

Chaleur renouvelable : la grande oubliée de la stratégie énergétique française ?

Novembre 2022

Pôle Énergie

Michaël Margo
Chef de Projet

Céleste Grillet
Consultante

Relecture : Alexandre Joly, Manager, Responsable du Pôle Énergie chez Carbone 4.

*Cette publication a été en partie financée par
Newheat, ARVERNE, Enerplan et AFPG.*

Sommaire

Synthèse.....	4
Introduction.....	7
I - Chaleur : quels volumes, quels usages, quels moyens de production ?	9
A) <i>Un usage sous-estimé dans nos besoins énergétiques</i>	9
B) <i>Chaleur renouvelable : la produire, la distribuer, la stocker.....</i>	11
i. Les filières de production de chaleur renouvelable sans combustion	12
ii. Les filières de production de chaleur renouvelable avec combustion	15
iii. En pratique : réseaux de chaleur, températures desservies et stockage	16
C) <i>L'importance de son essor dans une France bas-carbone</i>	21
II - Comment le développement de la chaleur renouvelable est-il soutenu ?	24
A) <i>Les dispositifs de soutien financier en France.....</i>	24
B) <i>Exemples de dispositifs de soutien à l'international.....</i>	27
III - Toutes les chaleurs renouvelables ne se valent pas	31
A) <i>Comparaison des principales filières de production de chaleur renouvelable ..</i>	31
B) <i>Quelles filières développer en priorité pour répondre à quels besoins ?</i>	36
IV - Zoom sur deux filières dont le potentiel est sous-exploité.....	39
A) <i>Solaire thermique</i>	39
i. Les cas d'application favorables au solaire thermique	39
ii. Deux exemples de projets solaires thermiques	41
B) <i>Géothermie.....</i>	43
i. Les cas d'application favorables à la géothermie	43
ii. Deux exemples de projets de géothermie	44
Conclusion.....	48
Sources	49

Synthèse

1. **La chaleur est le premier usage énergétique en France et représente 45% de l'énergie finale consommée.** La décarbonation de la production de cette chaleur (aujourd'hui produite à 60 % par des énergies fossiles) est un enjeu majeur de la décarbonation du mix énergétique français.
2. **La décarbonation de la production de chaleur passe par le triptyque : baisse des besoins, renouvelable, électrification.** Pour décarboner cette chaleur, dont la répartition des besoins se décompose en 50 % résidentiel, 30 % industrie et 20 % tertiaire, trois solutions s'offrent à nous :
 - a. **Moins en consommer** : via de la sobriété (baisse de la température dans les logements, diminution de la production en période de pointe hivernale pour les usines), ou de l'efficacité énergétique (rénovation thermique pour les particuliers ou optimisation de processus dans l'industrie) ;
 - b. **Produire de la chaleur à partir de sources renouvelables** (hors électricité) : la biomasse est la première source de production de chaleur renouvelable (65 %), suivie de loin par la géothermie, le solaire thermique, les gaz renouvelables, les déchets et la chaleur de récupération — certaines de ces filières sont matures et rentables et leur potentiel parfois sous- exploité, c'est l'objet de cette publication ;
 - c. **Électrifier la production de chaleur** : sous couvert d'avoir une production d'électricité bas-carbone abondante et bon marché, la production de chaleur peut s'électrifier dans certains cas ; par exemple avec des pompes à chaleur pour les particuliers, ou par un changement de machine pour les industriels (haut-fourneau à four à arc électrique par exemple).
3. **38% de chaleur renouvelable en 2030.** C'est l'objectif affiché par la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), qui détaille les ambitions par filière. À date, seul le déploiement des Pompes À Chaleur (PAC) aérothermiques semble se dérouler à la bonne vitesse. La part de renouvelable n'était qu'à 23% en 2020, un changement de régime rapide et ciblé s'impose.
4. **Les filières de production de chaleur sans combustion sont pertinentes pour répondre à une part importante des besoins.** Les besoins en chaleur sont variés en nature et en contrainte (température nécessaire, durée de stockage, etc.) et toutes

les technologies ne sont pas pertinentes pour y répondre. La basse température couvre 75 % des besoins en chaleur, en grande partie les besoins du résidentiel, du tertiaire, et 30 % des besoins de l'industrie, et gagne à ne pas passer par une combustion (biomasse, gaz, déchets) pour être produite. La combustion entraîne des températures bien plus élevées que celles nécessaires aux usages basse température et doit être privilégiée pour les usages qui le nécessitent.

5. **Solaire thermique et géothermie disposent d'un potentiel significatif et d'acteurs nationaux.** Parmi les filières sans combustion, deux d'entre elles ont une zone de pertinence technique et économique en particulier pour alimenter des réseaux de chaleur et les procédés industriels basse température : la géothermie et le solaire thermique (respectivement 5 % et 1 % de la chaleur renouvelable produite en 2020). Les acteurs de ces filières sont prêts à passer à la vitesse supérieure, portés par de nouveaux modèles pour agir "en base" dans de nouveaux réseaux de chaleur en construction, des procédés industriels ou encore fournir des solutions de stockage de chaleur intra voire inter-saisonniers. D'après l'ADEME, les coûts d'investissement élevés de ces technologies sont encore un frein à leur déploiement accéléré.
6. **Les opérateurs de réseaux comme les industriels s'adaptent à ces nouvelles intégrations.** L'adaptation des réseaux de chaleur existants à l'ajout de capacités renouvelables sans combustion nécessite un changement du modèle d'opération et un abaissement des températures d'usage. Les opérateurs de réseaux se forment à ces enjeux et parviennent de mieux en mieux à gérer ces intégrations, qui permettent de gagner en efficacité et en rendement. Les industriels mènent aussi des réflexions sur les températures de service et les boucles utilisées à l'échelle de chaque procédé pour que les sources de chaleur renouvelables sans combustion deviennent compatibles avec leurs besoins.
7. **Le soutien financier à la filière reste faible**, et passe principalement par des appels à projets et des aides à l'investissement (et non une obligation d'achat ou un complément de rémunération garanti), via le fonds chaleur de l'ADEME. Ce fonds chaleur a une dotation en 2022 de 370 millions d'euros (relevée à 520 millions au printemps dans le contexte de la crise ukrainienne). Cela paraît faible devant les 24 Mds d'euros dépensés dans le bouclier tarifaire français sur le pétrole, l'électricité et le gaz pour l'année 2022 qui ne soutiennent aucune transformation du système énergétique.
8. **Une évolution du rôle attribué par défaut à chaque filière est nécessaire.** Les filières de la géothermie et du solaire thermique pourraient gagner en vitesse de développement, si les bureaux d'étude, notamment, les incluaient

systématiquement dans leurs propositions de dimensionnement. En effet le plus souvent, elles sont considérées comme un appoint par rapport à une filière avec combustion, pour baisser légèrement l’empreinte carbone de la production de chaleur. Dans les faits, elles ont parfois la capacité de constituer la base du réseau ou du procédé industriel, voire la totalité de la production nécessaire, pour un bilan coûts / besoin en matériaux / émissions de gaz à effet de serre intéressant.

9. **L’électrification est un vecteur de décarbonation qui doit être priorisé selon les secteurs.** La SNBC prévoit une augmentation d’environ 30 % de la consommation d’électricité entre 2019 et 2050. La décarbonation de certains secteurs comme les transports ou certains volets de l’industrie passe majoritairement par de l’électrification. La production d’électricité étant limitée, il est crucial de prioriser les usages pour lesquels elle a le plus d’impact, et qui ne peuvent être décarbonés autrement. En ce qui concerne la chaleur, on peut distinguer l’électrification directe (radiateurs électriques), de l’électrification indirecte (pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques) qui présente un meilleur rendement. Il est également possible de produire directement de la chaleur décarbonée, ce qui permet à l’usager (industriel, collectivité, particulier) de s’affranchir de l’incertitude sur les prix et sur la disponibilité de l’électricité et modère la demande électrique.
10. **Préserver (autant que possible) la biomasse.** Le développement de ces filières de production de chaleur renouvelable sans combustion a un autre intérêt majeur : arbitrer une partie des conflits d’usage de la biomasse. Le bilan net de l’Utilisation des Terres, Changement d’Affectation des Terres et Forêt (UTCATF) en France en 2020 est un puits de 14 MtCO_{2e}. Dans le Paquet Climat européen, la France s’est engagée à atteindre 34 MtCO_{2e} net d’absorption par an dès 2030 pour ce secteur de l’UTCATF. La forêt constitue la principale contribution à l’absorption brute (30 MtCO_{2e} en 2020, soit 75 % des absorptions), les terres cultivées et les zones artificialisées constituent les principaux émetteurs bruts. Or l’absorption de carbone par la forêt a diminué de presque 60 % en 12 ans (70 MtCO_{2e} en 2008 à 30 MtCO_{2e} en 2020). La forêt possède de plus un rôle essentiel dans la décarbonation de la construction, et de certains produits manufacturés. La filière bois-énergie, qui doit rester l’usage final le plus dégradé du bois, constituera toujours une part de production importante pour la chaleur renouvelable, mais gagnerait à ne pas être une solution par défaut, davantage un opportunisme local en fonction des sources d’approvisionnement disponibles et si d’autres filières ne peuvent pas offrir le même service.



Introduction

L'année 2022 nous a rendus témoins d'événements climatiques extrêmes sur tous les continents. La rentrée de septembre s'est tenue sur un fil entre tensions sur l'approvisionnement énergétique, autant en gaz qu'en électricité, et prix des marchés de l'énergie qui explosent. Forts de cette prise de conscience renouvelée que nos systèmes économiques et sociaux se basent avant tout sur l'énergie, citoyens, entreprises et administration publiques réaffirment leur volonté de "passer à l'action". Les gouvernements français et européens attaquent de front des chantiers colossaux qui n'ont que trop tardé :

- Plus de sobriété ("faire moins pour consommer moins") ;
- Plus d'efficacité énergétique ("faire autant et consommer moins") ;
- Plus de bas-carbone ("produire en émettant moins de carbone l'énergie dont on a besoin").

Sobriété, efficacité et moins carboné sont, dans cet ordre, des leviers indispensables à activer rapidement et massivement pour lutter contre le changement climatique à la vitesse et à la hauteur nécessaires.

En France, le premier secteur consommateur d'énergie (30 % du total) et le plus émetteur de gaz à effet de serre (30 % du total) est le transport. Il constitue à ce titre le plus gros consommateur de la première énergie utilisée en France : le pétrole.

Si l'on considère les usages finaux de l'énergie, ce ne sont plus les transports mais les besoins en chaleur qui occupent la tête du podium (45 % de l'énergie finale).

C'est sur cette production de chaleur bas-carbone que nous allons nous pencher dans cette publication.

Produire de la chaleur, qui est la forme finale la plus dégradée de l'énergie, n'est pas en soit un défi technique. Ce qui l'est en revanche c'est de la produire au bon moment, à la bonne température, en quantité suffisante, la transporter efficacement, voire la stocker. Aujourd'hui, le fossile représente 60% de la production de chaleur et c'est le gaz naturel qui permet en majorité de répondre à ces contraintes (40 % de la production de chaleur). Le caractère fortement émetteur de CO₂ et la disponibilité limitée de cette source d'énergie poussent à chercher des substituts, et à se diriger vers la production de chaleur d'origine renouvelable, ou a minima bas-carbone.

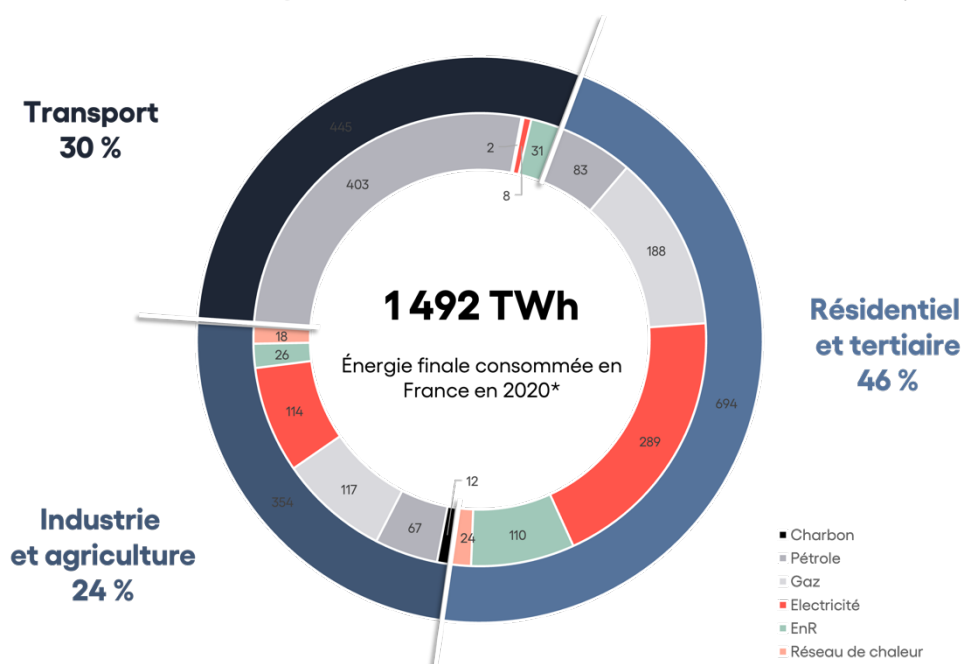
Où en est la France sur le développement de la chaleur renouvelable ? Quelles sont les filières porteuses d'espoir ? Comment est-ce financé ? Est-on aligné avec la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) ?

I - Chaleur : quels volumes, quels usages, quels moyens de production ?

A) Un usage sous-estimé dans nos besoins énergétiques

En 2020, la consommation totale d'énergie finale en France était de 1 492 TWh et environ 45 % de cette consommation s'est faite sous forme de chaleur pour l'industrie, le tertiaire ou le résidentiel. La production de chaleur est donc l'un des premiers postes de consommation d'énergie, même devant celui des transports.

