

# ÉTUDE DE VALORISATION DU STOCKAGE THERMIQUE ET DU POWER-TO-HEAT

Novembre 2016

N° de contrat : 1514C0168

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et l'ATEE par le groupement ARTELYS,  
ENEA CONSULTING et le BRGM

**Coordination technique :** CANAL Patrick - **ATEE**  
GERBAUD Manon - Service Réseaux et Energies Renouvelables, Direction Production et  
Energies Durables, **ADEME**



---

**SYNTHESE D'ETUDE**

En partenariat avec :



## Avant-propos

Cette étude est financée par l'ATEE et l'ADEME dans le cadre de réflexions sur le développement de la filière de stockage de chaleur et du power-to-heat. Les travaux ont été cofinancés par dix acteurs industriels référents (Air Liquide, CPCU, Dalkia, EDF, Eiffage Énergie, Engie, Enedis, IFP Énergies Nouvelles, Inélia et RTE) représentés par l'ATEE. L'étude a été coordonnée par l'ATEE et les décisions relatives à l'étude ont été prises au sein du Comité de pilotage (COFIL) constitué par les représentants de l'ADEME, les industriels cofinanceurs et le Consortium de réalisation.

Les éléments présentés dans ce rapport, ainsi que leur interprétation, sont l'aboutissement des travaux réalisés par Artelys, ENEA Consulting et le BRGM en concertation avec les membres du COFIL, mais n'engagent aucunement individuellement les acteurs industriels du consortium. Notamment, les scénarios de mix énergétique 2030 étudiés ont été élaborés à partir d'exercices prospectifs réalisés indépendamment par RTE et ENTSO-E et ne reflètent pas nécessairement la vision de ces acteurs ni des acteurs privés.

## Auteurs

Les travaux ont été réalisés par les personnes suivantes :

- | Modélisation des systèmes énergétiques, quantification, calculs économiques (Artelys) : Sylvain Mouret, Maxime Chammas, Pierre Attard
- | Prospective sur les technologies de stockage, analyse financière et études de cas (ENEAA) : Jacques de Bucy, Hugo Lochmann, Loïc Le Gars, Luc Payen
- | Expertise sur les technologies de stockage en sous-sol (BRGM) : Hervé Lesueur

**Artelys** est une entreprise spécialisée en optimisation, prévision et aide à la décision. À travers la réalisation d'une centaine d'études et de projets logiciels dans le domaine de l'énergie, Artelys est un acteur de référence en optimisation et analyse technico-économique de grands systèmes énergétiques. Artelys a notamment développé une suite logicielle, Artelys Crystal, dédiée à l'optimisation économique de la gestion et des investissements sur les systèmes énergétiques.

**ENEAA** est une société de conseil spécialisée sur les enjeux de l'énergie et du développement durable, leader sur le secteur industriel. De la stratégie à la mise en œuvre, ENEAA accompagne ses clients dans la transition énergétique, notamment quant à leur positionnement sur les filières innovantes telles que le stockage d'énergie.

L'expertise de la division Géothermie du **BRGM** couvre l'ensemble des formes de géothermies (géothermie à échangeurs fermés superficiels ou profonds, géothermie sur aquifères superficiels ou profonds, poreux perméables ou fracturés, géothermie en milieu faiblement perméable) et le stockage thermique souterrain.

## Résumé de l'étude

De nombreuses études abordent la question des besoins de flexibilités et de stockage pour le système électrique dans un contexte de développement des énergies renouvelables. Par exemple, l'étude sur le potentiel de stockage d'énergies<sup>1</sup>, lancée conjointement par l'ADEME, l'ATEE et la DGCIS<sup>2</sup>, a permis de démontrer l'intérêt du stockage pour favoriser l'insertion des énergies renouvelables fluctuantes, améliorer l'efficacité énergétique, apporter de la flexibilité aux systèmes énergétiques et renforcer la sécurité des réseaux. En complément de ces travaux, le stockage thermique et la conversion d'électricité en chaleur (« power-to-heat ») sont deux outils pouvant être utilisés pour poursuivre la décarbonisation du mix énergétique thermique français à moindre coûts tout en assurant sa flexibilité. Ils s'inscrivent plus globalement dans les réflexions sur les conversions et la synergie entre vecteurs énergétiques (chaleur et électricité). L'étude menée identifie des cas d'applications pour lesquels ces solutions techniques réduisent l'empreinte CO<sub>2</sub> des mix de chaleur, créent de la valeur pour la collectivité tout en étant opérées de façon rentable. Parmi ces cas d'application, on retient plus particulièrement le stockage de chaleur pour valoriser la chaleur fatale industrielle ou pour reporter le renforcement des réseaux de chaleur suite à des extensions ou à une densification. L'utilisation de pompes à chaleur sur les réseaux de chaleur et de chauffe-eau thermodynamiques domestiques s'est également révélée intéressante.

