



Documents de Travail

N° 2018/2 • Mai 2018

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES THERMIQUES

Arthur SOULETIE

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES THERMIQUES

Arthur SOULETIE*

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

* **Arthur SOULETIE** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances (France)

arthur.souletie@dgtrésor.gouv.fr (+33-1-44-87-14-30)

Table des matières

Résumé	5
Abstract	6
Introduction	8
LES ÉNERGIES RENOUVELABLES THERMIQUES	1
1. Panorama de la chaleur renouvelable en France.....	9
1.1 Les différentes technologies de production de chaleur renouvelable	9
1.2 Part des différentes technologies thermiques propres	11
1.3 Caractéristiques de la chaleur renouvelable.....	13
1.4 Quels coûts de production pour les EnRT ?.....	14
1.5 Chauffage au bois individuel et pollution locale	18
2. Évolution de la production des différentes technologies	21
3. Objectifs concernant la chaleur renouvelable	25
4. Les mécanismes de soutien à la chaleur renouvelable.....	26
4.1 Le fonds chaleur finance des technologies thermiques vertes globalement efficaces pour un montant de soutien public relativement faible.....	26
4.2 Le CITE.....	28
4.3 Aides locales.....	29
4.4 TVA réduite	29
5. Comment favoriser efficacement l'augmentation de la part de la chaleur renouvelable ?	29
5.1 Quel prix du carbone pour favoriser l'adoption d'EnRT ?	30
5.2 Le fonds chaleur devrait être maintenu pour les plus gros projets	30
5.3 Le soutien pour le chauffage individuel via le CITE pourrait être concentré sur les technologies les plus efficaces.....	31
5.4 Primes à la casse.....	31
5.5 Norme pour nouveaux bâtiments.....	31
5.6 Taux réduits de TVA.....	32
5.7 Information et qualité.....	32
Annexes	33

Résumé

En 2015, la chaleur (chauffage, eau-chaude sanitaire et cuisson notamment) représente environ 47 % de la consommation finale d'énergie en France, et reste largement carbonée (65 % provenant du gaz, du pétrole et du charbon). L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation de chaleur représente un levier majeur de la transition vers une économie bas-carbone.

La France s'est dotée d'objectifs ambitieux concernant la chaleur renouvelable (33 % en 2020 et 38 % en 2030 de chaleur renouvelable dans l'ensemble de la chaleur), mais est aujourd'hui nettement en retard sur la trajectoire prévue (20,7 % de chaleur renouvelable en 2016, contre 25,5 % prévu). Cela s'explique notamment par la forte baisse des coûts des combustibles fossiles au cours des deux dernières années, qui modifie l'arbitrage entre chaleur renouvelable et chaleur carbonée.

Les technologies de chaleur renouvelable sont en général peu coûteuses (par exemple, un chauffage collectif au bois peut présenter un coût d'abattement du carbone compris entre 8 et 11 €/tCO₂). En particulier, elles apparaissent nettement plus efficaces que nombre d'EnR électriques qui sont par ailleurs fortement subventionnées.

Le soutien à la chaleur prend les formes suivantes :

- Un fonds chaleur (doté d'environ 0,2 Md€ en 2017) soutient les projets collectifs de taille importante, en leur offrant des subventions pour leur permettre d'être compétitifs avec des solutions au gaz. Le fonds chaleur a fait preuve de son efficacité depuis 2009, en sélectionnant des projets présentant un coût d'abattement du carbone faible. Le fonds chaleur a été soutenu à hauteur de 1,2 Md€ sur la période 2009 et 2014, contre 11,7 Md€ pour les EnR électriques *via* la contribution au service public de l'électricité.
- Le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE), qui peut concerner des appareils de chaleur renouvelable (à hauteur de 0,3 Md€ en 2016).
- Des aides locales sous forme de prime à la casse, pour inciter les ménages à remplacer leur chaudière ancienne et polluante.
- Des taux réduits de TVA pour certaines installations.

Pour favoriser le déploiement de la chaleur renouvelable, la mise en place d'un prix du carbone suffisant est l'outil principal, en particulier du fait du caractère décentralisé de la chaleur (la production se fait à l'échelle d'un ou quelques logements, sauf pour les réseaux de chaleur), afin d'orienter les investissements privés vers les EnRT¹. Les professionnels du secteur estiment qu'un prix du carbone de 50 €/t serait suffisant pour améliorer significativement la compétitivité de ces technologies². Le rehaussement de la trajectoire de la composante carbone par rapport à celle prévue dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adopté en loi de finance initiale 2018, est un élément essentiel de soutien à la chaleur renouvelable³.

Cependant, même avec la tarification du carbone adoptée, le développement de la chaleur renouvelable est soumis à plusieurs obstacles semblables à ceux rencontrés pour la rénovation thermique : contrainte de crédit, problème d'information, biais cognitifs, préférence pour le court terme. Ces obstacles peuvent empêcher la diffusion de certaines technologies même rentables. Des politiques complémentaires sont alors nécessaires :

¹ Énergies renouvelables thermiques.

² Fédération des services énergies environnement : *Propositions en faveur de la transition énergétique*, octobre 2017.

³ Le rehaussement consiste à augmenter la composante carbone, dont le niveau était de 30,5 €/tCO₂ en 2017, de 14,1 €/tCO₂ en 2018, puis 10,4 €/tCO₂ les années suivantes, pour atteindre 86,2 €/tonne de CO₂ en 2022 (contre 64,8 €/tCO₂ en 2022 sous-jacent à la loi de transition énergétique pour une croissance verte).

- Le fonds chaleur, qui repose sur un processus efficace de subventions basées sur une analyse socio-économique, devrait être maintenu.
- Pour les installations individuelles, le CITE peut aider à l'adoption des technologies les plus efficaces (comme le chauffage au bois ou les réseaux de chaleur) et ayant les émissions les plus faibles (dans le cas du chauffage au bois). Il est cependant nécessaire d'assurer une information claire sur le bon usage du chauffage au bois, afin de limiter la pollution locale causée par une mauvaise utilisation d'appareils théoriquement performants.

Abstract

In 2015, 47% of final energy consumption results from heating use (primarily for indoor heating, hot water and cooking) in France. 65% of the heat production derives from fossil energies (gas, oil or coal). Increasing the share of renewable energies in the heating sector is an important issue for the transition towards a low carbon economy.

France has set very ambitious objectives for renewable energy in the heating sector (33% in 2020 and 38% in 2030). In 2016, France lagged behind its objectives (20.7% vs. a 25.5% target) due to the decrease in fossil fuel prices during the last two years, which changes the relative competitiveness between renewable and fossil energies.

Most of thermal renewable energies are relatively inexpensive (for instance, the cost to reduce CO₂ emissions with a collective wood heating system stands between 8 and €11/tCO₂). In particular, thermal renewable energies are more efficient to decrease CO₂ emissions than most electric renewable energies. The latter are highly subsidized.

In France, thermal renewable energies are supported through different mechanisms:

- A special fund for thermal renewable energies (the so-called "fonds chaleur"). For 2017, the fund was allocated €200 M. The fund supports important collective projects, through subsidies to help compete with gas installations. Since 2009, the fund has been effective in the selection of projects with a low cost of reducing CO₂ emissions. The fund received €1,2 bn between 2009 and 2014, whereas electric renewable energies received €11,7 bn through the so-called "contribution au service public de l'électricité".
- The tax credit for energy transition (CITE), which can support some thermal renewable energy technologies (€300 M in 2016).
- Local subsidies which encourage households to replace old and polluting boilers with more efficient ones.
- Reduced VAT rates for some installations.

Raising the level of carbon pricing is the best way to increase the share of renewable energies in the heating sector, due to the decentralized nature of heating installations (most of the production is at the household or a few households' level, except for heat networks). According to a French professional association⁴, a €50/tCO₂ carbon pricing is enough to enhance the competitiveness of thermal renewable energies. France has adopted a more ambitious trajectory for its carbon tax in the 2018 Budget Law, than that of the 2015 Energy Transition for Green Growth Act⁵. This new trajectory is a key element in supporting thermal renewable energies.

⁴ Fédération des services énergies environnement : *Propositions en faveur de la transition énergétique*, octobre 2017.

⁵ The carbon tax will increase from 44.6 €/tCO₂ in 2018 to 86.2 €/tCO₂ in 2022 (against 64 €/tCO₂ in 2022 in the 2015 energy transition for green growth act).

However, even with a high carbon tax, some investment barriers – similar to those preventing the development of energy efficiency and building renovation –, will remain and could prevent the development of renewable thermal energies: credit constraint, information issues, cognitive bias, short-term preferences. Complementary tools are therefore needed:

- The “fonds chaleur”, which distributes subsidies based on socio-economic analysis, should be maintained.
- For individual installations, the CITE could encourage the use of the most efficient technologies (such as wood boiler and heat networks) and the less polluting ones (in the case of wood boilers). It is also necessary to increase the level of public knowledge on wood heating, in order to limit local pollution due to misuse of wood boilers

Introduction

La décarbonation de la production de chaleur consommée par les ménages et les entreprises représente un levier essentiel de la transition vers une économie bas carbone.

La consommation de chaleur représente en effet près de la moitié de la consommation d'énergie finale totale. Ainsi, en 2015, sur un total de 149 Mtep de consommation finale⁶ d'énergie en métropole (qui comprend également l'électricité et les transports), la consommation de chaleur atteignait 70 Mtep, soit 47 % de la consommation finale totale d'énergie. Ce volume connaît toutefois une tendance baissière : en 2007, la consommation finale de chaleur était de près de 80 Mtep et représentait près de 50 % de la consommation énergétique totale. On constate donc une baisse progressive de la consommation de chaleur, de l'ordre de 1,25 Mtep par an. L'essentiel de la baisse est imputable au secteur de l'industrie, puis au secteur du résidentiel et tertiaire.