Consommation d'énergie finale en France par secteur et par source (2020)

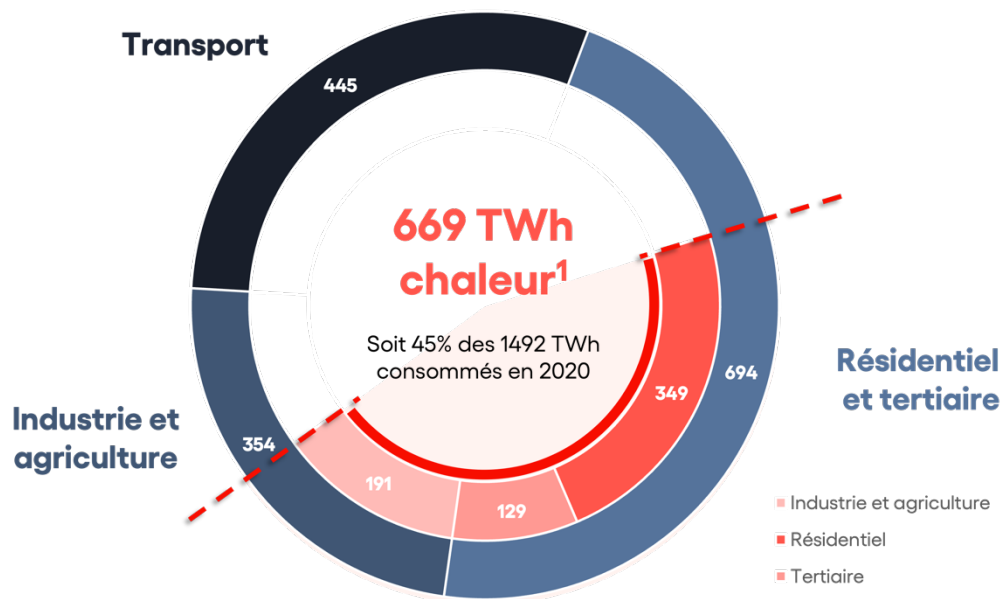


*Corrigées des variations climatiques

Note : EnR – énergies renouvelables thermiques, déchets et biocarburants

Source : Bilan énergétique de la France pour 2020 (Janvier 2022) DataLab MTE, SDES, analyse Carbone 4

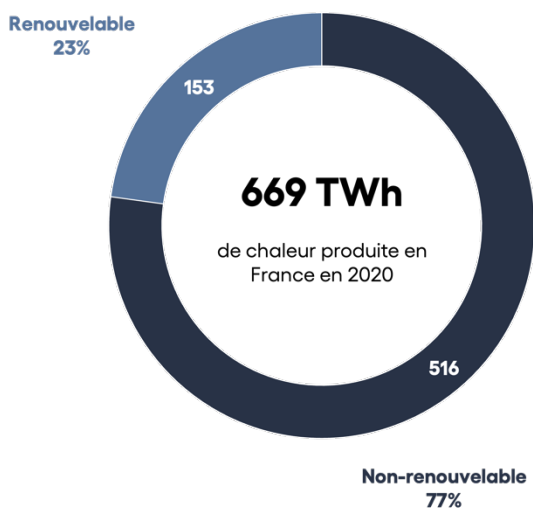
Part des usages chaleur par secteur dans la consommation d'énergie finale en France (2020)



1. La part de la chaleur dans la consommation finale de l'industrie est basée sur une donnée de 2015 reportée dans Transition(s) 50, ADEME, Données corrigées des variations climatiques
Source : Bilan énergétique de la France pour 2020 (Janvier 2022) DataLab MTE, SDES, Transition(s) 50 ADEME, analyse Carbone 4

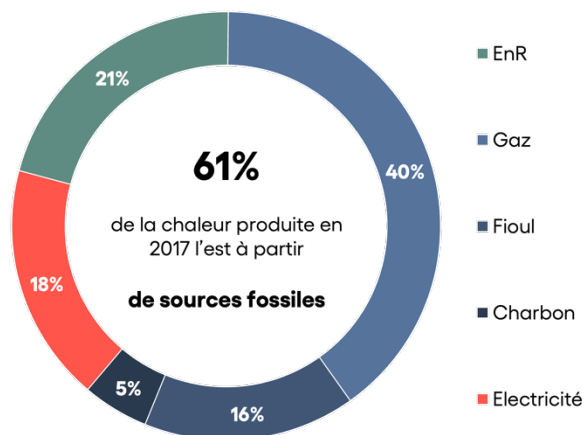
Seule une petite part (23%) de ces besoins de chaleur est couverte par des filières de production renouvelable en 2020 tandis que le reste est couvert par l'utilisation d'énergies fossiles beaucoup plus carbonées (majoritairement du gaz et du fioul) ainsi que par de l'électricité.

Part du renouvelable dans la production de chaleur (2020, TWh)



Source : Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération, 2021

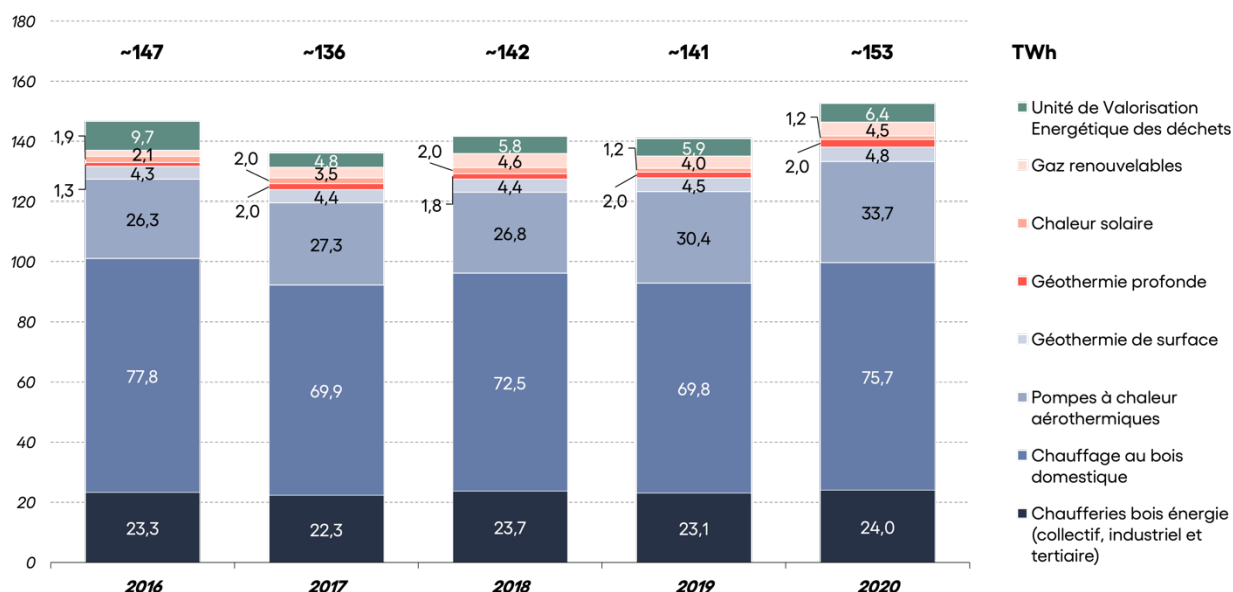
Origine de la chaleur en France (2017)



Source : PPE, p.64

B) Chaleur renouvelable : la produire, la distribuer, la stocker

Evolution de la production de chaleur renouvelable en France¹ (TWh)



1. Métropolitaine
Source : Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération, 2017-2021, analyse Carbone 4

De 2016 à 2020, la production globale de chaleur renouvelable a augmenté de 8 %. Cette production est assurée par de nombreuses filières, plus ou moins développées, détaillées ci-dessous. **En 2020, la biomasse domine largement le secteur, elle représente 65 % de la production renouvelable de chaleur** et est utilisée aussi bien pour le chauffage domestique que dans le tertiaire et l'industrie¹. Les pompes à chaleur aérothermiques arrivent en seconde position, principalement utilisées pour la production de chaleur domestique, elles assurent 22 % de la production. D'autres filières de production de chaleur renouvelable existent, détaillées ci-dessous, mais peinent parfois à se développer. Deux grandes catégories se distinguent :

- **Sans combustion** (PAC aérothermiques, solaire thermique, géothermie, récupération de chaleur) ;
- **Avec combustion** (biomasse solide, biométhane, hydrogène).

¹ 49 % pour le chauffage domestique et 16 % dans des chaufferies collectives, industrielles ou tertiaires

i. Les filières de production de chaleur renouvelable sans combustion

Les PAC aérothermiques

Les PAC aérothermiques transfèrent la chaleur d'un milieu basse température, l'air, vers un milieu à plus haute température comme un bâtiment ou un ballon d'eau chaude au moyen d'un cycle thermodynamique qui utilise de l'électricité. Elles sont classées dans la catégorie des renouvelables thermiques car la consommation d'un kWh d'électricité leur permet de restituer plusieurs kWh de chaleur en prélevant des calories dans l'air, à condition que la température extérieure ne soit pas négative. La performance d'une pompe à chaleur se traduit par son coefficient de performance (COP). Le COP représente le nombre de kWh de chaleur produits pour 1 kWh d'électricité ou de gaz consommé. Ces équipements peuvent transférer la chaleur par un vecteur air "en soufflant de l'air chaud"² (PAC Air/Air), par un réseau d'eau (plancher chauffant, radiateurs, etc.) "par circulation d'eau chaude" (PAC Air/Eau) ou pour produire de l'eau chaude sanitaire (chauffe-eau thermodynamique). **Les PAC aérothermiques ont couvert 33,66 TWh de production thermique renouvelable en 2020ⁱ, soit 5 % de la consommation finale de chaleur.** Le marché français est en croissance, +9 % d'unités vendues sur la période 2019-2020ⁱⁱ, mais **les PAC aérothermiques sont loin de couvrir le potentiel qu'elles représentent** : leur potentiel maximum est estimé par l'AFPAC à 75 TWh dans le résidentiel et 40 TWh dans le tertiaire en 2050³. Il convient toutefois de s'intéresser à la source d'énergie qui les alimente pour garantir leur intérêt d'un point de vue carbone. En hiver, avec la baisse des températures, les PAC aérothermiques voient leur rendement baisser et leur consommation électrique augmenter sur les périodes de pointe pour lesquelles l'électricité est plus carbonée⁴. Le fonctionnement et la pertinence des PAC aérothermiques étant relativement bien connus et la dynamique de déploiement soutenue, nous ne nous y attarderons pas dans cette publication.

² Permettent également de fournir du froid via de la climatisation si elles fonctionnent en mode "réversible"

³ PAC géothermiques comprises. AFPAC - Association Française pour les Pompes à Chaleur

⁴ Voir la publication de Carbone 4 "Chauffage électrique en France : une bonne idée pour le climat ?" pour approfondir l'impact de la production d'un kWh électrique supplémentaire en hiver pour un usage chauffage

La géothermie

La géothermie consiste à récupérer l'énergie disponible sous la surface de la terre. Elle permet de couvrir différents usages et besoins en température selon la profondeur des forages effectués. On distingue la géothermie de surface et la géothermie profonde :

La géothermie de surface utilise des pompes à chaleur géothermiques qui valorisent la chaleur prélevée dans le sol ou dans l'eau des nappes souterraines (via différents systèmes : sondes, forages sur nappe, corbeilles) et la transmettent à une température plus élevée vers un bâtiment. Cette géothermie s'appuie sur des forages de profondeur inférieure à 200 m et permet de répondre à des besoins en température inférieurs à 60 °C ou à apporter du rafraîchissement en réinjectant la chaleur dans le sous-solⁱⁱⁱ. Elle convient pour les logements individuels, avec certaines applications dans le collectif et le tertiaire. **Elle représente une production thermique renouvelable de 4,77 TWh en 2020 en France métropolitaine et couvre 0,7 % de la consommation finale de chaleur.** Le marché français des PAC géothermiques sur le marché des particuliers a fortement décliné depuis 2008 et reste en recul de 13 % sur la période 2019-2020, à contre-courant de la dynamique du marché européen qui affiche une croissance de 9 % sur la même périodeⁱⁱ.

La géothermie profonde permet de transmettre de la chaleur (ou du froid) à des bâtiments, directement ou via un réseau de chaleur. Elle s'appuie sur des forages entre 400 et 2500 m de profondeur^{iv} et permet de satisfaire des besoins en température entre 30 et 150 °C selon le lieu et la profondeur du forage, voire de plus de 150 °C pour des forages situés dans des zones d'anomalies géothermiques (bassins d'effondrement ou zones volcaniques par exemple) utilisée dans la production d'électricité ou de vapeur industrielle^v. **La production thermique renouvelable associée à la géothermie profonde, principalement localisée dans le bassin parisien, correspond à 2 TWh en 2020 en France et couvre 0,4 % de la consommation finale en chaleurⁱ.**

Le marché de la géothermie profonde connaît une croissance irrégulière depuis 2010, mais la France a tout de même doublé sa puissance installée en géothermie profonde sur cette période. En 2020, cette puissance avoisine les 700 MWth avec plus de 70 installations en fonctionnement, dont une cinquantaine qui alimentent des réseaux de chaleur urbains en Île-de-France. En 2023, ce nombre devrait passer à 80^{vi}.

Au total, **les installations de géothermie** (équipements de surface ou géothermie profonde) ont produit près de 7,3 TWh de chaleur renouvelable en 2020, soit près de 1,1 % de l'ensemble de la consommation annuelle de chaleur en Franceⁱ.

Le solaire thermique

Le solaire thermique transforme le rayonnement solaire, via des capteurs thermiques, en chaleur transmise par des fluides caloporteurs. On retrouve cette filière sous trois systèmes principaux :

- **Les chauffe-eau solaires individuels** représentent 79 % de la surface installée en France (utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire dans les logements individuels) ;
- **Le solaire thermique collectif et industriel** représente 18 % de la surface installée. Son application la plus courante est la production d'eau chaude sanitaire pour les logements collectifs ou le tertiaire, mais des centrales de très grandes dimensions (> 1000m²) se développent depuis quelques années pour répondre à de nouvelles applications comme la production de chaleur pour les réseaux de chaleur, la chaleur de procédés ou même la production de froid ;
- **Les systèmes solaires combinés** représentent 3 % de la surface installée et permettent de répondre à la fois aux besoins d'ECS et de chauffage.

En 2020, la production totale de chaleur renouvelable solaire s'élève à 1,24 TWh en France métropolitaine, (environ 2,24 TWh, en comptant les DOM) ce qui représente 0,2 % de la consommation finale de chaleurⁱ. Le solaire thermique permet de répondre à une large gamme des besoins en température, allant de 60 à 250 °C (les températures au-delà de 100 °C sont obtenues par concentration des rayons pour produire de la vapeur pour l'industrie)^v. Peu développé dans le secteur industriel, le solaire thermique est pourtant adapté à la production de gros volumes d'eau chaude à moyenne / basse température applicables dans des secteurs comme l'agro-alimentaire ou les industries de lavage. Le nombre de MW de solaire thermique installés en France est en croissance de 19 % sur la période 2020-2021^{vii}.

La récupération de chaleur

La récupération de chaleur n'est pas une filière de production à proprement parler. Elle désigne la valorisation de la chaleur fatale (perdue) présente dans les rejets d'un site ou d'un procédé dont la finalité première n'est pas la production de chaleur (ex : industrie, raffinerie, centrale électrique, station d'épuration des eaux, unité de valorisation énergétique des déchets, data center, hôpital, etc.). Il est possible de capter tout ou partie de cette énergie et de la valoriser sous forme de chaleur (ou

d'électricité). Selon la forme des rejets, la chaleur fatale est plus ou moins facile à capter : les rejets liquides sont les plus facilement récupérables, suivis des rejets gazeux dans les fumées ou les buées, tandis que les rejets diffus (ex : pertes par les parois) sont les plus difficiles à capter. Selon son origine, la plage de température de la chaleur récupérée peut varier de 30 °C (eaux usées) à 500 °C (gaz de combustion, etc.). **La production de chaleur par les Unités de valorisation énergétique des déchets atteint 12,73 TWh en 2020 et couvre 2 % de la consommation finale de chaleur, 50 % sont réglementairement considérés comme de la chaleur renouvelable, les 50 % restants sont qualifiés de chaleur de récupération⁵ⁱ.**

ii. Les filières de production de chaleur renouvelable avec combustion

La biomasse solide

La biomasse solide désigne principalement du bois (bûches, copeaux, plaquettes, granulés, broyat) d'origine variée (forestière^{6viii}, bocagère ou agro-forestière, paysagère, industrielle, déchets) utilisé en tant que combustible. Elle permet de répondre à une très large gamme de besoins en température, de 100 à plus de 550 °C^v. La biomasse solide a couvert 99,66 TWh de production thermique renouvelable en 2020ⁱ, répartie entre :

1. Le bois-énergie (23,96 TWh), utilisé dans les secteurs collectif, industriel et tertiaire via des chaufferies dédiées sur site ou des réseaux de chaleur ;
2. Le chauffage bois domestique (75,70 GWh) utilisé dans les logements individuels via des inserts, poêles, chaudières ou cuisinières à bois.

Elle est de loin la première source d'énergie renouvelable utilisée en France, elle représente ainsi 65 % de la production de renouvelable thermique en 2020, soit encore 15 % de la consommation finale de chaleur.

