

Potentiels du stockage de chaleur et du power-to-heat en France

A D E M E



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





Contexte et objectifs de l'étude

- Contexte:
 - La chaleur représente la moitié des consommations d'énergie en France
 - La PPE vise à réduire la consommation d'énergie et accroître la part d'EnR&R
 - Stockage thermique et P2H sont des leviers potentiels pour décarboniser le mix thermique français
- Objectifs:
 - Quantifier la valeur de ces filières pour des applications jugées pertinentes
 - Valorisation de surplus de chaleur et d'électricité
 - Arbitrage électrique sur le réseau
 - Economies d'investissements
 - Déterminer les modalités et potentiels de déploiement de ces filières



L'étude se focalise sur 6 cas d'application

- Sélection des cas d'étude par le comité de pilotage composé de l'ATEE, de l'ADEME et des 10 industriels cofinanceurs
- Critères de sélection:
 - Cas susceptibles d'avoir un intérêt économique
 - Cas peu ou pas analysés à ce jour

ADEME

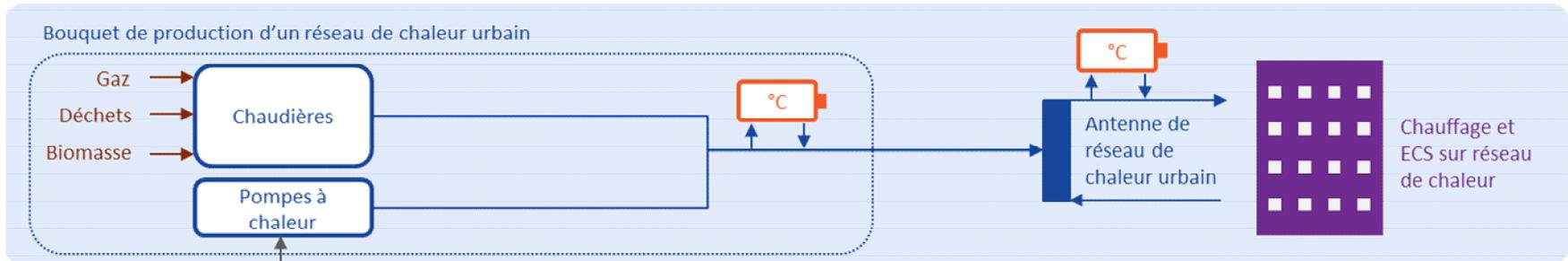


Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

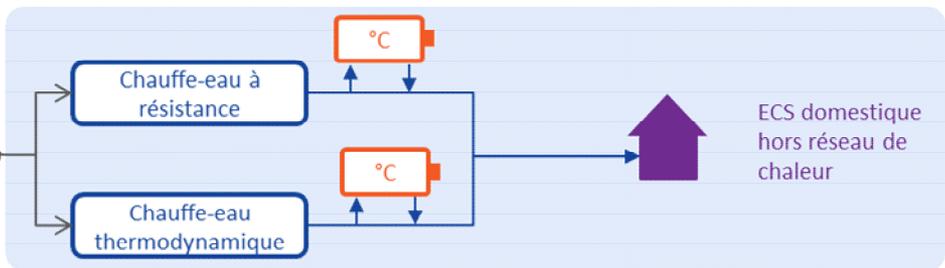




Applications sur les réseaux de chaleur urbains



Applications domestiques décentralisées



Applications industrielles





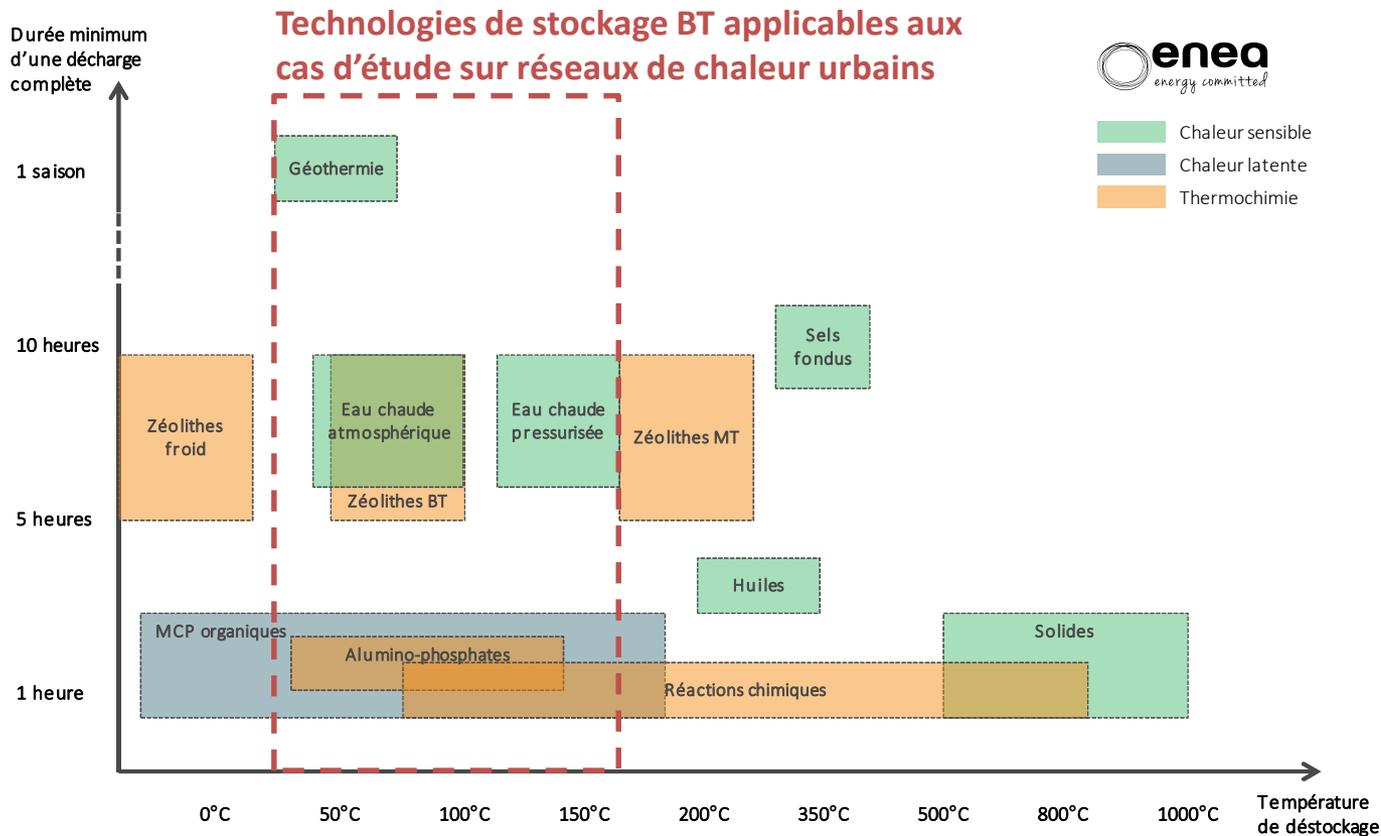
Cas d'étude sur réseaux de chaleur urbains