Mais la part de la chaleur issue de sources d'énergie renouvelable représente moins d'un cinquième de la production thermique. Les moyens de production de la chaleur sont le chauffage au gaz (environ 40 %, cf. tableau 1), au fioul (moins de 20 %), et dans l'industrie, au charbon (8 %), auxquels s'ajoutent les énergies renouvelables thermiques (EnRT, moins de 20 %). Le reste de la production de chaleur provient essentiellement des chauffages électriques qui produisent de la chaleur en consommant eux-mêmes de l'électricité qui constitue une énergie largement décarbonée en France.

Tableau 1 : Consommation finale de chaleur (Mtep) en 2015, corrigées des variations climatiques

Secteur	Électricité ⁷	Gaz	Pétrole	EnRT ⁸	Charbon	Total	Part de chaque secteur
Résidentiel	6,7	15,1	6,7	9,7	0,2	38,4	55,0 %
Tertiaire	3,1	5,3	3,2	0,9	0,2	12,7	18,2 %
Agriculture	0,1	0,3	0,0	0,2	0,0	0,6	0,9 %
Industrie	2,0	7,8	1,7	1,7	4,9	18,0	25,9 %
Total	11,9	28,5	11,6	12,5	5,3	69,7	
Part de chaque énergie	17,1 %	40,8 %	16,6 %	17,9 %	7,6 %		

Source : SOeS, Bilan énergétique de la France 2015, calculs DG Trésor.

⁶ La consommation finale ne considère que l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale, quand l'énergie primaire prend également en compte l'énergie utilisée pour la production de cette énergie.

⁷ Pour obtenir la chaleur finale à partir de l'ensemble de la consommation finale par secteur et par énergie, on pose une série d'hypothèses (identiques à celles accompagnant les documents de présentation de la programmation pluriannuelle de l'énergie de 2016). On suppose que (i) 100 % du gaz consommé dans le secteur résidentiel, tertiaire et agricole, et 80 % de celui consommé dans l'industrie est dédié à un usage thermique (ii) 100 % du pétrole et du charbon consommé dans le secteur résidentiel et tertiaire et 80 % de celui consommé dans l'industrie est dédié à un usage thermique (le pétrole consommé dans l'agriculture étant supposé être utilisé pour le transport). (iii) 50 % de l'électricité consommée dans le résidentiel, 25 % de l'électricité consommée dans le tertiaire et 20 % de l'électricité consommée dans l'industrie et l'agriculture l'est pour des usages thermiques.

⁸ Cela comprend les pompes à chaleur, qui fonctionnent à l'électricité, cf. *infra*.

Ce document de travail n'étudie pas l'opportunité d'augmenter la chaleur produite à partir d'électricité, en augmentant le volume de chauffage électrique. Ce choix dépend en effet de plusieurs paramètres spécifiques au secteur électrique qui sortent de l'analyse présentée ici, notamment :

- **L'effet du chauffage électrique sur le réseau électrique.** L'augmentation de l'usage du chauffage électrique augmente la sensibilité du système électrique aux températures extérieures et donc les capacités nécessaires pour assurer la pointe d'électricité en hiver. Dans le même temps, le chauffage électrique permet d'offrir un débouché pour la production d'électricité (historiquement, le chauffage électrique a été développé en France pour permettre d'absorber une partie de la production nucléaire en augmentant la demande d'électricité⁹).
- **La composition de la pointe d'électricité.** Suivant la composition de la pointe d'électricité (gaz, nucléaire ou EnR), le passage au chauffage électrique peut augmenter ou réduire les émissions de carbone. En particulier, les centrales à gaz utilisées pour la pointe d'électricité émettent plus que les chauffages au gaz les plus efficaces (0,36 tCO₂/MWh contre 0,18 tCO₂/MWh¹⁰).

À ce sujet, les divers objectifs de chaleur renouvelables excluent systématiquement le secteur électrique de leur périmètre.

En termes d'usage de la chaleur, ce document de travail se concentre sur le « chauffage » et l'« eau chaude sanitaire » qui représentent près de trois quarts des usages¹¹. En particulier, la « cuisson » est laissée de côté car les technologies de la chaleur renouvelable ne portent pas sur cet usage.

En termes d'objectifs, l'augmentation de la part de chaleur renouvelable à des fins de réduction d'émissions carbonées n'entre pas en conflit avec des objectifs d'efficacité énergétique. Ainsi, il existe des chauffages au bois qui présentent un faible surcoût par rapport aux chauffages au gaz les plus coûteux et qui sont moins coûteux que les chauffages au fioul. Ils permettent ainsi à la fois une baisse des émissions de CO₂ et des économies d'énergie. Par ailleurs, une grande partie des actions de rénovation concernent surtout l'isolation et la programmation qui ne sont pas en lien direct avec les actions permettant d'augmenter la part de la chaleur renouvelable¹². Enfin, la rénovation permet de réduire la consommation, et donc de réduire les problèmes de pollution locale posés par certains chauffages au bois (*cf. infra*).

Le reste du document de travail est organisée comme suit. La partie 1 dresse un panorama des différentes technologies de production de chaleur renouvelable. La partie 2 présente la dynamique de diffusion de ces technologies au cours des dernières années. La partie 3 revient sur les objectifs en matière de chaleur renouvelable. La partie 4 analyse les différents mécanismes de soutien en faveur de la chaleur renouvelable et la partie 5 contient des propositions d'amélioration de ces mécanismes.

1. Panorama de la chaleur renouvelable en France

1.1 Les différentes technologies de production de chaleur renouvelable

Les EnRT reposent sur différentes technologies, qui peuvent servir pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire :

⁹ Les chauffe-eaux électriques permettent par ailleurs un lissage de la consommation, puisqu'ils sont le plus souvent déclenchés pendant les périodes de faible demande (l'eau chaude étant stockée pour une utilisation future). Jusqu'à présent, ce n'était pas le cas des chauffages (cela pourrait évoluer avec les nouvelles générations, qui permettent une meilleure programmation des périodes de chauffage).

¹⁰ Source : ADEME.

¹¹ Selon l'Ademe, en 2013, le chauffage représentait 61,3 % de la consommation énergétique moyenne d'un logement, l'eau-chaude sanitaire 12,1 % et la cuisson 7 %. Le reste de la consommation renvoie essentiellement aux usages spécifiques de l'électricité.

¹² Les changements de chaudière représentent 20 TWh des 89 TWh d'actions de rénovation socio-économiquement rentables. Cf. Camilier-Cortial I., Loublier A., Perrot E. et Souletie A. (2017), « Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ? » Document de travail de la DG Trésor n°2017/02.

- **La biomasse.** Il est possible de brûler de la biomasse provenant de la sylviculture (biomasse venant des forêts et sous-produits de l'industrie du bois, dit *bois-énergie*), la biomasse agricole et la biomasse provenant des déchets. Au niveau des logements individuels, la biomasse, essentiellement sous forme de bois, peut être utilisée dans des inserts, des foyers fermés¹³ ou des poêles à bois pour chauffer une ou plusieurs pièces, ou dans une chaudière reliée au chauffage central et éventuellement au ballon d'eau chaude. Pour les logements collectifs ou les entreprises, des chaudières de plus ou moins grandes tailles peuvent être mobilisées.
- **Le biogaz.** Le biogaz est produit lors de la méthanisation des déchets, c'est-à-dire le processus de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène. Il existe plusieurs types de méthaniseurs : les méthaniseurs d'ordures ménagères, les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND), les digesteurs de boues d'épuration ou les méthaniseurs agricoles. En fonction de la situation de chacune des installations, les méthaniseurs peuvent produire uniquement de la chaleur, du gaz ou de l'électricité ou réaliser une cogénération électricité/chaleur.
- **Le solaire thermique.** Le solaire thermique permet d'assurer la production d'eau chaude sanitaire et, dans certains cas, d'une partie du chauffage. La technologie la plus commune est celle du chauffe-eau solaire individuel (CESI). La production se fait grâce à un capteur plan associé à un ballon de stockage de l'eau chaude via un échangeur. Le CESI permettant de couvrir environ 50 à 60 % des besoins d'eau chaude sanitaire en moyenne sur une année grâce au soleil, ces chauffe-eau comportent un chauffage d'appoint.
- **La géothermie.** La géothermie est l'exploitation de l'énergie thermique contenue dans le sous-sol, dans lequel la température augmente avec la profondeur. Dans le cas de la géothermie thermique¹⁴, on exploite des températures allant de 10 à 100°C. On peut distinguer 3 niveaux :
 - La géothermie superficielle dite « très basse énergie » (moins de 30°C) exploite les premières dizaines de mètres sous la surface et trouve des applications principalement dans l'habitat collectif, le tertiaire et l'individuel ;
 - La géothermie « basse énergie » (entre 30 et 90°C) utilise des ressources plus profondes (jusqu'à environ 2 000 m) ;
 - Au-delà, dans les zones favorables, on peut avoir de la géothermie « moyenne énergie » (plus de 90°C). Il s'agit dans ce cas d'une production centralisée qui va valoriser directement la chaleur de ressources que l'on rencontre dans des aquifères¹⁵ situés entre 400 m et 2500 m de profondeur. Cette ressource est couramment utilisée pour le chauffage urbain via des réseaux de chaleur ou en usage direct (chauffage de serres, de piscines et d'établissements thermaux).

¹³ Les inserts et les foyers fermés s'encastrent directement dans une cheminée, les poêles à bois se placent dans une pièce.

¹⁴ La géothermie peut également être utilisée pour la production d'électricité.