Le biométhane

Le biométhane est issu de matières organiques : déchets ménagers organiques, déchets agricoles ou de l'industrie agro-alimentaires, effluents d'élevage, déchets verts, ou encore de cultures dédiées comme les cultures intermédiaires à vocation énergétique

⁵ Seule la fraction "biodégradable" des déchets brûlés est considérée comme source de chaleur renouvelable (par convention 50 %), le reste est de la chaleur de récupération

⁶ Le bois-énergie n'est pas une utilisation finale recherchée en sylviculture, ce n'est qu'un co-produit d'exploitation

(CIVE). Il est produit par la dégradation de ces matières fermentescibles par des micro-organismes en l'absence d'oxygène (méthanisation). **En 2020, on compte environ 1 100 installations de production et d'utilisation de biométhane**, 65 % de ces installations produisent de la chaleur en co-génération avec l'électricité, 15 % produisent de la chaleur seule et 20 % des installations injectent leur production sur le réseau⁷. L'électricité étant bas-carbone en France, c'est ce dernier type d'installation qui est désormais plébiscité par l'Etat. **La production thermique directe résultant de biométhane s'élève pour l'ensemble du parc à 4,5 TWh. Cette production couvre 0,7 % de la consommation finale de chaleur en France**ⁱ.

L'hydrogène

L'hydrogène peut être produit par gazéification d'hydrocarbures ou de biomasse, par vapo-réformage du gaz fossile ou par électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité. En 2020, 79 % de la production d'hydrogène dans le monde est basée sur des produits fossiles (gaz (62 %), charbon (19 %)), moins de 1 % de cette production comporte du "Carbon Capture, Utilisation and Storage" (CCUS) permettant de réduire l'empreinte carbone de cette production, et le reste est assuré par des procédés dont l'hydrogène est un co-produit^x. Mais l'anticipation des baisses de coûts associés à l'hydrogène vert (produit à partir d'électricité renouvelable) permet de l'envisager comme un vecteur de production de chaleur renouvelable qui pourrait être intégré ou se substituer aux fossiles dans les unités de production de chaleur et répondre à des besoins de hautes températures. A court et moyen termes, cet usage ne semble cependant pas se dessiner comme prioritaire pour l'hydrogène⁸.

iii. En pratique : réseaux de chaleur, températures desservies et stockage

Réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur tout comme les réseaux électriques ou d'eau permettent de mutualiser les coûts, les risques, les compétences des différentes filières et d'optimiser le taux d'utilisation de la production. Il est donc naturel que la chaleur, qui représente 69 % de la consommation énergétique du secteur résidentiel et tertiaire, se développe

⁷ Voir l'article de Carbone 4, « Biométhane et climat : font-ils bon ménage ? »

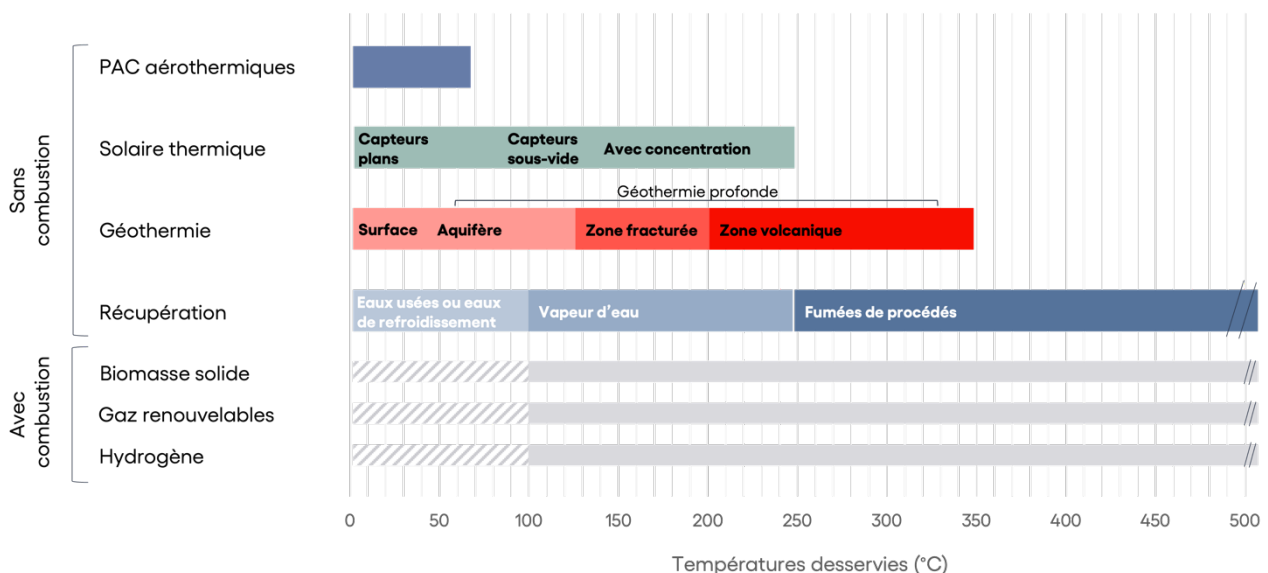
⁸ Voir la publication de Carbone 4, « Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? »

également dans des réseaux de distribution avec des capacités de production centralisées. Les livraisons de chaleur via des réseaux répondent à moins de 10 % des besoins de chaleur en France en 2020. La chaleur, bien que distribuable sur de moins longues distances que l'électricité ou l'eau, gagne à être distribuée via des réseaux car ils constituent de bons vecteurs de valorisation des ressources thermiques locales (solaire thermique, géothermie, biomasse, déchets, récupération) et permettent une diminution significative du contenu carbone de la chaleur livrée.

En 2020, les réseaux de chaleur utilisaient 60,5 % d'énergies renouvelables (contre 23 % pour l'ensemble de la production de chaleur) et de récupération contre 31 % en 2010^x. La Loi de la Transition Énergétique et de la Croissance Verte a fixé l'objectif de livrer sur les réseaux de chaleur 39,5 TWh d'EnR&R en 2030 tandis qu'ils ont permis de livrer 25,4 TWh de chaleur livrée nette en 2020 avec un contenu carbone moyen de 129 gCO₂e/kWh (émissions ACV)^{xi}.

Niveaux de température

Les plages de température desservies par les technologies de production de chaleur renouvelable (°C)

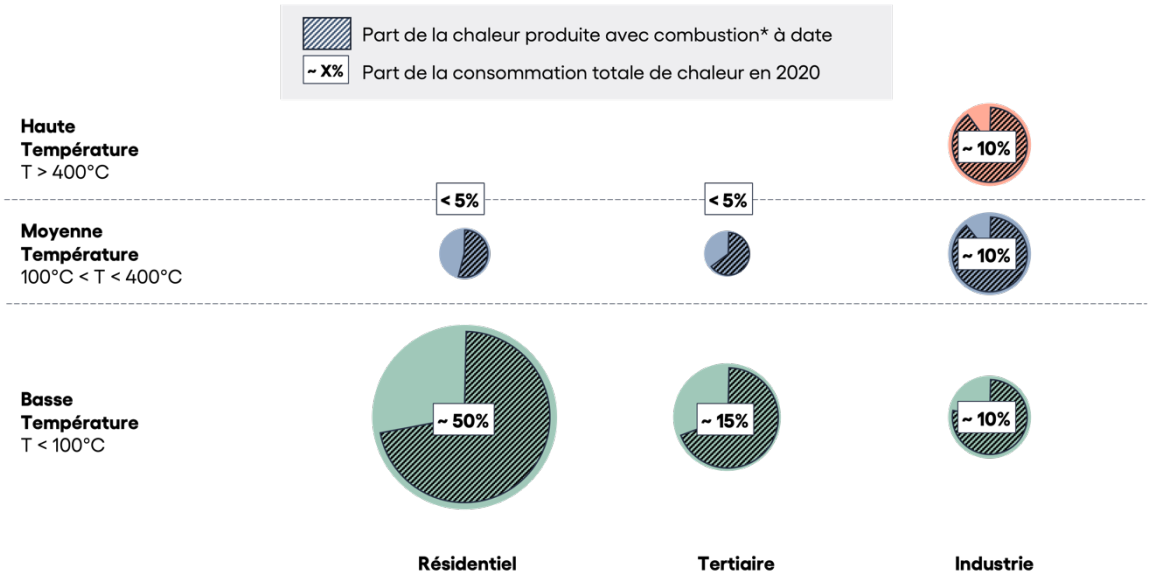


Sources : Fonds chaleur, Expertise ADEME Energies, geothermies.fr

Pour les besoins de chaleur à très haute température, supérieure à 400 °C, seules les filières avec combustion (fossile, biomasse, biométhane ou encore hydrogène) et la

récupération sur certaines filières (combustion, nucléaire) sont adaptées. Les technologies les plus répandues du solaire thermique, des PAC et de la géothermie servent plutôt des températures inférieures à 100 °C, qu'on qualifie de "basses températures".

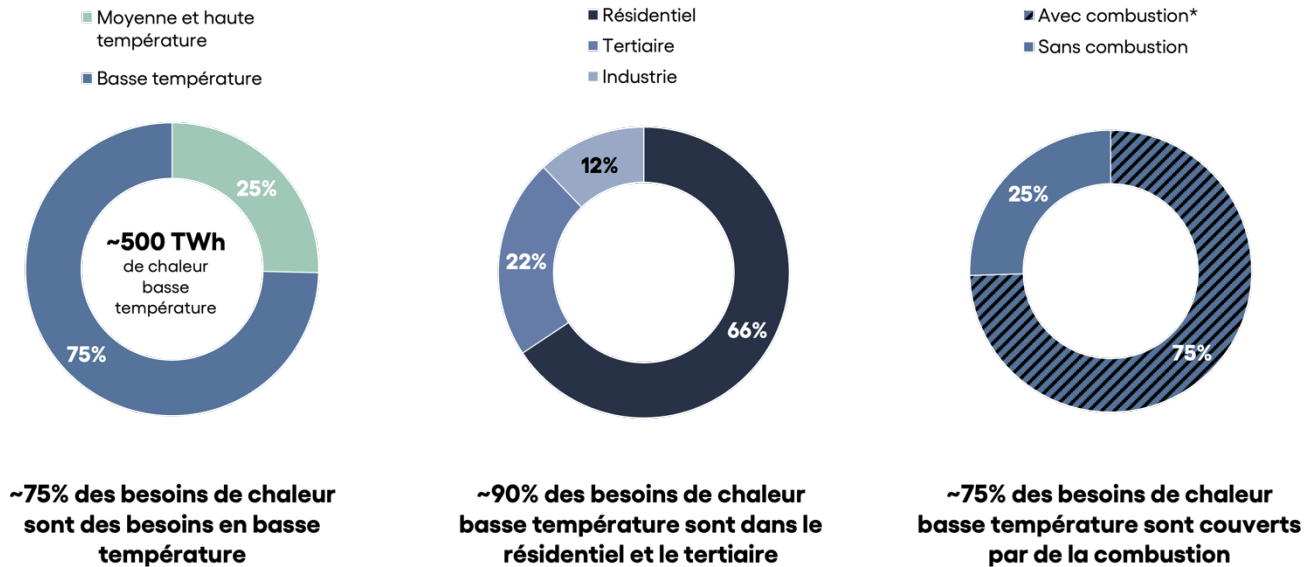
Répartition des besoins de chaleur par températures et par secteurs en France



*Sources renouvelables incluses. Sources : Consommations d'énergie par usage du résidentiel (2020, SDES), Consommation énergétique du secteur tertiaire (CEREN, 2020), Données sur l'énergie dans l'industrie (CEREN, 2016), Répartition par secteur de la consommation finale de l'industrie (SDES, 2019), Heating without global warming (IEA), analyse Carbone 4

Les besoins en basse température représentent environ 75 % des besoins de chaleur, majoritairement portés par le résidentiel et le tertiaire. Sur ces besoins en basse température, 75 % sont couverts par des technologies avec combustion (y compris combustion de renouvelables - biomasse solide, biométhane) tandis que les filières de production de chaleur renouvelable sans combustion sont souvent adaptées pour y répondre. Ce sont donc l'équivalent de 500 TWh de chaleur, à basse température, qui peuvent être servis par des filières sans combustion afin de prioriser les combustibles, y compris ceux d'origine renouvelable pour des usages énergétiques qui ne peuvent s'en passer. D'après la programmation pluriannuelle de l'énergie, 200 TWh (soit 19 % des besoins en énergie)^{xiii} sont associés à des usages spécifiques (aviation, industrie) qui ne pourront être assurés que par des combustibles en 2050. Aussi, valoriser les sources de chaleur renouvelables sans combustion permettrait de prioriser l'utilisation des vecteurs combustibles issus de la biomasse, qualifiée de "ressource rare en 2050" (voir l'encart sur les conflits d'usage de la biomasse).

Zoom sur les besoins de chaleur à basse température en France (< 100°C)



*Sources renouvelables incluses. Sources : Consommations d'énergie par usage du résidentiel (2020, SDES), Consommation énergétique du secteur tertiaire (CEREN, 2020), Données sur l'énergie dans l'industrie (CEREN, 2016), Répartition par secteur de la consommation finale de l'industrie (SDES, 2019), Heating without global warming (IEA), analyse Carbone 4

Les solutions de stockage de la chaleur

L'énergie thermique peut être stockée selon trois procédés différents :

- **Le stockage de chaleur sensible** est basé sur la restitution de la chaleur absorbée par un matériau liquide ou solide chauffé sans changement d'état (eau, sels fondus, roches, béton) ;
- **Le stockage de chaleur latente** est basé sur la restitution de la chaleur latente absorbée lors du changement de phase de l'état solide à l'état liquide d'un matériau (glace, paraffines, acides gras, sels hydratés) ;
- **Le stockage thermochimique** est basé sur la restitution de chaleur par des réactions chimiques qui absorbent de l'énergie thermique pour se produire dans un sens (endothermique) et qui dégagent de la chaleur lorsque effectuées dans le sens inverse (exothermique) pour revenir à l'état initial.

La solution de **stockage thermique de chaleur sensible** est la plus simple et la plus répandue, elle permet de stocker la chaleur sur des durées plus ou moins longues, du

pas journalier ou hebdomadaire par stockage d'eau chaude dans des cuves, jusqu'au pas inter-saisonnier sur champ de sondes géothermiques (chaleur stockée dans le sol), sur aquifère (chaleur stockée dans un aquifère souterrain) ou en fosse (chaleur stockée dans des "piscines" creusées dans le sol).

	Grande cuve de stockage d'eau chaude	Stockage en fosse
Taille	1,000 à 10,000m ³	50,000 à 500,000m ³
Capacité	60 à 600MWh	3,000 à 30,000MWh
CAPEX	~3M€/GWh de capacité de stockage	~ 0,6M€/GWh de capacité de stockage
OPEX	~ 8,6€/MWh/an de capacité	~ 3€/MWh/an de capacité
Pertes	~ 0,2% par jour	~ 0,08°C par jour

Note : ©2015
 Source : DEA, Technology Data for Energy Storage, analyse Carbone 4

Le stockage thermique permet notamment la valorisation d'énergies fatales, l'optimisation des moyens de production de chaleur renouvelable et de leur dimensionnement (déstockage lors de pointes de consommation qui évite de faire appel à une chaudière supplémentaire par exemple). Mais surtout, le stockage thermique permet le couplage et l'intégration d'énergies renouvelables à production variable (lissage ou déphasage de la production par rapport à la consommation) possibles pour le solaire thermique et la géothermie. Enfin, le stockage peut également permettre de coupler l'intégration d'énergies renouvelables électriques intermittentes, comme à Aalborg (Danemark) où la fosse de stockage est chauffée lorsque l'électricité éolienne est excédentaire^{xiii}.

