



Améliorer le rendement des PACS grâce au géostockage L'une des clés de la décarbonation du Tertiaire

Table des matières

À propos de l'auteur	2
Résumé exécutif	3
1. Les limites du discours de Belfort	4
2. Quelques rappels généraux concernant les Pompes à Chaleur	6
3. Le géo-stockage	9
4. Comparaison PAC aérothermique et géostockage	10
A propos de l'Institut Sapiens	12

À propos de l'auteur



Philippe Charlez

Expert en Questions Energétiques
Institut Sapiens

Ingénieur des Mines de l'École Polytechnique de Mons et Docteur en Physique de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Expert internationalement reconnu en énergie, il est l'auteur de plusieurs ouvrages sur la transition énergétique. Il enseigne à Science Po, Dauphine, l'INSEAD, Mines Paris Tech, l'ISSEP et le Centre International de Formation Européenne. Il est éditorialiste régulier pour Valeurs Actuelles, Contrepoints, Atlantico, Causeur et Opinion Internationale. Il est l'expert en Questions Energétiques de l'Institut Sapiens. www.philippecharlez.com www.youtube.com/energychallenge



Résumé exécutif

La mise en œuvre de pompes à chaleurs aérothermiques pour décarboner le tertiaire augmentera de façon significative la consommation d'électricité. En 2050, elle devrait représenter 97% du mix énergétique dans le Tertiaire. Malgré les promesses de l'Etat (discours de Belfort d'Emmanuel Macron) de renouveler le parc nucléaire (14 réacteurs EPR) et de mettre en œuvre massivement des énergies renouvelables (puissance solaire photovoltaïque multipliée par dix, doublement de la puissance éolienne terrestre et mise en œuvre de 40 GW d'éolien marin), le mix électrique 2050 contiendra toujours une partie significative d'électricité gazière. Réduire la consommation d'électricité apparaît donc comme l'une des clés de la future transition énergétique.

La méthode décrite dans ce rapport consiste à améliorer le rendement des pompes à chaleur du Tertiaire en remplaçant en partie les PACs aérothermiques par des PACs géothermiques soutenues par du géostockage. Une telle technologie permet de multiplier par trois le coefficient de performance et en conséquence de réduire d'autant la consommation d'électricité.

En lieu et place du scénario de base (équivalent au scénario 2 du rapport « **quelle stratégie pour décarboner du tertiaire** »), nous proposons une variante consistant à mettre en œuvre des PACs géothermiques soutenues par du géostockage sur 300 millions de mètres carrés (surfaces supérieures à 1500 m²- 25% de la surface du tertiaire à l'horizon 2050). Sur la moitié de cette surface (soient 150 millions de mètres carrés) la technologie de PAC + géostockage est aussi utilisée comme système de climatisation. Sa mise en œuvre met en évidence de multiples avantages :

- ✓ grâce au rendement supérieur le géostockage permet d'économiser 21 TWh d'électricité à l'horizon 2050. Cette électricité économisée provenant de la source marginale c'est-à-dire du gaz (rendement de 60% pour les Turbines Gaz Vapeur et un MWh gazier flat à 100 €) le géostockage permettrait à la France d'économiser 670 TWh d'importations gazières soient 67 milliards d'euros et 134 millions de tonnes de CO₂.
- ✓ malgré un investissement supérieur (148 €/m² contre 80 €/m²), la VAN 4% devient positive dès 2032 (contre 2038 pour le cas de base). A l'horizon 2050, le géostockage dégage une VAN4% de 60 G€ supérieure de 40 G€ par rapport à celle du cas de base,
- ✓ il accélère fortement la décarbonation à la fois grâce à la réduction plus importante de la consommation, la disparition plus précoce des chaudières résiduelles au gaz et au fioul ainsi qu'indirectement par la réduction de l'électricité gazière.