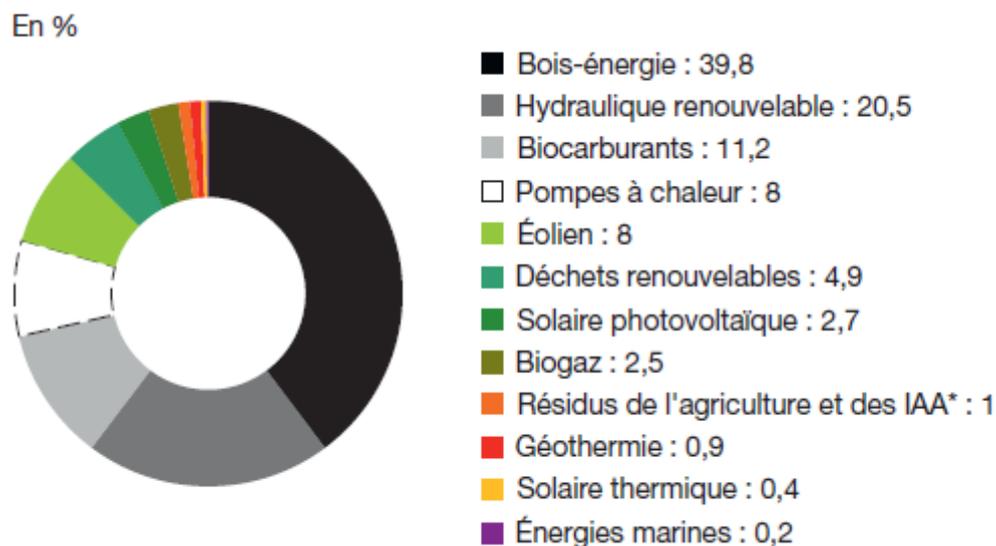
¹⁵ Les aquifères sont des roches suffisamment poreuses ou fissurées pour permettre le passage de l'eau.

- **Pompe à chaleur (PAC).** Une PAC est un système thermodynamique qui permet de prélever de la chaleur d'un milieu à basse température, pour la transférer vers un milieu où la température est plus élevée (cf. annexe 1 pour la description plus précise du fonctionnement d'une PAC). Pour assurer ce transfert de chaleur, les PAC consomment de l'énergie, sous forme électrique dans plus de 95 % des cas en France (le reste fonctionnant au gaz). Les performances d'une PAC sont caractérisées par son COP (coefficient de performance) qui correspond au rapport entre la quantité de chaleur transférée et la quantité d'électricité consommée. Le COP se situe entre 3 et 4,5 pour le chauffage et entre 2,5 et 3 pour la production d'eau chaude. On distingue les pompes à chaleur aérothermiques qui rassemblent les technologies qui utilisent l'air comme source de chaleur, et les pompes à chaleur géothermiques qui captent l'énergie du sol ou de l'eau. En cas de rénovation, la PAC peut venir en complément de la chaudière (la chaudière joue alors le rôle d'appoint en cas de température extérieure basse). Quand la PAC et la chaudière sont un seul et même appareil, on parle alors de PAC hybride.
- **La chaleur fatale (ou chaleur de récupération).** C'est la chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui est récupérée. Les sources de chaleur fatale sont diversifiées : il peut s'agir de sites de production industrielle, de bâtiments tertiaires, des *data-centers*, ou encore des sites d'élimination des déchets comme les unités de valorisation énergétiques des déchets, sous l'angle de leur partie non renouvelable, et les unités d'incinération des déchets autres que ménagers. La valorisation de cette chaleur de récupération peut ensuite se faire sur le site lui-même pour des besoins spécifiques (séchage, préchauffage, chauffage des locaux...), pour répondre à des besoins de chaleur d'entreprises situées à proximité (réseau entre deux entreprises) ou pour des besoins de chaleur d'un territoire (réseau de chaleur urbain).
- **Les réseaux de chaleur.** Dans les réseaux de chaleur, une chaufferie centrale produit de la chaleur (sous forme d'eau chaude ou de vapeur), qui est ensuite distribuée dans une ville ou dans un quartier par un réseau de canalisations souterraines à des immeubles d'habitation ou des entreprises (cf. annexe 2). Dans chacun de ces bâtiments, un poste de livraison transforme la chaleur livrée en eau chaude pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire. Le caractère renouvelable des réseaux dépend de l'alimentation des chaufferies. Une alimentation à partir de biomasse, de la géothermie, de biogaz ou d'une source de chaleur fatale permet d'obtenir une chaleur renouvelable.

1.2 Part des différentes technologies thermiques propres

Si on examine l'ensemble des EnR, on constate que le bois énergie (qui peut également servir pour l'électricité) est la première forme de production d'EnR (39,8 % de la production primaire d'EnR en 2015, cf. figure 1), devant l'hydraulique (20,5 %), les biocarburants (11,2 %) et les pompes à chaleur (8,0 %).

Figure 1 : Production primaire d'énergies renouvelables par filière en 2015 en métropole (total : 23,0 Mtep)

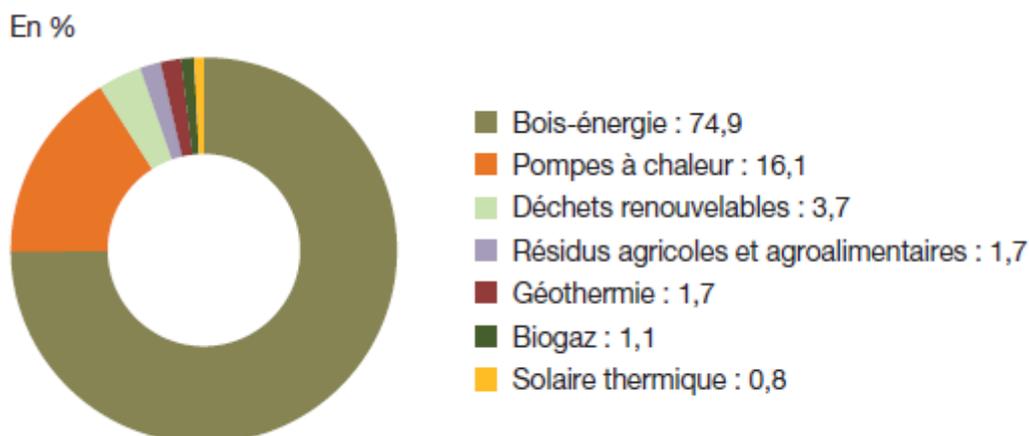


* IAA : industries agroalimentaires.

Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

Si on sépare les EnRT entre les différentes technologies, on constate que sur 12,3 Mtep en métropole, le bois-énergie représente 74,9 %, suivi par les pompes à chaleur (16,1 %) et les déchets (3,7 %, cf. figure 2).

Figure 2 : Consommation primaire d'énergies renouvelables pour la production de chaleur en 2015, corrigée des variations climatiques (total : 12,3 Mtep)



Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

La production de chaleur renouvelable dans les DOM représente 97 Ktep, 63 % venant du solaire thermique et 37 % de la biomasse.

1.3 Caractéristiques de la chaleur renouvelable

À l'exception des réseaux de chaleur, l'utilisation des technologies thermiques renouvelables est très décentralisée au niveau des consommateurs individuels. La production de chaleur est propre à chaque bâtiment et est donc essentiellement décentralisée et autoconsommée (cf. partie 1.2 pour la part de chaque type de technologie dans la production de chaleur). La problématique est donc très différente de l'électricité, qui repose sur des unités de production pouvant fournir beaucoup de consommateurs. Seuls les réseaux de chaleur présentent une échelle plus importante au niveau local, puisqu'ils fonctionnent aux niveaux du quartier ou de la ville. Cependant, les réseaux de chaleur ne couvrent qu'environ 5 % de la consommation de chaleur et restent donc marginaux.

Les technologies thermiques propres, même lorsqu'elles sont rentables, peuvent ne pas être spontanément adoptées en raison de difficultés similaires à celles de la rénovation thermique¹⁶ :

- Les préférences des individus sont différentes des préférences socio-économiques (taux d'actualisation plus élevés, aversion au risque). En particulier, le taux d'actualisation relativement élevé des ménages peut rendre non rentable l'adoption de technologies vertes : les EnRT présentent un coût d'investissement initial supérieur et un coût du combustible inférieur par rapport au moyen de production carboné, ce qui peut impliquer un taux de retour relativement long. Par exemple, l'installation d'une chaudière à bois coûte en moyenne 10 000 €, contre 3 600 € pour une chaudière au gaz à condensation (et 15 000 € pour une PAC géothermique), mais le prix des intrants est plus faible pour une centrale au bois, pour des niveaux de production équivalents. Par ailleurs, il peut exister une incertitude sur le prix des combustibles pour les ménages.
- Les agents économiques ont des biais cognitifs (rationalité limitée, biais en faveur du *statu quo*).
- Il existe des défaillances de marché (externalités liées aux émissions de carbone, problème d'accès au crédit).

Ainsi, comme pour la rénovation thermique¹⁷, l'augmentation du prix du carbone peut ne pas suffire pour déclencher l'adoption de technologies thermiques propres, même s'il demeure essentiel. Les études empiriques analysant le déploiement des EnRT montrent que si le prix est un facteur important dans l'adoption des EnRT, il n'est pas le seul déterminant. Hecher *et al.* (2017)¹⁸ montrent ainsi, en considérant plusieurs sous-groupes de la population¹⁹, que l'écart de prix (à l'usage) entre les EnRT et des systèmes au gaz ou au pétrole est le principal facteur de choix. Néanmoins, l'étude souligne l'importance d'autres facteurs, parmi lesquels :

- L'existence d'une dépendance au passé : même contrôlée par les différences de prix (à la fois en termes d'investissement et de coûts de fonctionnement), la présence dans le logement d'un moyen de production carboné réduit la probabilité de passer à un autre mode de chauffage. Cet effet est particulièrement important pour les personnes changeant un chauffage arrivé en fin de vie. Cela plaide pour un effort particulier dans les nouveaux bâtiments, pour éviter des effets de blocage par la suite.