C) L'importance de son essor dans une France bas-carbone

Les objectifs nationaux fixés par la révision de la programmation pluriannuelle de l'énergie sont de porter la part des énergies renouvelables à 38 % de la chaleur consommée et de multiplier par 5 la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux en 2030 (par rapport à 2012)^{xiv}. **En 2020, la part des énergies renouvelables dans la production de chaleur en France est de 22,8 %, elle progresse de 0,8 point par an en moyenne depuis 2010.** Cette hausse résulte à la fois d'une augmentation de la production de chaleur par des sources renouvelables et d'une baisse de la consommation finale de chaleur⁹.

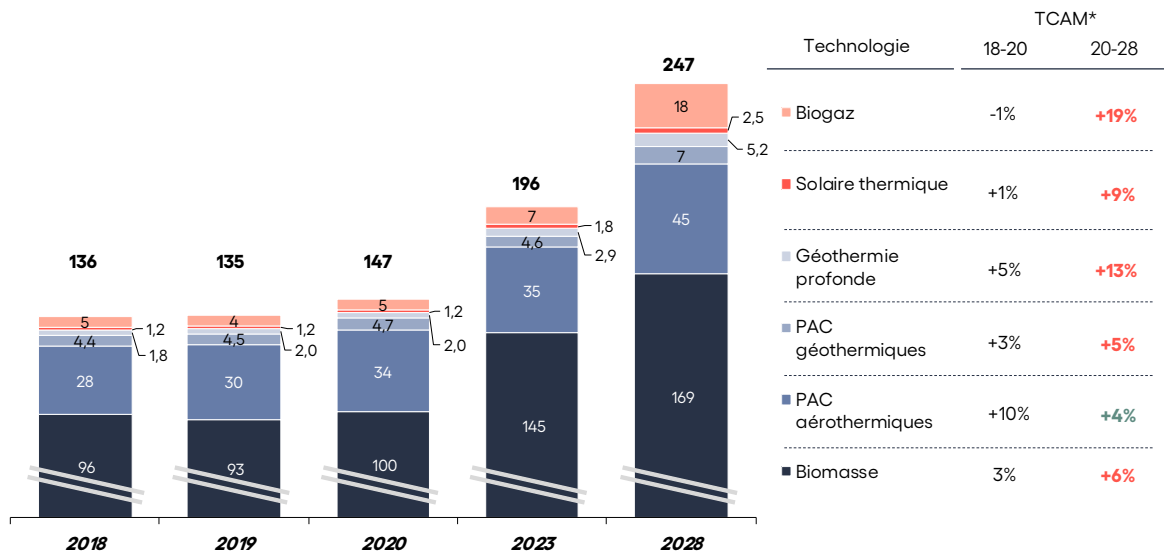
Pour atteindre l'objectif fixé par la LTECV, la croissance du taux de chaleur renouvelable devrait atteindre 1,5 points par an, soit un rythme quasiment deux fois plus soutenu que celui observé sur la période 2015-2020.

En analysant la progression par filière, **seule la filière des PAC aérothermiques se développe à un rythme suffisant pour atteindre les objectifs de 2030.** Les autres filières comme la biomasse solide, le biogaz ou les PAC géothermiques montrent une croissance trop faible pour atteindre les objectifs. Enfin, la géothermie profonde et le solaire thermique sont les deux filières pour lesquelles l'écart entre le rythme de déploiement observé et le rythme nécessaire pour atteindre les objectifs de la PPE est le plus important.

Les filières du solaire thermique et de la géothermie représentent une faible part en absolu de la capacité renouvelable prévisionnelle de 2028 mais ont cependant des objectifs de croissance très ambitieux sur la période 2018-2028 avec une croissance attendue jusqu'à 190 % pour la géothermie profonde, 60 % pour les PAC géothermiques et 110 % pour le solaire thermique.

⁹ La PPE estime que les besoins en chaleur vont décroître de 669 TWh en 2020, à 639 TWh en 2023 et à 579 TWh en 2028

**Evolution de la production de chaleur renouvelable par filière
sur la période 2018-2020 et objectifs fixés par la PPE pour 2023 et 2028 (TWh)**



*TCAM : Taux de croissance annualisé moyen. Champ : France métropolitaine continentale (champ défini par la PPE).
Source : Panorama de la chaleur renouvelable, ADEME 2019, 2020, 2021, PPE, analyse Carbone 4

Les scénarios de l'ADEME présentés dans le rapport Transition(s) 2050 sont des scénarios qui visent la neutralité carbone de la France à 2050. Le scénario tendanciel (de prolongation des tendances passées), qui ne permet pas de respecter l'objectif de neutralité carbone en 2050, n'atteint pas les objectifs fixés par la PPE en termes de production renouvelable à horizon 2030 ni au global ni par filière (excepté pour les PAC aérothermiques).

Tous ces scénarios se reposent moins sur la production de chaleur renouvelable à partir de biomasse solide et de biogaz que la PPE. Ils comptent tous entre 30 et 60% de production en moins par rapport à la PPE sur la filière biomasse solide et environ 25% de moins pour le biogaz. Au contraire, trois de ces quatre scénarios dépassent largement les objectifs de la PPE en ce qui concerne la production de solaire thermique et des PAC géothermiques pour 2030 (respectivement jusqu'à +80% et +35% sur les capacités de production de ces filières). Le rapport indique aussi que les grandes installations de solaire thermique font partie des tendances émergentes dans les réseaux de chaleur et les sites industriels et agricoles, car elles ont l'avantage de faire gagner en compétitivité le solaire thermique.

L'objectif intermédiaire de 38 % de renouvelable dans la production de chaleur fixé par la PPE, révisée en 2019, semble à la fois difficilement atteignable au rythme actuel mais également très ambitieux sur la contribution des filières biomasse solide et biogaz à cet objectif.

La géothermie et le solaire thermique présentent un potentiel théorique illimité (car basés sur deux ressources présentes sur l'ensemble du territoire français), mais leur développement dépend de la levée des freins économiques et techniques que ces deux filières rencontrent. Les trois points clés que nous identifions comme des facteurs nécessaires pour porter le développement des filières aux objectifs de la PPE, ou plus encore de la neutralité carbone, sont les suivants :

- Un réseau d'acteurs compétents et agréés capables de répondre localement aux besoins techniques associés aux filières de production de chaleur renouvelable. À titre de contre-exemple, il n'existe qu'une cinquantaine d'entreprises de forage qualifiées dans toute la France pour la réalisation de forages pour de la géothermie de surface ;
- De la visibilité (post PPE) et de la communication (pour tous les publics) pour que les filières de production renouvelable soient envisagées et mises à l'étude au début des projets ;
- Des mécanismes de soutien dimensionnés et orientés selon les besoins et objectifs fixés à chaque filière.



II - Comment le développement de la chaleur renouvelable est-il soutenu ?

A) Les dispositifs de soutien financier en France

Le Fonds Chaleur

Le Fonds Chaleur de l'ADEME apporte un soutien financier et technique aux projets de production de chaleur renouvelable (biomasse, géothermie, solaire, biogaz, énergies de récupération et réseaux de chaleur associés) en remplacement de capacités fossiles. Il contribue à l'objectif de la loi TECV¹⁰ d'atteindre 38 % de chaleur renouvelable dans la consommation finale de chaleur d'ici 2030. Le dispositif a financé 27 % des investissements réalisés¹¹ dans les installations de chaleur renouvelable sur la période 2009-2021.

Trois procédures de financement possibles :

- Les **appels à projets nationaux annuels**, BCIAT (projets biomasse chaleur industrie agriculture et tertiaire)¹² ou GIST (grandes installations solaires thermiques)^{13xv} ;
- Le **dispositif d'aides régionales** géré par les directions régionales de l'ADEME sous forme d'appels à projets locaux qui peuvent également aider au financement d'études et de conseil en amont des projets d'installation ;
- Les **soutiens conclus de gré à gré** sous forme d'aide à l'investissement pour les industriels, les entreprises et les collectivités qui couvrent jusqu'à 30 % des investissements dans la récupération de chaleur, 45 % dans les énergies

¹⁰ TECV = Loi sur la transition énergétique et la croissance verte

¹¹ 2,9 milliards sur 10,6 milliards d'investissement total dans des installations de chaleur renouvelable

¹² Pour les installations qui assurent une production énergétique annuelle supérieure à 12 000 MWh/an, à partir de biomasse, couplées ou non à d'autres énergies renouvelables ou de récupération

¹³ Pour les installations solaires de production d'eau chaude sanitaire ou pour des procédés industriels à partir d'une surface totale de capteurs ≥ 500 m² pour le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et le secteur agricole, et $\geq 1 500$ m² pour les installations couplées à un réseau de chaleur avec stockage

renouvelables et 60 % dans les réseaux de distribution de chaleur avec des soutiens additionnels pour les PME.

Les autres aides à la chaleur

Les aides “pour la chaleur”^{xvi} couvrent également les dispositifs qui permettent de moins consommer de chaleur (ex : la rénovation thermique) ou l’ajout de capacité renouvelable supplémentaire pour atteindre les objectifs de la PPE.

- Notamment, pour la rénovation thermique des bâtiments ou le changement d’équipement de chauffage, le dispositif des **certificats d’économie d’énergie (CEE)** impose aux fournisseurs d’énergie d’aider les consommateurs à réduire leur consommation d’énergie, les économies réalisées sont comptabilisées proportionnellement sous forme d’un volume de CEE restitué à l’Etat avec des pénalités aux fournisseurs en cas d’objectif non atteint. L’aide peut être accordée à tous (particuliers, entreprises, collectivités) sous différentes formes, selon le fournisseur d’énergie retenu : prime en chèque, bons d’achat, réductions, services gratuits...
- **Ma Prime Rénov’** est une aide de l’état pour réaliser des travaux d’isolation ou soutenir le changement d’un système de chauffage au fioul ou au gaz vers une installation biomasse, solaire thermique, géothermique ou pompe aérothermique qui concerne tous les propriétaires pour un montant indexé sur leur revenu et le gain écologique permis par les travaux.
- **L’éco-prêt à taux zéro** permet de financer la rénovation énergétique des logements sans avance de trésorerie et sans payer d’intérêts jusqu’à 50 000 € sans condition de ressources.
- Avec le dispositif **Coup de pouce économies d’énergie**, certains vendeurs d’énergie octroient des primes aux particuliers notamment pour le changement de leur système de chauffage et en fonction du niveau de ressource du bénéficiaire (non compatible avec les CEE).
- La **TVA à 5,5%** ou l’**exonération de la taxe foncière** pour les travaux réalisant des économies d’énergie ainsi que pour **la livraison de chaleur par des réseaux alimentés par au moins 50 % de renouvelables**.

En plus de ces aides à la chaleur, **des fonds de garanties spécifiques** à certaines filières comme la géothermie profonde (SAF-Environnement) et à la géothermie de surface (Aquapac) existent et couvrent certains risques de court terme (liés au forage et au risque géologique) et de long terme (liés à l'évolution de la ressource en eau de l'aquifère ou de la nappe exploitée).

Quelles différences avec les ENRs électriques ?

En 2019, la chaleur génère environ 5 fois plus de GES que la production d'électricité totale en France^{xvii}. Pourtant en 2020, sur les presque 10 Md€ d'investissements favorables au climat dans le secteur de la production d'énergie, la chaleur représentait 13 % des investissements contre 87 % investis dans la production électrique^{xviii}. Pour permettre une décarbonation la plus rapide possible, il conviendrait de maintenir un soutien aux EnR électriques (la nature et l'ampleur de ce soutien n'étant pas discutés ici), qui sont nécessaires à court comme à long terme pour répondre à une partie de l'augmentation de la demande électrique (indépendamment des choix effectués sur la filière nucléaire), mais aussi d'augmenter le soutien à la production de chaleur renouvelable. En effet, **la chaleur est à la fois plus carbonée et représente à ce jour une quantité annuelle d'énergie servie plus importante que l'électricité.** En 2022, le budget prévisionnel du Fonds chaleur atteint seulement 370 M€ (relevés à 520M€ au printemps) et 520 M€ dans le budget 2023 (à la date de rédaction en octobre 2022)^{xix}, c'est le seul dispositif de soutien au développement de production de chaleur renouvelable centralisée ou pour les entreprises. De plus, il se présente sous la forme d'aides à l'investissement qui demandent aux porteurs de projets une avance de trésorerie et ne permettent pas de garantir sur le long terme au consommateur un prix de la chaleur renouvelable produite compétitif avec le fossile (à défaut d'un prix de marché centralisé de la chaleur), contrairement aux dispositifs pour l'électricité renouvelable. On peut noter que depuis 2020, la biomasse dispose d'aides au fonctionnement via France Relance en plus des aides à l'investissement prévues par le Fonds chaleur. On pourrait penser que ce format de soutien financier n'est pas adapté au solaire thermique ou à la géothermie dont la majorité des coûts sont dus aux investissements initiaux. Mais des aides au fonctionnement pourraient ainsi favoriser le développement de ces filières qui peinent à décoller. En effet, le solaire photovoltaïque présente la même structure de coûts et s'est développé grâce à de tels mécanismes assurantiels (visibilité dans le temps, et garantie de prix stable et compétitifs avec les prix de marché).

En comparaison, une enveloppe de 5,2 Md€ était prévue en soutien de la production renouvelable d'électricité en France métropolitaine sous la forme de mécanismes d'obligations d'achat et de compléments de rémunération en 2022^{xx}. Toutefois, le choc sur les prix de l'énergie en cours depuis fin 2021 ayant fait passer le prix de gros de l'électricité au-dessus des tarifs garantis par l'Etat aux producteurs d'énergies renouvelables, ces dépenses s'avèrent devenir des recettes prévisionnelles de 4,3 Md€ cumulées pour 2022.

D'autres dispositifs de soutien à la chaleur, comme les CEE, l'éco-prêt à taux zéro ou Ma Prime Rénov', existent et bénéficient de financements conséquents (2Md€ consacrés à Ma Prime Rénov' en 2022^{xxi}). Ces dispositifs ne concernent que le développement de la chaleur renouvelable de manière décentralisée, chez les particuliers. Toutefois, ils soutiennent également l'isolation et la rénovation thermique, indispensables avant même de changer de système de chauffage, pour réduire la consommation énergétique ainsi que les émissions de CO2 associées au bâtiment.

Le soutien à l'installation de capacité de production électrique renouvelable est, dans une certaine mesure, plus facile que le soutien à la production de chaleur renouvelable. En effet, les solutions renouvelables électriques alimentent un réseau centralisé qui les rend applicables quasiment partout. Au contraire, **la chaleur ne peut pas être produite puis transportée sur de longues distances, les installations de production doivent donc être adaptées aux contraintes et aux ressources locales et étudiées au cas par cas des projets.**

Ce décalage entre part dans les émissions de CO2 et niveau de subvention ainsi que le choix d'aider les investissements plutôt que la production sur la durée de vie de l'installation de production de chaleur sont-ils des fatalités ? Nos voisins européens ont-ils réalisé les mêmes choix ?