- Les réseaux de chaleur urbains représentent un vecteur de croissance pour la chaleur à basse température
- Le secteur est *a priori* favorable aux technologies de stockage et power-to-heat (profil de demande thermosensible avec fortes variations saisonnières)
- Trois cas d'étude sélectionnés
 - Dimensionnement de chaudières biomasse
 - Renforcement de réseau
 - Intégration de technologies de power-to-heat (couplage chaleur / électricité)
- Objectif de part d'EnR&R dans la production fixé à 60%



Cas d'étude sur réseaux de chaleur urbains

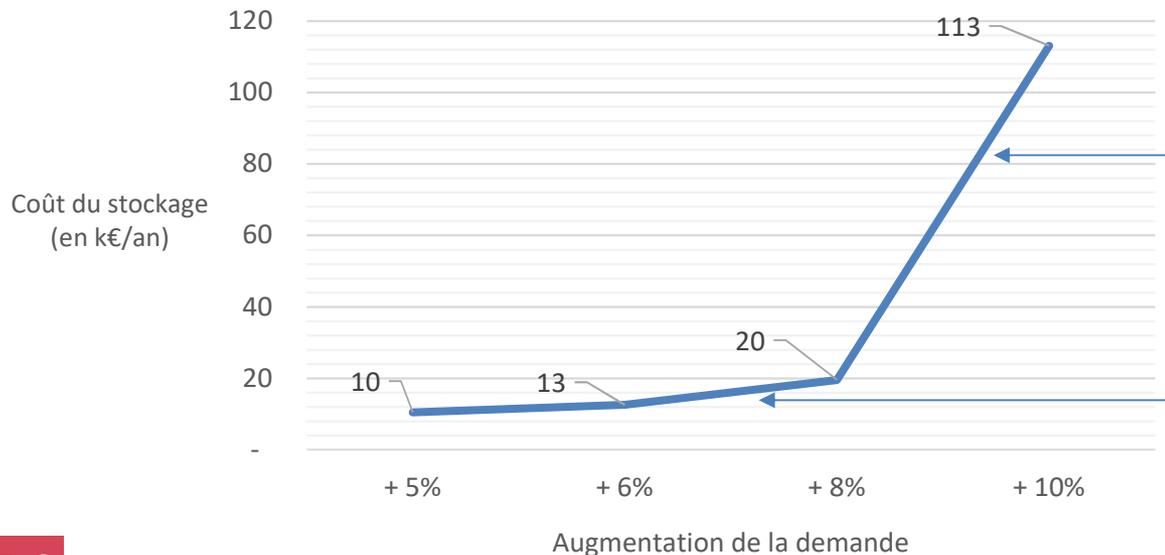
- Technologies de stockage envisagées:





Renforcement de réseau de chaleur

- Le stockage est utilisé lors d'une augmentation de la demande de chaleur sur le réseau, pendant les périodes de pointe:
 - Pour éviter la congestion du réseau
 - Pour augmenter la fourniture d'EnR&R sans investissement supplémentaire en chaudière biomasse



