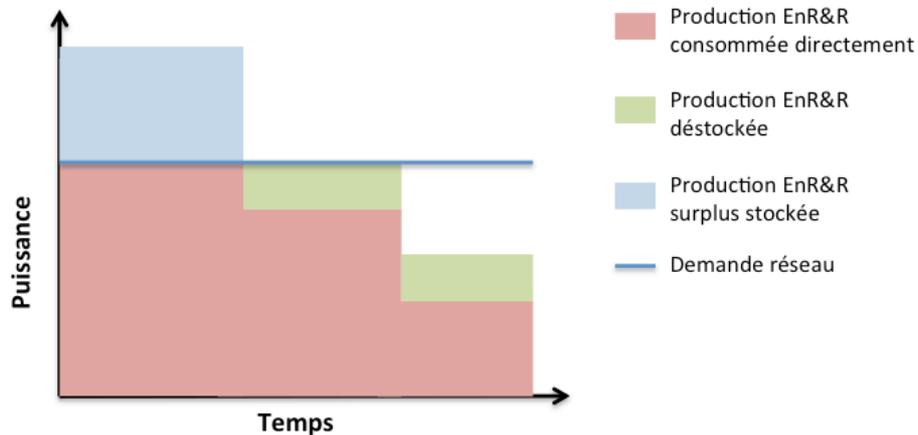


Figure 5: Représentation schématique de l'intégration d'EnR&R avec stockage (rouge+vert) et sans stockage (rouge)

- **Valorisation de la cogénération**, en offrant notamment une flexibilité sur la production de chaleur et une amélioration de la rentabilité économique des installations.
- **Sécurisation de la fourniture d'énergie**, avec un accès immédiat, lorsque le stockage est plein, à une source d'énergie pour le réseau en cas de problème de production (Figure 6).

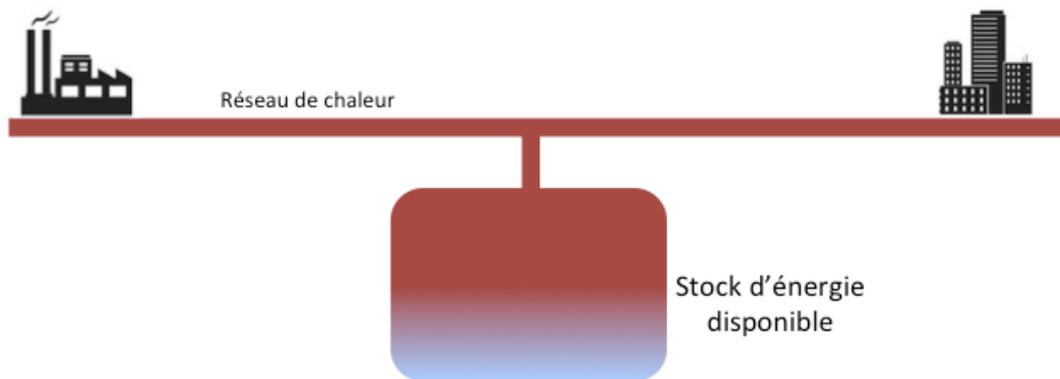


Figure 6: sécurisation de la fourniture d'énergie

- **Valorisation des énergies renouvelables électriques par le principe du Power to Heat (P2H)**, qui consiste à transformer l'électricité excédentaire en chaleur par une pompe à chaleur (PAC), lorsque les prix de marché sont bas (Figure 7). Cette électricité peut-être directement transformée en chaleur dans un stockage (projet SETI lauréat au

Concours Mondial d'Innovation) ou passer au préalable par une pompe à chaleur (projet smartgrid<sup>1</sup>). Le P2H est aujourd'hui au stade de la recherche.

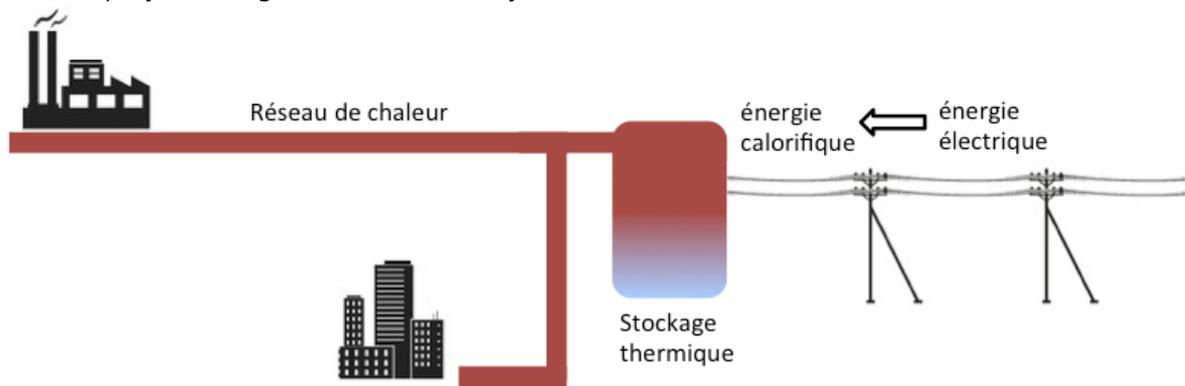


Figure 7: Illustration schématique du principe du Power to Heat

De manière générale, le stockage thermique permet **une optimisation économique et environnementale** du réseau, en introduisant une flexibilité de l'équilibre offre-demande et en tendant vers une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> des installations de production de chaleur.

Ces enjeux seront présentés plus en détail dans la partie 3 de ce rapport.

#### 1.4. Paramètres clés d'un projet de stockage

Chaque réseau de chaleur est unique de part sa taille, sa densité, son mix énergétique de production, la rigueur du climat et le profil de ses consommateurs. Ainsi, la pertinence de l'installation d'un stockage sur un réseau et la définition de ce stockage (taille, temporalité, localisation...) doit faire l'objet d'une étude technique préalable au cas par cas.

Plusieurs paramètres clés doivent être pris en compte lors de l'élaboration d'un projet de stockage (Figure 8). Face au large panel de technologies et d'applications disponibles, il est important d'être en mesure de cerner les besoins propres à son réseau de chaleur, afin de définir une solution de stockage appropriée.

L'analyse des installations de production thermique présentes sur le réseau et des profils de production vont participer à déterminer **quelle temporalité choisir pour le stockage : journalier, hebdomadaire ou inter-saisonnier<sup>2</sup>?**

Par exemple, un réseau possédant une forte production de chaleur fatale tout au long de l'année aura sûrement un intérêt à stocker la chaleur produite en été, puis à la restituer en hiver. D'autre part, un réseau dont les appels de puissance sont irréguliers, ou qui doit faire face à d'importants pics de consommation, trouvera probablement un avantage à stocker de la chaleur en heures creuses, afin de couvrir une partie du besoin en heure de pointe. Cependant, ces conseils restent des généralités de première approche, et seule une véritable analyse technico-économique poussée pourra déterminer une solution viable et durable pour le réseau de chaleur.

Le lieu d'implantation du stockage, en particulier si celui-ci est **centralisé ou décentralisé**, doit ensuite être défini selon le mode de fonctionnement attendu.

<sup>1</sup> Quelques informations à ce sujet sur les sites [www.smartgrids-cre.fr](http://www.smartgrids-cre.fr) et [www.atee.fr](http://www.atee.fr)

<sup>2</sup> L'utilisation d'un dispositif de stockage de grandes dimensions pour un usage temporellement mixte peut également être envisageable.

Se pose également la question de la **quantité d'énergie à stocker (en MWh)**. En fonction de la production de chaleur et des spécificités du réseau, les besoins de stockage énergétiques ne seront pas identiques. Cette quantité énergétique va directement impacter le **volume du stockage**. Les installations existantes couvrent des volumes allant de quelques mètres cube à plusieurs centaines de milliers de mètres cube. Dans certains cas, la quantité d'énergie à stocker pourra soulever la question de l'**emprise au sol**, c'est à dire de la surface au sol disponible pour l'installation, ou encore de l'**encombrement**, du **poids** ou d'éventuelles **limites réglementaires d'énergie stockable** dans un lieu donné.

La **puissance de charge et de décharge** (en kW), est représentative des temps de charge et décharge envisagés.

Enfin, les caractéristiques propres du réseau de chaleur (**fluide caloporteur, température, pression**) sont également des paramètres discriminants pour le choix de la technologie de stockage.

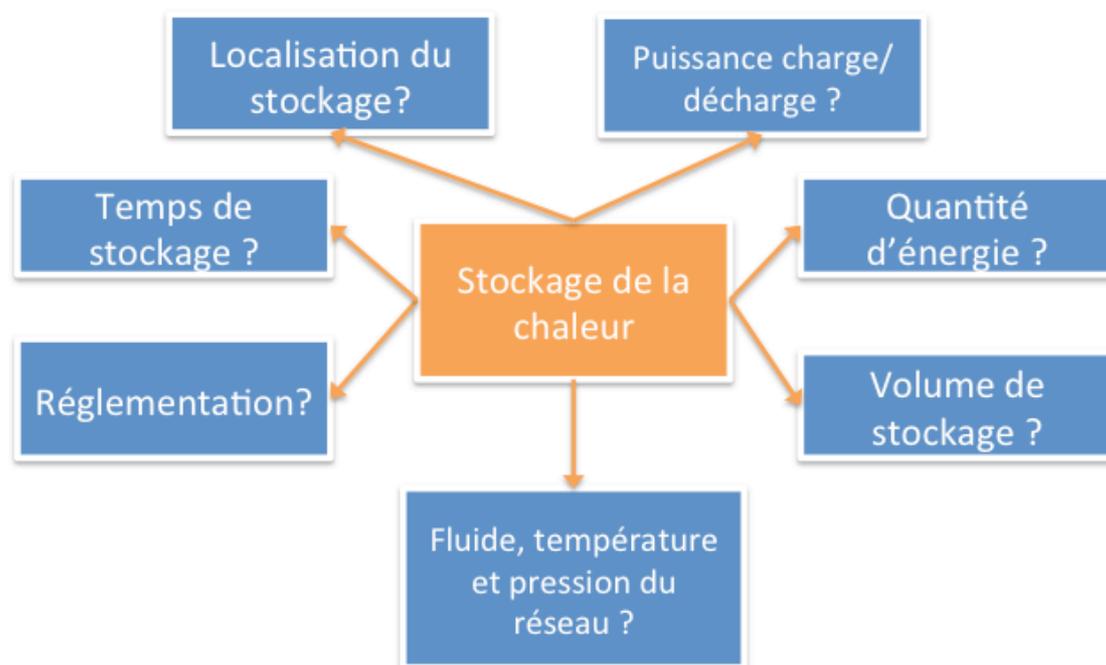


Figure 8: Paramètres clés d'un stockage

## 2. TECHNOLOGIES DÉPLOYÉES

Différentes technologies existent actuellement ou sont en cours de développement pour stocker l'énergie dans les réseaux de chaleur. Cette partie a pour objectif de fournir une présentation succincte de chacune d'entre elles, et de permettre d'identifier rapidement les avantages/inconvénients et les caractéristiques de celles-ci. Une distinction a été réalisée entre les technologies à usage court terme (CT) ou long terme (LT).