B) Exemples de dispositifs de soutien à l'international

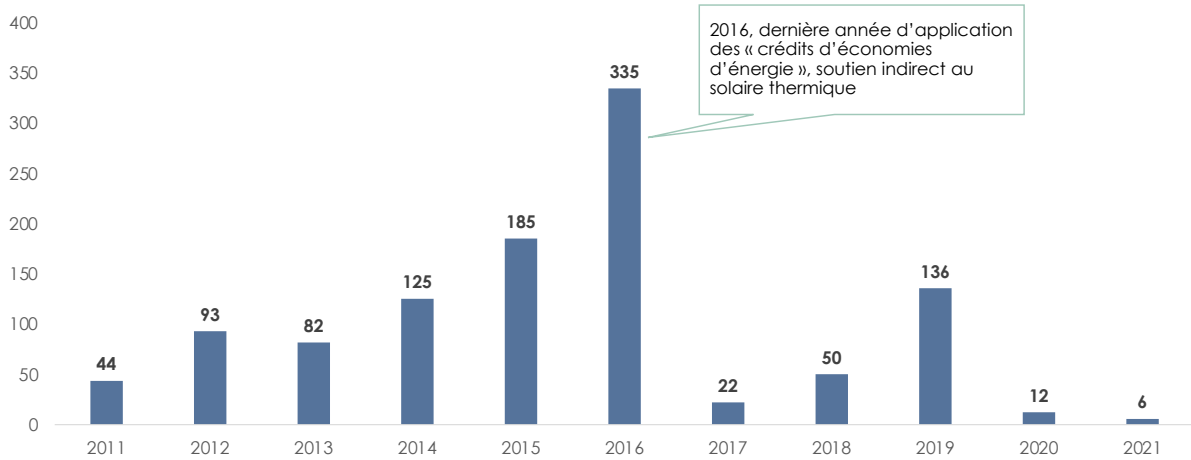
Pays-Bas : Le mécanisme de subvention SDE++, revu en 2019 mais existant depuis 2011, cherche à soutenir le développement de la production renouvelable et de technologies de réduction du CO2 avec un budget total de 13 milliards d'euros pour 2022. Cette

subvention est “opérationnelle”, c’est à dire qu’elle est versée mensuellement pour compenser l’écart entre le coût de production et de revenu de l’énergie renouvelable produite et est allouée pour une période de 12 à 15 ans. Elle permet de garantir un prix stable sur le long terme pour la chaleur renouvelable produite et donc d’inciter les producteurs et les consommateurs (industriel, réseau urbain, collectivité...) à s’engager dans des projets de production renouvelable, même avec des investissements conséquents comme le solaire thermique. Cette subvention est ouverte notamment à la production de chaleur renouvelable ou bas- carbone via les filières biomasse solide, gaz renouvelables, solaire thermique, géothermie profonde et de surface, et récupération de chaleur^{xxii}.

Danemark : Les réseaux de chaleur appartiennent généralement aux consommateurs eux-mêmes ou à la municipalité, et pour le service public danois, les investissements à long terme ne sont pas considérés comme un obstacle.

L’accès à des garanties municipales sur des prêts longs avec des taux d’intérêts de l’ordre de 2 à 3 % facilite les investissements dans les énergies renouvelables, et notamment dans le solaire thermique. Il existait également une incitation indirecte au développement du solaire dans les réseaux de chaleur danois qui exigeait de chaque réseau d’obtenir une certaine économie d’énergie chaque année ou d’acheter des “crédits économie d’énergie” à un autre service public excédentaire : avant janvier 2017, la première année de production de chaleur solaire comptait comme des économies d’énergie, qui revendues remboursaient une partie de l’investissement initial. Cette option a pris fin en décembre 2016, ce qui a poussé de nombreux services publics à terminer plusieurs centrales solaires thermiques avant cette échéance^{xxiii}. Le marché danois du solaire thermique s’est effondré en 2020 suite à l’expiration de la politique énergétique menée jusqu’alors. Toutefois, les politiques précédentes ont permis le développement de la filière solaire thermique de grandes installations sur réseau au Danemark. En 2021, la capacité installée pour les grandes installations destinées aux réseaux de chauffage urbains s’élevait à 1 126 MW sur 125 installations contre 11 MW sur 8 installations en France^{xxiv} alors que l’irradiation moyenne annuelle est de 1 000 kWh/m²/an au Danemark contre 1 400 kWh/m²/an pour la France^{xxv}.

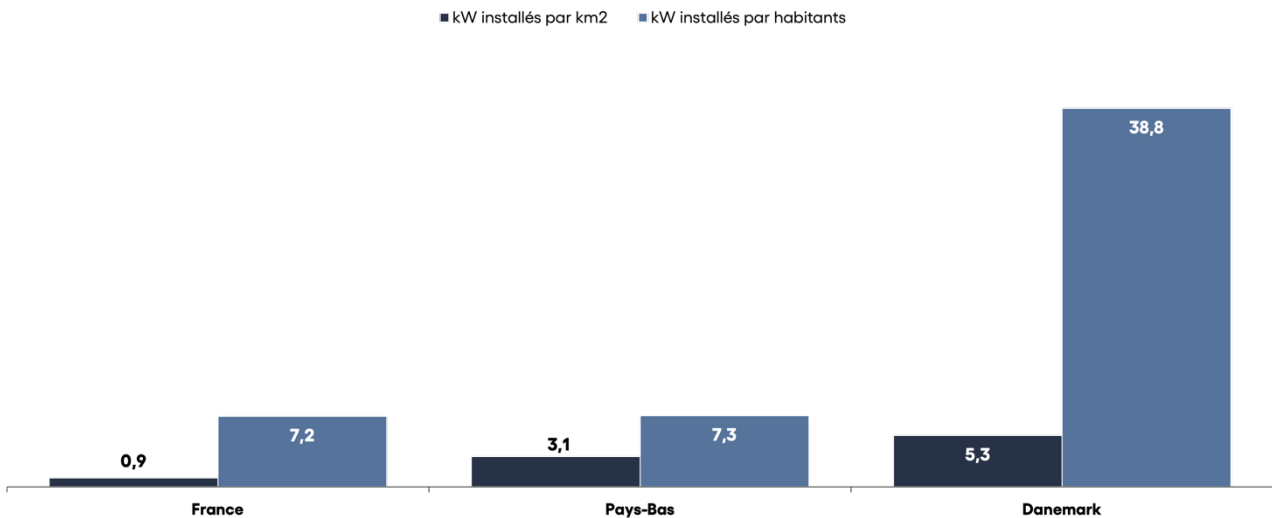
Installations annuelles de solaire thermique au Danemark (MW_{th})



Source : Solar district heating trends and possibilities, SHC, 2018

On peut voir ici, que la politique de soutien au solaire thermique mise en place au Danemark a permis une installation importante de capacités de solaire thermique, tous types d'installations confondus. **Sur la période 2017-2021, il y a eu 5 fois plus de kW de solaire thermique installés par m² et par habitant au Danemark qu'en France.**

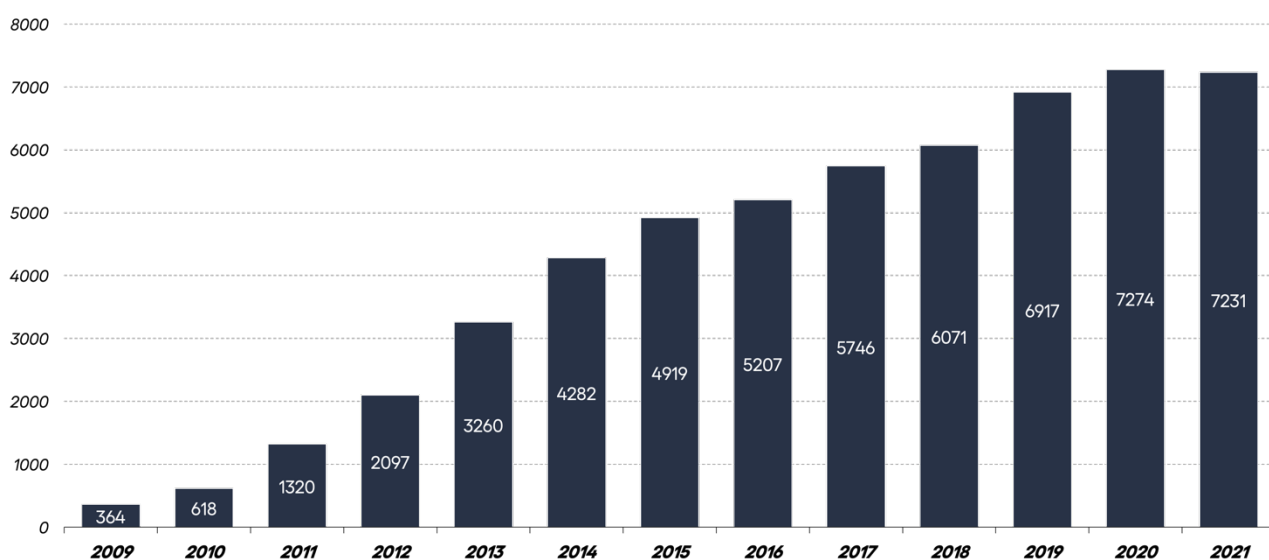
Comparaison des installations de solaire thermique en France, aux Pays-Bas et au Danemark sur la période 2017-2021



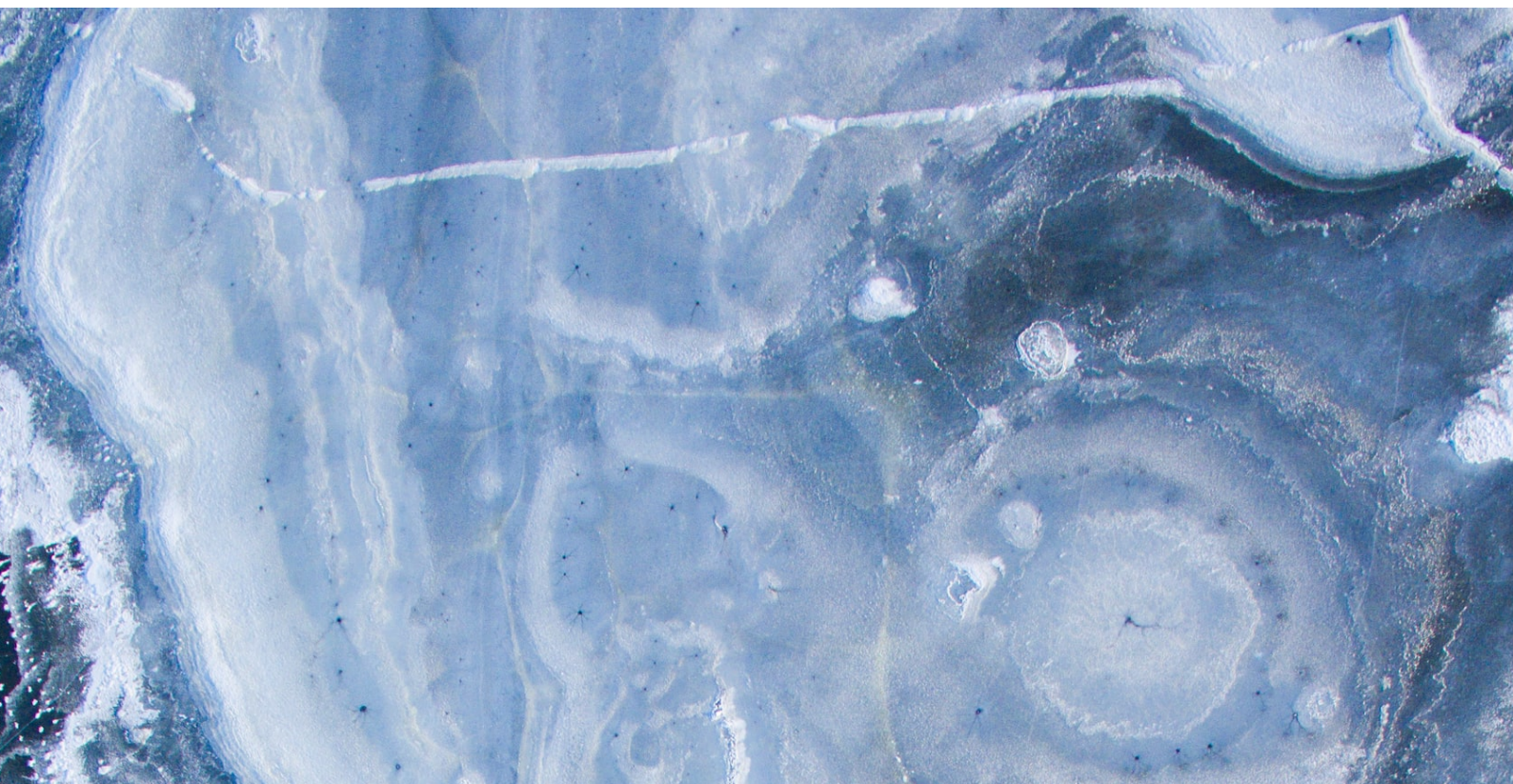
Source : Source : Baromètres EurObserv'ER pour le solaire thermique 2013-2021, analyse Carbone 4

Suisse : Depuis 2018, l'Office fédéral de l'Énergie suisse a mis en place des mesures de soutien aux projets d'utilisation directe de la géothermie pour la production de chaleur via des contributions pour les phases de prospection et de mise en valeur. Depuis 2009, l'aide financière à l'installation de PAC géothermiques a été revalorisée à 2,400 francs suisses auxquels s'ajoutent au minimum 180 francs suisses par kW installés. Ce soutien à la géothermie de surface montre des effets positifs sur l'évolution du nombre de PAC géothermiques vendues sur les 12 dernières années^{xxvi}.

Evolution des ventes de PAC géothermiques en Suisse (unités vendues/an)



Source : Association suisse de la géothermie, FWS Statistik 2021





III - Toutes les chaleurs renouvelables ne se valent pas

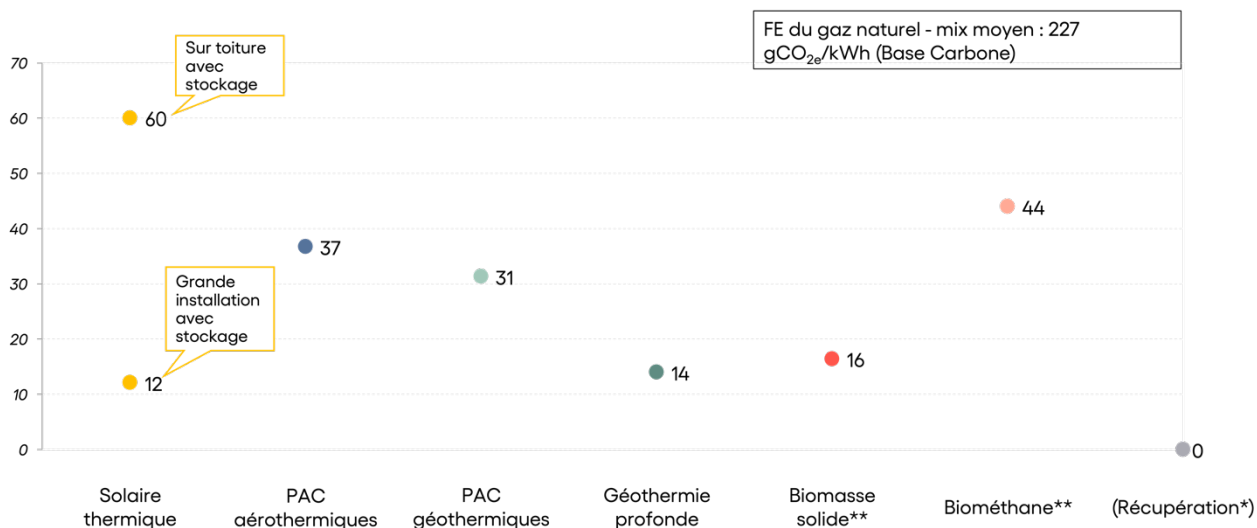
A) Comparaison des principales filières de production de chaleur renouvelable

Émissions de CO2

La chaleur de récupération est comptabilisée à 0 gCO₂e/kWh car considérée par la FEDENE¹⁴ comme perdue sous forme de chaleur fatale si elle n'était pas récupérée. Elle se positionne donc comme la source de chaleur la moins carbonée. Toutefois, il faut noter qu'elle provient très largement de procédés qui utilisent des ressources fossiles, donc amenés à diminuer dans un contexte de décarbonation. Les grandes installations de solaire thermique, la géothermie profonde directe et la biomasse solide produisent de la chaleur 15 fois moins carbonée que celle basée sur le gaz fossile. Les PAC aérothermiques ou géothermiques de surface sont 6 à 7 fois moins carbonées que le chauffage au gaz fossile, mais leur empreinte dépend fortement de leur coefficient de performance (COP) et du contenu carbone de l'énergie qui les alimente. Enfin, le biogaz produit de la chaleur avec un contenu carbone 5 fois inférieur à celui du gaz fossile.