¹⁶ Pour une discussion plus détaillée de ces difficultés, cf. Camilier-Cortial I., Loublie A., Perrot E. et Souletie A. (2017), « Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ? » Document de travail de la DG Trésor n°2017/02.

¹⁷ Cf. Camilier-Cortial I., Loublie A., Perrot E. et Souletie A. (2017), « Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ? » Document de travail de la DG Trésor n°2017/02.

¹⁸ Hecher M., Hatzl S., Knoeri C. et A. Posch, 2017, "The trigger matters: The decision-making process for heating systems in the residential building sector", *Energy Policy*, 102, 288-306.

¹⁹ Les auteurs séparent la population étudiée entre les personnes devant remplacer un moyen de chauffage ne fonctionnant plus, les personnes qui changent de moyens de chauffage avant la fin de vie de leur appareil, et les personnes dans un logement neuf qui doivent décider du moyen de chauffage à installer.

- Le niveau d'information joue également un rôle dans l'adoption des technologies EnRT. En particulier, les informations sur la simplicité de fonctionnement et le coût sont importantes. L'importance d'une meilleure information dans la diffusion des EnRT est confirmée par d'autres études (par exemple, cf. Michelsen et Madlener, 2016).
- Les motifs environnementaux ont un impact significatif, mais relativement faible (et uniquement pour les individus changeant de chauffe-eau avant la fin de vie de leur installation).

1.4 Quels coûts de production pour les EnRT ?

L'analyse des coûts de production des EnRT implique de les comparer avec le coût d'équipements carbonés ou électriques destinés aux mêmes usages. Il convient de distinguer :

- Le résidentiel individuel. Dans ce cas, la comparaison va se faire entre des EnRT (type chaudière au bois ou PAC) et des moyens de production carbonée (gaz notamment) ou électrique pour le chauffage individuel.
- Le résidentiel collectif, et les secteurs tertiaire et industriel. Cela renvoie à des projets de plus grandes tailles (chaufferie au bois, connexion à une source de chaleur fatale). La comparaison se fait avec des chaudières au gaz qui sont aujourd'hui les plus efficaces.
- Les réseaux de chaleur, dont le coût va varier fortement en fonction de la source de chaleur (chaudière biomasse, chaleur de récupération ou géothermie) et du nombre de consommateurs connectés au réseau. La comparaison se fait par rapport au chauffage au gaz collectif.

Pour les chauffages individuels, les chauffages au bois sont dans certains cas au moins aussi rentables que les chaudières au gaz à condensation (qui constituent la technologie carbonée la moins coûteuses, cf. tableau 2). C'est notamment le cas des chaudières et des poêles les plus efficaces. Cependant, cette analyse laisse de côté les coûts cachés liés au chauffage au bois. En effet, hormis les chauffages à granulés qui permettent une autonomie de plusieurs jours, ces chauffages demandent à être rechargés très régulièrement (généralement plusieurs fois par jours), ce qui réduit le confort par rapport à un chauffage au gaz. En revanche, les PAC et le solaire thermique représentent toujours un surcoût important par rapport aux chaudières à gaz. Cependant, les PAC sont compétitives par rapport à des condensateurs électriques (dont le coût est estimé par l'ADEME à 154 €/MWh).

Tableau 2 : Coût des EnRT dans les logements individuels (en 2014)

	Rendement ²⁰	Investissement initial (€/kW)	Exploitation fixe (€/kW/an)	Coût du combustible (€/MWh)	Coûts de production total (€/MWh)
Appareils indépendants (biomasse)					
<i>Insert, foyer fermé, poêle à bûches 10 kW</i>	75 %	100-500	5-15	41	48-69
<i>Poêle à granulés classiques 10 kW</i>	85 %	200-500	5-15	75	86-103
Chauffage central (biomasse)					
<i>Chaudière à bûches turbo avec ballon d'hydroaccumulation</i>	85 %	400-750	15-20	36	54-67
<i>Chaudière à bûches à tirage naturel 20 kW</i>	80 %	200-800	15-20	38	50-70
<i>Chaudière automatique granulés 20 kW</i>	90 %	350-950	15-20	63	80-100
Solaire thermique					
<i>Chauffe-Eau Solaire Individuel (France Nord)</i>	300 ²¹	940-1180 (€/m ²)	15 (€/m ² /an)		301-366
<i>Chauffe-Eau Solaire Individuel (France Sud)</i>	500	940-1180 (€/m ²)	15 (€/m ² /an)		181-219
PAC					
<i>Aérothermique (air/eau)</i>	2,5-3 ²²	1100-1400	40	24-28	116-137
<i>Géothermique</i>	3,3-3,8	1200-1600	40	20-24	118-145
<i>Chaudière à gaz à condensation²³</i>	80%	120	4	60	84
<i>Condensateur électrique</i>					154

Source : ADEME, Coûts des Énergies renouvelables, 2016 (pour les EnRT et les condensateurs électriques), Ylios et calculs DG Trésor (pour les chaudières à condensation). Les données de l'ADEME étant calculées à partir d'un taux d'actualisation de 5 % pour une durée de 20 ans, on retient ce chiffre pour le calcul sur les chaudières à gaz.

En revanche, pour le logement collectif ou les secteurs industriels et tertiaire, les EnRT présentent systématiquement un surcoût par rapport aux chaudières à gaz, même si dans certains cas le surcoût est faible (notamment dans le cas de la biomasse industrielle, cf. tableau 3).

²⁰ Le rendement indique le niveau de chaleur produit par la combustion d'une unité de gaz ou de biomasse. Un rendement de 85 % signifie que la combustion d'1 MWh de biomasse/gaz produit 0,85 MWh de chaleur.

²¹ Dans le cas du solaire thermique, il ne s'agit pas de rendement, mais de productivité, exprimée en €/m²/an.

²² Dans le cas des PAC, il ne s'agit pas de rendement, mais du coefficient de performance (COP), qui mesure la quantité d'énergie produite par 1 kWh d'électricité.

²³ On suppose que le prix du carbone est nul.

Tableau 3 : Coût des EnRT dans les logements collectifs et les secteurs industriel et tertiaire (en 2014)

	Investissement initial (€/kW)	Exploitation fixe (€/kW/an)	Coût du combustible (€/MWh)	Coûts de production total (€/MWh)
Biomasse résidentiel collectif				
<i>Moins de 1MW</i>	1100	17,5	34	96
<i>Entre 1MW et 3MW</i>	940	17,5	34	77
<i>Plus de 3MW</i>	610	17,5	34	62
Biomasse industrielle				
<i>Moins de 1MW</i>	1100	7	29	65
<i>Entre 1MW et 3MW</i>	940	7	29	55
<i>Plus de 3MW</i>	610	7	29	46
Solaire thermique collectif				
<i>STC (Nord de la France, <150 kW)</i>	650-1050 (€/m²)	10 (€/m²/an)		138-209
<i>ST sur réseau (Nord de la France, 150kW-500 kW)</i>	530-700 (€/m²)	10 (€/m²/an)		93-128
<i>STC (Sud de la France, <150 kW)</i>	650-1050 (€/m²)	10 (€/m²/an)		104-157
<i>ST sur réseau (Sud de la France, 150kW-500 kW)</i>	530-700 (€/m²)	10 (€/m²/an)		76-105
PAC géothermique				
<i>Géothermie superficielle sur champ de sondes (30-300 kW)</i>	1200-1800	45-60		78-114
<i>Géothermie sur aquifère superficiel (100-1000 kW)</i>	500-1400	60-90		56-112
Géothermie profonde (8-12 MW)	2400-3600	140-160		74-99
Chaufferie au gaz naturel²⁴				
<i>Moins de 150 kW</i>	254,9	8,6	56,3	75
<i>Entre 150 et 500 kW</i>	135,4	4,4	46,1	56
<i>Entre 500 et 1000 kW</i>	83	2,8	46,1	52
<i>Entre 1-3 MW</i>	60,3	1,1	46,1	48
<i>Plus de 3 MW</i>	47,3	0,6	38,2	40

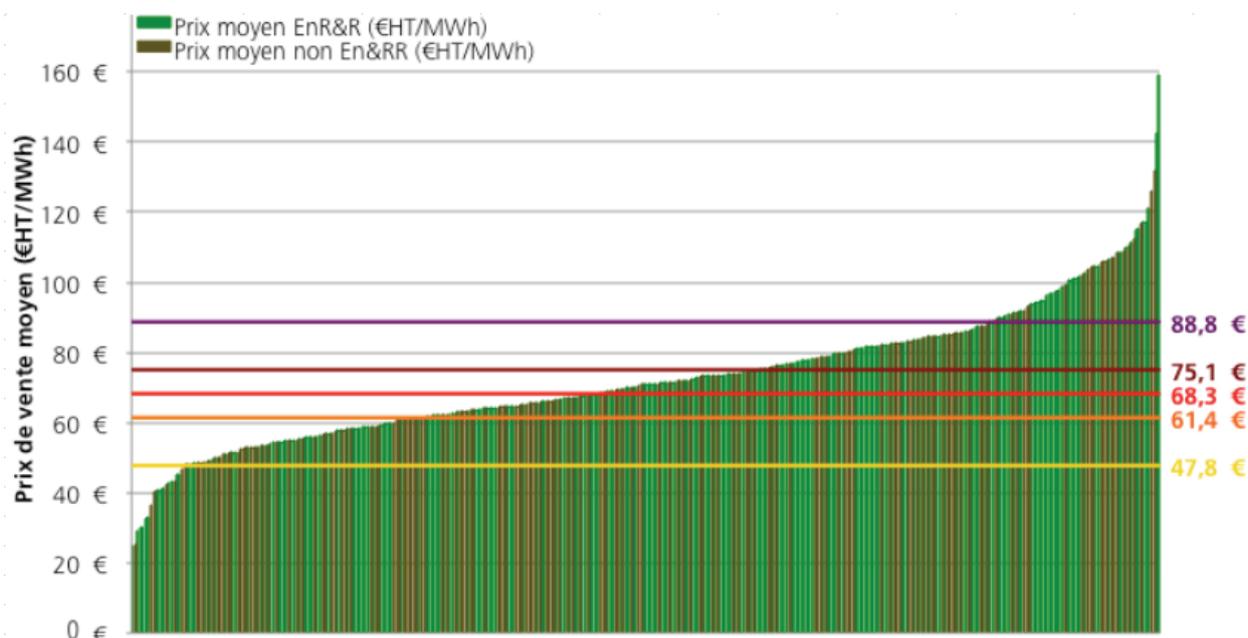
Source : ADEME, Coûts des Énergies renouvelables, 2016. Le taux d'actualisation retenu est de 5 %, pour une durée de 20 ans.