Actuellement, **les technologies les plus matures concernent le stockage de la chaleur sensible**. La chaleur sensible correspond à une variation de température sans changement de phase d'un matériau (*exemple : eau à l'état liquide passant de 20 à 40°C*). Ainsi, l'énergie peut être stockée dans des matériaux liquides ou solides (eau, terre, roche, sable, etc.). N'oublions pas non plus que le réseau de chaleur lui-même peut stocker une partie de l'énergie produite directement par l'intermédiaire de ses canalisations.

Une technologie de stockage innovante en voie de développement vise à utiliser la chaleur latente d'un matériau, qui correspond à l'énergie mise en jeu lors d'un changement de phase (*exemple : glaçon fondant dans un verre ou eau liquide se transformant en vapeur*). Ce type de stockage est appelé stockage par Matériau à Changement de Phase (MCP) et a comme avantage principal une plus forte densité de stockage (en kWh/m<sup>3</sup>) que le stockage sensible. Le Tableau 1 synthétise les informations présentées dans cette rubrique.

Tableau 1: Tableau récapitulatif des technologies de stockage

Type		Durée (LT/CT/mixte <sup>1</sup> )	Temp. de stockage	Volume	Densité (kWh/m <sup>3</sup> )	Coût <sup>2</sup>	Maturité
Cuve de stockage sensible	Eau (P <sub>atm</sub> )	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 <sub>atm</sub> )	LT	<90°C	•••	Proche de 35	€€€	Indus.
	Eau/gravier ou Eau/sable	LT	<90°C	•••	15-25	€€€	Indus.
Grand Réservoir	Eau (P <sub>atm</sub> 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

<sup>1</sup> Concerne les stockages fonctionnant en configuration journalière et intersaisonnière.

<sup>2</sup> Le classement des coûts a été établi de manière qualitative en fonction des retours de plusieurs acteurs du stockage

## 2.1. Stockage sensible à court terme : la cuve thermocline

Les cuves thermoclines permettent de stocker la chaleur du réseau dans un réservoir isolé thermiquement, aérien ou enterré<sup>1</sup>, pressurisé ou à pression atmosphérique. Ces réservoirs sont généralement situés proches d'une unité de production d'eau chaude et peuvent être construits à partir de plusieurs matériaux selon les projets (béton, acier, ou encore fibre de verre renforcée).

Le fonctionnement de ces installations est basé sur la différence de densité de l'eau, du fait de la différence de température de l'eau au sein du ballon. Il existe ainsi une stratification entre la couche chaude et la couche froide, appelée thermocline, dans laquelle un gradient de température est en place. Ainsi, lorsque le ballon est amené à se décharger, l'eau chaude est soutirée dans la partie haute et remplacée par l'eau froide de retour de réseau, dans la partie basse (Figure 9). Lors des charges, l'eau chaude est injectée par le haut et l'eau froide soutirée par le bas.

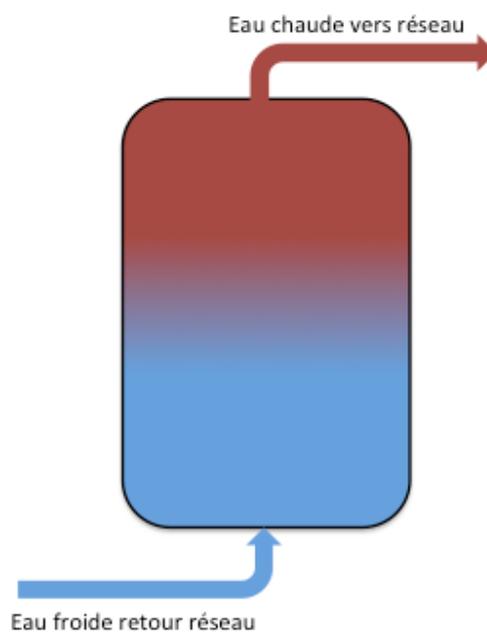


Figure 9: Fonctionnement d'un ballon de mélange en décharge

Afin d'éviter le mélange des couches chaude et froide, l'eau est parfois stratifiée à l'intérieur du ballon. Des éléments mécaniques internes au ballon<sup>2</sup> sont pour cela insérés (appelés distributeurs hydrauliques), ils ont pour effet de limiter et d'uniformiser la vitesse de l'eau. A noter que des modèles de stratification plus complexes et plus efficaces sont encore au stade de la recherche (cf. paragraphe 2.3.1).

Il est également possible d'intégrer des petits ballons d'eau chaude directement à proximité des sous-stations des réseaux de chaleur, dans le but de lisser les pics de consommation.

Les ballons pressurisés permettent le stockage de l'eau chaude au delà de 100°C, ce qui permet en particulier de stocker l'eau à la température et à la pression du réseau, permettant une implémentation plus simple. En revanche ils peuvent présenter l'inconvénient de placer les équipements dans la catégorie réglementaire des équipements sous pression.

<sup>1</sup> Les réservoirs enterrés serviront plutôt pour les plus grosses capacités, cf. 2.2

<sup>2</sup> Par exemple, une simple plaque percée de trous pour les plus basiques

## Stockage en ballon à pression atmosphérique

### Avantages

- Conception simple
- Possibilité de décharge rapide
- Faible maintenance

### Température de stockage :

<100°C

### Volume de stockage :

De quelques m<sup>3</sup> à quelques milliers de m<sup>3</sup> (1)

### Densité énergétique<sup>1</sup> :

Environ 35 kWh/m<sup>3</sup>

### Maturité de la technologie :



Mûre et répandue

### Inconvénients

- Température de stockage limitée à 100°C
- Besoin d'équipements auxiliaires pour s'adapter à la pression du réseau
- Risque de mauvaise stratification, et donc de température de décharge non constante



Figure 10: Tour de stockage de Pimlico, Londres: 2500 m<sup>3</sup>

## Stockage en ballon pressurisé

### Avantages

- Densité de stockage supérieure au stockage à pression atmosphérique
- Conception simple
- Possibilité de décharge rapide
- Faible maintenance

### Température de stockage : >100°C

**Volume de stockage :** De quelques m<sup>3</sup> à quelques milliers de m<sup>3</sup> (1)

**Densité énergétique :** Jusqu'à 40 kWh/m<sup>3</sup>

### Maturité de la technologie :



Mûre et répandue

### Inconvénients

- Coût d'investissement plus élevé qu'à pression atmosphérique
- Risque de mauvaise stratification, et donc de température de décharge non constante
- Risques opératoires liés à la pression

<sup>1</sup> Dans un souci de comparabilité, les densités énergétiques fournies concernent un écart de température chaud froid ( $\Delta T$ ) sur le réseau de 30°C. La densité énergétique dépend du  $\Delta T$  du réseau.

## 2.2. Stockage sensible inter-saisonnier

Les stockages inter-saisonniers, de longues durées, possèdent actuellement 4 technologies mises en oeuvre. Ces technologies sont d'ores et déjà déployées dans certains réseaux de chaleur des pays du nord de l'Europe. Bien que généralement l'efficacité d'un stockage saisonnier soit inférieure à celle d'un stockage court terme, celui-ci permet de stocker de très grandes quantités d'énergie non valorisable sans stockage.

### 2.2.1. Dans le sol : sondes géothermiques

Lorsque sa typologie est adaptée, le sol peut être utilisé en tant que matériau de stockage à part entière. En règle générale, les formations géologiques adaptées à ce genre de stockage sont les sols très rocheux, ou les sols saturés en eau sans écoulement<sup>1</sup>.

Le principe de cette technologie est simple : la chaleur est stockée ou déstockée dans le sol par l'intermédiaire de sondes forées dans le sol de 30 à 100 m de profondeur. Ces sondes, dans lesquelles un fluide caloporteur circule en système fermé, jouent le rôle d'échangeur thermique avec le sol (Figure 11).

Lorsque les niveaux de température en sortie sont faibles<sup>2</sup>, certaines configurations utilisent des pompes à chaleur afin de rehausser la température du fluide en sortie de stockage, avant injection dans le réseau. A noter que le stockage géothermique peut également être utilisé pour stocker le froid.