### Contexte et objectifs

La chaleur pèse pour environ la moitié des consommations d'énergie en France et représente un levier significatif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, par la production de chaleur renouvelable et de récupération (EnR&R). La France, en s'engageant de manière volontariste dans sa transition énergétique, s'est fixé des objectifs ambitieux en la matière dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie, notamment pour réduire la consommation d'énergies primaires et pour accroître la part EnR&R dans la production d'énergie. Le stockage thermique et le power-to-heat (P2H) sont des solutions techniques qu'il convient de mieux analyser pour évaluer leur contribution potentielle à la décarbonisation du mix thermique français, et ce pour l'ensemble de ses applications (domestique, industrielle, réseau de chaleur).

Cette étude a pour objectif d'évaluer le potentiel du stockage thermique et du power-to-heat en France et d'identifier les filières technologiques pertinentes d'ici à 2030. À cet effet, l'étude vise à quantifier la valeur de ces filières pour des applications jugées pertinentes. La valeur attendue de ces technologies réside dans la valorisation des surplus de chaleur ou d'électricité, l'arbitrage électrique sur le réseau et les économies d'investissement. Ainsi, le power-to-heat est étudié avec l'objectif de ne pas accroître les tensions sur le système électrique.

---

<sup>1</sup> ATEE, «Étude sur le potentiel de stockage d'énergies,» 2013.

<sup>2</sup> Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services

Au-delà de la quantification de cette valeur, l'étude vise également à identifier les modalités de mise en œuvre et conditions de rentabilité des technologies dans le cadre d'applications concrètes, ainsi que les perspectives de développement industriel liées au déploiement de ces filières.

## Méthode et limites de l'étude

La méthodologie utilisée pour l'analyse des cas d'étude repose sur les cinq piliers suivants :

- | **Estimation de la valeur du stockage et du P2H pour la collectivité** prenant en compte l'ensemble des coûts des systèmes de production envisagés (investissement, exploitation, maintenance, combustibles, etc.) pour l'ensemble des acteurs concernés.
- | **Optimisation conjointe du dimensionnement et de la gestion du parc énergétique** afin de déterminer l'arbitrage optimal entre coûts d'investissement et coûts opérationnels. Cette optimisation est réalisée au moyen du logiciel Artelys Crystal.
- | **Modélisation des fondamentaux du système électrique** français et européen permettant d'estimer le coût marginal de production d'électricité pour les cas d'étude impliquant les technologies combinant chaleur et électricité.
- | **Analyse de la rentabilité des projets de stockage ou de P2H** pour évaluer les conditions (typologie de projet, coût des technologies, prix de l'énergie) nécessaires à leur réalisation par les acteurs concernés.
- | **Évaluation du gisement technique** (potentiel de réplcation en France à l'horizon 2030) et **impact sur l'emploi**.

L'approche utilisée permet de réaliser une analyse des coûts et bénéfices de projets d'investissement en technologies innovantes. Elle présente cependant les limites suivantes :

- | Seule une partie des cas d'application des technologies de stockage thermique et P2H est abordée. Le stockage de froid n'est par exemple pas étudié.
- | Les hypothèses de coût des technologies de stockage et de P2H sont basées sur les coûts actuels des technologies les plus matures.
- | Pour les cas d'application combinant chaleur et électricité, une seule hypothèse de mix énergétique européen (prenant en compte les objectifs de la transition énergétique) est utilisée. Également, l'approche fait l'hypothèse d'un marché soumis à une concurrence libre et non faussée et peut négliger les effets de pouvoir de marché.
- | Les valeurs du stockage en termes de services de sécurisation de l'approvisionnement et services système (type effacement) pour le réseau électrique ne sont pas prises en compte. De la même façon, les régimes transitoires (infra-horaires) ne sont pas modélisés.