1. Les limites du discours de Belfort

La transition énergétique sera avant tout une transition électrique. En dehors de l'habitat (PACs, chauffe-eaux thermodynamiques, plaque à induction), l'électricité sera partout dans les transports (voitures électriques, hydrogène vert fabriqué à partir de l'électrolyse de l'eau c'est-à-dire à partir d'électricité) ou encore dans les processus industriels (hydrogène vert et four à arc électrique en sidérurgie et en cimenterie). D'ici 2050 la consommation française devrait presque doubler passant d'environ 450 TWh en 2019 à 850 TWh à l'horizon 2050. Cet objectif mais aussi celui de décarbonation totale de l'électricité est-il pour autant crédible ?

Dans son discours fondateur de Belfort¹ (13 février 2022), le président Emmanuel Macron avait présenté une nouvelle stratégie pour accéder à ces objectifs d'électrification². Reconnaisant que « *que miser sur un seul type d'énergie- i.e. renouvelables- serait une impasse* » mais pointant aussi du doigt la faillite de « *l'aventure gazo-renouvelable allemande* » il avait prôné un développement durable s'appuyant sur une croissance soutenable : « *atteindre en trente années la neutralité carbone* » sans pour autant « *faire preuve d'austérité énergétique* » tout en « *assurant le développement industriel de notre pays* ».

Sa stratégie reposait notamment sur le « *Grand Carénage* » du nucléaire existant permettant de prolonger d'au moins 20 années les 56 réacteurs nucléaires actuellement en service, la construction de six nouvelles EPRs de troisième génération et l'étude de faisabilité de 8 autres (soit 14 au total), la mise en œuvre à l'horizon 2050 de 100 GW de solaire (x8), de 37 GW d'éolien terrestre (x2) et de 40 GW d'éolien off-shore (l'équivalent de 80 parcs éoliens équivalents à celui de Fécamp).

Bien qu'allant dans la bonne direction, la croissance de l'éolien et du solaire ainsi que le nombre proposé de nouvelles centrales EPR (6+8) s'avèrent pourtant insuffisants pour satisfaire la forte augmentation de la demande électrique. Selon les chiffres de la **Figure 1**, la stratégie présidentielle permettrait au mieux de fournir 680 TWh d'électricité (80% de la demande). Les 20% manquant devront donc inévitablement reposer sur 25 GW de centrales à gaz CC (Cycles Combinés).

1 <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/02/10/repandre-en-main-notre-destin-energetique>

2 <https://www.institutsapiens.fr/observatoire/repandre-en-main-notre-destin-energetique/>

L'un des inconvénients majeurs du scénario 2 du rapport « **quelle stratégie pour décarboner du tertiaire** » (appelé **étude 1** dans la suite de l'exposé) est sa dépendance presque totale à l'électricité qui représenterait alors 97% du mix énergétique du tertiaire en 2050.

Parc électrique 2050	Puissance	Charge	2050
	GW	%	TWh
Nucléaire existant	15	80%	105
Nucléaire nouveau	22,4	85%	167
Hydraulique	26	26%	60
Eolien marin	40	38%	133
Eolien terrestre	37	24%	78
Solaire	100	14%	123
Biomasse & déchets	2	80%	14
Thermique gaz CC	25	80%	175
Total	267		855

*Figure 1 – Production électrique française 2050
(hypothèses du discours de Belfort)*

Réduire cette consommation électrique passe soit par de la sobriété énergétique supplémentaire (aux risques de pénaliser la croissance économique !), soit par l'utilisation de sources alternatives de chaleur n'utilisant pas l'électricité (biomasse) soit par une amélioration significative du rendement des pompes à chaleur. Dans cette optique, le géostockage associé à des PACs géothermiques devrait jouer un rôle essentiel dans la transition énergétique du Tertiaire.