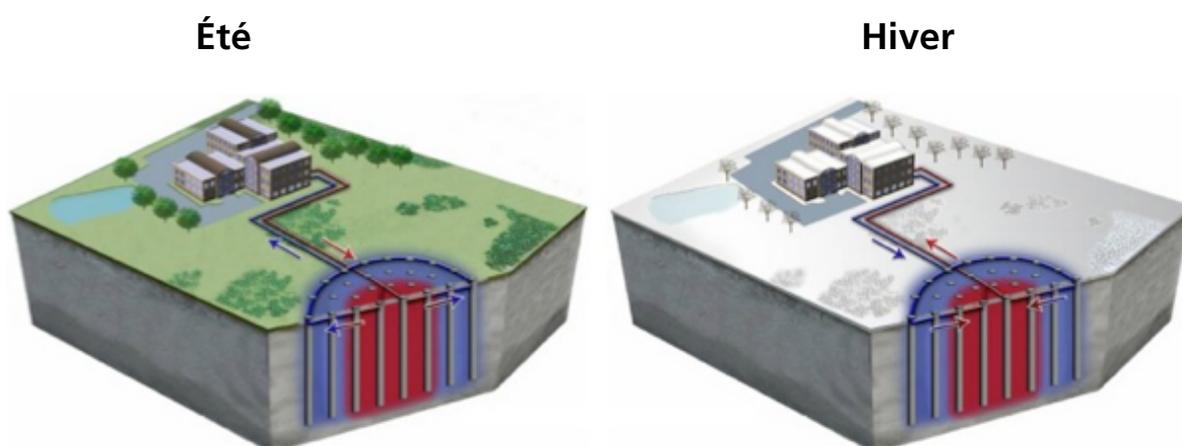


Figure 11: Schéma illustratif d'un stockage géothermique (source: Underground Energy, LLC)

A la différence des autres technologies de stockage, le stockage géothermique ne comporte pas de limite physique spatiale hormis celles géologiques. De ce fait, il est possible d'utiliser « gratuitement » la configuration naturelle du sol, en grande quantité. La plupart du coût d'investissement pour ce type de projet réside dans les échangeurs utilisés pour transférer la chaleur au sol, dans la réalisation des forages, et dans la couche d'isolant placée à la surface du stockage<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> D'après le Solar Heating and Cooling Programme de l'Agence Internationale de l'Énergie

<sup>2</sup> C'est notamment parfois le cas avec les installations utilisant du solaire thermique

<sup>3</sup> Pour les stockages plus petits (<5000 m<sup>3</sup>), une enveloppe peut être utilisée pour limiter les pertes thermiques et contenir un volume de sol donné.

## Stockage dans le sol : sondes géothermiques

### Avantages

- Stockage peu coûteux
- Importants volumes mobilisables facilement
- Possibilité de modulation par ajout/retrait de sondes

### Inconvénients

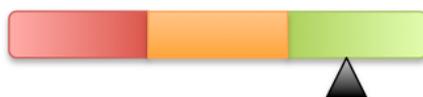
- Forte inertie
- Densité énergétique faible
- Besoin de conditions géologiques spécifiques
- Besoin d'un ballon tampon pour certaines configurations (notamment pour l'ajustement des débits de stockage)

**Température de stockage :** < 90°C

**Volume de stockage :** quelques milliers de m<sup>3</sup> à plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> (1)

**Densité énergétique :** 5 – 15 kWh/m<sup>3</sup>

**Maturité de la technologie :**



Mûre : 8 systèmes à grande échelle en fonctionnement

### 2.2.2. En aquifère

Les aquifères sont des formations géologiques contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau dans le sous-sol. Lorsqu'il s'agit d'une nappe captive, c'est à dire située entre deux formations peu perméables, et comportant une roche poreuse et très perméable, il est possible d'utiliser l'aquifère pour stocker de la chaleur ou du froid. Des études de sous-sol doivent être préalablement menées, pour vérifier le sens et la vitesse d'écoulement de la nappe (pour limiter le risque de recyclage thermique).

Le principe d'utilisation réside dans le forage de deux puits (ou groupe de puits), à partir desquels l'eau est soit injectée, soit reprise (Figure 12). En fonctionnement, lors du stockage par exemple, l'eau froide est soutirée au puits froid, chauffée par les systèmes de production du réseau de chaleur, puis injectée dans le puits chaud. Lors de la décharge, c'est l'inverse qui est réalisé.



Figure 12: Schéma illustratif d'un stockage en aquifère (source: Underground Energy, LLC)

L'injection d'eau chaude à haute température peut causer des modifications de la géologie de l'aquifère et de la composition de l'eau, ce qui peut également entraîner des complications au niveau des échangeurs. Ainsi, la température de stockage en aquifère est généralement limitée.

**Stockage en aquifère**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Stockage peu coûteux</li> <li>➤ Importants volumes mobilisables facilement</li> <li>➤ Emprise au sol très faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Besoin de conditions géologiques spécifiques</li> <li>➤ Densité de stockage faible</li> <li>➤ Température de stockage limitée</li> </ul>

**Température de stockage :** Aux alentours de 50°C

**Volume de stockage :** quelques milliers de m<sup>3</sup> à plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> (1)

**Densité énergétique :** 15 - 20 kWh/m<sup>3</sup>

**Maturité de la technologie :**



Mûre et répandue (+ de 1000 réalisations)

### 2.2.3. En fosse

Le stockage thermique en fosse consiste à accumuler la chaleur soit dans de l'eau chaude directement, soit dans une matière minérale (typiquement du sable ou des graviers). Le stockage thermique minéral est réalisé par l'intermédiaire de tubes échangeurs de chaleur, judicieusement répartis dans le volume de la fosse.

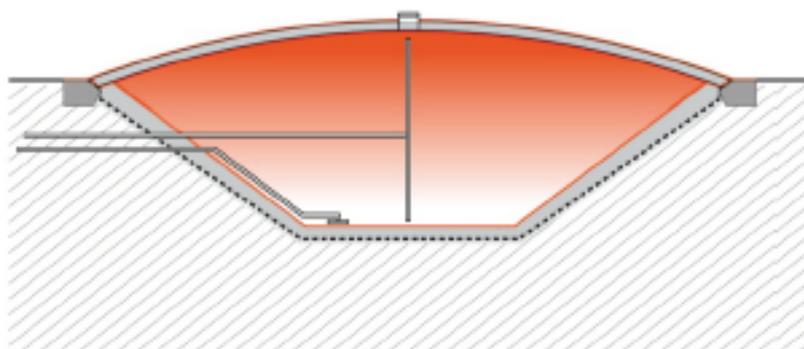


Figure 13: Schéma d'un stockage en fosse (source: solites)

À la différence d'un réservoir, la géométrie d'une fosse est créée par un simple trou dans le sol, après couverture de celui-ci par un isolant thermique et une membrane imperméable (Figure 13). La surface libre est protégée par un couvercle isolant, qui peut être de plusieurs types selon le matériau de stockage : simple bâche isolante si milieu minéral, couvercle flottant, couvercle autoportant ou encore couvercle porté.

L'avantage d'un couvercle autoportant ou porté peut résider dans son accessibilité pour la maintenance, tandis qu'un système flottant offre une surface de couverture quasi illimitée.

### Stockage d'eau chaude en fosse

#### Avantages

- Stockage moins cher qu'en réservoir
- Densité énergétique proche de celle de l'eau
- Facilité de maintenance

#### Inconvénients

- Efficacité modérée
- Beaucoup de pertes thermiques
- Investissement élevé pour la couverture supérieure

**Température de stockage :** jusqu'à 90°C

**Volume de stockage :** de quelques milliers de m<sup>3</sup> quelques centaines de milliers de m<sup>3</sup> (1)

**Densité énergétique :** proche de 35 kWh/m<sup>3</sup>

**Maturité de la technologie :**



Mûre et répandue

Bien que le stockage de la chaleur dans de l'eau chaude soit plus pertinent d'un point de vue thermodynamique, les graviers ou le sable peuvent offrir l'avantage de s'intégrer plus facilement dans un paysage urbain, amenuisant ainsi le problème de l'emprise au sol (Figure 14).

### Stockage eau-gravier ou eau-sable en fosse

#### Avantages

- Stockage moins cher qu'en réservoir
- Peu de fondations nécessaires
- Couvercle isolant relativement simple à mettre en œuvre
- Intégration paysagère

#### Inconvénients

- Efficacité modérée
- Inertie du gravier
- Maintenance plus difficile
- Beaucoup de pertes thermiques
- Densité énergétique moins bonne qu'avec de l'eau chaude

**Température de stockage :** jusqu'à 90°C

**Volume de stockage :** de quelques milliers de m<sup>3</sup> quelques centaines de milliers de m<sup>3</sup> (1)

**Densité énergétique :** 15 - 25 kWh/m<sup>3</sup>

**Maturité de la technologie :**



Mûre et répandue



Figure 14: Exemple d'intégration paysagère à Eggenstein, Allemagne (source: solites)

#### 2.2.4. En réservoirs / cuves de grandes dimensions

Tout comme le stockage à court-terme, le stockage inter-saisonnier ou à long-terme peut être réalisé par stockage d'eau chaude en réservoirs (Figure 15). Ces réservoirs possèdent une bonne isolation thermique, et, tout comme les réservoirs à usage journalier, peuvent être aériens ou enterrés selon les projets.

Ils permettent le stockage de la chaleur sur le long terme en garantissant peu de pertes thermiques, avec une gamme de température de stockage large. Cependant, cette efficacité se répercute sur le coût des installations.

Le principe de fonctionnement de ces installations reste très similaire aux précédentes technologies. L'eau chaude collectée est stockée durant les mois chauds d'été, puis restituée en hiver. Si besoin, le couplage avec une pompe à chaleur (PAC) est possible afin d'assurer un certain niveau de température à la chaleur restituée.

**Stockage en réservoir de grandes dimensions**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Grande efficacité</li> <li>➤ Peu de pertes thermiques</li> <li>➤ Bonne densité de stockage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Investissement élevé</li> <li>➤ Risque éventuel lié à la pression du réservoir</li> </ul>

**Température de stockage :** peut être supérieure à 100°C

**Volume de stockage :** de quelques centaines de m<sup>3</sup> quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup> pour les très grosses installations<sup>1</sup> (1)

**Densité énergétique :** 35 kWh/m<sup>3</sup>

**Maturité de la technologie :**

Mûre et répandue

<sup>1</sup> Par exemple, la tour du réseau de Linz-Mitte, en Autriche, peut contenir 34 000 m<sup>3</sup> d'eau.

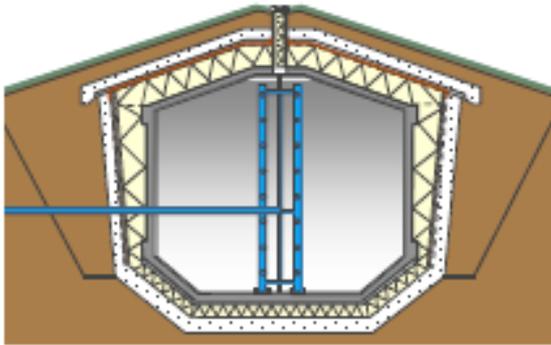


Figure 15: Schéma d'un réservoir enterré (source: SDH)



Figure 16: Exemple de réservoir aérien de 37 000 m<sup>3</sup> à Borås, Suède (source : Living circular-Veolia)

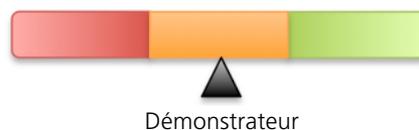
### 2.3. Solution de stockage en phase de R&D

Quelle que soit la typologie de stockage, le monde de la recherche travaille sur des solutions nouvelles ou améliorées, applicables tant pour les stockages inter-saisonniers que pour les stockages à court terme.