Face à la multitude d'applications possibles pour le stockage thermique et le P2H, l'étude est centrée sur 6 cas d'étude préalablement sélectionnés en concertation avec l'ADEME, l'ATEE et les industriels cofinanceurs de l'étude. Ces cas d'étude portent sur des applications aux réseaux de chaleur urbains, aux sites industriels auto-producteurs d'énergie, et à la production d'eau chaude sanitaire au moyen de chauffe-eau électriques (voir Figure 1). Les paragraphes suivants synthétisent les principaux résultats de simulation et les conclusions qui ont été tirées de ces différents cas d'étude.

Applications sur les réseaux de chaleur urbains

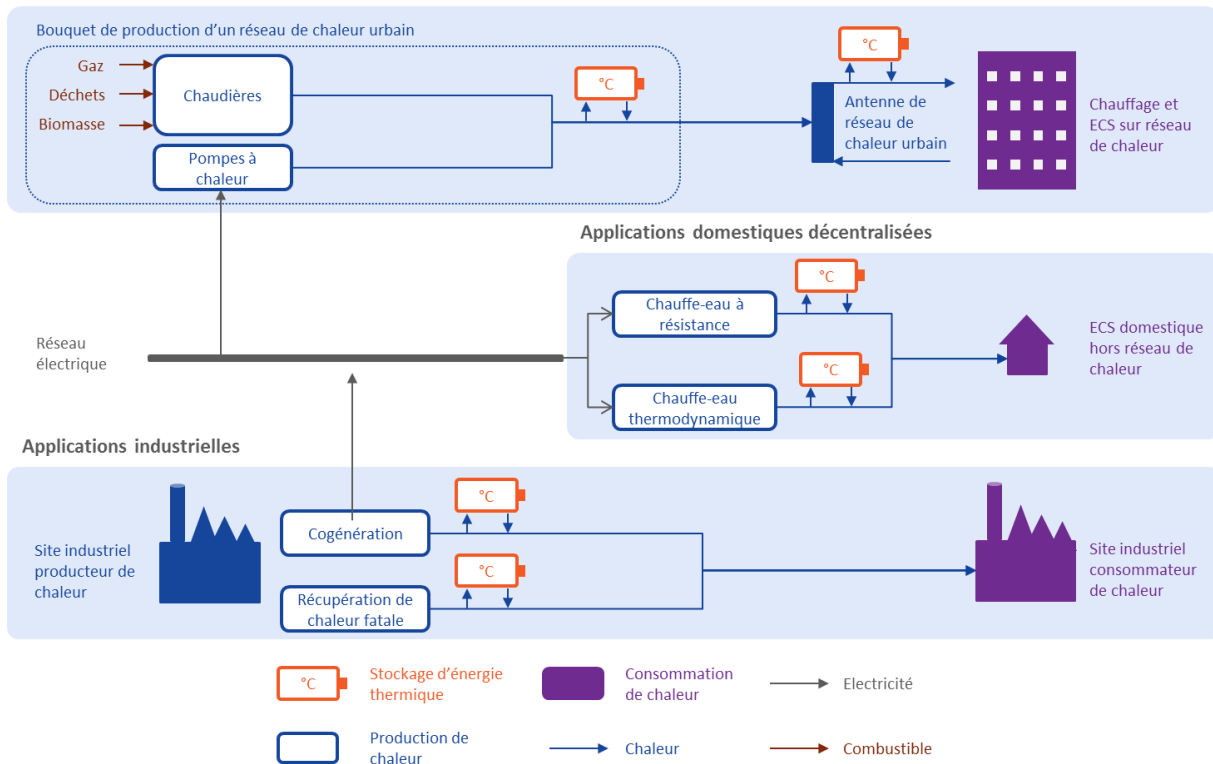


Figure 1. Schéma synoptique des cas d'application du stockage thermique et du power-to-heat étudiés

## Principaux résultats

### *Le stockage thermique et le power-to-heat pour accompagner l'augmentation de chaleur renouvelable fournie par des réseaux de chaleur urbains*

Les réseaux de chaleur urbains représentent un levier important pour l'augmentation de la part renouvelable dans la consommation de chaleur en France. La Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) fixe l'objectif de multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid renouvelable et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030. Cette croissance sera portée par l'augmentation de la part des EnR&R sur les réseaux de chaleur et par l'extension des réseaux existants ainsi que la construction de nouveaux réseaux. L'étude menée indique que le stockage thermique et le power-to-heat sont des solutions à mobiliser dans cette perspective.