¹⁴ FEDENE = Fédération des Services Energie Environnement

Empreinte carbone des différentes filières de production de chaleur renouvelable (gCO_{2e}/kWh)

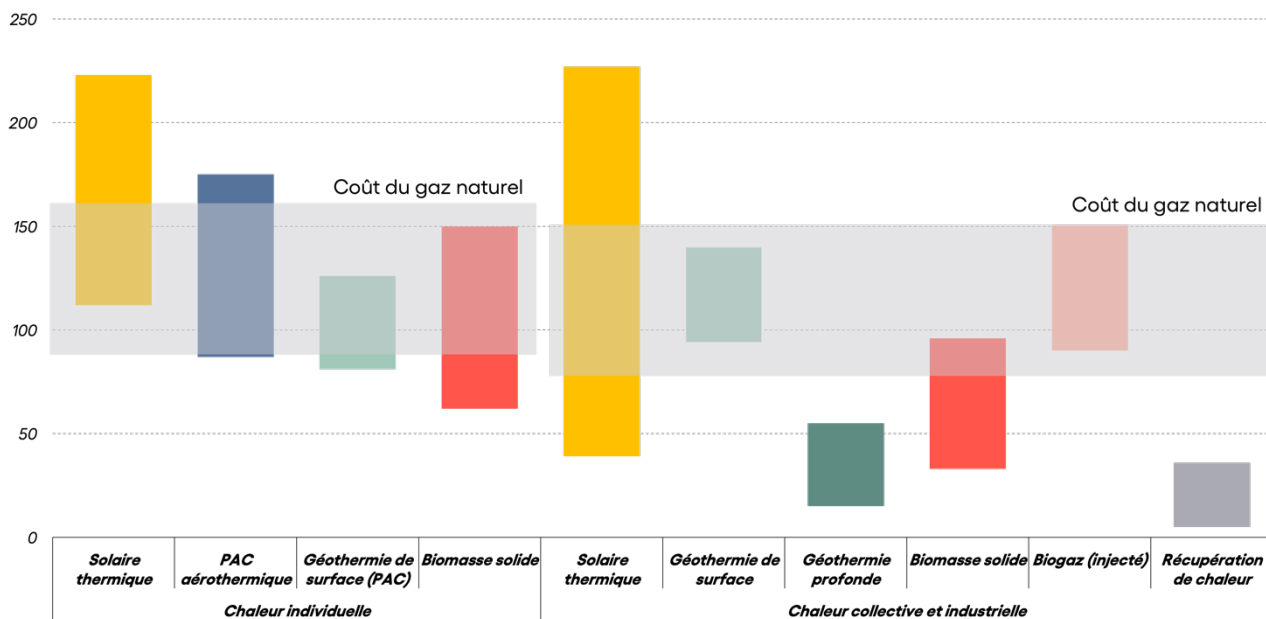


*La récupération n'est pas de la production de chaleur, elle est ici considérée à zéro par convention mais ce n'est pas le résultat d'un calcul ACV qui nécessiterait une analyse au cas par cas. ** La biomasse et le biogaz émettent du CO₂ « biogénique » lors de leur combustion, non comptabilisé ici comme indiqué dans l'ARS (GIEC)
Sources : Solaire thermique – Site du Fonds chaleur, ADEME, Newheat; PAC – Calculé à partir du FE de la Base Carbone ADEME (65gCO_{2e}/kWh; Electricité - 2021 - usage : chauffage - consommation / Méthode moyenne) avec des COP de 3 (aérothermique) et de 4 (géothermique) et 15gCO_{2e}/kWh pour les fluides frigorigènes; Géothermie directe, biomasse solide et biométhane – Base Carbone.

Coûts

Les coûts de production de la chaleur renouvelable sont fortement dépendants du cas d'usage et de la technologie installée. **L'ensemble des technologies étudiées présente une plage de compétitivité avec le chauffage au gaz** (dans un contexte où le prix du gaz fossile est compris entre 80 et 120 € du MWh). Il faut donc réfléchir au cas par cas afin de choisir la filière de production de chaleur renouvelable la plus compétitive et la plus adaptée au cas d'usage considéré.

Coût de production des différentes filières de chaleur renouvelable en €/MWh de chaleur livrée



Note : Pour un prix du gaz naturel entre 80 et 120€/ du MWh (2022).

Source : Coût des énergies renouvelables et de récupération (voir la publication pour le détail des hypothèses de calcul), ADEME, 2019, analyse Carbone 4

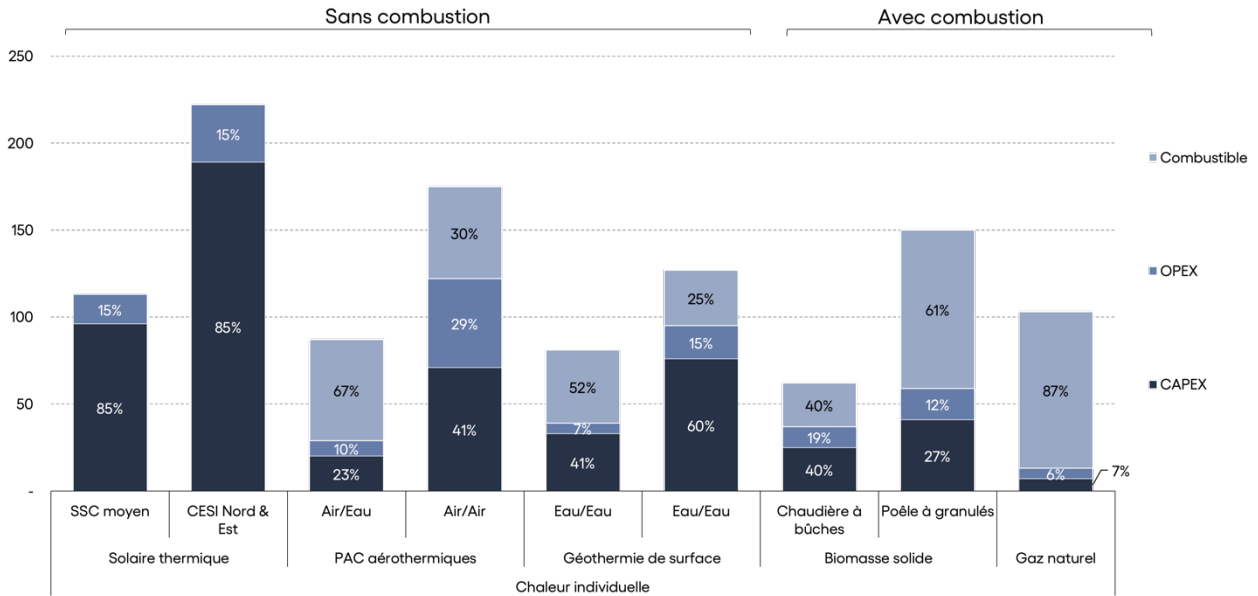
Selon la filière de chaleur renouvelable considérée, la répartition entre CAPEX, OPEX et coûts du combustible ou de l'énergie dans le prix du MWh varie beaucoup.

Pour le solaire thermique, le CAPEX représente plus de 85 % du prix du MWh livré car les coûts liés au combustible ou à la consommation d'énergie sont quasi nuls. Le coût du MWh peut varier de 40 à 230 €/MWh (hors subventions) selon le type d'installation mais reste indépendant des prix du marché de l'énergie tout comme pour la géothermie profonde ou la chaleur de récupération.

L'électricité représente entre 30 et 70 % du prix du MWh pour les PAC aérothermiques et entre 20 et 55 % pour la géothermie de surface^{xxvii}.

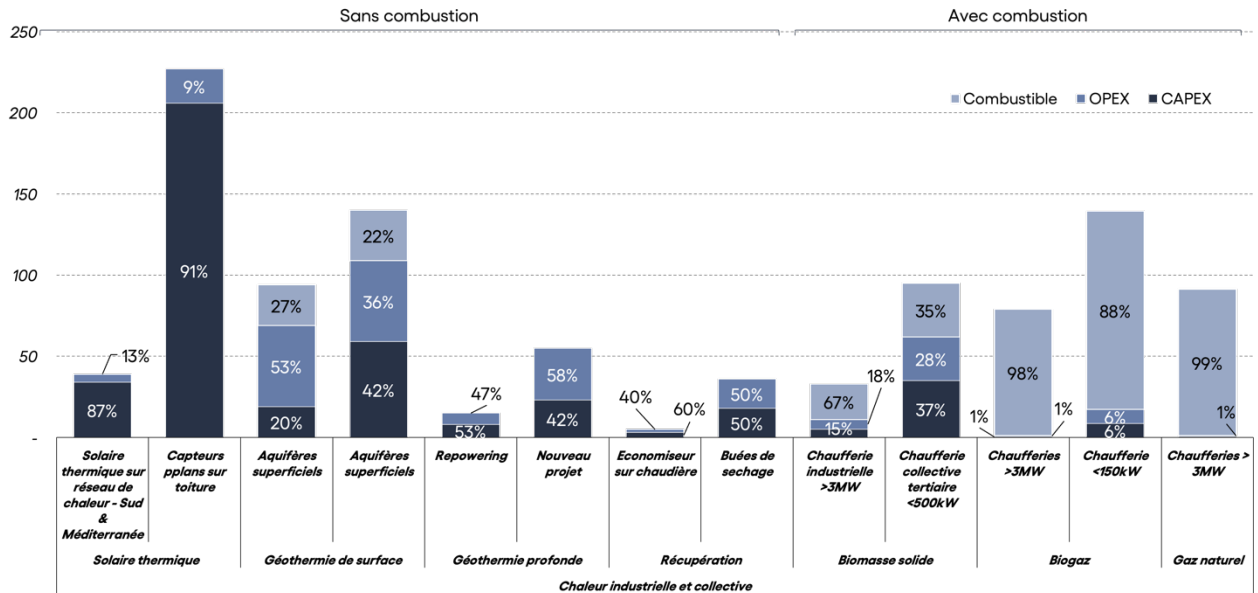
Pour les filières de production de chaleur avec combustion, le combustible représente une part importante du prix du MWh de chaleur produit, entre 35 et 70 % pour la biomasse, et de plus de 85 % du prix pour le biogaz et le gaz fossile.

Répartition des CAPEX, OPEX et des coûts de combustible/énergie en €/MWh livré pour la chaleur individuelle



Note : Pour un prix du gaz naturel compris entre 80 et 120€/ du MWh (2022)
 Source : Coût des énergies renouvelables et de récupération, ADEME, 2019, analyse Carbone 4

Répartition des CAPEX, OPEX et des coûts de combustible/énergie en €/MWh livré pour la chaleur collective et industrielle



Notes : Pour un prix du gaz naturel compris entre 80 et 120€/ du MWh. Pour un prix du biogaz injecté entre 70 et 110€/ du MWh (2022)
 Repowering = réhabilitation visant à prolonger la durée de vie du site de 20 ans.
 Source : Coût des énergies renouvelables et de récupération, ADEME, 2019, analyse Carbone 4

Autres impacts

Comme toutes les sources d'énergie (notamment fossiles, non détaillées ici), les filières de production de chaleur renouvelable ont des impacts hors émissions de CO₂. Bien que leurs bénéfices dépassent largement leurs inconvénients, il convient de prendre en compte ces impacts pour leur assurer un développement le plus transparent et vertueux possible, prenant en compte toutes les externalités négatives.

Sans les détailler, cette représentation graphique soulève les enjeux associés aux potentiels impacts sur la biodiversité, l'utilisation de métaux, les émissions de GES hors CO₂ (explicitées ici bien que bien prises en compte dans les contenus carbone des filières évoquées précédemment en CO₂ équivalent) et la pollution locale de l'air. Il s'agit souvent de risques, parfois normés, contrôlés ou à faible probabilité d'occurrence, mais existants néanmoins.

Les autres impacts potentiels des technologies de production de chaleur renouvelable

Sources de chaleur	Impact sur la biodiversité	Utilisation de métaux	Emissions potentielles d'autres GES	Pollution de l'air	Commentaires
Biomasse solide	◆			◆	Biodiversité : risque de mise en place de monocultures intensives Pollution de l'air : émissions de particules fines
Solaire thermique	◆	◆			Biodiversité : fragmentation des habitats et semi-artificialisation du sol Métaux : acier inox, cuivre, alu
Géothermie		◆	◆		Métaux : acier au carbone, parfois inox Emissions : risques d'émissions (H ₂ S, CH ₄) de dégazage lors des pannes
PAC			◆		Emissions : fuites et risques d'émissions de fluides frigorigènes (à fort pouvoir réchauffant) sur la fabrication, vie ou fin de vie
Biométhane	◆		◆		Biodiversité : risque de changement d'affectation des sols Emissions : fuites et risques d'émissions de CH ₄ * (fort pouvoir réchauffant)
Hydrogène		◆	◆		Métaux : utilisation de platine dans les piles à combustibles Emissions : fuites d'H ₂ qui augmente le PRG d'autres gaz (CH ₄ , O ₃ , H ₂ O)

◆ Filière concernée par l'enjeu environnemental ◆ Enjeu environnemental d'attention critique pour la filière

* CH₄b: méthane biogénique. Sources : Inuk pour Newheat; Hydrogen emissions from a hydrogen economy, European Commission, 2022, p6; Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte, 2017; Geoenvi, BRGM, Dégazage; «Questions-Réponses : Bois-Energie», 2021, p43

Une autre question récurrente concerne l'emprise au sol. Cette problématique, déjà plus développée pour les moyens de production d'électricité renouvelable (photovoltaïque et éolien en tête), contient deux sous-jacents : la disponibilité de foncier "au bon endroit", et la "pollution visuelle". Ces impacts peuvent être proches du lieu de

consommation de chaleur (le convertisseur d'énergie occupe du terrain, typiquement le solaire thermique) ou plus éloignés (le combustible prend de la place, typiquement la biomasse).

Les Nations Unies et l'IRENA ont conduit une étude commune en 2017 sur la consommation d'espace pour l'énergie. Ils estiment que la consommation d'espace pour les sources "non renouvelables" est d'environ 0,1 à 1 m²/MWh (hors mines de charbon à ciel ouvert), 1 à 10 m²/MWh pour les renouvelables hors biomasse et 100 à 1000 m²/MWh pour la biomasse (hors résidus et co-produits)^{15xxviii}.

Les engagements pris par l'ensemble des pays du globe pour réussir la transition énergétique portent la part de renouvelables pour la production d'électricité et de chaleur de 17 % en 2021 à 66 % en 2050^{xxix}.

Les aménagements des territoires devront ainsi prendre en compte la nécessité d'allouer plus d'espace à la production d'énergie (et ainsi apprendre à gérer son acceptabilité sociale) pour se passer des combustibles fossiles et atteindre la neutralité carbone.

B) Quelles filières développer en priorité pour répondre à quels besoins ?