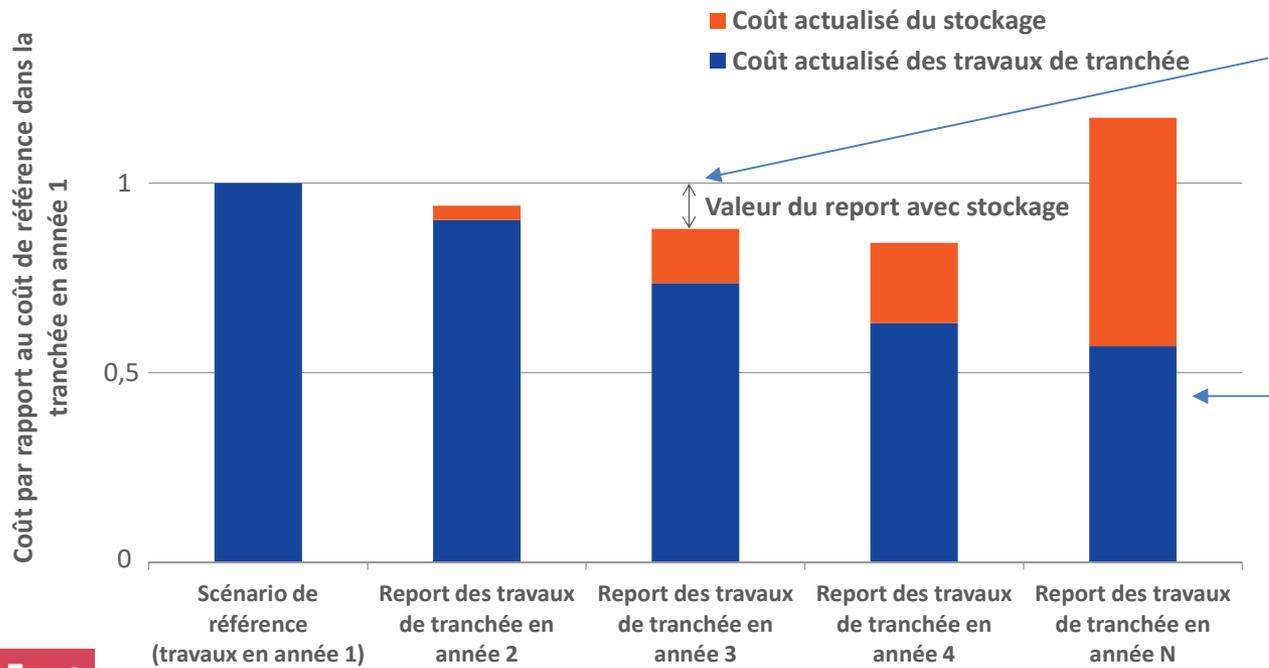
Au-delà d'un certain niveau d'augmentation de demande (ici 8%), la taille du stockage requis croît fortement, ce qui renchérit son utilisation.

Pour les faibles niveaux d'augmentation de la demande, le stockage permet de tenir les pics et la fourniture d'EnR&R sans investissement dans une rénovation de réseau ou de chaudière biomasse



Renforcement de réseau de chaleur

- On évalue la valeur du stockage en report d'investissement dans une rénovation du réseau pour éviter sa congestion
- Le stockage apporte de la valeur, même si la rénovation est réalisé à terme



Pour de faibles augmentations de la demande, installer un stockage pour reporter la rénovation est moins coûteux que de réaliser la rénovation en année 1

La valeur du stockage augmente avec la durée de report de l'investissement

Au-delà d'un niveau seuil d'augmentation de la demande, la taille du stockage à installer est trop importante, et donc trop coûteuse



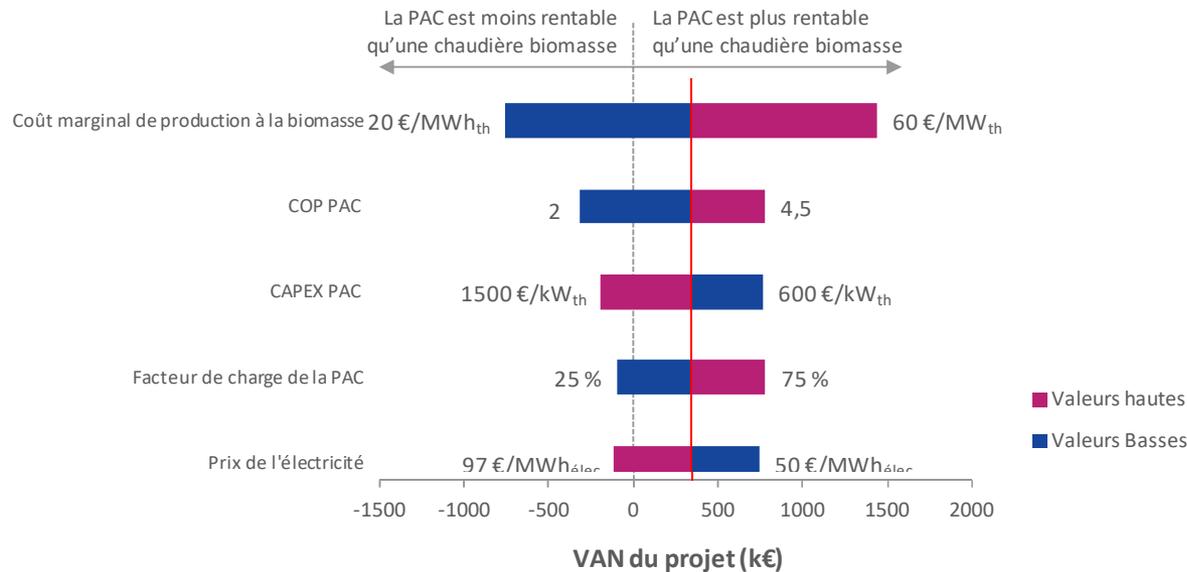
Renforcement de réseau de chaleur

- La valeur du stockage dépend de paramètres clés:
 - Le profil de demande de chaleur
 - Le coût du stockage (lié au niveaux de température pour l'eau chaude)
 - Le coût des travaux de rénovation du réseau
- Les technologies à haute densité pourraient être intéressantes en cas de forte contrainte d'implantation
- Environ 1 GWh_{th} de stockage pourrait être installé à horizon 2030 en France (selon le développement des réseaux)



Power-to-heat et réseau de chaleur

- L'analyse porte sur l'utilisation de PAC non géothermiques pour fournir 60% de chaleur renouvelable à un réseau, en alternative à de la biomasse



- Les pompes à chaleur sont rentables, dès aujourd'hui et dans les conditions de 2030