**Face à une augmentation progressive de la demande sur un réseau de chaleur, le stockage thermique permet de reporter l'investissement dans un renforcement du réseau et dans les moyens de production.**

L'augmentation de la demande sur un réseau de chaleur suite à des extensions ou à une densification, peut engendrer des contraintes sur le réseau lors des pics de demande de chaleur. Le stockage (en aval des zones de contrainte) permet de lisser les flux de chaleur et de faire face au besoin de chaleur des différents clients.

Ceci tend à se vérifier pour des niveaux modérés d'augmentation de la demande, typiquement inférieurs à 10% dans les conditions d'analyse de cette étude, bien que ce niveau dépende fortement du profil de la demande ainsi que du coût du stockage. Ainsi, le stockage thermique se révèle particulièrement approprié dans les contextes où l'évolution quantitative et qualitative (fraction ECS, delta de température en augmentation...) de la demande à moyen terme est incertaine.

**Le stockage thermique apporte des services de flexibilité et de sécurisation au réseau de chaleur, et permet d'optimiser le pilotage des chaudières biomasse.**

L'exploitation optimale de chaudières biomasse implique de les maintenir dans un régime proche de leur puissance nominale et de limiter les phases d'arrêt et de redémarrage. Or, l'utilisation de chaudières biomasse sur un réseau de chaleur engendre souvent des périodes de surcapacité pendant lesquelles le stockage thermique permet d'exploiter les chaudières dans un régime de fonctionnement optimal. Le stockage peut également être envisagé pour réduire les coûts d'investissement des chaudières en utilisant une seule chaudière de capacité importante munie d'un stockage à cycle court au lieu de deux chaudières de plus faible capacité. Ce cas de figure peut toutefois entraîner un nombre élevé d'arrêts et redémarrages de la chaudière en été sauf dans le cas où la demande de chaleur comporte d'importantes variations infra-journalières. Ce cas de figure est *a priori* favorable aux réseaux desservant des bâtiments dont les besoins en chauffage sont faibles relativement à la consommation d'eau chaude sanitaire (notamment nouveaux quartiers ou bâtiments isolés).

**Les pompes à chaleur peuvent être une solution intéressante et rentable pour alimenter les réseaux de chaleur en EnR&R en régime de base et de semi-base.**

Bien que les PAC soient surtout rentables lorsqu'elles sont utilisées en base, elles peuvent également couvrir une part très importante de la demande en énergie d'un réseau de chaleur et assurer, par exemple, 60% d'EnR&R, à condition qu'un gisement de chaleur suffisant soit disponible. En revanche, leur utilisation pour de la semi-pointe ou de la pointe, en arbitrage face à de la chaleur gaz en période hivernale, n'est pas rentable dans les conditions actuelles de coût des PAC car le nombre d'heures de fonctionnement est trop faible pour amortir les coûts d'investissement importants de cette technologie. À l'horizon 2030, l'effet cumulé d'une élévation du prix du gaz et d'une taxe CO<sub>2</sub> portée à 100 €/t est toutefois susceptible de rendre les PAC rentables en régime de semi-pointe pour accompagner la décarbonisation du mix des réseaux de chaleur.

Le contexte local et le niveau de prix de l'électricité et de la biomasse à horizon 2030 peuvent impacter de façon significative la compétitivité des PAC pour les opérateurs de réseau de chaleur comme moyen de production d'énergie renouvelable par rapport aux chaufferies bois.