#### 2.3.1. Stockage en cuve par stratification à températures variables

L'importance de la stratification des couches thermiques pour un stockage journalier en ballon a été brièvement évoquée dans le paragraphe 2.1. Cette stratification est parfois complexe à maintenir, en particulier pour des puissances de charge et de décharge importantes, et ce même si les températures chaude et froide sont constantes. Pour des températures chaudes variables (énergie issue de différentes sources de production) la problématique est encore plus complexe. La recherche travaille à ce jour sur des dispositifs technologiques d'injection à température variable, afin d'injecter l'eau à la hauteur appropriée sans dénaturer des couches thermiques.

Maturité de la technologie :

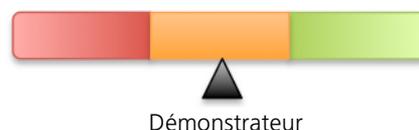


#### 2.3.2. Stockage de la chaleur latente : les matériaux à changement de phase

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) font l'objet de recherche pour une application court terme ou long terme. Le changement de phase permet de stocker d'importantes quantités de chaleur sur un volume réduit, offrant une densité énergétique jusqu'à 3 fois supérieure aux meilleures technologies développées aujourd'hui. Il existe plusieurs technologies de MCP :

- Les MCP Solide/Liquide permettent de stocker l'énergie à température auto-régulée (T de fusion) et permettent un stockage non pressurisé même au delà de 100°C.

Maturité de la technologie :



- Les MCP Surfondus, outre les avantages précédents, permettent un stockage en phase liquide à température ambiante, n'engendrant ainsi pas ou très peu de pertes thermiques.

Maturité de la technologie :



- Les MCP Solide/Solide comportent les mêmes avantages que les MCP Solide/Liquide, mais permettent également d'éviter toute fuite de liquide et diminuent fortement l'expansion volumique. Il est aussi possible de mettre en forme l'échangeur avec le MCP lui-même.

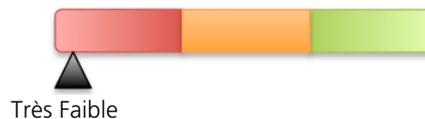
Maturité de la technologie :



### 2.3.3. Stockage de la chaleur thermochimique

Le stockage thermochimique permet de stocker la chaleur par l'intermédiaire de réactions chimiques. La technologie peut-être basée sur le phénomène d'adsorption/désorption de vapeur d'eau par des molécules poreuses ou sur des réactions chimiques classiques. Ces phénomènes sont accompagnés de restitution ou de consommation de chaleur, d'où leur intérêt pour le stockage thermique. Le stockage thermochimique, en plus de permettre un stockage à température ambiante, donc sans perte thermique, conduit à des densités de stockage très élevées, potentiellement 10 à 15 fois supérieures à celle de l'eau en sensible. La chaleur ainsi stockée peut présenter l'avantage d'être facilement transportable.

Maturité de la technologie :



### 3. QUELS GAINS GRÂCE A UN DISPOSITIF DE STOCKAGE ?

#### 3.1. Lisser les pics de production, de transport et de consommation

Les réseaux de chaleur sont dimensionnés de façon à subvenir au besoin maximum appelé par leurs usagers lors d'un instant donné. La consommation de chaleur suivant de près la production, les réseaux doivent être capables d'injecter rapidement assez de chaleur en cas de forte demande (cf. encadré ci-contre).

Ainsi, deux types de fonctionnement sont représentés pour les installations de production sur les réseaux de chaleur :

- Les installations fonctionnant « en base » (typiquement les centrales biomasse ou les productions de chaleur fatale (Usine d'Incinération des Ordures Ménagères-UIOM, industries)) produisent tout au long de la journée, mais souvent ne peuvent ajuster rapidement leur puissance de production.
- Les installations fonctionnant « en pointe » produisent de manière intermittente en cas de besoin. Elles doivent être capables de démarrer ou de s'adapter rapidement afin de satisfaire une brusque demande sur le réseau, jusqu'à plusieurs fois par jour. Typiquement, les installations utilisant des énergies fossiles (gaz naturel ou fioul) assurent ce rôle sur la plupart des réseaux.

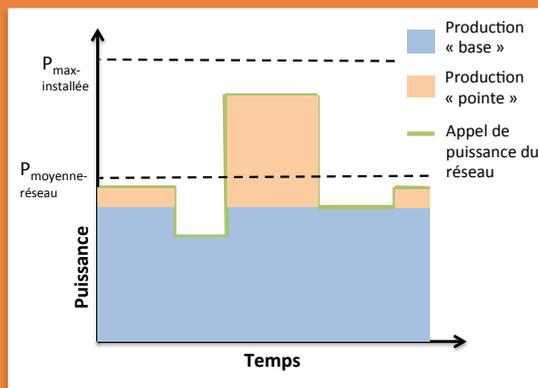
Le stockage journalier de l'énergie, à court-terme, permet **l'augmentation de la puissance apparente des installations fonctionnant en base**<sup>1</sup>. De ce fait, lorsque la puissance de base devient supérieure à la puissance appelée sur le réseau, les installations stockent une partie de l'énergie excédentaire produite. Plus tard dans la journée, lors d'une pointe de consommation, l'énergie stockée sera alors libérée, se substituant totalement ou en partie à l'apport d'énergie d'une centrale d'appoint. La Figure 17 schématise le fonctionnement d'un stockage journalier.

Par conséquent, en évitant le recours aux générateurs de pointe, l'utilisation du stockage journalier permet de **diminuer la puissance maximale installée** sur le réseau, que ce soit

#### ZOOM SUR LA COURBE DE CHARGE JOURNALIÈRE TYPIQUE D'UN RÉSEAU DE CHALEUR

En règle générale, la courbe de charge d'un réseau de chaleur urbain comporte de fortes irrégularités sur une journée, dues à l'activité variable de ses consommateurs. Il n'est pas rare que la puissance appelée lors d'un pic soit 4 à 6 fois supérieure à la puissance appelée en heure creuse. Ainsi, pour une fourniture de chaleur sécurisée, des puissances très nettement supérieures à aux moyennes des appels de puissance sont installées sur le réseau, et ne sont utilisées seulement quelques fois par an, voire inutiles certaines années.

**Le stockage permet une diminution de ce ratio.**



<sup>1</sup> Diminuant ainsi la puissance utilisée par les installations de pointes

dans le cadre de la construction d'un réseau neuf, ou pour un réseau existant lors du remplacement d'une centrale de pointe arrivant en fin de vie.

L'amortissement d'un dispositif de stockage de l'énergie sera ainsi en partie compensé par l'économie des dépenses relatives aux installations d'appoint, tels que les **coûts de maintenance**, les **coûts d'investissements**, les **coûts énergétiques** et les **coûts de démarrage**.

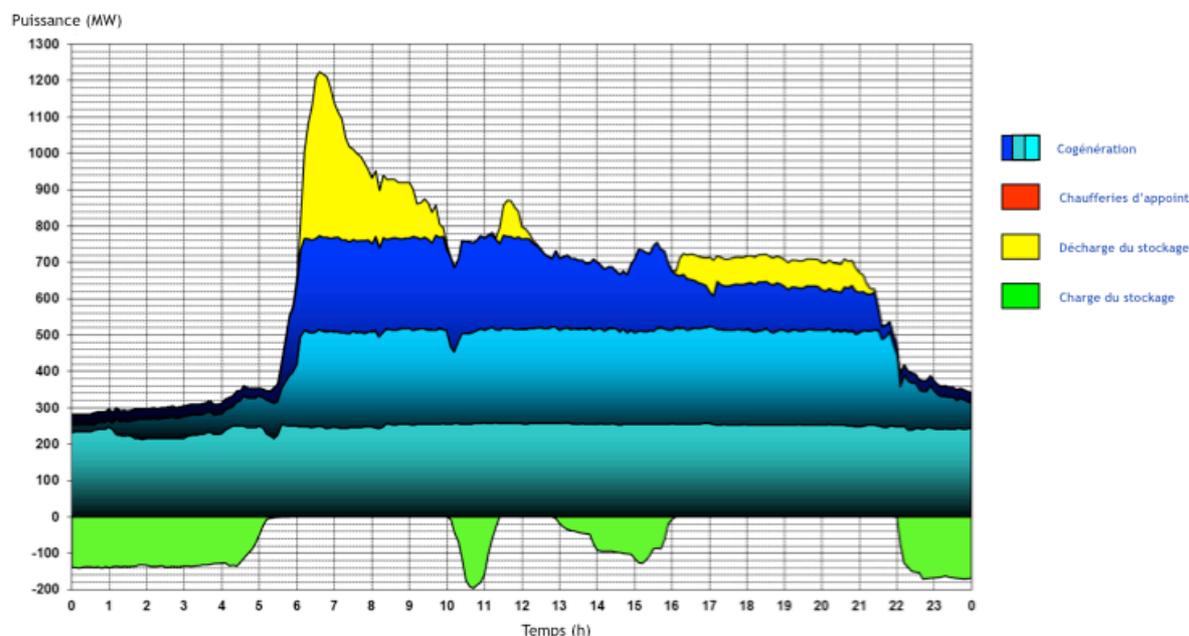


Figure 17: Illustration d'un stockage journalier par sa courbe de puissance appelée (source: IREN)

Un stockage journalier décentralisé en sous station, ou plus vraisemblablement un foisonnement de stockages décentralisés en sous-station, permet, lors des pics de consommation, d'**injecter de la chaleur au plus proche du consommateur**, sans avoir à cheminer par le réseau. La puissance maximale que doit être capable de transporter le réseau (et donc la taille de ses tuyauteries) pourrait alors ne plus être dimensionnée sur la puissance maximale appelée mais sur la puissance moyenne appelée. Ce principe peut s'appliquer aux réseaux à construire dans les années à venir et aux extensions de réseaux existants lorsque le réseau est déjà congestionné lors des pics de consommation.