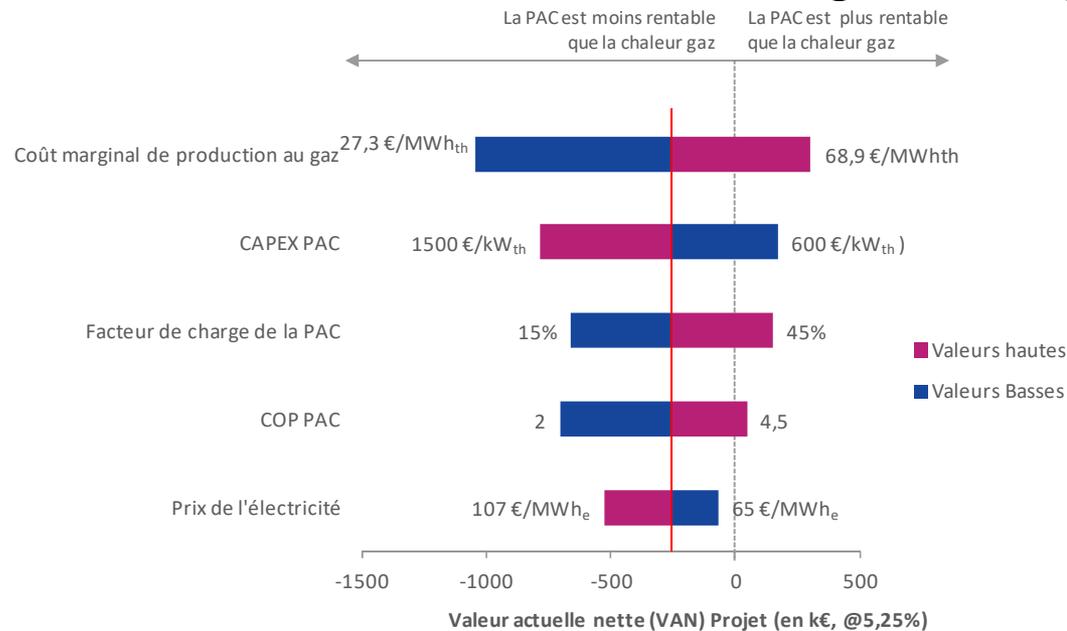


Hypothèses du cas nominal: CAPEX projet PAC 1000€/kW_{th}, facteur de charge moyen PAC 50%, COP moyen PAC 3, coût moyen électricité 75€/MWh_{élec}, CAPEX chaudière biomasse 500€/kW_{th}, coût variable chaleur biomasse 40€/MWh_{th}, WACC 5,25%



Power-to-heat et réseau de chaleur

- L'analyse porte sur l'utilisation de PAC non géothermiques pour fournir de la chaleur renouvelable à un réseau, en arbitrage face au gaz naturel



- Les PAC pourraient être rentables en semi-pointe face au gaz naturel à horizon 2030 (augmentation du prix du gaz et de la taxe carbone)

Hypothèses du cas nominal: CAPEX projet PAC 1000€/kW_{th}, facteur de charge moyen PAC 30%, COP moyen PAC 3, coût moyen électricité 75€/MWh_e, coût variable chaleur gaz 52€/MWh_{th}, WACC 5,25%



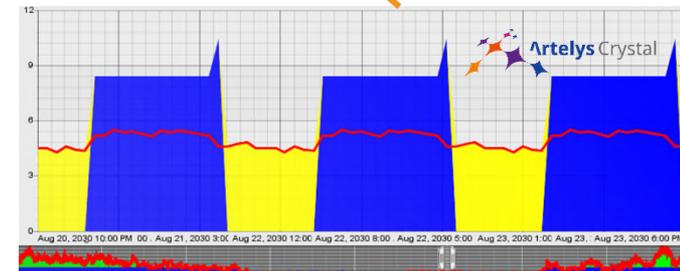
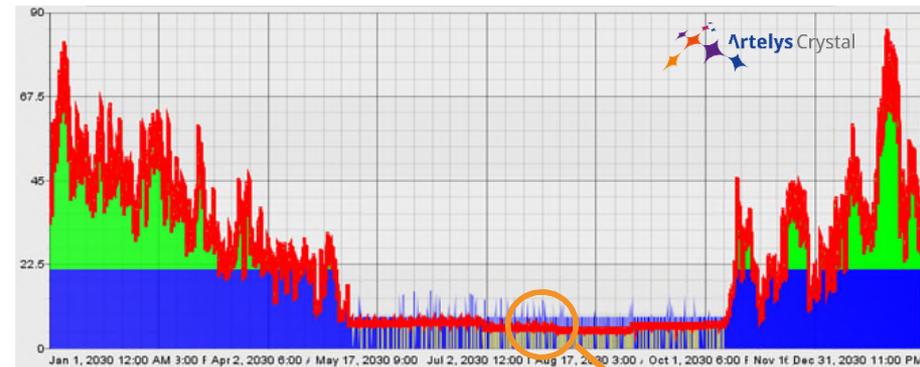
Power-to-heat et réseau de chaleur

- Le stockage couplé aux PAC permet d'augmenter leur performances mais n'apporte pas de valeur d'arbitrage sur les faibles variations de prix de l'électricité.
- La valeur des PAC et leur déploiement sont fortement liés à l'évolution des niveaux de température sur les réseaux.
- Le potentiel de développement des PAC sur réseau de chaleur est très important: près de 1 GW_{th} à horizon 2030 (hors géothermie).