**Le stockage thermique permet d'optimiser et de sécuriser les performances des pompes à chaleur (PAC) mais n'offre pas d'opportunité d'arbitrage sur les prix d'électricité si l'écart infra-journalier n'est pas suffisant.**

L'efficacité énergétique d'une pompe à chaleur (coefficient de performance, ou COP) est un paramètre critique pour la rentabilité des PAC. Dans les conditions de modélisation de l'étude, réduire le COP de

3 à 2,5 peut annuler la rentabilité des PAC par rapport à la biomasse<sup>3</sup>. À l'inverse, une augmentation du COP au-delà de 4,5 permettrait de rentabiliser les PAC par rapport à la chaleur gaz. L'utilisation d'un stockage eau chaude permet de maintenir un COP élevé en stabilisant le niveau de température à la source froide ainsi qu'en maximisant le temps de fonctionnement de la PAC à son point nominal.

Dans les conditions de modélisation de cette étude, l'ajout d'un stockage d'eau chaude pour maximiser la production des PAC aux heures d'électricité moins chère apporte peu de valeur, voire aucune dans le cas d'un stockage thermique saisonnier. Ceci est principalement dû aux faibles écarts journaliers des prix de l'électricité modélisés à l'horizon 2030 ainsi qu'aux coûts d'investissement additionnels engendrés par un éventuel surdimensionnement des PAC.

**La valeur et le potentiel de déploiement des solutions de stockage thermique et de power-to-heat sont fortement liés aux niveaux de température des réseaux de chaleur.**

Pour valoriser des gisements de chaleur importants mais à faible température tels que l'eau de mer, les réseaux d'assainissement ou les stations d'épuration, tout en maintenant un COP élevé, les PAC devront être installées sur des réseaux de chaleur à basse voire très basse température (55 à 70°C). Aussi, le potentiel de déploiement significatif des PAC sur les réseaux de chaleur urbains dépend fortement du développement des réseaux à ces niveaux de température.

Les gisements géothermiques semi-profonds à profonds (500 – 2 000 m) présents sur une large partie du territoire français (notamment les bassins parisien et aquitain) et la chaleur fatale industrielle représentent un potentiel élevé *a priori*. Toutefois, l'étude de leur gisement n'a pas été réalisée du fait de leur technicité et particularité (ressources géologiques, localisation des usines).

Pour les technologies de stockage sensible telles que l'eau chaude, l'écart des niveaux de température sur le réseau de chaleur impacte fortement la quantité d'énergie stockable par unité de volume. Aussi, l'augmentation de cet écart de température, par la diminution de la température de retour du réseau, réalisée grâce à des mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments et sous-stations raccordés, augmentera directement la valeur des dispositifs de stockage sensible, y compris ceux installés antérieurement à ces évolutions.

### *Le stockage thermique pour valoriser la chaleur fatale industrielle*

La récupération et la valorisation de la chaleur fatale industrielle est un levier incontournable de réduction des consommations d'énergie dans l'industrie. On estime à 51 TWh<sub>th</sub>/an le gisement chaleur fatale industrielle actuellement disponible à plus de 100°C, dont 2,27 TWh<sub>th</sub>/an récupérable à haute température, pour produire de la vapeur<sup>4</sup>. Cette étude se focalise sur le gisement à haute température (entre 200 et 350°C), énergie thermique de haute valeur mais dont les coûts de récupération sont plus élevés que pour de la chaleur à basse température.

---

<sup>3</sup> Dans le cadre de l'étude, les PAC aérothermiques n'ont pas été prises en compte.

<sup>4</sup> ADEME, «La chaleur fatale industrielle,» Mars 2015.



**Le stockage thermique permet de valoriser de la chaleur fatale discontinue difficilement utilisable sans stockage, et de façon rentable pour les opérateurs lorsque les profils de chaleur fatale sont attractifs.**

On peut envisager deux types d'usage du stockage thermique pour valoriser de la chaleur fatale industrielle à haute température. En premier lieu, le stockage peut être utilisé comme moyen d'optimisation d'une récupération de chaleur fatale préexistante afin de maximiser la chaleur récupérée sur une source continue et satisfaire une demande fluctuante nécessitant une production de chaleur d'appoint (chaudière gaz). Dans ce cas d'application le stockage apporte de la valeur économique au système, principalement par la réduction des consommations de gaz initialement nécessaires pour assurer les pointes : le temps de retour d'un tel projet est d'environ 5 à 8 ans selon les conditions de modélisation utilisées dans cette étude.