Le même principe de **stockage journalier décentralisé** peut être **installé directement chez l'abonné, lui permettant de lisser son profil d'appel de puissance** :

- En appelant un peu plus de puissance lors des creux de consommation pour charger le stockage
- En appelant un peu moins de puissance lors des pics grâce à la décharge du stockage.

**L'énergie consommée reste la même mais la puissance maximale appelée baisse**, ce qui pourrait ainsi permettre de diminuer la puissance souscrite.

De manière générale, en lissant les pointes de production, de transport et de consommation, les dispositifs de stockage engendrent un fonctionnement beaucoup plus régulier des installations de base sur le réseau. De ce fait, les dispositifs de production peuvent fonctionner à puissance nominale sur des périodes plus longues, bénéficiant ainsi d'une **amélioration des rendements de fonctionnement, d'un allongement la durée de vie des équipements** et d'une **diminution des émissions de gaz à effet de serre**<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dans l'hypothèse d'une base de production à partir d'EnR&R ou cogénération

### **Illustration par la simulation: le cas de Turin, Italie**

La monotone de puissance appelée d'une simulation du réseau de Turin est présentée sur la Figure 18.

- Sans stockage (en bleu), la puissance appelée sur le réseau atteint son maximum très peu d'heures dans l'année, et possède un profil nécessitant une forte adaptation de la production (de 200 à 1200 MW)
- Avec 1 cogénération et 12 000 m<sup>3</sup> de stockage (en rose), la fourchette de puissance appelée se réduit fortement avec une diminution de 300 MW installés sur le réseau. En contrepartie, le réseau fonctionne plus régulièrement à puissance moyenne.
- Avec 2 cogénérations et 32 000 m<sup>3</sup> de stockage (en rouge), la puissance installée sur le réseau diminue jusqu'à un tiers par rapport à l'absence de stockage.

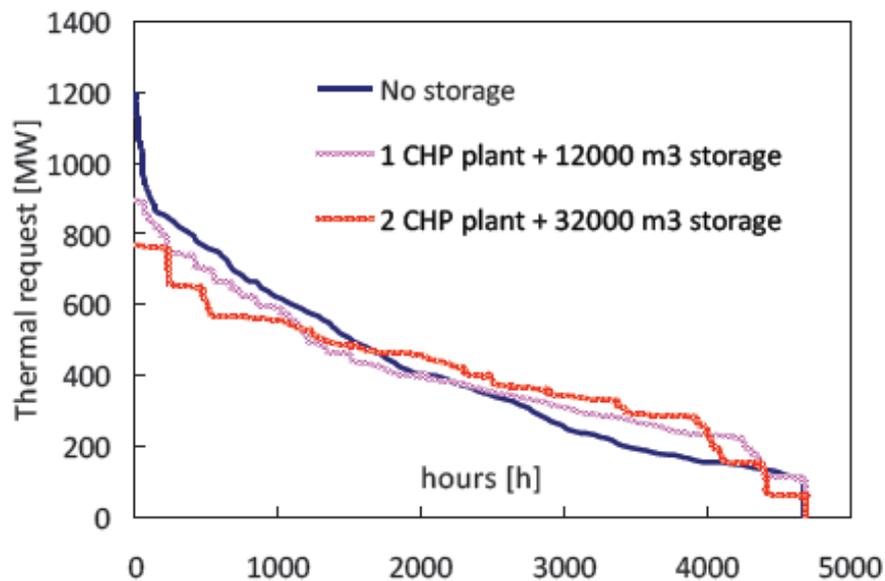


Figure 18: Monotone de puissance appelée sur le réseau de Turin, simulation réalisée par l'école Polytechnique de Turin

### **Exemple pour un réseau biomasse :**

Les centrales biomasse peuvent avoir l'inconvénient d'être plus difficilement pilotables que les centrales à gaz (existence d'une puissance minimale de fonctionnement, arrêt/démarrage plus lent). Le couplage avec une installation de stockage pourrait ainsi permettre :

- L'installation d'une puissance de production biomasse plus grande (et de ce fait une diminution de la puissance installée en appoint)
- Un taux de couverture annuel par l'énergie biomasse plus important
- Un fonctionnement à régime nominal plus fréquent, entraînant moins de marche/arrêt, donc un meilleur rendement final et une plus longue durée de vie de l'équipement
- Le fonctionnement à régime nominal induit également une meilleure combustion, c'est à dire moins de combustible consommé et moins d'émissions atmosphériques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, poussières)
- A cela s'ajoute les avantages économiques et environnementaux présentés dans les paragraphes précédents

Pour information, la production de 1 kWh par une centrale biomasse à plaquettes forestière engendre l'émission de 13 g de CO<sub>2</sub>, contre 234 g pour le gaz naturel, et 320 g pour le fioul lourd<sup>1</sup>.

### **Exemple pour un réseau à cogénération :**

En rendant les unités de cogénération moins dépendantes des besoins thermiques immédiats du réseau, le stockage de l'énergie calorifique permet un **pilotage des centrales directement en lien avec les marchés de l'électricité**. La centrale peut alors produire en ajustant la production d'électricité en fonction de l'évolution journalière des prix de marché, permettant un gain économique sur la revente de celle-ci. Un mode de fonctionnement classique réside en le démarrage de la centrale de cogénération durant le pic de consommation électrique du soir, en stockant la chaleur si il n'y a pas de pic de consommation de chaleur, et un non-démarrage de la cogénération le matin durant l'appel de puissance du réseau de chaleur, la chaleur étant fournie par le stockage chargé la veille au soir.

## **3.2. Intégration d'EnR&R sur le réseau**

Certaines technologies de production d'EnR&R produisent la majeure partie de leur énergie lors de périodes peu demandeuses sur les réseaux de chaleur.

Typiquement, pour le solaire thermique, une grande partie du potentiel annuel de production se situe pendant les journées des mois d'été. La puissance appelée et la consommation d'un réseau de chaleur étant faible sur ces périodes, la production du parc ne pourra trouver preneur qu'en cas de décalage temporel de consommation (Figure 19). A défaut, la taille du parc installé devra être revue à la baisse, ne pouvant trouver d'acheteur au moment de la production. Une solution de stockage inter-saisonnier permet l'**augmentation du taux de couverture annuel**, diminuant par la même occasion le temps de retour sur investissement de l'installation. La Figure 20 permet d'illustrer ces propos à travers l'exemple du stockage inter-saisonnier de Dronninglung, Danemark.

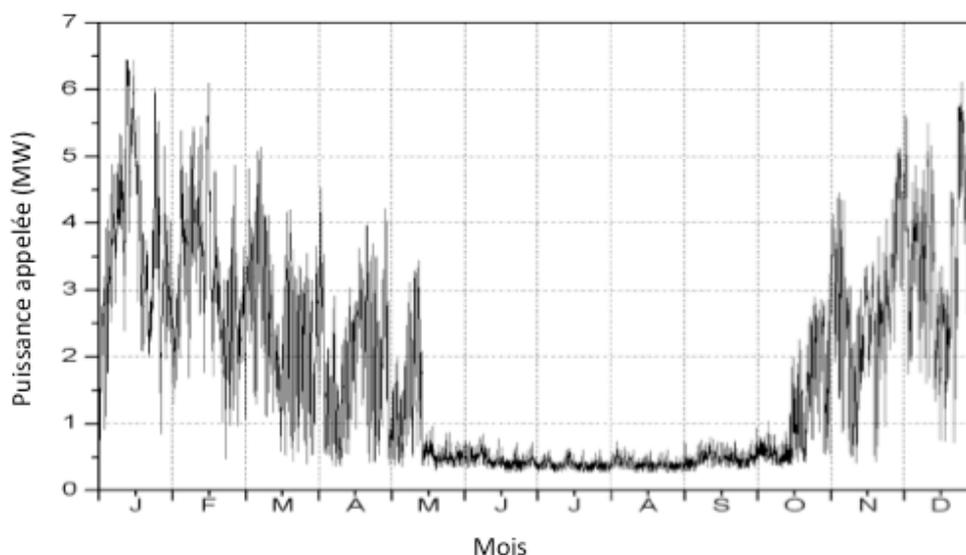


Figure 19: Courbe de charge annuelle d'un réseau de chaleur (source: COFELY)

De plus, pour rappel, franchir le seuil de 50% d'EnR&R sur son réseau permet de bénéficier d'une TVA à taux réduit sur la fourniture d'énergie.

<sup>1</sup> Source : Comparatif des modes de chauffage et prix de vente de la chaleur en 2014 – AMORCE

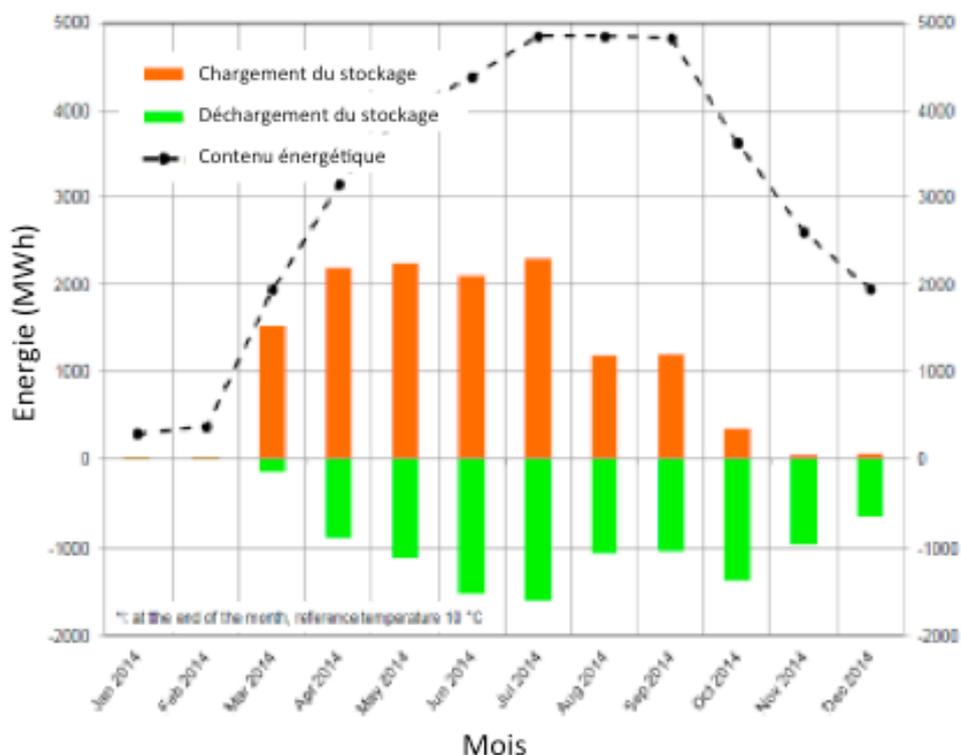


Figure 20: Fonctionnement couplé du parc solaire et de l'installation de stockage de Dronninglund (Source: Planenergi)