Dimensionnement de chaudières biomasse

- Le stockage est utilisé pour flexibiliser une chaudière biomasse de grosse capacité pour suivre une demande de chaleur fluctuante
- Permet une baisse des CAPEX par rapport à l'installation de 2 chaudières biomasse de faible capacité
- Intérêt limité en raison de nombreux redémarrages de la chaudière en été

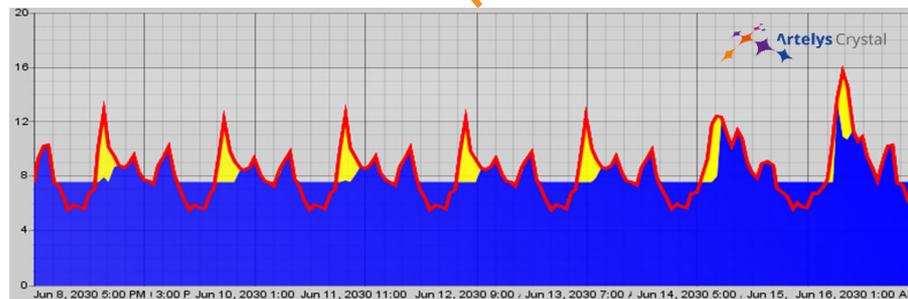
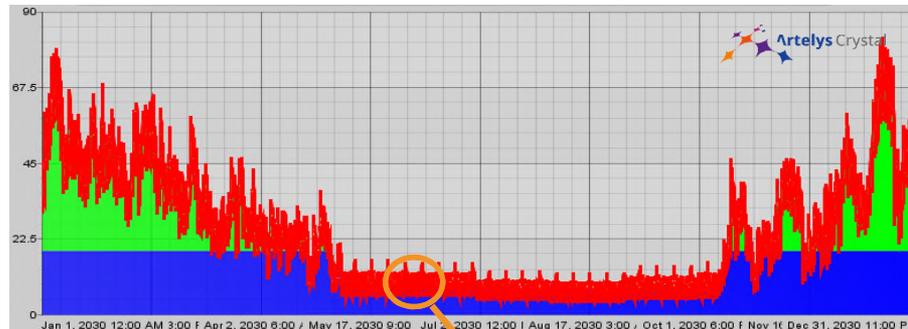


— Consommation ■ Chaudière gaz ■ Chaudière biomasse ■ Stockage



Dimensionnement de chaudières biomasse

- Deux facteurs peuvent favoriser l'utilisation du stockage :
 - Augmentation du delta de température, réduisant ainsi les coûts du stockage
 - Evolution du profil de demande de chaleur vers de plus fortes variations journalières (ex: augmentation de la part d'ECS)



— Consommation ■ Chaudière gaz ■ Chaudière biomasse ■ Stockage



Synthèse sur les réseaux de chaleur urbains

- Le stockage permet d'accompagner le développement des réseaux de chaleur
 - Flexibiliser et renforcer les capacités des réseaux à moindre coût
 - Minimiser les risques financiers de projets d'extension de réseaux dans des contextes incertains d'évolution de la demande
- Les pompes à chaleur permettent de poursuivre la décarbonisation des réseaux
 - Disposer d'une alternative aux UIOM et à la biomasse comme source d'EnR&R en régime de base
 - Réduire les consommations de gaz naturel en semi-pointe à horizon 2030