En second lieu, le stockage peut être utilisé pour rendre exploitable une source de chaleur fatale discontinue en la restituant à puissance constante. En effet, la discontinuité d'un gisement de chaleur peut représenter une barrière pour sa valorisation auprès d'un agent économique externe tel qu'un opérateur de réseau de chaleur ou un consommateur de chaleur. Ce type d'usage du stockage à haute température est économiquement attractif pour de nombreuses configurations de profils de chaleur fatale, à condition que le dispositif de stockage cycle une fois par jour au minimum et que la marge d'achat-revente de la chaleur fatale soit supérieure à 25-30 €/MWh<sub>th</sub>.

L'intérêt du stockage thermique identifié dans cette étude pour la récupération de chaleur à haute température est également observable - *a priori* - sur les applications à plus faible niveau de température (inférieur à 200°C) pour lesquelles des technologies de stockage moins coûteuses peuvent être utilisées.

**Le développement des projets au-delà des niches rentables dès aujourd'hui passe par l'utilisation de tarifs de rachat de la chaleur fatale et l'accès à des solutions de financement à coût réduit.**

Les projets de stockage les plus rentables pour la chaleur fatale discontinue sont ceux qui valorisent de la chaleur disponible sur des cycles à forte fréquence et au cours desquels la durée de chaleur fatale disponible est élevée, c'est-à-dire lorsque le système de stockage est dimensionné en puissance plutôt qu'en énergie. Pour d'autres cas de figure le stockage pour la valorisation de chaleur fatale n'est pas nécessairement rentable face à la production de chaleur au gaz naturel. Les CAPEX liés à la récupération de chaleur, au système de stockage ou encore le type de profil de chaleur fatale peuvent rapidement dégrader la rentabilité des projets.

La mise en place de tarifs de rachat de chaleur fatale industrielle, l'application d'une taxe carbone aux combustibles utilisés dans l'industrie ou encore la réduction du coût du financement par des prêts à taux bonifiés ou par des fonds de garantie sont autant de mécanismes qui permettraient d'augmenter efficacement et de généraliser la rentabilité des projets.

## *Le stockage thermique pour la cogénération au gaz naturel*

Avec environ 4,7 GW<sub>e</sub> de puissance installée, la cogénération est une filière importante de production d'électricité en France. Grâce à une production combinée de chaleur et d'électricité à haut rendement énergétique, la cogénération est aussi une solution intéressante pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à la production indépendante de chaleur (chaudière au gaz) et d'électricité (centrale à cycle combiné au gaz). La cogénération permet également de limiter les pertes réseaux, surtout lorsque l'électricité produite est autoconsommée ou livrée à moyenne ou basse tensions. L'étude menée est centrée sur l'analyse de la flexibilisation de cet outil de production dans un contexte industriel (utilisation de la chaleur à haute température) via l'utilisation de stockage thermique. L'impact du contexte réglementaire et des mécanismes de soutien de la filière cogénération gaz sur la valorisation du stockage est également abordé.

### **Le stockage thermique permet de flexibiliser la production de chaleur de la cogénération et de réaliser de meilleurs arbitrages économiques sur le marché de l'électricité.**

Dans un contexte industriel dans lequel une chaudière gaz accompagne systématiquement la cogénération pour l'appoint de production, le stockage thermique à cycle court (d'une journée ou moins) peut être employé pour flexibiliser la cogénération. En premier lieu, le stockage permet d'augmenter la puissance de fonctionnement, voire d'éviter un arrêt de la cogénération durant les périodes de faible demande de chaleur. Également, le stockage permet de maximiser la production d'électricité lors des périodes de prix d'électricité élevés, indépendamment de la demande de chaleur. Dans les deux cas, le surplus de production de chaleur est stocké pour être restitué ultérieurement lors de périodes de prix d'électricité faibles ou d'arrêts de la cogénération.

Bien que leur valeur ne soit pas quantifiée, le stockage apporte des bénéfices opérationnels réels en permettant une utilisation plus stable et proche d'un régime nominal de l'unité de cogénération et en réduisant sensiblement le nombre de démarrages.