Électrifier oui, mais avec discernement

L'une des principales tendances de décarbonation dans de nombreux secteurs est de miser très largement sur l'électrification. La SNBC prévoit une augmentation d'environ 30 % de la consommation d'électricité entre 2019 et 2050, qui passerait de 473 TWh à 623 TWh^{xxx}. L'augmentation rapide de la demande en électricité pose des questions de faisabilité concernant le dimensionnement du réseau électrique français, mais aussi de la capacité de production électrique nécessaire pour satisfaire ces besoins. Dans son rapport "futurs énergétiques 2050", RTE propose des solutions pour atteindre la

¹⁵ Les données portent majoritairement sur des énergies renouvelables électriques (solaire thermique et géothermie de surface sont évoqués, mais comme des cas spécifiques). L'étude précise que dans de nombreux cas, les surfaces immobilisées par des convertisseurs renouvelables peuvent avoir un co-usage, notamment agricole

neutralité carbone en 2050 dans six scénarios prospectifs. Ces scénarios font état de choix technologiques différents, qui permettent tous d'atteindre un système électrique stable en 2050, mais qui s'accompagnent tous de paris sur le développement de certaines technologies ou l'amélioration d'autres. Dans ce cadre, **tout arbitrage permettant de décarboner certains usages sans les électrifier semble bon à prendre.** La décarbonation de certains secteurs comme les transports ou l'industrie passe majoritairement par de l'électrification, il est donc important de réfléchir à comment prioriser l'électrification sur les applications et les usages pour lesquels elle a le plus d'impact.

Dans le cadre de la décarbonation de la chaleur, on peut distinguer l'électrification directe (radiateurs électriques 1 kWh d'électricité donne 1 kWh de chaleur), de l'électrification indirecte (pompes à chaleur aérothermiques et géothermiques, 1 kWh d'électricité donne 2 à 4 kWh de chaleur) comptabilisée dans la chaleur renouvelable. La seconde est à privilégier sur la première.

Il est aussi possible de produire directement de la chaleur décarbonée sans passer par l'électricité. La production directe de chaleur nécessite plus d'études et de prise en compte du contexte que le passage par l'électrification, car la solution adaptée à chaque usage se fait au cas par cas en fonction notamment du profil de consommation, de la flexibilité et de la localisation. Toutefois, passer par des réseaux de chaleur permet de centraliser les installations, ce qui évite l'équipement des bâtiments un à un, et mutualise la gestion et l'entretien des systèmes de production de chaleur. Enfin, le raccordement à un réseau de chaleur ou la production de chaleur sans électricité permettent à l'utilisateur (industriel, collectivité, particulier) de s'affranchir de l'incertitude sur les prix et sur la disponibilité de l'électricité. Cela permet également de réduire les tensions sur le système électrique français.

Prioriser les sources de production de chaleur renouvelable, avec ou sans combustion ?

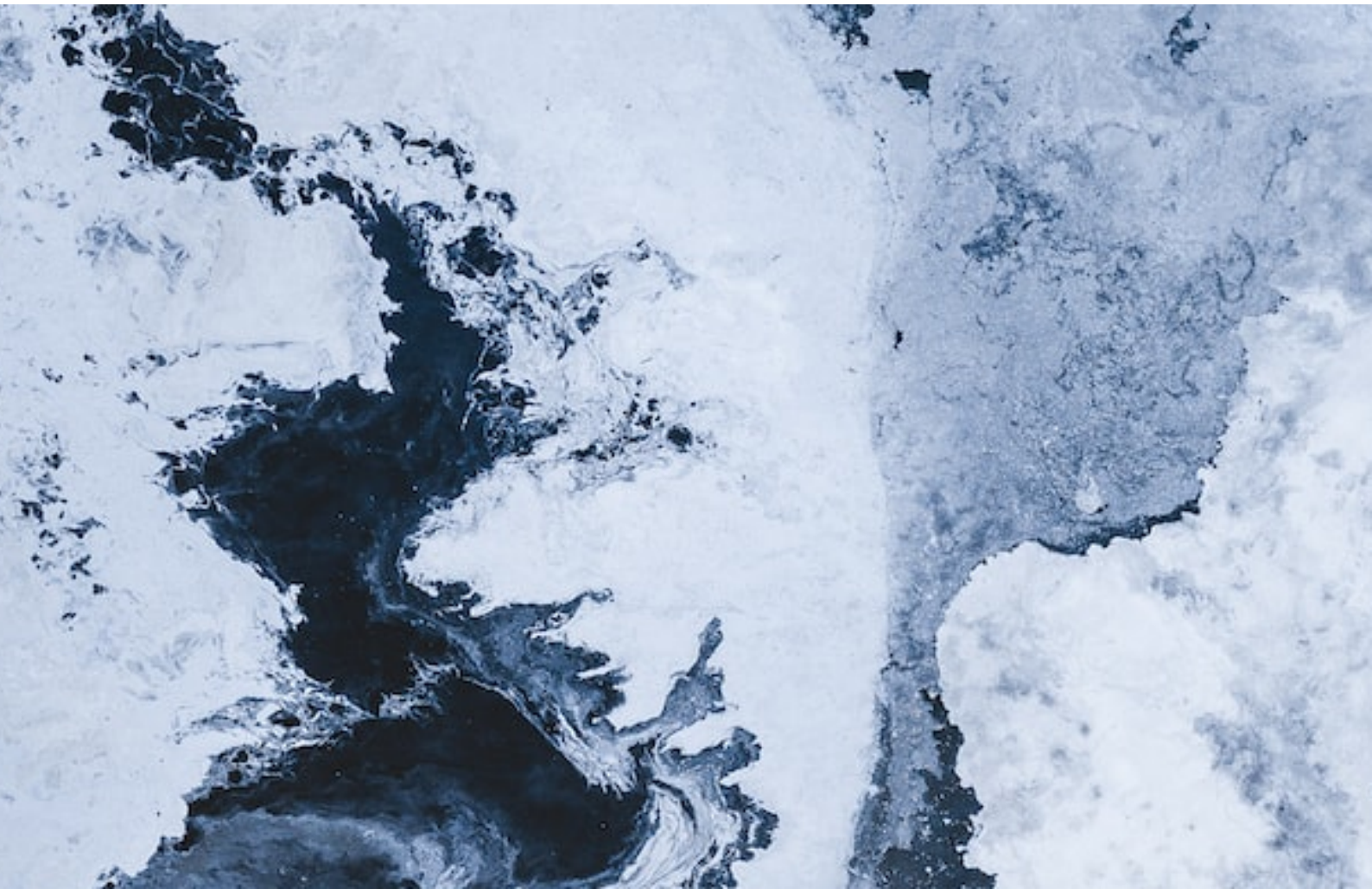
Dans les filières de production directe de chaleur renouvelable (hors électrification via des pompes à chaleur seules) on distingue les filières avec combustion (biomasse solide, biométhane, hydrogène) des filières sans combustion (solaire thermique, géothermie, récupération de chaleur). **Les filières avec combustion sont intéressantes car elles permettent de répondre à des besoins en température très élevée et sont 100 % pilotables.** La contrepartie est qu'elles sont sur-sollicitées dans les scénarios de décarbonation et qu'elles se basent sur un gisement fini (voir l'encadré sur les conflits

d'usages de la biomasse), **il faudra donc en prioriser les usages.** Il est ainsi important dans la construction de notre système énergétique de réfléchir à la place à accorder aux filières avec combustion et de les préserver pour les besoins hautes températures ou en appoint à une base renouvelable sans combustion.

Des réseaux de chaleur plus performants mais aussi plus complexes

Lorsque qu'elle passe par des réseaux de chaleur, l'intégration de capacités de production de chaleur renouvelable nécessite pour les opérateurs d'apprendre à gérer une nouvelle complexité. Ils doivent développer les compétences qui leur permettent d'optimiser la combinaison des différentes chaleurs délivrées sur le réseau par un suivi et un pilotage renforcé mais aussi prioriser l'utilisation de certaines sources de chaleur par rapport à d'autres.

De plus, afin d'intégrer les énergies renouvelables et gagner en efficacité en diminuant les pertes thermiques, les réseaux de chaleur doivent être conçus ou adaptés pour les réseaux existants afin de pouvoir fonctionner à basse pression et à basse température.





IV - Zoom sur deux filières dont le potentiel est sous-exploité

A) Solaire thermique

i. Les cas d'application favorables au solaire thermique

Le solaire thermique individuel pour le résidentiel représente actuellement l'essentiel de la capacité installée et il est particulièrement intéressant dans certaines régions françaises (ex : DROM-COM). Toutefois, **l'essor des grandes installations de solaire thermique est une opportunité de croissance rapide pour la filière**. En effet, l'essentiel des coûts du solaire thermique réside dans l'investissement initial, les applications à grandes échelles permettent d'optimiser ces coûts et de faire baisser à la fois le prix de la chaleur produite et son empreinte carbone. Pour un fonctionnement optimal, l'intermittence de production du solaire thermique doit être prise en compte et lissée par des capacités de stockage et/ou par des sources d'énergie d'appoint également

connectées au réseau de chaleur ou au procédé industriel. Enfin, **les températures sont un paramètre important pour maximiser le rendement du solaire thermique en réduisant les pertes.** La température de consigne du réseau est souvent réglée sur le besoin en chaleur le plus important et élève inutilement la température pour une partie des applications qui nécessitent des températures plus faibles. Les applications idéales pour le solaire thermique sont celles où la chaleur est produite par de grandes installations (> 5 MWth installés) et distribuée de manière centralisée. De plus, le taux de couverture du solaire thermique est maximisé : 1. lorsque l'installation est dimensionnée sur la demande estivale et ne fait intervenir de sources d'appoint pilotable (type biomasse) que pour compléter la production solaire et/ou 2. lorsque du stockage inter-saisonnier est possible, il peut alors permettre de passer d'une couverture estivale (20 % des besoins) à une couverture de plus de 50 % des besoins.

De plus, le solaire thermique à l'avantage d'utiliser des panneaux manufacturés en Europe dont les filières de production sont structurées et présentent même un solde d'exportation positif en Europe, par opposition au solaire photovoltaïque qui s'appuie sur des produits importés de filières de production majoritairement situées en Asie^{xxxii}.

Pourtant, le développement de la filière du solaire thermique connaît les freins suivants :

Solaire thermique

Freins

- Les coûts d'investissements importants
- La variabilité saisonnière de la production

Leviers

- Rechercher la diminution des coûts par effet d'échelle sur les grandes installations solaires thermiques
- Développer des projets de solaire thermique en couplage avec d'autres EnR ou avec des capacités de stockage inter-saisonnier
- Généraliser l'intégration du solaire thermique aux contrats de performance énergétique

Quelques projets, notamment dans le tertiaire, couplent le solaire thermique avec du stockage géothermique de surface, inter-saisonnier (par exemple sur champs de sondes) pour maximiser l'utilisation des énergies renouvelables dans la consommation énergétique des bâtiments¹⁶.

¹⁶ KTR France (69)

ii. Deux exemples de projets solaires thermiques

Narbosol

Application : production de chaleur pour le réseau de chaleur de la ville de Narbonne, centrale solaire dimensionnée pour répondre aux besoins estivaux, ce qui représente sur l'année jusqu'à 20 % des besoins de chaleur.

Mise en service : 2021

Capacité installée : 2,8 MW_{thc}

Production annuelle : 2 300 MWh_{th} sur la première année de fonctionnement

Niveaux de température desservis : entre 60 et 80 °C mais le régime de fonctionnement varie entre l'hiver et l'été

Surface installée : 3 232 m² de panneaux

Stockage : journalier / hebdomadaire avec une cuve de 1 000 m³ (équivalent à trois jours de pleine production estivale)

Réseau : intégration en bout de branche du réseau de chaleur

Objectif : couvrir jusqu'à 100 % des besoins estivaux (arrêt complet de la biomasse) et apporter un complément d'ENR le reste de l'année

Coût de la chaleur : 30-40 €/MWh (subventions incluses)

Financement : 55 % de subventions ADEME (appel à projet Grandes Installations Solaires Thermiques) associé à un soutien régional de la région Occitanie de 100 000 €

Emissions évitées pour la première année : 552 tonnes de CO₂ évitées par rapport à un système de chaleur produite à partir de 100 % de gaz fossile

CAPEX : environ 2 M€

OPEX : environ 30 000 €/an

Les facteurs de réussite : disponibilité du foncier à 800 m d'un bout de branche du réseau de chaleur existant

Lactosol

Application : production de chaleur industrielle (préchauffage de trois flux d'air différents en amont de batteries vapeur alimentées au gaz) pour le séchage de Lactoserum par Lactalis.

Mise en service : début 2023

Capacité installée : 13 MWthc

Production annuelle : 8 000 MWhth attendus

Niveaux de température desservis : 90 °C en été et à partir de 20 °C en hiver

Surface installée : 15 300 m² de panneaux sur un terrain de 5 hectares

Stockage : journalier / hebdomadaire avec une cuve de 3 000 m³

Réseau : création d'un réseau raccordé directement aux procédés pour le solaire thermique

Objectif : réduire de 10 à 12 % la consommation de gaz de Lactalis sur le site

Coût de la chaleur : 25-50 €/MWh (subventions incluses)

Financement : 55 % de subventions ADEME (appel à projet Grandes Installations Solaires Thermiques) ainsi qu'une aide régionale Grand-Est de 350 000 € et 170 000 € d'aides du GIP Objectif Meuse

Emissions évitées pour la première année : 1 860 tonnes de CO₂ évitées par rapport à un système de chaleur produite à partir de 100 % de gaz fossile

CAPEX : environ 6 M€

OPEX : environ 75 000 €/an

Les facteurs de réussite : l'accord d'un industriel prêt à adapter ses procédés pour permettre l'utilisation du solaire thermique et à s'engager sur 25 ans

B) Géothermie

i. Les cas d'application favorables à la géothermie

La géothermie dispose d'un triple avantage : elle ne présente **pas de variabilité saisonnière** ; elle **répond aux besoins en chaud et en froid** (amenés à augmenter) ; elle **ne nécessite pas de stockage de chaleur** autre que le stockage naturel effectué dans le sous-sol (et peut même être considérée dans certains cas comme une technologie de stockage de la chaleur). Elle présente un potentiel sur tout le territoire français et s'exploite sous des formes très différentes d'installations selon la localisation du projet et la nature du sous-sol.

Les installations de géothermie de surface couplées à des PAC sont pertinentes pour décarboner les logements individuels, collectifs et certains bâtiments tertiaires neufs ou lors d'une rénovation. Elles peuvent, dans le cadre de bâtiments qui disposent d'une bonne isolation et de températures de circulation de l'eau modérées, être les sources principales voire uniques de chaleur et/ou de froid.

Quand elle est possible, la géothermie profonde est particulièrement pertinente à utiliser comme base sur un réseau de chaleur urbain ou industriel.