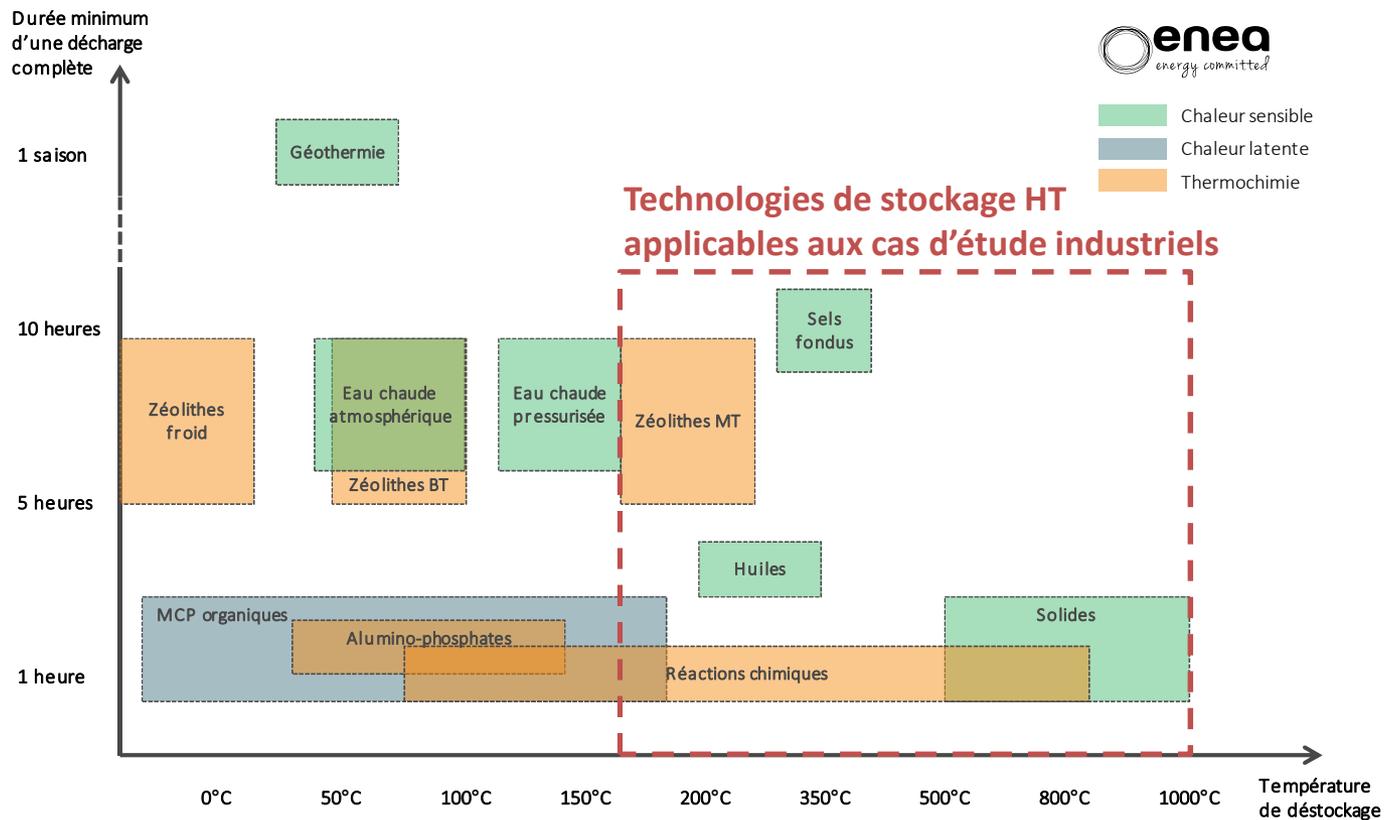
Stockage thermique en milieu industriel

- Consommation de chaleur au sein d'un complexe industriel (ex: éco parc)
 - Procédés industriels faisant usage de chaleur à haute température (vapeur d'eau)
 - Un profil de demande non-thermosensible avec faibles variations saisonnières
- Deux cas d'étude sélectionnés
 - Cogénération au gaz (couplage chaleur / électricité)
 - Récupération de chaleur fatale



Stockage thermique en milieu industriel

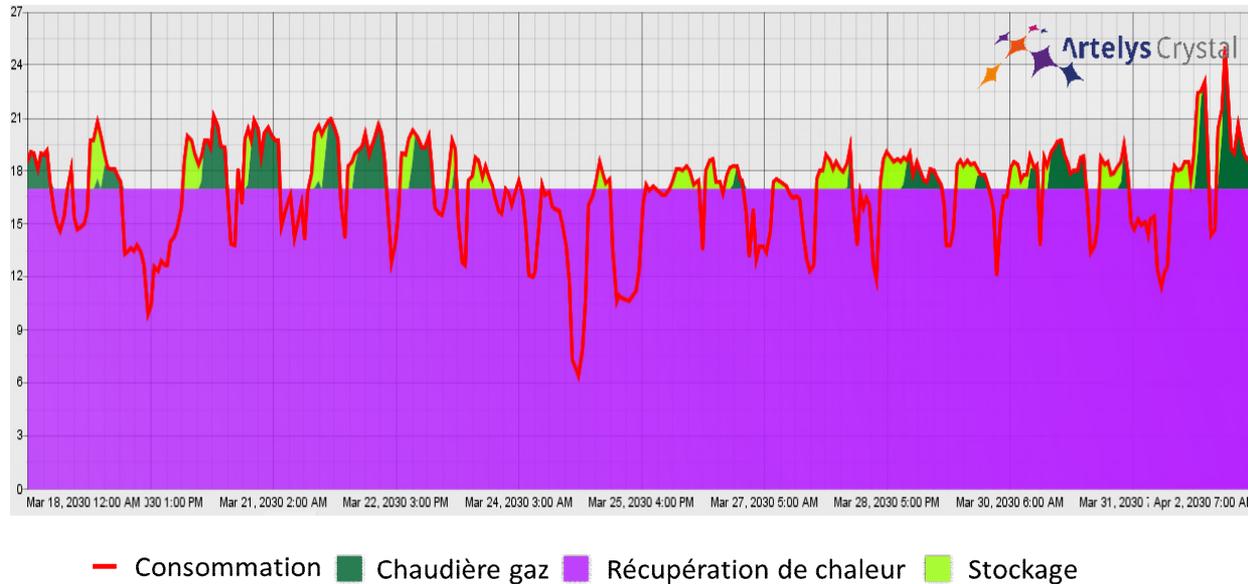
- Technologies de stockage envisagées:



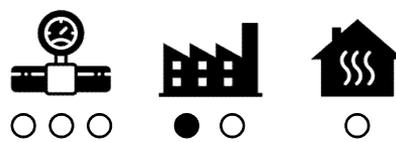


Stockage et récupération de chaleur fatale

- 1^{er} cas de figure: le stockage est utilisé pour maximiser la valorisation de chaleur fatale sur une chaudière de récupération préexistante

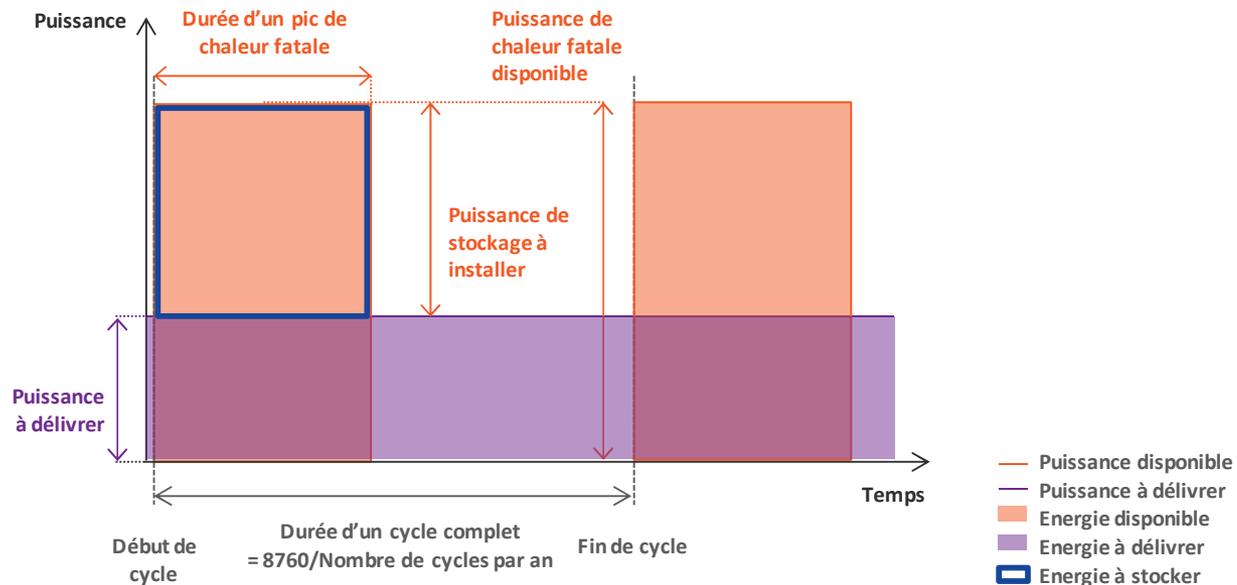


- Le stockage permet de réduire les consommations de gaz du site industriel (TRI de 5 à 8 ans dans les conditions de l'étude)