La valorisation technico-économique du stockage thermique se heurte néanmoins à des coûts d'investissement élevés dans le cas d'un usage à haute température, mais il est attendu que la valeur du stockage soit *a priori* plus élevée dans le cas d'une utilisation de la chaleur à basse température, en raison notamment de coûts de stockage notablement plus faibles.

### **Le complément de rémunération, dès lors qu'il préserve les signaux de prix de marché, permet une meilleure valorisation du stockage thermique.**

Le complément de rémunération est un mécanisme de soutien appliqué, entre autres, à la filière de cogénération. Il consiste en une prime versée pour la production d'électricité. Les mécanismes de complément de rémunération actuellement en vigueur reposent sur l'écart entre un prix cible fixé par filière et le prix de marché, auquel viennent s'ajouter les prix des certificats éventuels (par exemple certificat de capacité). L'étude menée consiste à analyser l'impact d'un dispositif sensiblement différent, permettant de préserver les signaux de prix de marché, sur la valorisation du stockage.

Un tel dispositif de complément de rémunération, contrairement aux mécanismes actuels, incite les exploitants de cogénération à mieux optimiser leur production électrique en fonction des conditions de marché. Dans ce contexte, le stockage thermique est un atout considérable pour augmenter la flexibilité et la rentabilité des installations de cogénération industrielles produisant de la chaleur à haute température.

### *Stockage thermique domestique et flexibilité du système électrique français*

Avec 12 millions de foyers équipés en chauffe-eau électriques individuels principalement à effet Joule, la consommation électrique liée à l'eau chaude sanitaire (ECS) domestique représente une part importante de la consommation électrique française avec 9 GW<sub>e</sub> de capacités installées. Le pilotage intelligent de ces capacités de stockage thermique est donc une source de flexibilité importante pour le réseau électrique. Ce cas d'étude porte sur l'impact d'un déploiement important de chauffe-eau thermodynamiques (CET) dans le bouquet de production d'ECS domestique sur la flexibilité du système électrique français.

#### **Les chauffe-eau thermodynamiques disposent d'un meilleur rendement énergétique mais le temps de chauffe est plus long.**

Comparativement aux chauffe-eau à résistance (CER) classiques, l'utilisation de technologies de pompe à chaleur dans les CET permet d'obtenir de meilleurs rendements énergétiques et donc une réduction de la consommation électrique globale. Néanmoins, le coût d'investissement est notablement plus élevé pour les CET, et les puissances installées plus faibles. Ainsi, le temps de chauffe du ballon est plus long par rapport aux CER, ce qui laisse moins de marge de manœuvre pour piloter et ajuster la consommation électrique pour les besoins du réseau.

#### **Le déploiement des CET n'induit pas d'impacts contraignants sur la flexibilité du système électrique français.**

L'étude menée se place dans le contexte des scénarios énergétiques Nouveau Mix de RTE (pour la France) et Green Transition d'ENTSO-E (pour le reste de l'Europe), ces scénarios traduisant la mise en œuvre effective des politiques énergétiques actuelles à l'horizon 2030.

En supposant que le parc de chauffe-eau électriques demeure constant, le déploiement de CET en remplacement des CER introduit une baisse très significative de la consommation électrique française aux heures où la demande globale est faible. En effet, les chauffe-eau (CER et CET) étant généralement activés durant ces périodes pour profiter des prix faibles de l'électricité, la consommation électrique est directement impactée par le rendement plus élevé des CET. Durant les périodes de pointe, la consommation électrique moyenne augmente légèrement car les CET doivent être activés plus longtemps au cours de la journée.

En conséquence, le remplacement des CER par des CET conduit à une baisse significative des prix de l'électricité en période de creux. En période de pointe, dans le contexte des hypothèses de mix énergétique de l'étude, aucun impact notable n'est observé sur les prix de l'électricité. Ceci traduit le fait que, dans le scénario envisagé, la baisse du service de flexibilité en puissance liée au déploiement

des CET n'est pas contraignante si le système électrique dispose de marges suffisantes (capacités de stockage et d'interconnexion, groupes de production flexibles, etc.).

### *Technologies : État des lieux et besoins*

Il existe trois grandes familles de technologies de stockage thermique : la « chaleur sensible » qui utilise la variation de température du médium de stockage, la « chaleur latente » qui exploite le changement de phase (liquide/solide) du médium et la « thermochimie » qui met en œuvre des réactions physico-chimiques.