Enfin, si le coût de l'énergie issue des réseaux de chaleur est très variable, ces réseaux sont aujourd'hui compétitifs en moyenne, en particulier les réseaux alimentés par des EnR. En 2015 en France, le coût moyen est de 68,3 €/MWh ; le premier quartile se situe à 60,0 €/MWh et le troisième quartile à 82,9 €/MWh. (cf. figure 3). Le coût moyen des réseaux alimentés par des EnR et de la chaleur de récupération est de 65,6 €/MWh. Pour les bâtiments les mieux isolés (par exemple ceux soumis à la RT 2005²⁵, cf. tableau 4), les réseaux de chaleur alimentés par des EnR et de la chaleur de récupération sont le mode de chauffage le plus économique. Pour les bâtiments les moins bien isolés, c'est le deuxième mode de chauffage le plus efficace, derrière le chauffage collectif au gaz.

²⁴ On suppose un prix du carbone est nul.

²⁵ Réglementation thermique. La réglementation fixe un niveau d'exigence pour les nouveaux bâtiments. Sur la RT 2018 cf. partie 5.

Figure 3 : Monotone des prix de vente moyens de la chaleur en 2015 pour les réseaux de chaleur, pour les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R)



Source : AMORCE, Compétitivité des réseaux de chaleur en 2015.

Note : l'Amorce distingue 5 classes de réseaux chaleurs, selon que leur prix est respectivement inférieur à 30 % du prix moyen, inférieur de 10 à 30 %, compris entre moins et plus 10 %, supérieur entre 10 et 30 %, supérieur à 30 %. Les lignes horizontales marquent les différentes classes.

Tableau 4 : Coût global annuel des différents modes de chauffage par logement²⁶ pour différentes types d'habitation en 2015 (en euros)

	Bâtiments RT-2005 120 kWh/m ² .an	Parc social moyen 170 kWh/m ² .an	Bâtiment peu performant 300 kWh/m ² .an
Réseau de chaleur avec plus de 50 % d'EnR	949	1158	1707
Réseau de chaleur moyen	987	1216	1818
Réseau de chaleur avec moins de 50 % d'EnR	1033	1286	1949
PAC individuelle	1564	1792	2386
PAC collective géothermique	1253	1582	2286
Gaz collectif	1074	1155	1654
Gaz individuel	1328	1535	2077
Électricité individuelle	1362	1800	2973
Fioul collectif	1076	1331	1996

Source : AMORCE, Compétitivité des réseaux de chaleur en 2015.

²⁶ Pour un logement de 70 m² dans un immeuble de 25 logements.

1.5 Chauffage au bois individuel et pollution locale

Le chauffage au bois peut poser un problème spécifique de pollution de l'air. En effet, la combustion de la biomasse peut entraîner l'émission de particules fines (PM 2,5 et PM 10). Ainsi, en 2015 le secteur résidentiel et tertiaire a été responsable de 31 % des émissions de PM 10 et 48 % des émissions de PM 2,5, et cela proviendrait pour plus de 90 % de la combustion du bois²⁷. Une taxe sur le bois utilisé, pour internaliser l'externalité, aurait peu d'effet. En effet, ces émissions dépendent du type de bois brûlé (essence de bois, bois sec ou non) et de la manière dont la chaudière est utilisée. Par ailleurs, une partie du bois consommé est acquis gratuitement par les consommateurs, ce qui réduirait l'efficacité d'une telle taxe.

Des efforts importants ont néanmoins été réalisés pour limiter les émissions de polluants avec la création du label flamme verte en 2000 (qui garantit un niveau minimum de rendement²⁸). La flamme verte 5 étoiles, qui présente l'efficacité énergétique la plus faible, émet 30 fois moins de particules fines qu'un appareil de chauffage au bois installé avant 2002. Depuis le 1^{er} janvier 2018, seuls sont autorisés à la vente les modèles supérieurs (6 et 7 étoiles) qui permettent des réductions encore plus importantes (émissions de monoxyde de carbone et de particules fines divisées par plus de 2 avec un modèle 7 étoiles par rapport à un modèle 5 étoiles²⁹). Selon l'ADEME, les chauffages au bois individuel actuellement en vente émettent **en moyenne 40 g/MWh de particules fines**, contre 2390 g/MWh³⁰ pour les chauffages les moins efficaces encore en circulation.

Néanmoins, l'ADEME souligne que cette estimation de 40 g/MWh est une moyenne, et que la mauvaise utilisation des appareils de chauffage au bois peut augmenter leur émissions (utilisation par exemple d'un bois humide), ce qui peut annuler tout ou partie des gains en termes de pollution locale liés au passage à des appareils plus modernes. Ainsi, selon l'ADEME³¹, la fourchette d'émissions pour les appareils à la vente en fonction de l'utilisation varie de 4 g/MWh pour les chauffages au bois les plus efficaces utilisés au mieux à 139 g/MWh pour les chauffages au bois mal utilisés. Il est donc important de développer l'information autour des bonnes pratiques de chauffage.

En reprenant les valeurs tutélaires pour les émissions de particules fines du rapport Quinet³² et celle de la Commission, on obtient le tableau 5 présentant le coût de la pollution locale en fonction du milieu considéré, pour des appareils au bois émettant respectivement, 4 g/MWh, 40 g/MWh, 139 g/MWh et 2390 g/MWh dans des conditions normales d'utilisation :

²⁷ Source : données du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA), 2017 pour les émissions par secteur et ADEME, « Bois énergie et qualité de l'air », 2015, pour la part du bois.

²⁸ Le rendement désigne ici le rapport entre la chaleur effectivement utilisée et le bois consommé pour produire cette chaleur.

²⁹ Cela entraîne cependant un surcoût : les modèles 7 étoiles sont en moyennes 22 % plus chers.

³⁰ Source : Office national des forêts, pour des installations datant d'avant 1996.

³¹ Évaluation des performances énergétiques et environnementales des chaufferies biomasses, campagne de mesure 2016.

³² Quinet E. (2013), « L'Évaluation socioéconomique en période de transition », contribution de G. Duclos, *Valorisation de la pollution atmosphérique dans le calcul socioéconomique*.

Tableau 5 : Coût de la pollution liée aux émissions de particules fines des chauffages au bois individuel en €/MWh

		Valeur tutélaire des particules fines (€/kg)	Chauffage au bois efficace bien utilisé (4 g/MWh)	Moyenne chauffage au bois actuel (40 g/MWh)	Chauffage au bois actuel mal utilisé (139 g/MWh)	Chauffage au bois polluant (2390 g/MWh)
Rapport Quinet	interurbain	17	0	1	2	41
	urbain diffus	174	1	7	24	415
	urbain	521	2	21	72	1244
	urbain dense	1562	6	62	217	3733
	urbain très dense	4686	19	187	651	11200
Commission		88	0	4	12	210

Source : Rapport Quinet (2013), Commission, ADEME, ONF. Calculs DG Trésor.

Ces coûts supplémentaires doivent être comparés aux émissions de carbone des chauffages au gaz (qui constituent la technologie la plus efficace avec lesquels les chauffages au bois sont en concurrence). En menant une analyse coût-bénéfice tenant compte de l'ensemble des externalités liées à la pollution (climatique et locale), et en retenant un coût pour l'externalité carbone actualisée de 100 €/tCO₂ en 2030, équivalent à la valeur Quinet, on constate qu'avec les appareils les plus performants utilisés de manière efficace, le coût supplémentaire par MWh dans toutes les zones reste limité, ce qui permet au chauffage au bois d'être une solution efficace du point de vue socio-économique pour la décarbonation (cf. tableau 6). En revanche, pour les chauffages moins performants et/ou mal utilisés, on constate un fort surcoût lié aux émissions dans les zones urbaines denses et très denses. Il est donc nécessaire de se concentrer sur les technologies les plus performantes (en poursuivant notamment l'effort de hausse régulière du niveau minimum d'efficacité pour pouvoir vendre des chauffages au bois³³) et de communiquer sur le bon usage de ces technologies. Il est par ailleurs nécessaire de renouveler les appareils les plus anciens.

Par ailleurs, les projets de grandes tailles possèdent un niveau d'émissions nettement plus faibles que les chauffages individuels (environ 4 g/MWh).

³³ Cela implique de tendre à termes vers des chauffages 7 étoiles ou plus.