Pourtant, le développement de la filière de la géothermie connaît les freins suivants :

Géothermie

Freins

- Le montage de projets géothermiques peut être complexe car il fait appel à des acteurs très variés (foreurs, bureaux d'études de sous-sol et de surface, installateurs de PAC)
- Les coûts d'investissement importants dus à la réalisation de forage
- Le manque d'accès aux données établissant les potentiels géothermiques locaux
- Le constructeur d'un bâtiment en est rarement l'exploitant, il doit effectuer des investissements supplémentaires conséquents sans bénéficier de retombées économiques long terme des systèmes géothermiques

Leviers

- Structurer des réseaux locaux d'acteurs de la géothermie
- Améliorer l'accès de ces réseaux aux données de potentiel géothermique du territoire
- Investir en R&D pour améliorer les COP, diminuer les coûts de forage

ii. Deux exemples de projets de géothermie

Blagnac

Application : chauffage de plusieurs bâtiments par géothermie de surface (superficie totale de 36 000 m²) sur le site du siège d'Airbus à Blagnac

Mise en service : 2016

Capacité installée : 2 MWth de chaud et 1 MWth de froid

Technologie : boucle tempérée sur champs de sondes (profondeur de 205 m)

Production annuelle : 8 000 MWhth (chaud et froid)

Niveaux de température desservis : 35 à 30 °C pour le chaud et 16 à 21 °C pour le froid

Stockage : pas de stockage nécessaire, stockage naturel dans le sol - deux ballons de 30 m³ pour le bon fonctionnement des PAC

Réseau : réseau basse température (< 42 °C) possible car ce sont des bâtiments neufs qui sont alimentés

Objectif : couvrir tous les besoins en chaud (100 %) des bâtiments ainsi qu'une partie des besoins en ECS et en froid (90 %)

Coût de la chaleur : < 50 €/MWh

Financements : 17 % par l'ADEME via le Fonds Chaleur, 6 % via le fonds des nouvelles technologies émergentes

CAPEX : environ 4 millions d'euros

OPEX : n.c.

Les facteurs de réussite : système pensé sur des bâtiments basse consommation qui permettent une boucle d'eau tempérée

ArGéo

Application : production de chaleur par géothermie profonde pour le réseau de chaleur de la ville d'Arcueil

Mise en service : Juin 2015

Capacité installée : 15 MW de puits géothermique, complété par 12 MW de PAC eau/eau, et 21 MW d'appoint gaz (18 MW en centralisé et le reste en décentralisé)

Technologie : forages de 1 600 m de profondeur sur la nappe du Dogger, assistée par pompe à chaleur (eau/eau) et appoint gaz

Production annuelle : 80 GWh par an (80% géothermie et 20% gaz) pour chauffer l'équivalent de 10 000 logements

Niveaux de température desservis : la température de sortie du puit est de 62 °C, l'eau est ré-injectée à 25 °C et la température après PAC est de 75 °C

Stockage : pas de capacité de stockage déployée

Réseau : réseau de presque 20 km construit pour accueillir le projet de géothermie comprenant une centaine de sous-stations

Objectif : alimenter 60 % des besoins du réseau de chaleur en géothermie

Coût de la chaleur : dossier négocié à 73 € TTC/MWh

Financements : 40 millions d'euros d'investissements dont 7,5 millions apportés par l'ADEME et la région Île-de-France

CAPEX : subventions de l'ADEME et de la région Île-de-France à hauteur de 7,5 millions d'euros sur les 40 millions d'euros d'investissements

OPEX : n.c.

Les facteurs de réussite : une consommation minimum sécurisée en amont car les communes d'Arcueil et de Gentilly ont un bailleur social commun (propriétaires de logements collectifs, HLM) qui représente 40 % des consommations

La biomasse - vers un conflit d'usages dans la ruée vers l'or vert ?

La biomasse en France représente, en 2020, plus d'absorptions (par la croissance de la biomasse forestière et non forestière) que d'émissions (mortalité des arbres, déboisement, feux de forêts, artificialisation des sols...).

Le puits net¹⁷ est estimé à -14,0 Mt de CO₂e à comparer aux 393 Mt émis par les autres secteurs d'activité, dont il compense donc 3,6 % des émissions. Après avoir été fortement en hausse sur la période 1990- 2005, ce puits de carbone a fortement diminué ces dernières années, il est passé de -45MtCO₂e au milieu des années 2000, à -35 MtCO₂e en 2015, puis la diminution s'est accélérée pour arriver à -14 MtCO₂e en 2020^{xxxii}.

La diminution du puits est liée principalement à **l'effondrement du puits de carbone forestier** menacé par :

- Les sécheresses à répétition
- Les crises sanitaires (scolytes, chalarose ...)
- Le ralentissement de la croissance des peuplements
- **Une hausse des prélèvements** (50,1 Mm³ par an entre 2011 et 2019, contre 42,4 sur la période 2005-2013)¹⁸.

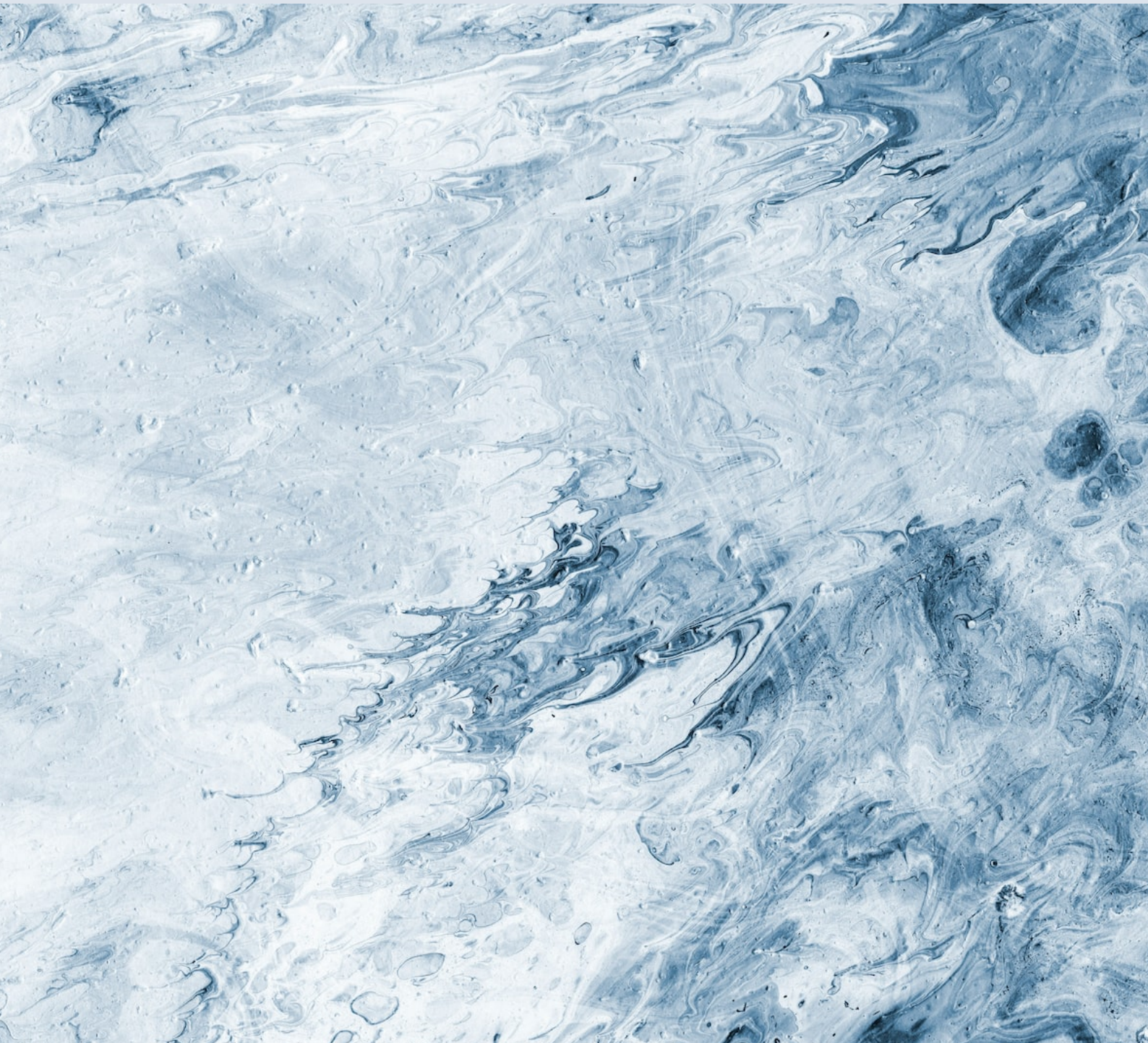
Cette hausse des coupes ne se traduit cependant pas par un stockage accru dans les produits bois, dont la capacité atteint 0,8 MtCO₂e en 2020, contre 3,4 MtCO₂e en 2010 : la hausse des volumes de bois commercialisés entre 2014 et 2019 repose ainsi en grande partie sur la production à des fins énergétiques (+3,4 % par an, contre +0,3 % en moyenne toutes filières confondues)^{xxxiii}.

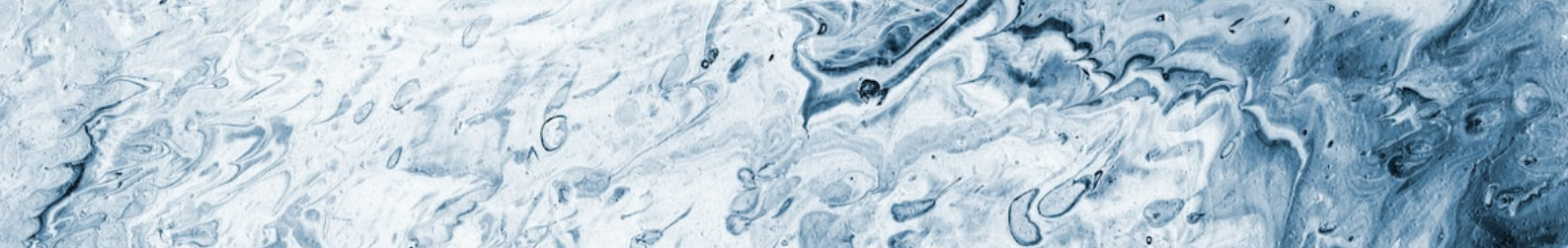
Pourtant, dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), la France a des objectifs ambitieux en la matière : **absorber sur le territoire 40 millions de tonnes de CO₂ par an en 2030, et environ 80 MtCO₂ en 2050, contre 14 MtCO₂ en 2020^{xxxiv}**. Cette stratégie repose notamment sur l'augmentation de la quantité de **carbone stocké dans les sols agricoles et les prairies** et sur **la substitution du bois à d'autres matériaux et produits** pour lesquels le carbone demeure séquestré à l'intérieur du bois d'œuvre durant la vie du produit ce qui permet d'éviter les émissions générées par les matériaux auxquels le bois se substitue tout en maintenant le stock de carbone séquestré.

¹⁷ Ensemble des absorptions représentées par le secteur UTCAF (Utilisation des Terres, Changement d'Affectation et Foresterie)

¹⁸ Voir l'article de Carbon 4, « Séquestration de carbone en France : le signal d'alarme du Haut Conseil pour le Climat », Juillet 2022

Dans un contexte où le changement climatique et l'effondrement de la biodiversité fragilisent ces puits de carbone, des enjeux importants émergent dans l'adaptation des forêts au changement climatique et la favorisation de la résilience des peuplements pour permettre un maintien voire une régénération du puits forestier. Pour soutenir la stratégie de la SNBC, il est nécessaire d'identifier et d'actionner les leviers qui permettent **une réorientation des usages, qui priorise l'utilisation du bois récolté dans des produits bois à longue durée de vie plutôt qu'à des fins énergétiques** comme le montrent les nouveaux critères restrictifs appliqués à la bioénergie exprimés dans la directive européenne sur les énergies renouvelables.





Conclusion

La décarbonation de la chaleur en France ne suit pas une trajectoire qui permettrait d'atteindre les objectifs fixés dans la loi pour respecter une neutralité carbone à horizon 2050. Ce retard s'explique par un manque de structuration de certaines filières, une enveloppe de financement insuffisante dédiée au Fonds Chaleur et des mécanismes de soutien parfois peu efficaces, lisibles ou incitatifs. Il existe pourtant des solutions, couplées entre elles ou avec du stockage, pour décarboner la chaleur, notamment celle à basse température, qui représente environ 75% des besoins.

Dans un contexte énergétique et géopolitique qui nous pousse à accélérer drastiquement la transition vers des énergies bas-carbone, ces solutions de production de chaleur basse température locales sont pertinentes pour gagner en souveraineté énergétique. Même si la hausse des prix de l'énergie peut faire apparaître leur avantage économique, elles ont besoin d'un soutien financier adapté sur le long-terme pour se déployer à grande échelle. Du côté des consommateurs, c'est l'assurance d'une visibilité sur les prix tout en pouvant sortir des énergies fossiles.

En deux ans de crise énergétique, les renouvelables électriques devraient avoir « remboursé » la quasi-totalité des subventions reçues depuis 2013, qu'attendons-nous pour investir dans la production de chaleur renouvelable ?

Sources

- ⁱ Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération, 2021, pages 5, 17, 21, 28, 35
- ⁱⁱ Baromètre Pompe à chaleur EuroObservEr 2021, pages 5 et 6
- ⁱⁱⁱ geothermies.fr
- ^{iv} Expertises ADEME - La géothermie
- ^v Fonds chaleur, ADEME – Géothermie, Solaire thermique, Biomasse
- ^{vi} La géothermie en France, Étude de filière, 2021, AFIG
- ^{vii} Baromètre Solaire thermique EuroObsER 2021, pages 5 et 6
- ^{viii} « Questions-Réponses : Bois-Energie », Mai 2021
- ^{ix} IEA Global hydrogen review 2022
- ^x Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid, Restitution des statistiques pour l'année 2010
- ^{xi} Les réseaux de chaleur et de froid, Enquête 2021
- ^{xii} Stratégie française pour l'énergie et le climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie, 2019-2023 / 2024-2028
- ^{xiii} Aalborg CSP - Changing Energy, Pit thermal energy storage for increased efficiency and flexibility
- ^{xiv} Programmation pluriannuelle de l'énergie, Révisée en 2020
- ^{xv} Cahier des charge, Appel à projets GIST, ADEME
- ^{xvi} <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/aides-renovation-energetique#maprimerenov>
- ^{xvii} Source Citepa, Industrie de l'Energie, édition 2022, analyse Carbone 4
- ^{xviii} Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'État – septembre 2021, page 112
- ^{xix} ADEME, "Budget 2022 - Un financement sans précédent de la transition écologique", 2021.

- ^{xx} Évaluation des charges de service public de l'énergie pour l'année 2022, CRE
- ^{xxi} Le Figaro, Rénovation énergétique : une enveloppe de 2 milliards d'euros pour financer Ma Prime Rénov'
- ^{xxii} SDE++ 2022, Stimulation of Sustainable Energy Production and Climate Transition
- ^{xxiii} Solar district heating trends and possibilities, SHC, 2018
- ^{xxiv} Solar heat Worldwide 2022, SHC IEA
- ^{xxv} Solargis, Solar resource maps, Direct normal irradiation
- ^{xxvi} Office fédéral de l'énergie, Promotion de la géothermie
- ^{xxvii} Coût des énergies renouvelables et de récupération, 2019
- ^{xxviii} Energy and Land Use - UNCCD and IRENA 2017
- ^{xxix} AIE - WEO 2022 - Scénario Announced Pledges Scenario (APS)
- ^{xxx} EDF, La consommation d'électricité en chiffres & « Évolution de la demande énergétique à moyen et à long terme », Carbone 4
- ^{xxxi} Solar Heat Europe, « Energising Europe with Solar Heat, A Solar Thermal Roadmap for Europe »”
- ^{xxxii} CITEPA - Rapport Secten 2022
- ^{xxxiii} Agreste, « Récolte de bois en 2020. Repli de 2,5 % dans le contexte de l'épidémie de Covid-19 », Février 2022
- ^{xxxiv} Stratégie Nationale Bas-Carbone révisée



Carbone 4 est le premier cabinet de conseil indépendant spécialisé dans la stratégie bas-carbone et l'adaptation au changement climatique.

En permanence à l'écoute des signaux faibles, nous déployons une vision systémique de la contrainte énergie-climat, et mettons toute notre rigueur et notre créativité en œuvre pour transformer nos clients en leaders du défi climatique.

Contact : contact@carbone4.com