De nombreuses installations de production de chaleur fatale, à l'image des UIOM, produisent de la chaleur toute l'année du fait de leur mode de fonctionnement. Leur couplage avec une installation de stockage pourrait permettre une valorisation beaucoup plus importante de l'énergie disponible, autorisant l'installation d'échangeurs de plus grande capacités, et diminuant fortement la non-valorisation de la production. Dans l'industrie en France, 51 TWh sont rejetés chaque année sous forme de chaleur fatale non valorisée et supérieure à 100°C<sup>1</sup>.

À SAVOIR: En France et en 2014, le prix moyen pondéré de vente des réseaux de chaleur **majoritairement alimentés par des EnR&R** est de **74,5 €TTC/MWh**, contre un prix moyen pondéré de **92,4 €TTC/MWh** pour les réseaux **majoritairement alimentés en gaz naturel** (hors cogénération)<sup>2</sup>. Cette différence s'explique notamment par l'impact de la TVA à taux réduit mise en place pour les réseaux majoritairement alimentés par des EnR&R (biomasse, solaire, chaleur fatale ou géothermie).

### **Illustration par un cas concret: Dronninglund, Danemark**

Le réseau de chaleur solaire Danois de Dronninglund possède 37 000 m<sup>2</sup> de capteurs pour une production de chaleur solaire de 17,5 GWh/an. Avec une infrastructure de stockage inter-saisonnier en fosse de 60 000 m<sup>3</sup>, le taux de couverture solaire de la première année de fonctionnement a été de 34 %<sup>3</sup> avec un démarrage au mois de mars. La Figure 20 présente la couverture du stockage de cette première année de fonctionnement.

<sup>1</sup> Source : *La chaleur fatale industrielle* – ADEME - mars 2015

<sup>2</sup> Source : Comparatif des modes de chauffage et prix de vente de la chaleur en 2014 – AMORCE

<sup>3</sup> Source : Planenergi

## 4. CADRE RÉGLEMENTAIRE

---

Les typologies des stockages pouvant être variées, chaque technologie ne dépend pas des mêmes codes ou réglementations. En effet, actuellement en France, **il n'existe pas de réglementation spécifique concernant le stockage de l'énergie thermique en général.**

- **Stockage en aquifères**

Une partie du code minier est dédiée au stockage d'énergie calorifique dans le sol. Mais, selon les cas, l'activité de stockage souterrain d'énergie thermique peut se situer à la frontière entre une installation de stockage souterrain de gaz, une exploitation de gîte géothermique et une exploitation de nappe phréatique : les deux premières activités sont réglementées par le code minier, la dernière par le code de l'environnement<sup>1</sup>.

Ainsi, le prélèvement et la réinjection d'eau sont réglementés par le code de l'environnement et la réalisation de forage est soumise à déclaration ou autorisation au titre du code de l'environnement (selon les débits exploités et la sensibilité des nappes intéressées).

Selon le code minier, les stockages souterrains d'énergie calorifique ne peuvent être exploités qu'en vertu d'un permis d'exploitation accordé par l'autorité administrative, et sont soumis à enquête publique et étude d'impact, voire étude de danger si le projet est soumis à autorisation.

Exemple : l'Albien est un aquifère d'eau potable dans la région parisienne de l'ordre de 655 milliards de mètres cube. Sa température, estimée entre 25°C et 28°C, en fait une source de géothermie essentielle pour le plan Climat-Energie de Paris.

Des contraintes d'exploitation sont imposées aux forages à l'Albien avec l'obligation de réinjecter l'eau pompée dans la nappe après en avoir extrait les calories, tout en assurant la conservation de la qualité de l'eau réinjectée. Il est également interdit de rejeter des calories dans la nappe ce qui limite les possibilités de stockage chaud.

- **Stockage dans le sol**

Le stockage dans le sol semble se situer dans un cas de figure proche de la géothermie à échangeurs fermés. La réglementation liée aux forages reste ainsi soumise au code de l'environnement. Différents cas de figure pourraient être envisagés en fonction de la profondeur des forages (<10m, compris entre 10 et 200m, ou >200m).

- **Ballons de mélange et réservoirs à pression atmosphérique**

Hormis les autorisations liées à l'urbanisme (permis de construire en particulier), les ballons de mélange et réservoirs à pression atmosphérique semblent n'apparaître dans aucun texte de loi à ce jour.

- **Ballons de mélange et réservoirs sous pression**

Les réservoirs sous-pression peuvent être a priori soumis aux dispositions concernant les équipements sous-pression (DESP) tels que définis dans le code de l'environnement (Livre V, titre V, chapitre VII).

- **Stockage en fosse**

La réglementation liée à la mise en place d'un stockage thermique en fosse, bien que non définie dans les textes de loi, pourrait en partie s'inspirer de l'arrêté du 27 août 1999 sur la création d'une excavation pour accueillir de l'eau. Ce type d'ouvrage serait soumis soit à déclaration, soit à autorisation au titre de la nomenclature IOTA (installations, ouvrages, travaux et aménagements). L'arrêté précise que la cuvette doit être étanche pour maintenir le

---

<sup>1</sup> Source : INERIS

niveau du plan d'eau, doit pouvoir être vidangée, et que la qualité de l'eau doit être maintenue suffisante pour ne pas risquer de dégrader la qualité des eaux superficielles.

Pour chacun des projets de stockage envisagés, et vu l'absence d'une réglementation claire et définie pour les stockages thermiques, **AMORCE préconise de contacter votre direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement** (DREAL) ou en outre-mer votre **direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement** (DEAL), ou en Ile de France votre **direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie** (DRIEE), pour connaître la marche exacte à suivre.

## 5. MONTANT D'INVESTISSEMENT ET AIDES POUR UN DISPOSITIF DE STOCKAGE

### 5.1. Quel montant d'investissement pour un projet de stockage ?

Chaque projet étant très différent et spécifique à son territoire, il est extrêmement difficile d'affecter une fourchette de coût d'investissement suffisamment étroite. Quelle que soit la technologie retenue, il est clair que les coûts spécifiques diminuent de manière significative avec la taille des projets. A titre indicatif, le coût d'un stockage par sonde géothermique peut varier considérablement, avec une fourchette de 3,5 à 30 €/m<sup>3</sup> de stockage<sup>1</sup>.

La Figure 21 présente les données de coûts relatives à la construction d'installations de stockages inter-saisonniers en Allemagne, depuis 1996. Ces stockages ont été réalisés pour des températures allant jusqu'à 95°C, et concernent pour la plupart un couplage avec une installation de production solaire thermique.

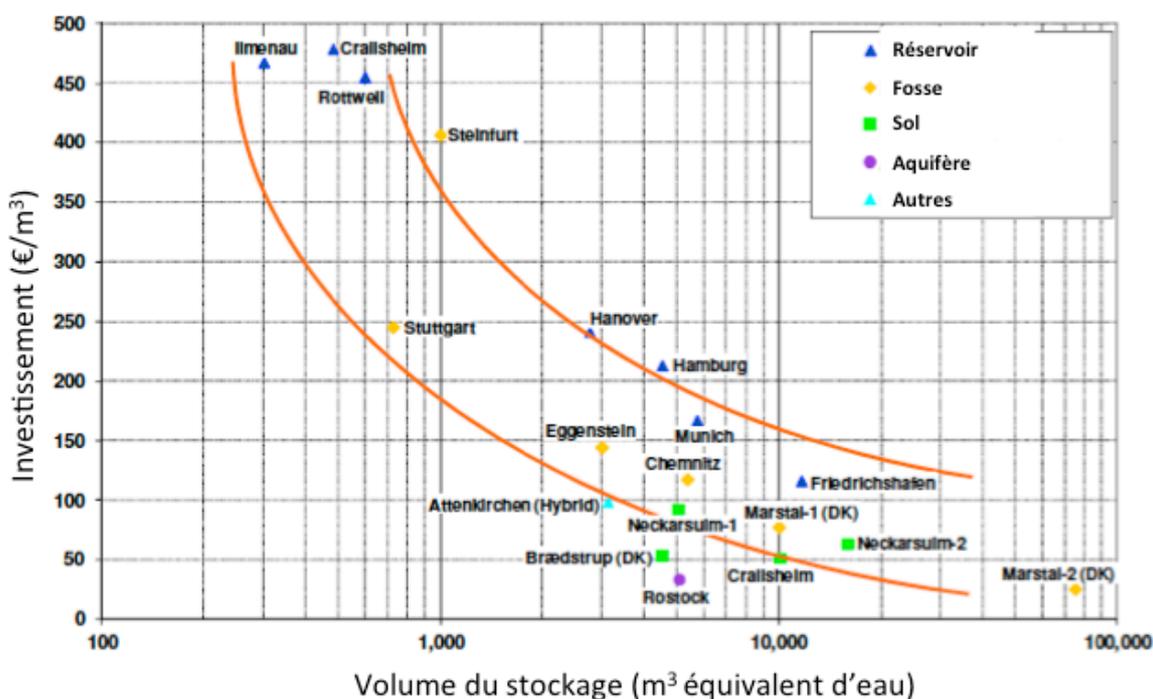


Figure 21: Investissement pour différents projets allemands, en fonction du volume de stockage équivalent d'eau<sup>2</sup> (source: Solites)

Le coût au mètre cube des projets décroît visiblement avec les volumes installés. Généralement, les stockages en réservoir sont plus onéreux et les stockages géothermiques moins coûteux, notamment pour les raisons citées dans la partie 2 de ce rapport.