Les trois familles couvrent une vaste gamme de température, du froid (températures inférieures à 0°C) aux très hautes températures (au-delà de 500°C). Cette étude se focalise sur les technologies et applications de stockage thermique à basse température (de 30 à 100°C) et à haute température (de 200°C à 350°C).

**Pour les cas d'usage envisagés dans cette étude, l'eau chaude (chaleur sensible) est aujourd'hui la technologie de référence pour les applications à basse température qui laissent toutefois une place aux technologies innovantes plus compactes.**

Pour les applications à basse température (ex : eau chaude sanitaire, réseau de chaleur urbain), la technologie de stockage d'eau chaude par chaleur sensible est de loin la plus compétitive car elle met en œuvre un médium de stockage et des équipements de charge et décharge matures et éprouvés. Le coût et la performance de cette technologie est fortement sensible à l'écart de température pratiqué entre la charge et la décharge ( $\Delta T$ ), ce qui renforce son intérêt dans la perspective d'un abaissement des températures de retour sur les réseaux de chaleur. Toutefois, cette technologie connaît deux limites : sa densité énergétique et son ratio puissance/énergie modérés (limités par la chaleur massique de l'eau). Pour les applications liées à l'ECS et aux réseaux de chaleur urbains, le développement de technologies plus compactes, bien que plus chères, pourra permettre de déployer du stockage thermique là où les contraintes physiques d'empreinte au sol ou de volume disqualifient l'eau chaude. En revanche, d'après la courbe de demande de chaleur des réseaux de chaleur urbains utilisée dans cette étude, les besoins des réseaux en matière de stockage ne semblent pas justifier le développement de technologies à fort ratio puissance/énergie (faible durée de décharge).

**Les développements en cours sur les technologies de stockage à haute température devront veiller à minimiser leurs coûts liés au stock en énergie et à optimiser leur ratio puissance/énergie selon les applications visées.**

Pour les applications à haute température (ex : cogénération, récupération de chaleur fatale industrielle), les trois familles de technologies présentent un intérêt selon le type de besoin (température, taille, ratio puissance/énergie). L'étude montre que le coût total du stockage est majoritairement impacté par la partie liée au stock en énergie (réservoir de stockage) comparativement aux équipements de puissance (charge et décharge de l'énergie). Aussi, certains cas d'applications industriels à haute température nécessitent de fortes puissances de charge et de décharge et un faible stock d'énergie, ce qui implique l'utilisation d'une technologie à fort ratio puissance/énergie.

**Les technologies de power-to-heat thermodynamiques sont aujourd'hui matures et efficaces pour la valorisation des sources d'EnR&R dans les applications à basse température, tant pour l'ECS que pour les réseaux de chauffage urbains.**

Durant les dernières décennies les solutions de power-to-heat thermodynamiques (pompes à chaleur) ont atteint une maturité commerciale, tant pour les solutions de l'eau chaude sanitaire que pour les applications sur les réseaux de chaleur urbains. Avec un coefficient de performance (COP) moyen égal ou supérieur à 3, les pompes à chaleur s'avèrent particulièrement efficaces pour la valorisation des sources d'EnR&R, et sont à ce titre préférables à l'effet Joule pour une utilisation sur les réseaux de chaleur urbains. Bien que des réductions de CAPEX soient encore envisageables sur les pompes à chaleur, c'est leur coût de raccordement à la source froide, peu compressible, qui contribue le plus fortement à l'investissement final. Aujourd'hui, les pompes à chaleur peuvent être utilisées pour des applications jusqu'à 120°C. Des développements récents ont permis de démontrer la faisabilité pour des applications industrielles à plus haute température. Une évaluation du potentiel des besoins de ce type d'applications en France serait opportun à cet égard.

### *Des filières génératrices d'emplois en France*

Les filières du stockage thermique et du power-to-heat impliquent la mobilisation d'emplois localisés en France, par la nature des technologies impliquées (ex : pompes-à-chaleur fabriquées en France) et des services associés (ingénierie, construction et installation). Ainsi, le développement de ces filières devrait générer des emplois localisés en France.