Tableau 6.1 : Analyse coût-bénéfice du chauffage individuel (partie 1)

	Chauffage efficace bien utilisé (4 g/MWh)					
	Coût de production total (€/MWh)	Coût de la pollution carbone ³⁴ (100 €/tCO ₂)	Pollution PM (hors urbain dense) (€/MWh)	Total (hors urbain dense) (€/MWh)	Pollution PM (urbain dense/ très dense) (€/MWh)	Total (urbain dense/ très dense) (€/MWh)
Chauffage central						
<i>Chaudière à bûches turbo avec ballon d'hydroaccumulation</i>	54-67	1,625	0-2	56-69	6-19	62-88
<i>Chaudière à bûches à tirage naturel 20 kW</i>	50-70	1,625	0-2	52-72	6-19	58-91
<i>Chaudière automatique granulés 20 kW</i>	80-100	1,625	0-2	82-102	6-19	88-121
Chaudière à gaz à condensation	84	22,5	0	106,5	0	106,5

Tableau 6.2 : Analyse coût-bénéfice du chauffage individuel (partie 2)

	Moyenne chauffage actuel (40 g/MWh)					
	Coût de production total (€/MWh)	Coût de la pollution carbone (100 €/tCO ₂)	Pollution PM (hors urbain dense) (€/MWh)	Total (hors urbain dense) (€/MWh)	Pollution PM (urbain dense/ très dense) (€/MWh)	Total (urbain dense/ très dense) (€/MWh)
Chauffage central						
<i>Chaudière à bûches turbo avec ballon d'hydroaccumulation</i>	54-67	1,625	2-21	58-90	62-187	118-256
<i>Chaudière à bûches à tirage naturel 20 kW</i>	50-70	1,625	2-21	54-90	62-187	114-259
<i>Chaudière automatique granulés 20 kW</i>	80-100	1,625	2-21	84-123	62-187	144-289
Chaudière à gaz à condensation	84	22,5	0	106,5	0	106,5

³⁴ On reprend les valeurs de la base carbone de l'ADEME pour estimer les émissions : 180 gCO₂/kWh pour le gaz et 13 gCO₂/kWh pour le bois.

Tableau 6.3 : Analyse coût bénéfice du chauffage individuel (partie 3)

	Chauffage peu efficace mal utilisé					
	Coût de production total (€/MWh)	Coût de la pollution carbone (100 €/tCO ₂)	Pollution PM (hors urbain dense)	Total (hors urbain dense)	Pollution PM (urbain dense/très dense)	Total (urbain dense/très dense)
Chauffage central						
Chaudière à bûches turbo avec ballon d'hydroaccumulation	54-67	1,625	2-72	58-141	217-651	273-720
Chaudière à bûches à tirage naturel 20 kW	50-70	1,625	2-72	54-144	217-651	269-723
Chaudière automatique granulés 20 kW	80-100	1,625	2-72	84-174	217-651	299-753
Chaudière à gaz à condensation	84	22,5	0	106,5	0	106,5

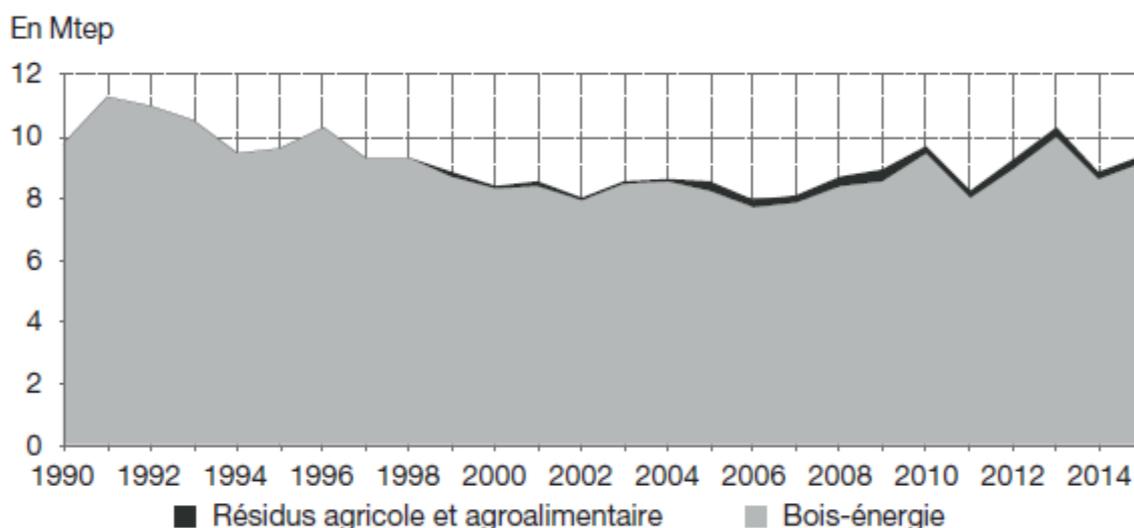
Source : Rapport Quinet (2013), ADEME, ONF. Calculs DG Trésor.

2. Évolution de la production des différentes technologies

La biomasse solide hors déchets (qui regroupe le bois-énergie et les résidus agricole et agroalimentaire) représente une consommation primaire de 9,5 Mtep en 2015 pour produire de l'énergie renouvelable. Elle est utilisée essentiellement pour produire de la chaleur (94 %) plutôt que de l'électricité, du fait d'un rendement supérieur dans la chaleur.

Après une période de baisse entre le début des années 1990 et le milieu des années 2000, la production primaire à partir de biomasse est repartie à la hausse (cf. figure 4). Ce profil s'explique notamment par une réduction puis une hausse du nombre de logements équipés en chauffage-bois énergie (environ 7 millions en 1990, 5,5 millions en 2001 et 7 millions en 2013) et par l'amélioration des performances des appareils (alors que le nombre de logements chauffé au bois est quasiment identique entre 1990 et 2013, la consommation de bois-énergie moyenne par logement a été réduite de 18 %).

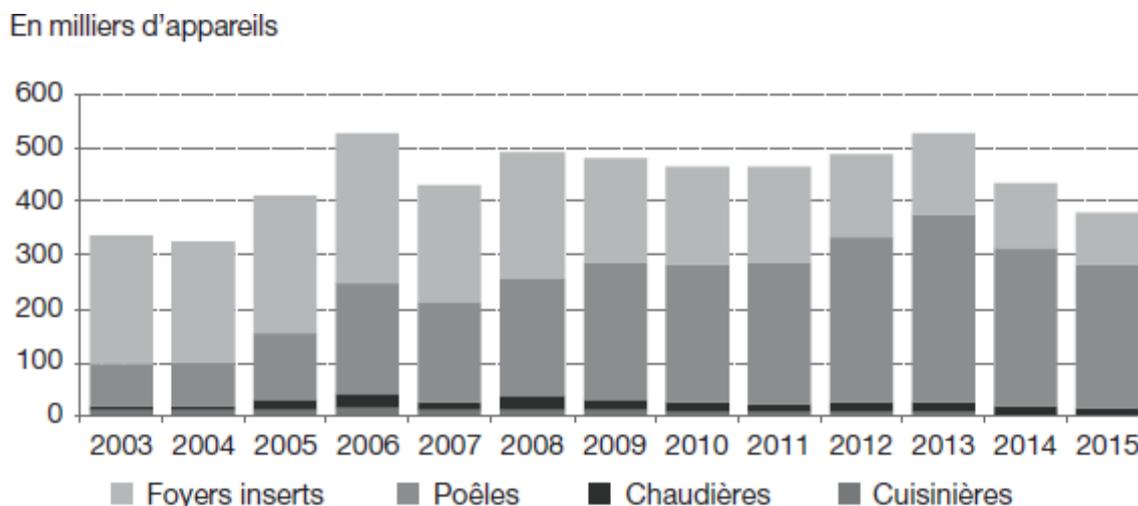
Figure 4 : Évolution de la production primaire à partir de biomasse solide hors déchets



Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

L'essentiel des appareils au bois acheté concerne des foyers inserts ou des poêles. On constate une forte baisse du nombre d'appareils vendus entre 2013 et 2015 (de plus de 500 000 à moins de 400 000, cf. figure 5), en partie du fait de la baisse du prix du gaz et du pétrole qui a réduit la compétitivité du bois-énergie. Ainsi, le prix du gaz spot a diminué de 40 % entre 2011 et 2016, ce qui n'a été que partiellement compensé par l'augmentation du prix du carbone³⁵, alors que le prix du bois-énergie a augmenté sur cette période (par exemple de 14 % pour les granulés en vrac entre 2011 et 2015).

Figure 5 : Ventes annuelles d'appareils de chauffage au bois énergie pour le résidentiel individuel



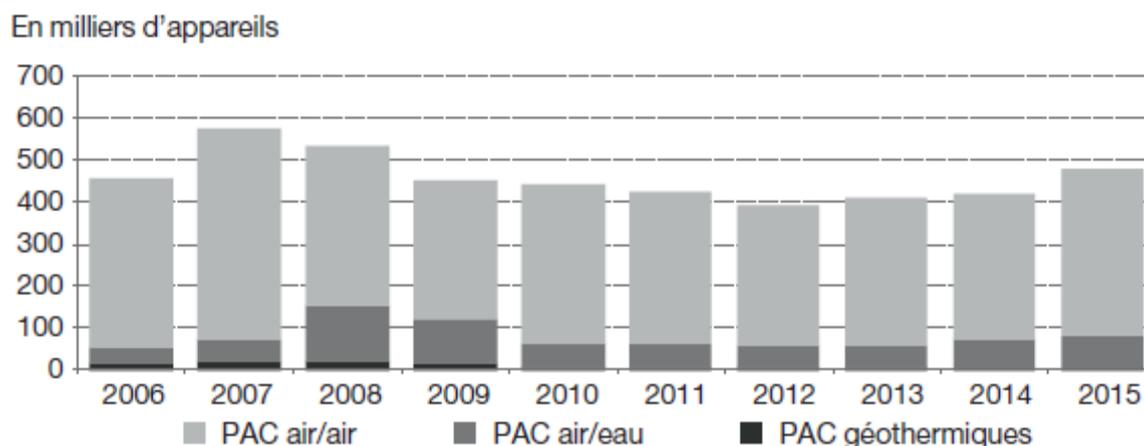
Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

Les PAC ont connu un développement soutenu au cours des dernières années. La consommation issue des PAC est passée de 200 ktep en 2005 à près de 2 000 ktep en 2015. Les ventes de PAC ont cependant fortement diminué entre 2007 et 2012 (passant d'environ 580 000 en 2007 à 400 000 en 2012), avant de réaugmenter. L'essentiel des ventes concernent des appareils air/air (essentiellement de la climatisation). En

³⁵ La baisse du prix spot si on ajoute le prix du carbone n'est plus que de 20 %.