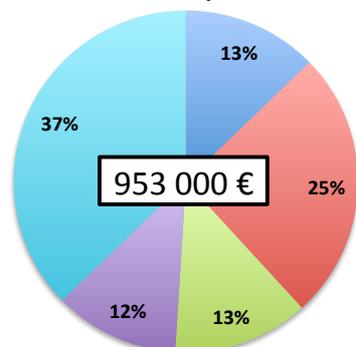
La Figure 22 est consacrée à la présentation des coûts totaux et relatifs de 4 projets de stockages inter-saisonniers allemands différents. Il peut ainsi être lu, pour chaque projet, les parts relatives à l'isolation (en bleu foncé), aux revêtements (en rouge), aux dispositifs permettant le stockage (en vert), aux travaux du sol (en violet), et à l'exploitation du volume de

<sup>1</sup> Source : Solar Heating and Cooling Programme, de l'Agence Internationale de l'Énergie

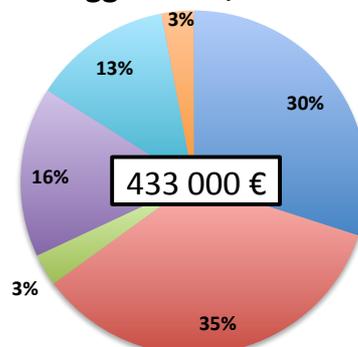
<sup>2</sup> Un m<sup>3</sup> équivalent d'eau permet de rendre comparable les différentes technologies n'utilisant pas nécessairement l'eau chaude comme moyen de stockages. Par exemple, 1 m<sup>3</sup> d'eau correspond à 3 à 5 m<sup>3</sup> de sol selon la typologie du terrain.

stockage (en bleu ciel). Il est intéressant de remarquer que le stockage en aquifère est le moins coûteux, et ne comporte ni isolation, ni revêtement de protection, du fait de sa typologie.

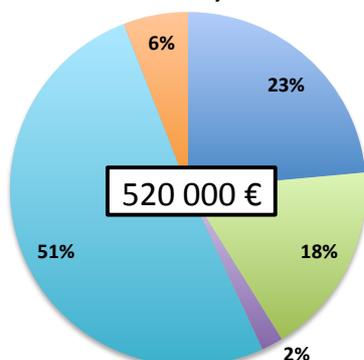
**5700 m<sup>3</sup> - Stockage en réservoir de Munich, 2007**



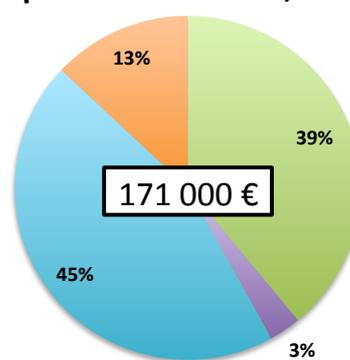
**4500 m<sup>3</sup> - Stockage en fosse d'EGgenstein, 2007**



**37500 m<sup>3</sup> - Stockage dans le sol de Crailsheim, 2008**



**20000 m<sup>3</sup> - Stockage en aquifère de Rostock, 2000**



■ Isolation  
■ Revêtements  
■ Dispositif de charge  
■ Travaux du sol  
■ Exploitation du volume de stockage  
■ Autre

Figure 22: Exemple de distribution des coûts de construction pour 4 différents stockages allemands (coût hors TVA et hors étude pré-projet) (source: solites, analyse : AMORCE)

Dans une étude commandée par l'ATEE<sup>1</sup> sur le stockage de l'énergie, l'investissement initial relatif à trois types de réseaux de chaleur avec et sans stockage a été calculé :

- Réseau 75% biomasse, appoint gaz  
Avec stockage de 70 MWh ou sans stockage
- Réseau 55% biomasse et cogénération gaz, appoint gaz  
Avec stockage de 50 MWh ou sans stockage
- Réseau gaz avec pointe gaz  
Avec stockage de 50 MWh ou sans stockage

Les résultats de l'étude sont donnés dans le tableau 2, et mettent en valeur les économies réalisables par l'investissement dans un réseau avec dispositif de stockage.

<sup>1</sup> Source : Étude sur le potentiel du stockage d'énergies, ATEE, 2013

Tableau 2 : Economie d'investissement pour réseaux avec stockage thermique

	Economie d'investissement si stockage (€)
75% biomasse	1 000 000
55% biomasse & cogénération gaz	65 000
Pointe gaz	65 000

## 5.2. Quelles aides pour un dispositif de stockage ?

Le Fonds Chaleur, mis en place par l'ADEME, permet de diffuser des solutions de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables et de récupération jugées techniquement matures. Il apporte des aides à l'investissement pour obtenir une compétitivité économique par rapport aux systèmes basés sur des énergies conventionnelles. L'aide aux réseaux en création ou extension est ainsi conditionnée au fait que le réseau soit alimenté globalement, extension comprise, au minimum par 50% d'EnR&R<sup>1</sup>.

Dans la perspective de progresser sur la connaissance des technologies en devenir et de les porter vers une plus large diffusion en cas de performances avérées, l'ADEME lance depuis plusieurs années un appel à projet pour les « Nouvelles Technologies Emergentes » (NTE). L'appel à projet NTE vise à obtenir un retour d'expérience consolidé sur certaines opérations « pilotes » suffisamment instrumentées.

Les projets attendus en 2016 concernent les nouvelles technologies en liens avec l'énergie solaire, la géothermie, la combustion de la biomasse, le couplage de ces énergies aux réseaux de chaleur, et les projets combinant l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés existants et l'introduction de sources d'énergies renouvelables.

Les projets de stockage sur réseaux de chaleur sont également éligibles à l'appel à projet NTE. **L'appel à projet sera relancé en 2017 pour les projets suivants :**

« Systèmes de stockages de chaleur couplés à des réseaux de chaleur visant à effacer des consommations d'appoint fossile et/ou optimiser les productions EnR&R. »

**Type :** Sensible par hydro-accumulation / Latent par matériaux à changement de phase

**Technologie :** Réservoir sensible aérien ou enterré / Réservoir de type « thermocline » / Stockage en fosse.

**Fonction :** Stockage horaire/ journalier/ hebdomadaire /inter saisonnier /multifonction.

Lien de l'appel à projet : <https://appelsaprojets.ademe.fr/aap/NTE%2020162016-36>

De plus amples renseignements sur les dispositifs d'aide généraux sont disponibles sur la FAQ<sup>2</sup> du site internet d'AMORCE. Ils exposent les dispositifs d'aides présentés ci-dessous de manière plus précise et détaillent leurs conditions respectives.

- Aides européennes :
  - Programmes cadres **Horizon 2020** et **LIFE**.
  - Fonds structurels **FEDER** et **FEADER**

<sup>1</sup> Source : ADEME – Fonds chaleur 2016

<sup>2</sup> <http://www.amorce.asso.fr/fr/reseaux-de-chaleur/foire-aux-questions/>

- **Banque européenne des investissements** par le biais de « **prêt intermédiés** »
- Aides nationales
  - **Fonds chaleur**
  - **Fonds d'aide à l'investissement local**
  - Les crédits du **Programme d'Investissement d'Avenir (PIA)**
  - **Les prêts à taux bonifiés** de la caisse des dépôts et des consignations
  - Les crédits du **Fonds de financement de la transition énergétique**
  - La **TVA à taux réduit de 5,5%** sur la fourniture d'énergie pour les réseaux de chaleur alimentés par au moins 50% d'EnR&R.
  - Les **compléments de rémunération** et **appels d'offres CRE** pour l'achat d'électricité issue des cogénérations (UIOM, biomasse et gaz).
  - Les **aides des Conseils régionaux**
  - Les **aides des Conseils départementaux**
- Aides au développement
  - Le **Crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE)**
  - L'**Éco-prêt à taux zéro (Eco-PTZ)**
  - Les **Certificats d'Économie d'Énergie (CEE)**

## 6. RETOURS D'EXPÉRIENCES

### 6.1. Quel développement en Europe?

Avec des projets en développement depuis une vingtaine d'années déjà, plusieurs pays d'Europe (Allemagne, Pays-Bas, Suède, Danemark, Italie, etc.) bénéficient déjà d'un certain retour d'expérience sur les réseaux de chaleur couplés avec un stockage thermique. 3 retours dans 3 pays différents sont développés dans cette partie, bien qu'un certain nombre d'exemples aient déjà été intégrés entre les lignes de ce rapport.

#### ➤ Le cas de l'Allemagne

Depuis 1996, l'Allemagne a lancé une série d'installations pilotes de stockages inter-

#### CRAILSHEIM - Réseau de chaleur solaire

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

4 100 MWh/an

Type de stockage :

Sondes géothermiques

Volume du stockage :

37 500 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

50%

Autre :

Stockage appoint de 100+480 m<sup>3</sup>  
PAC de 480kW

#### MUNICH - Réseau de chaleur solaire

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

2 300 MWh/an

Type de stockage :

En réservoir

Volume du stockage :

5 700 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

47%

Autre :

PAC de 1,7 MW

#### EGGENSTEIN - Réseau de chaleur solaire

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

1 150 MWh/an

Type de stockage :

En fosse eau/gravier

Volume du stockage :

4 500 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

37%

#### ROSTOCK - Réseau de chaleur solaire

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

497 MWh/an

Type de stockage :

En aquifère

Volume du stockage :

20 000 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

49% en 2003

Autre :

Stockage appoint de 30 m<sup>3</sup>

saisonniers sur son territoire. Les 4 différentes technologies de stockage sensible introduites dans la seconde partie de ce rapport y sont représentées. La plupart de ces installations concernent la valorisation de systèmes solaires thermiques. 4 réseaux ont été sélectionnés et regroupés dans cette section pour y être mis en lumière.