2. Quelques rappels généraux concernant les Pompes à Chaleur

Une Pompe à Chaleur (PAC) reproduit un cycle thermodynamique ditherme (deux températures) aussi appelé « *Cycle de Carnot* ». En pratique, une PAC extrait la chaleur de l'environnement et la transfère à un fluide caloporteur³ dont les propriétés physiques sont choisies pour permettre des changements de phase (liquide vapeur et vice versa) aux températures rencontrées durant le cycle. Il est composé de quatre phases (**Figure 1**) :

- ✓ Vaporisation isotherme AB (évaporateur) : le fluide caloporteur initialement froid et liquide est vaporisé à la température extérieure (T_{froide}) dans l'évaporateur grâce aux calories puisées à l'extérieur (air -aérothermique- ou sol -géothermique-). Le changement de phase permet au fluide puiser à une température assez faible une importante quantité de calories dans le milieu extérieur,
- ✓ Compression adiabatique BC (compresseur) : le fluide caloporteur à l'état gazeux est alors comprimé. Il sort du compresseur à haute pression et haute température (T_{chaude}),
- ✓ Condensation isotherme CD (condenseur) : en cédant ses calories à la pièce à chauffer le fluide caloporteur se liquéfie mais reste sous haute pression,
- ✓ Détente adiabatique EF (détendeur) : à la sortie du condenseur, le liquide sous haute pression est détendu ce qui a pour effet de le revaporiser. Le fluide caloporteur est maintenant prêt pour le cycle suivant

³ A basse température, le fluide caloporteur emmagasine une grande quantité de calories en se vaporisant. A l'inverse lors de sa liquéfaction, il rend au milieu toutes les calories absorbées précédemment.

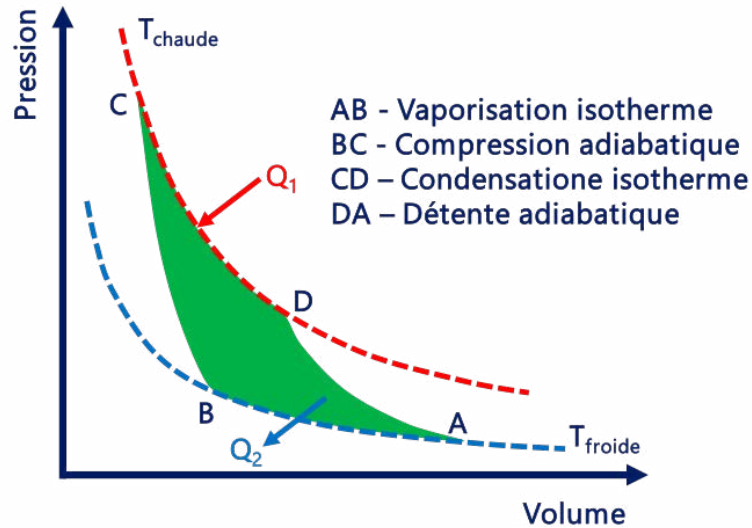
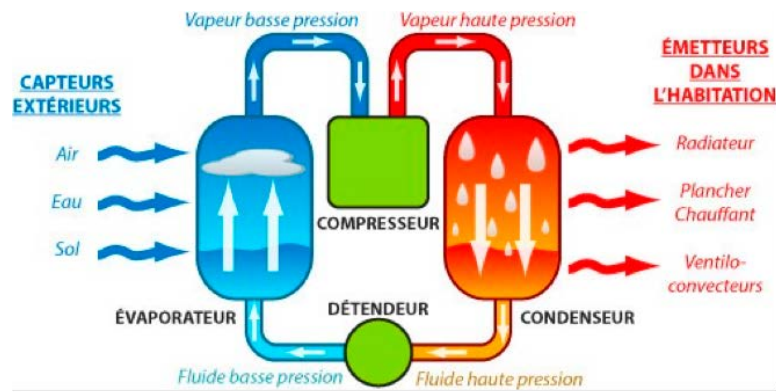