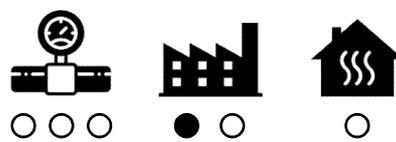


Stockage et récupération de chaleur fatale

- 2^{ème} cas de figure: le stockage est utilisé pour fournir un débit de chaleur stable à partir d'une source intermittente



- La récupération de chaleur avec stockage est rentable à partir d'un cycle par jour et d'une marge d'achat-revente de 30 €/MWh_{th}



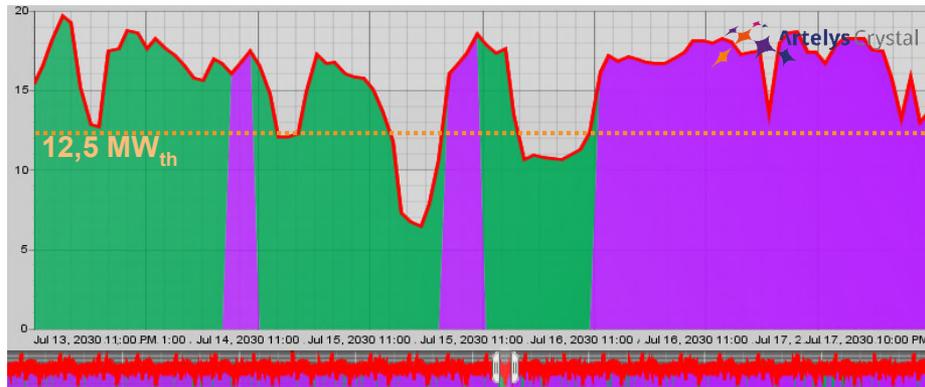
Stockage et récupération de chaleur fatale

- Le segment est porteur pour les technologies de stockage à haute température
- Le gisement de chaleur fatale industrielle en France est conséquent,
 - 7 TWh_{th}/an >350°C; 51 TWh_{th}/an <100°C
 - L'évaluation précise du potentiel du stockage requiert une étude au cas par cas
- Des mécanismes de soutien faciliteraient la mise en place de projets
 - Fonds de garantie pour palier les incertitudes liées au contexte industriel
 - Tarif de rachat ou premium et taxe carbone élevée (100 €/t_{CO2}) pour garantir la compétitivité de la chaleur fatale face au gaz naturel



Stockage et cogénération au gaz

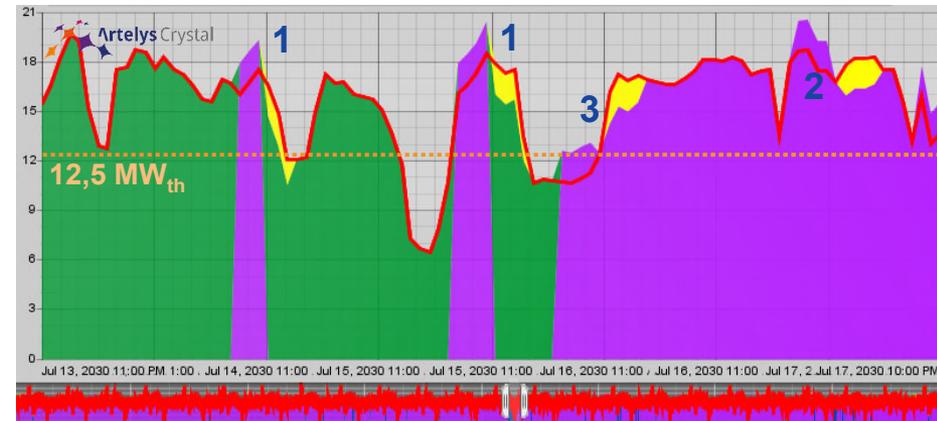
- Le stockage est un outil de flexibilisation permettant d'optimiser le fonctionnement des cogénérations au gaz, en arbitrage avec une chaudière gaz



— Consommation ■ Chaudière gaz ■ Cogénération

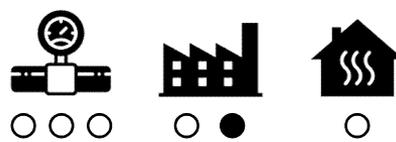
Sans stockage

Avec stockage



— Consommation ■ Chaudière gaz ■ Cogénération ■ Stockage





Stockage et cogénération au gaz

- La valeur du stockage en termes d'arbitrage économique est limitée
 - CAPEX élevés des technologies de stockage HT
- D'un point de vue opérationnel, le stockage présente néanmoins de multiples avantages observé durant l'étude:
 - Augmentation des ventes d'électricité
 - Augmentation de la durée de fonctionnement de la cogénération à un régime proche de sa puissance nominale
 - Réduction du nombre de démarrages liés à des baisses de charge
- Le contexte réglementaire peut également influencer la valorisation du stockage
 - Notamment via l'application d'un complément de rémunération maintenant les signaux de prix de marché de l'électricité