### ➤ Le cas du Danemark

Tout comme l'Allemagne, le Danemark utilise le stockage pour valoriser l'énergie solaire de ses réseaux de chaleur. Avec plus de 800 000 m<sup>2</sup> de capteurs thermiques installés en 2015 sur ses réseaux, plusieurs projets de stockage ont vu le jour depuis une vingtaine d'années.

#### VOGENS - Réseau de chaleur solaire

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

28 000 MWh/an

Type de stockage :

En fosse

Volume du stockage :

203 000 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

Près de 50 %

Autre :

Couplage avec PAC

#### MARSTAL - Réseau de chaleur solaire et biomasse

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

28 000 MWh/an

Type de stockage :

En fosse

Volume du stockage :

75 000 + 10 000 m<sup>3</sup>

Taux de couverture solaire :

Jusqu'à 50 %

Autre :

Couplage avec PAC de 1,5 MW

### ➤ Le cas de Turin, Italie :

Le réseau de chaleur de Turin comporte plus de 53 km de canalisations aller-retour pour 580000 habitants desservis<sup>1</sup>. 3 unités de cogénérations (90% de rendement) sont valorisées à travers le couplage avec 3 systèmes de stockage de 12 500 m<sup>3</sup> en réservoirs pressurisés. Sur la saison 2013/2014, 178 GWh, soit près de 10% de l'énergie totale produite, a transité par une des cuves de stockage.

4 nouveaux projets de stockage sont en cours pour un ajout de 8 700 m<sup>3</sup> supplémentaires.

#### TURIN - Réseau de chaleur à cogénération gaz

Energie délivrée par le réseau de chaleur :

2 300 GWh/an

Type de stockage :

Réservoirs pressurisé

Taux d'énergie stockée :

Jusqu'à 10 % de l'énergie totale produite

Volume des stockages :

12 500 m<sup>3</sup> + 8 700 m<sup>3</sup> à venir

<sup>1</sup> Source : IREN

## 6.2. Quel développement en France ?

Actuellement, très peu de réseaux de chaleur français possèdent un système de stockage thermique.

On recense un stockage inter-saisonnier en aquifère, à Boulogne Billancourt, sur la ZAC Segion-Rives de Seine. Il existe également des petits stockages en chaufferies, ou décentralisés dans les sous-stations installées en pied d'immeuble, et servant à lisser les appels de puissance. Le réseau de chaleur solaire-bois de l'éco-quartier de Vidailhan-Balma, en Haute-Garonne, possède ainsi un stock<sup>1</sup> de 8 m<sup>3</sup> décentralisé, installé en sous-stations d'immeubles.

Dans la banlieue de Nancy, le lycée des métiers du BTP Emmanuel-Héré de Laxou a mis en place une récupération de l'eau chauffée par 90 m<sup>2</sup> de capteurs solaires pour répondre aux besoins de chauffage de ses locaux. Une cuve enterrée de 600 m<sup>3</sup> (investissement de 0,7 M€<sup>2</sup>) permet de stocker la chaleur entre mai et septembre, puis de la restituer en hiver via une pompe à chaleur. Ce système, bien que très proche du sujet de ce rapport, n'est cependant pas connecté à un réseau de chaleur urbain.

De même, on trouve également un stockage en cuve de 3000 m<sup>3</sup> à Pontenx-les-Forges dans les Landes sur un réseau alimentant 10ha de serres agricoles, mais ce stockage n'est pas connecté à un réseau de chaleur urbain non plus.

En retard par rapport à ses voisins européens, la France va voir un de ses premiers projets de stockage thermique à grande échelle sur un réseau de chaleur naître prochainement à Brest en cette année 2016.

### LE STOCKAGE THERMIQUE DE BREST : AU PLUS PRÈS DU CONSOMMATEUR

Le réseau de chaleur de Brest a livré 104 GWh en 2015, pour un mix à 92% issu d'une UIOM. Suite à la volonté d'extension de celui-ci, l'ajout d'un système de stockage en réservoir atmosphérique de 1000 m<sup>3</sup> a été programmé pour 2016.

La demande intermittente du réseau, due notamment aux phases de fonctionnement des bâtiments tertiaires, administratifs et d'enseignement raccordés, a semblé particulièrement appropriée à l'intégration d'un stockage. Le dispositif sera ainsi intégré à proximité d'un gros consommateur du réseau, afin de lisser les forts appels de consommation, tout en satisfaisant la demande en chaleur du client.

Capacité de stockage : 17 MWh

Puissance : 5 MW

Bilan prévisionnel :

- 2500 MWh/an d'EnR&R supplémentaires valorisées
- 12 700 tCO<sub>2</sub> économisées et 4 470 tep substituées sur 20 ans

Budget prévisionnel : 1 490 k€ dont 670 k€ de subventions



<sup>1</sup> Source : Centre de ressources pour la chaleur renouvelable et l'aménagement énergétique des territoires (CEREMA)

<sup>2</sup> Source : Le stockage souterrain d'énergie thermique dans le contexte de la transition énergétique, INERIS, 2015

## SYNTHÈSE

---

Pour atteindre les objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour les réseaux de chaleur (multiplication par 5 de l'énergie renouvelable et de récupération distribuée par ceux-ci d'ici 2030) et plus généralement pour soutenir la politique nationale énergétique (32% de l'énergie finale consommée renouvelable en 2030), la France doit inventer des systèmes nouveaux et développer les systèmes existants à même de soutenir sa transition écologique.

Dans un souci d'optimisation des réseaux de chaleur ayant une consommation fortement fluctuante dans la journée et entre les saisons, et dans le but particulier de faciliter l'adaptation des moyens de production d'EnR&R intermittents, les technologies de stockage thermique présentent des avantages non négligeables.

Le stockage thermique dans les réseaux de chaleur consiste à accumuler la chaleur excédentaire produite lors d'un instant donné, et à la restituer lorsque la demande sur le réseau sera plus forte. Ce déphasage, introduit entre production et consommation sur le réseau, peut se faire sur différentes échelles de temps, avec des stockages journaliers, hebdomadaires ou inter-saisonniers.

Chaque territoire ayant ses spécificités, un stockage thermique pourra être réalisé sous plusieurs formes, en fonction de la temporalité souhaitée, de l'implantation spatiale sur le réseau, de la quantité d'énergie à stocker, de la typologie du terrain, etc. De ce fait, 4 grandes familles de stockage sont actuellement technologiquement mûres et développées sur les réseaux à travers le monde : les stockages en réservoir, en fosse, dans le sol, et dans les aquifères.

Le stockage est encore peu développé en France par rapport à ses voisins européens, avec un des premiers projets de stockage à grande échelle en cours à Brest, et quelques rares projets comportant des petits stockages décentralisés (Eco-quartier de Vidailhan-Balma par exemple). Et pourtant, les avantages inhérents au stockage dans les réseaux de chaleur sont nombreux, et ont déjà su faire leurs preuves depuis plusieurs années dans plusieurs pays (Allemagne, Pays-Bas, Suède, Danemark, Italie, etc.), avec en particulier les enjeux suivants :

- Le lissage des pointes de production, de consommation et de transport
- Une augmentation de la puissance apparente des installations fonctionnant en base sur le réseau
- Une diminution des puissances de production installées sur le réseau
- Des économies sur les coûts de maintenance, les coûts d'investissement, les coûts énergétiques et les coûts de démarrage liés aux installations de production d'appoint
- Une amélioration des rendements de fonctionnement des générateurs et un allongement de la durée de vie des équipements, par un fonctionnement à puissance nominale plus régulier
- Une forte intégration d'énergies renouvelables et de récupération, intermittentes ou non, et par conséquent une diminution des émissions de gaz à effet de serre émis par le réseau
- Une valorisation plus importante de la cogénération par un pilotage plus en lien avec les marchés de l'électricité
- Une sécurisation de la fourniture d'énergie, à condition que le dispositif de stockage soit plein

## BIBLIOGRAPHIE

---

### Documents Utiles

- *Étude sur le potentiel du stockage d'énergie* – Rapport d'étude; ATEE/ADEME/DGCIS, 2013
- (1) *Solar district heating guidelines, collection of fact sheets WP3 – D3.1 & D3.2* ; Solar District Heating – 2012 (en anglais)
- Le stockage souterrain d'énergie thermique dans le contexte de la transition énergétique, INERIS, 2015
- *The future role of thermal energy storage in the UK Energy systems : an assessment of the technical feasibility and factors influencing adoption, Reasearch Report* ; P. Eames, D. Loveday, V. Haines, P. Romanos ; UKERC-UK Energy Research Centre ; 2014 (en anglais)
- *The potential for thermal storage to reduce the overall carbone emissions from district heating systems* ; M. Martin, P. Thornley ; Tyndall Centre for Climate Change Research ; Working paper 157, 2013 (en anglais)

### Sites Utiles

- Fiches projet explicatives du Solar Heating and Cooling Programme (International Energy Agency) :  
<http://task45.iea-shc.org/fact-sheets> (en anglais)
- Le site du projet européen Solar District Heating (<http://solar-district-heating.eu>) auquel AMORCE a participé comporte de nombreux exemples de projets de stockage sur réseaux solaires thermiques. Pour accéder à la liste des grande centrales européennes :  
<http://solar-district-heating.eu/ServicesTools/Plantdatabase.aspx> (en anglais)
- Le site de Solites, Institut de recherche de la fondation Steinbeis pour les systèmes thermiques solaires et durables :  
<http://www.solites.de/english/Homepage.aspx> (en anglais)

### Pour aller plus loin...

- *The HIGH-COMBI project : High solar fraction heating and cooling systems with combination of innovative components and méthodes* ; V. N. Drosou, P. D. Tsekouras, T. Oikonomou, P. Kosmopoulos, C. Karytsas ; Renewable and Sustainable Energy Review 29 (2014), p. 463-473
- *Summary description of the SUNSTORE 4 plant in Marstal* – PlanEnergi – 2013
- *The central Solar Heating Plant with Aquifer Thermal Energy Store in Rostock – Results after four years of operation* ; T. Schmidt, H. Müller-Steinhagen ; Eurosun 2004 – the 5th ISES Europe Solar Conference, 2004
- Des exemples de projets allemands et européens de stockages thermiques dans les réseaux de chaleur (en allemand) :  
<http://www.saisonalspeicher.de/>