Figure 2 – Haut - Fonctionnement d'une pompe à chaleur
Bas - Cycle de Carnot

Le seul apport d'énergie nécessaire à une pompe à chaleur est l'électricité requise pour actionner le compresseur. Dans la mesure où une partie de l'énergie fournie au système (celle puisée au milieu extérieur) est « gratuite », le rendement thermodynamique d'une PAC⁴ (aussi appelé coefficient de performance COP) est généralement supérieur à 1. Il est donné par l'expression (les températures sont exprimées en °K) :

$$COP < \frac{T_{chaude}}{T_{chaude} - T_{froide}}$$

La performance thermodynamique d'une PAC est d'autant plus élevée que **la température de la source froide est proche de la température de la source chaude**. En mode chauffage, les PACs aérothermiques seront donc toujours plus efficaces dans des régions chaudes (i.e. Nice) que dans les régions froides (i.e. Lille). Le cycle inversé (mode climatisation) sera en revanche plus favorable en région froide qu'en région chaude. En revanche, la température du sous-sol variant assez peu avec la saison et la région, une PAC géothermique aura toujours un COP nettement supérieur à une PAC aérothermique.

4 https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_performance

Ainsi, pour une $T_{chaude} = 40^{\circ}\text{C}$ (sortie du compresseur) et une $T_{froide} = 5^{\circ}\text{C}$, le COP théorique sera de l'ordre 9. Toutefois, pour de multiples raisons (climat, isolation de l'habitat, pertes de chaleur mais surtout conception de la machine et qualité des échangeurs -condenseur/évaporateur), les COP réels sont toujours nettement inférieurs aux valeurs thermodynamiques. Mesurant les COPs de leurs équipements dans des conditions idéales, les fournisseurs (40° à la sortie du compresseur) avancent en général des valeurs de l'ordre de 3 pour les PACs aérothermiques et supérieures à 4 pour les PACs géothermiques.

En pratique, les PACs aérothermiques installées en France ont plutôt un COP moyen de l'ordre de 2 et les PACs géothermiques un COP de l'ordre de 3. Sachant qu'une chaudière au gaz consomme en moyenne annuellement 128 kWh/m² avec un rendement de 80%, cela conduit pour une PAC aérothermique à une consommation électrique moyenne de l'ordre de 52 kWh/m², une valeur en accord avec les chiffres de consommation annuelle et ceux fournis par l'ADEME⁵. Cette valeur avait été utilisée dans l'étude 1 (voir **Figure 4** de l'étude 1). Pour les PACs géothermiques (peu nombreuses en France à ce jour), cette consommation moyenne tombe alors à 35 kWh/m².

Ces COPs sont évalués par les fabricants en ne considérant que l'équipement primaire (PAC elle-même) sans aucune considération pour l'enveloppe secondaire (radiateurs, ventilo-convecteurs, plancher chauffant - **Figure 2**). Pourtant, l'enveloppe secondaire joue un rôle capital sur l'efficacité de la PAC. En effet, alors qu'un plancher chauffant (émetteur diffus) peut aisément travailler à une température de sortie du compresseur assez basse (de l'ordre de 40°C), dans le cas de radiateurs et de convecteurs (émetteurs ponctuels) la température requise peut être beaucoup plus haute (60°C à 70°C est la température de l'eau d'une chaudière thermique) ce qui impacte de façon négative les performances de la PAC. Pour cette raison, le COP=2 utilisé dans l'étude 1 est probablement optimiste. Aussi avons-nous retenu pour cette étude comparative une valeur inférieure de 1,7 (soit une consommation de 59 kWh électrique par an et par mètre carré).

5 <https://www.lesfurets.com/energie/guide/consommation-pompe-a-chaleur>

3. Le géo-stockage

Le géo-stockage consiste à accumuler dans le sous-sol durant les mois d'été de la chaleur générée à partir de capteurs solaires thermiques mais aussi récupérée à partir d'équipements d'air conditionné ou de processus industriels (i.e. la chaleur fatale de centrales thermiques). Le fluide caloporteur chaud (en général de l'eau) est transféré par circulation à la roche qui entoure la sonde. Cette chaleur emmagasinée durant l'été restitue l'hiver une T_{froide} bien supérieure (mais aussi constante dans le temps) à la température naturelle du sous-sol (elle-même déjà nettement supérieure à celle de l'air) et de ce fait de doubler les COP des PACs géothermiques pourtant déjà élevés. Nous avons pour cette étude **retenu un COP égal à 5** correspondant à une consommation électrique de 20 kWh par an et par mètre carré

Parmi les nombreux projets de géostockage existant dans le monde celui de Brædstrup⁶ (Danemark) a été pris comme modèle économique. L'investissement est de l'ordre de 70 €/m² de surface chauffée soit de 150 €/m² incluant le prix de la PAC (80 €/m² voir étude 1 **Figure 11**).