2015, il s'est ainsi vendu 478 000 PAC individuelles, réparties entre 400 000 air/air, 75 000 air/eau (qui peuvent servir pour le chauffage et l'eau-chaude sanitaire) et 3 000 géothermiques. (cf. figure 6).

Figure 6 : Ventes annuelles de PAC pour le résidentiel individuel

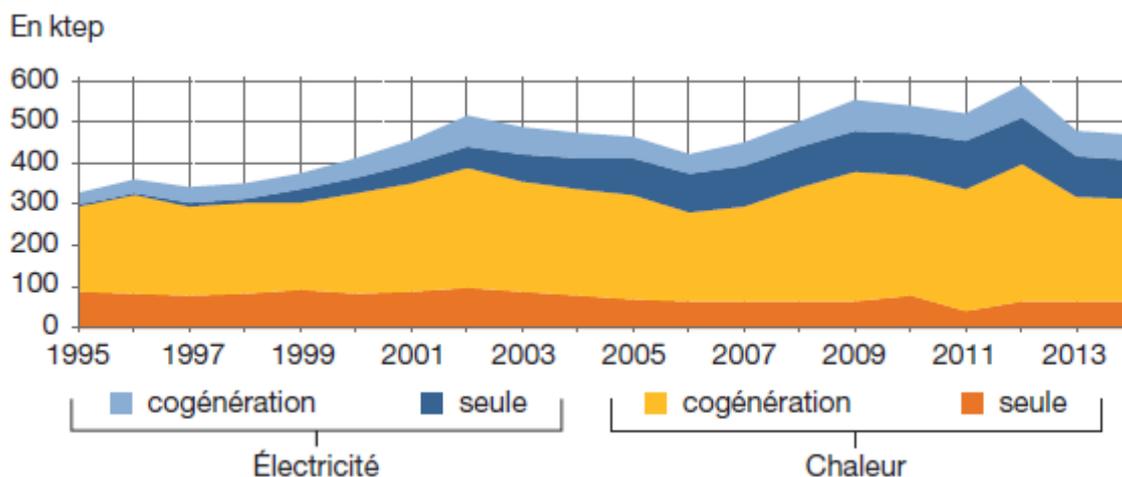


Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

Le solaire thermique et la géothermie ont connu des développements moins rapides. La production énergétique du solaire thermique est passée de 50 ktep en 2005 à 160 ktep en 2015. La production géothermique (qui concerne à plus de 94 % de la chaleur, le restant étant de l'électricité) a baissé entre 2005 et 2009 (de 100 ktep à 80 ktep), avant de ré-augmenter à environ 120 ktep en 2015.

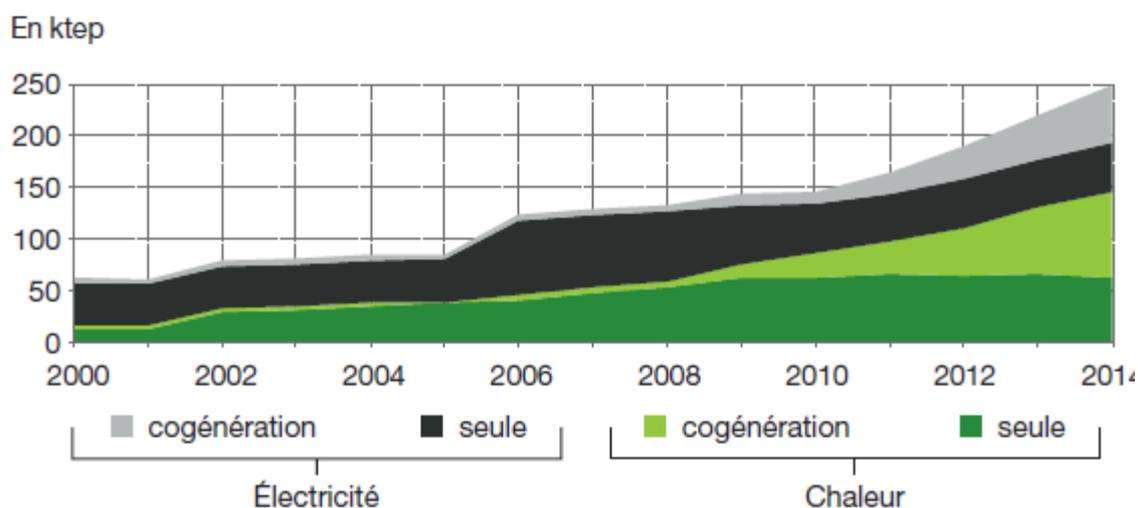
La production à partir de déchets renouvelables est restée relativement stable (environ 300 ktep en comptant la cogénération cf. figure 7) au cours des dernières années. En revanche, on constate une augmentation de la production de biogaz, notamment sous forme de cogénération (d'environ 30 ktep à 150 ktep en 2014, cf. figure 8).

Figure 7 : Évolution de la production d'énergie à partir de déchets urbaines renouvelables



Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

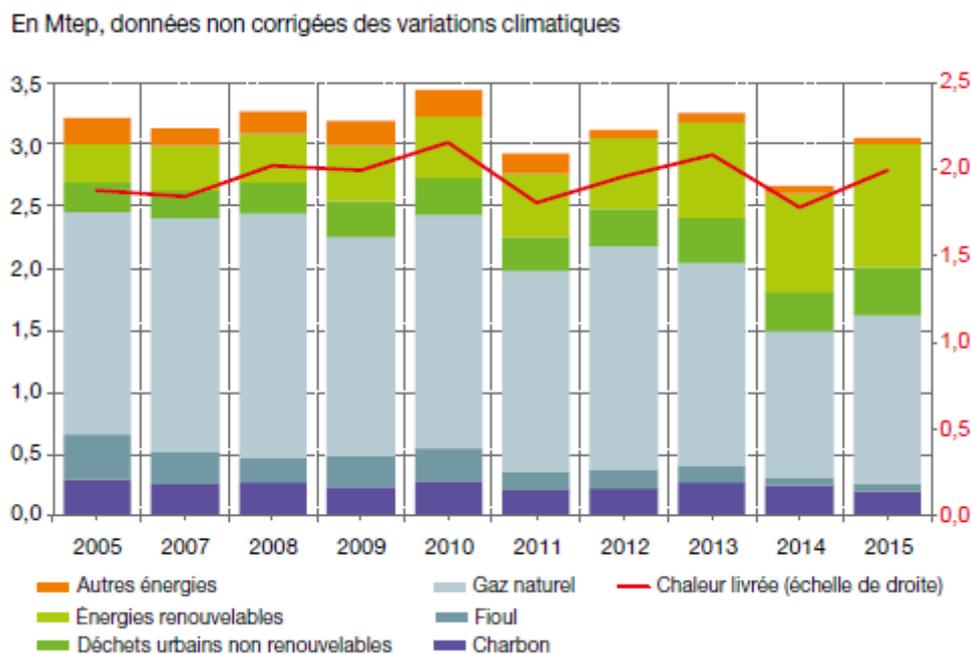
Figure 8 : Évolution de la production d'énergie à partir de biogaz



Source : SOeS, Chiffres clés des énergies renouvelables, 2016.

Enfin, en 2015, les réseaux de chaleur ont consommé un peu plus de 3 Mtep d'énergie (cf. figure 9). L'énergie livrée reste largement carbonée (43 % vient du gaz, 6 % du charbon et 2 % du fioul GPL). Les EnRT représentent près du tiers de la consommation d'énergie, en hausse sur l'ensemble de la dernière décennie.

Figure 9 : Évolution de la consommation d'énergie par source et de la chaleur livrée par les réseaux de chaleur



Source : SOeS, Chiffres clés de l'énergie, 2016.

3. Objectifs concernant la chaleur renouvelable

La directive 2009/28/CE a fixé à la France un objectif de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute³⁶ d'énergie à l'horizon 2020. En 2016, cette part s'élève à 15,7 %, contre 18,0 % prévu dans la trajectoire (cf. tableau 7). Cela vient en particulier d'un retard important de la chaleur renouvelable (passage de 11,8% en 2005 à 20,7 % en 2016, contre 25,5 % prévu). Une partie du retard s'explique par le climat doux des années 2014-2016, qui a pesé négativement sur la consommation de bois de chauffage. Ce retard reflète également la baisse des prix des combustibles fossiles sur les dernières années, qui a réduit la compétitivité des EnRT.

Tableau 7 : Part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2016

	Réalisé en 2016	Trajectoire prévue pour 2016	Objectifs 2020
Chaleur, refroidissement	20,7 %	25,5 %	33,0 %
Électricité	19,1 %	21,5 %	27,0 %
Transport	8,7 %	8,4 %	10,5 %
Ensemble	15,7 %	18,0 %	23,0 %

Source : CGDD, *Les énergies renouvelables en France en 2016, 2017*.