Synthèse sur le stockage en milieu industriel

- Le stockage permet d'optimiser les performances des systèmes énergétiques industriels
 - En augmentant leur efficacité énergétique
 - En facilitant leur pilotage et leur intégration aux réseaux
- Des réductions de coût et des mécanismes de soutien permettraient de sortir des niches identifiées
 - La réduction des CAPEX énergie est le premier levier pour augmenter la compétitivité des technologies HT sur les applications étudiées
 - Complément de rémunération, tarif de rachat, taxe carbone élevée, financement à taux réduit ou fonds de garantie



Eau chaude sanitaire domestique

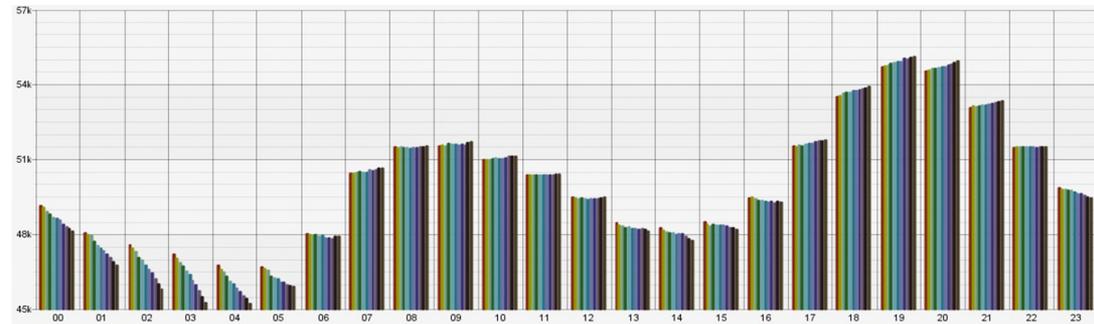
- Les 12 millions de chauffe-eaux installés en France représentent une source de flexibilité importante pour le système électrique
 - A condition d'en assurer un pilotage intelligent (cf. première étude PEPS)
- Les cumulus (effet Joule) sont progressivement remplacés par des chauffe-eaux thermodynamiques (CET)
 - Meilleur rendement énergétique global
 - Temps de chauffe plus long
- Dans quelle mesure le déploiement progressif des CET pourrait affecter la flexibilité du système électrique ?



Impact sur le système électrique français

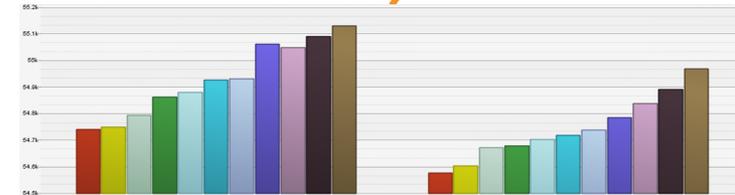
- Dimensionnement optimisé de la puissance des chauffe-eaux

- CER à 3,9 kWe
- CET à 600 We



- Impact sur le profil moyen de la demande électrique française

- Forte baisse de la consommation en période de creux (nuit) et surplus solaire (après-midi)
- Augmentation de la consommation en périodes de pics (midi et soirée)

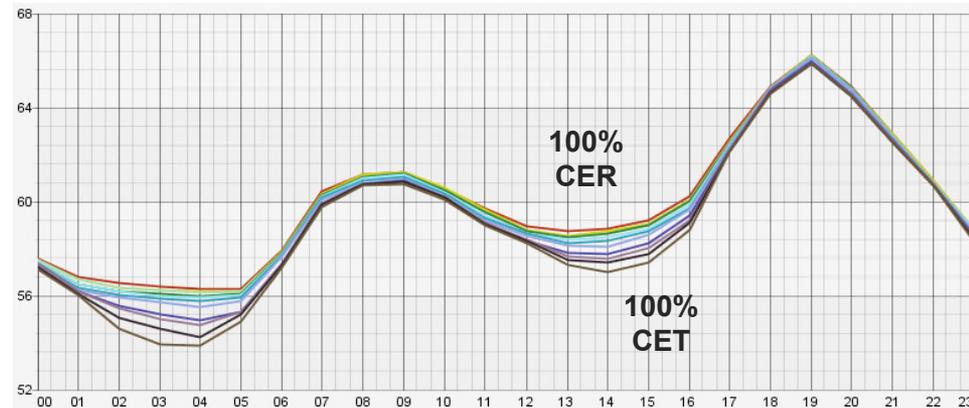


0% de CET → 100% de CET



Impact sur le système électrique français

- Impact sur le profil moyen des prix d'électricité en France
 - Réduction significative des prix en période de creux
 - Sans effet notable en pointe



- Impact sur les émissions de CO₂
 - Jusqu'à -0,8 Mt/an en France
 - Jusqu'à -4,6 Mt/an en Europe
 - Lié principalement à la baisse de la consommation électrique (environ -10 TWh_e avec un déploiement à 100% des CET)

- Résultats obtenus à *hypothèse de mix électrique fixée*
 - RTE Nouveau Mix (France) et ENTSO-E Green Transition (Europe)



Principales conclusions de l'étude

- Le stockage thermique est une solution rentable pour faire face aux augmentations difficilement prévisibles de la demande sur les réseaux de chaleur.
- Le stockage thermique permet d'accéder à des gisements de chaleur fatale industriels fortement discontinus, avec des cas d'application rentables à horizon 2030.
- Les pompes à chaleur sont une solution attractive et rentable pour alimenter les réseaux de chaleur en EnR&R.
- La pénétration massive des ballons d'eau-chaude thermodynamique permettrait d'améliorer l'efficacité énergétique de l'ECS domestique sans toutefois impacter sensiblement la flexibilité du système électrique français.
- Il existe des solutions innovantes et rentables avec le P2H et le stockage thermique pour accompagner la décarbonisation du mix thermique en France.