⁶ https://planenergi.dk/wp-content/uploads/2018/05/Soerensen-and-Schmidt_Design-and-Construction-of-Large-Scale-Heat-Storages-12.03.2018-004.pdf

4. Comparaison PAC aérothermique et géostockage

Le but de cette étude est de mettre en évidence l'efficacité des PACs géothermiques avec géostockage au regard de la mise en œuvre de PACs aérothermiques conventionnelles.

Pour ce faire, nous avons retenu comme cas de base le scénario 2 de l'étude 1 **en considérant la seule partie chauffage** incluant toutefois l'éradication des passoires énergétiques de catégorie E/F/G en D mais sans aucune réduction du TOE⁷ (TOE maintenu à sa valeur actuelle de 84%).

La variante introduit 300 millions de mètres carrés (soit approximativement 25% de la surface du tertiaire à l'horizon 2050 – surfaces supérieures à 1500 m²) de PACs géothermiques + géostockage **mises en œuvre en dix ans**. La moitié de cette surface (soient 150 millions de mètres carrés) met à profit le géostockage pour remplacer sans frais supplémentaire son système de climatisation traditionnel. Les paramètres technico économiques sont identiques à ceux retenus dans la **Figure 11** de l'étude 1.

La comparaison entre le cas de base et la variante géostockage est présentée sur la **Figure 4**. Grâce au rendement supérieur le géostockage permet d'économiser 21 TWh d'électricité à l'horizon 2050.

Malgré l'investissement supérieur (150 €/m² contre 80 €/m²), la mise en œuvre rapide du géostockage permet à la fois d'accélérer le retour sur investissement (la VAN 4% devient positive dès 2032 contre 2038 pour le cas de base). Le géostockage dégage une VAN 4% de 60 G€ supérieure de 40 G€ par rapport à celle du cas de base.

7 TOE = taux d'occupation énergétique. Voir étude 1

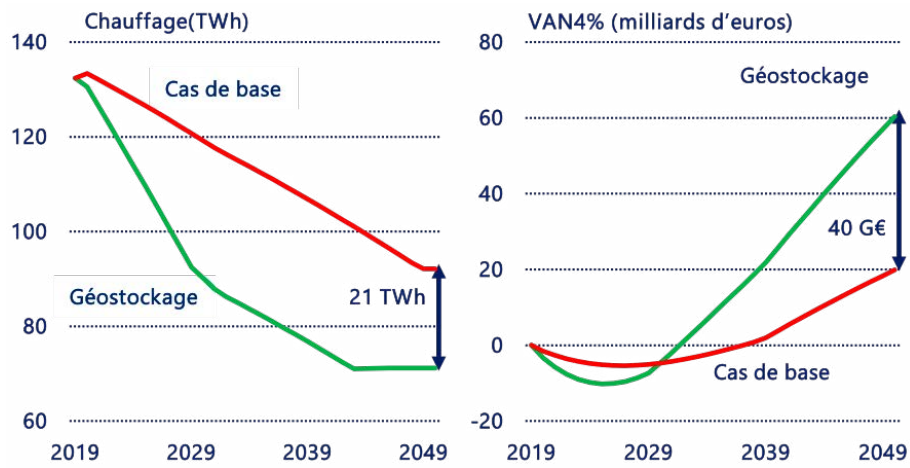


Figure 4 – Comparaison du cas de base et du géostockage (chauffage uniquement)

Gauche – consommation d'énergie

Droite – VAN4%

Bien que les deux scénarios permettent de décarboner totalement le Tertiaire à l'horizon 2050, le géostockage accélère la décarbonation⁸ (**Figure 5 - gauche**) à la fois grâce à la réduction de la consommation mais aussi grâce à une éradication plus précoce des chaudières résiduelles au gaz et au fioul.

L'intérêt du géostockage se lit aussi en filigrane de la consommation d'électricité (**Figure 5 - gauche**) soulagée de 21 TWh à l'horizon 2050. En supposant que cette dernière provient de la source marginale (c'est-à-dire du gaz – voir paragraphe 1) et en considérant un rendement de 60% pour les TGV (Turbines Gaz Vapeur) et un MWh gazier « flat » à 100 €, le géostockage permettrait à la France d'économiser 670 TWh de gazières soient 67 milliards d'euros d'importations et 134 millions de tonnes de CO₂.

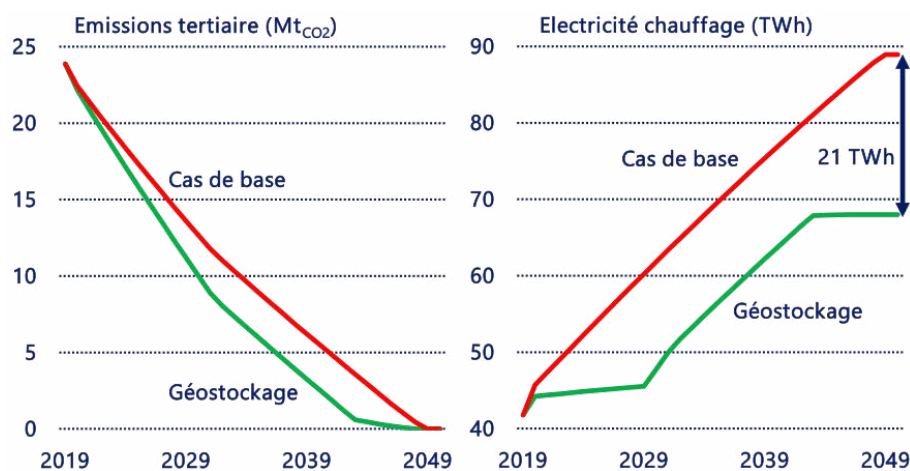


Figure 5 – Cas de base et géostockage

Gauche – Emissions

Droite – Consommation d'électricité

8 Supposant que l'ensemble de l'électricité est décarbonée

À propos de l'Institut Sapiens

L'Institut Sapiens est un laboratoire d'idées (*think tank*) indépendant et non partisan réfléchissant aux nouvelles conditions d'une prospérité partagée à l'ère numérique. L'humanisme est sa valeur fondamentale. Son objectif est d'éclairer le débat économique et social français et européen par la diffusion de ses idées.

Il fédère un large réseau d'experts issus de tous horizons, universitaires, avocats, chefs d'entreprise, entrepreneurs, hauts fonctionnaires, autour d'adhérents intéressés par les grands débats actuels. Sapiens s'attache à relayer les recherches académiques les plus en pointe.

Les travaux de Sapiens sont structurés autour de **sept observatoires thématiques** : développement durable ; IA et éthique ; science et société ; santé et innovation ; travail, formation et compétences ; politiques, territoire et cohésion sociale ; innovation économique et sociale.

Sa vocation est triple :

Décrypter — Sapiens aide à la prise de recul face à l'actualité afin d'aider à la compréhension des grandes questions qu'elle pose. L'institut est un centre de réflexion de pointe sur les grands enjeux économiques contemporains.

Décloisonner et faire dialoguer — Sapiens met en relation des mondes professionnels trop souvent séparés : universitaires, membres de la sphère publique, praticiens de l'entreprise ou simples citoyens. L'institut est un carrefour où ils peuvent se rencontrer pour réfléchir et dialoguer.

Se former — Le XXI^e siècle est celui de l'information ; il doit devenir pour l'individu celui du savoir. Les immenses pouvoirs que donnent les technologies appellent un effort nouveau de prise de recul et d'analyse. Grâce à ses publications, événements et rencontres, Sapiens se veut un lieu de progression personnelle pour ceux qui veulent y prendre part.

Pour en savoir plus, visitez notre site internet : institutsapiens.fr