Par rapport au plan national d'action pour les EnR de 2010, qui fixait un objectif et une trajectoire pour les différentes filières, les PAC ont dépassé leur cible, alors que les autres filières sont en retard (la biomasse a réalisé 75 % de son objectif, alors que les autres filières sont à moins de 50 %, cf. tableau 8). De même, la livraison par réseau de chaleur a été moins importante que prévue (65 % de l'objectif atteint). Ces objectifs ont été actualisés dans la programmation pluriannuelle de l'énergie adoptée en 2016 et tous ont été revus à la baisse pour tenir compte du rythme de développement, sauf les PAC dont l'objectif a fortement augmenté (2 200 ktep en 2018 contre un objectif initial en 2020 de 1 850 ktep).

³⁶ C'est-à-dire non corrigé des variations climatiques.

Tableau 8 : Objectifs et niveau actuels des différentes filières de chaleur renouvelables (en ktep)

	Réalisé		Plan national d'action EnR			Programmation pluriannuelle de l'énergie		
	2005	2016	Trajectoire pour 2016	Réalisation de l'objectif	Objectif 2020	2018	2023 bas	2023 haut
Chauffage et refroidissement (total)	8663	12471	15980	78%	19732	14880	17170	19050
dont réseaux de chaleur	n.d.	864	1320	65%	3200			
Solaire thermique	49	164	555	30%	927	180	270	400
Géothermie thermique	106	125	350	36%	500	200	400	550
Pompe à chaleur	203	2178	1575	138%	1850	2200	2800	3200
dont géothermiques	77	279	455	61%	570			
Biomasse et déchets urbains renouvelables	8256	9827	13180	75%	15900	12000	13000	14000
dont consommation de bois des ménages	6627	6902	7175	96%	7400			
Biogaz	49	177	320	55%	555	300	700	900

Source : CGDD, Les énergies renouvelables en France en 2016, 2017 et Programmation pluriannuelle de l'énergie.

Note : pour les réseaux de chaleur, les chiffres sont ceux de l'année 2015.

4. Les mécanismes de soutien à la chaleur renouvelable

Il existe deux principaux mécanismes de soutien aux EnRT : le **fonds chaleur pour les projets collectifs** et le **crédit d'impôt transition énergétique (CITE) pour les ménages**. Certaines collectivités offrent également un soutien ponctuel sous forme de subvention, souvent pour réduire la pollution. Enfin, la chaleur renouvelable bénéficie de plusieurs taux réduits de TVA.

4.1 Le fonds chaleur finance des technologies thermiques vertes globalement efficaces pour un montant de soutien public relativement faible

Le fonds chaleur a été lancé en 2009 et est géré par l'ADEME. Son dispositif de soutien se décline en deux mécanismes :

- Un appel à projets national et annuel. Il s'adresse aux entreprises de l'industrie, agricoles et tertiaires, dont la production de chaleur à partir de biomasse est supérieure à 1 000 tep par an (appel à projet biomasse Chaleur Industrie Agriculture et Tertiaire-BCIAT).
- Des soutiens aux projets régionaux, portés par des collectivités ou des entreprises qui souhaitent développer des systèmes de chaleur à partir de biomasse, de géothermie, de solaire thermique, de biogaz ou de chaleur fatale ainsi que des réseaux de chaleur.

Le fonds chaleur dispose de 215 M€ pour 2018. Il repose sur un processus de sélection des projets les plus rentables, en offrant des subventions calibrées pour permettre aux projets d'être compétitifs par rapport à une solution carbonée (le plus souvent, il s'agit du gaz). Les aides du fonds chaleur sont donc distribuées sur la base d'une analyse socio-économique.

Entre 2009 et 2014, le fonds chaleur a soutenu 3 266 opérations d'investissement, pour un montant total de 1,2 Md€. La biomasse (BCIAT et hors BCIAT) est le principal secteur d'investissement (48 %), devant les réseaux de chaleur (38 %), la géothermie (7 %), le solaire thermique (5,9 %), le biogaz (0,6 %) et la récupération de la chaleur (0,5 %). Les installations soutenues permettent la production de 1 554 ktep de chaleur renouvelable par an.

Sur la période 2014-2016, le fonds chaleur a noté une baisse du nombre de projets proposés, notamment du fait des prix du gaz relativement faible. Le fonds chaleur a dû augmenter le niveau du soutien pour chaque projet pour tenir compte de cette baisse.

Comme le souligne la Cour des Comptes, les investissements du fonds chaleur sont en général particulièrement efficaces³⁷. En particulier, lorsque l'on examine le coût de la tonne CO₂ évitée, on constate que dans tous les domaines, à l'exception du solaire thermique, le coût d'abattement est inférieur à la valeur tutélaire du carbone³⁸, ce qui met en évidence l'efficacité de ces projets.

Les montants alloués par le fonds chaleur à des technologies globalement très efficaces (1,2 Md€ sur 2009-2014, dont 1,1 Md€ en faveur de technologie présentant un coût d'abattement inférieur à la valeur tutélaire du carbone, cf. tableau 9) paraissent relativement faibles en comparaison au soutien de CSPE³⁹ alloué à des technologies beaucoup plus coûteuses (11,7 Md€ sur la même période). Les EnR électriques soutenues ont pour la plupart un coût d'abattement supérieur à la valeur tutélaire, à l'exception des éoliens terrestres et du photovoltaïque au sol. Le soutien a été bien plus important pour les EnR électriques que pour les EnR chaleur, alors qu'elles présentent un coût d'abattement supérieur.

³⁷ Cour des Comptes, 2013, *La Politique de développement des énergies renouvelables*.

³⁸ Cette valeur, définie dans le rapport d'Alain Quinet de 2009, correspondant au coût marginal de la tonne de CO₂ évitée dans l'hypothèse de l'atteinte efficace des objectifs de réduction d'émission. En prenant un taux d'actualisation de 4 %, on obtient une valeur tutélaire de 78 €/tCO₂eq.

³⁹ Contribution au service public de l'électricité.

Tableau 9 : Coûts d'abattement des technologies soutenues par le fonds chaleur (2009-2013) et montant du soutien public (2009-2014) : comparaison avec la CSPE

	Coût de la tonne de CO ₂ eq évitée (€/t CO ₂ eq) sur la période 2009-2013	Soutien cumulé sur la période 2009-2014 (en Md€)
Bois hors BCIAT ⁴⁰	11	0,3
Bois BCIAT	8	0,3
Géothermie	18	0,1
Biogaz	8	0,01
Solaire thermique	208	0,1
Réseaux de chaleur	44	0,5
Total chaleur		1,2
Photovoltaïque petit toiture	235-535 ⁴¹	3,8
Photovoltaïque grande toiture	190	1,7
Photovoltaïque au sol	71	1,3
Biomasse	67-202	0,8
Biogaz	94-373	0,5
Eolien	59	3,5
Total électricité		11,7

Source : Fonds chaleur, Cour des comptes, DG Trésor. Calculs DG Trésor. On suppose un taux d'actualisation de 4 % sur 20 ans. Cf. Grazi L. et Souletie A. (2016), « Les énergies renouvelables : quels enjeux de politiques publiques ? Lettre Trésor-Éco n° 162 ».

4.2 Le CITE

Le CITE vise à inciter les particuliers à effectuer des travaux d'amélioration énergétique dans leur logement. Il subventionne les dépenses d'acquisition de certains équipements visant soit la réduction de la consommation soit l'utilisation d'EnRT. Le taux du crédit d'impôt est de 30 % pour tous les équipements. Les EnRT concernées sont :

- Les équipements utilisant des énergies renouvelables ;
- Les pompes à chaleur autres que les pompes air/air (ces dernières ayant un objectif de climatisation et non pas de chaleur⁴²) ;
- Les équipements de raccordement à certains réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables ou des installations de cogénération⁴³.

En 2017, le CITE représentait un soutien public de 1,7 Md€, dont environ 300 M€ étaient alloués à la chaleur renouvelable.

Le montant des dépenses ouvrant droit au CITE ne peut excéder 8 000 € pour une personne seule (16 000 € pour un couple, avec 400 € supplémentaire par personne à charge). Par ailleurs, ces travaux sont également éligibles à l'Eco-PTZ, ce qui peut faciliter leur financement (les pompes à chaleur air/air sont également exclues de l'Eco-PTZ).

⁴⁰ Biomasse chaleur pour l'industrie, l'agriculture et le tertiaire.

⁴¹ La borne inférieure correspond à l'intégré simplifié au bâti (i.e. simplement posé sur la toiture) et la borne supérieure à l'intégré au bâti.

⁴² La climatisation n'appelle pas un soutien pour un motif environnemental (les pompes à chaleur air/air ne se substituent pas à des moyens de production carbonés).

⁴³ En revanche, les coûts à une entreprise pour le raccordement ne sont pas pris en compte.

De la même façon, les aides de l'ANAH (notamment le programme « Habiter mieux » qui subventionne la rénovation thermique de logements occupés par des ménages à faible revenu) peuvent également concerner les EnRT. En 2019, le CITE sera remplacé par une prime directement versée aux ménages.

4.3 Aides locales

Certaines collectivités ont mis en place des primes à la casse pour les chaudières à bois les plus anciennes, dans le but notamment de limiter la pollution. Ainsi, les collectivités de la vallée de l'Arve, en Haute-Savoie, ont mis en place une prime forfaitaire de 1 000 € (portée à 2 000 € au 1^{er} janvier 2017), cumulable avec d'autres aides, pour le remplacement d'un foyer ouvert ou d'un chauffage au bois antérieur à 2002 par un appareil possédant le label « flamme verte 7 étoiles ».

Il conviendrait d'évaluer l'impact de ces aides, pour estimer leur effet sur le changement d'appareil. De telles évaluations n'existent pas pour l'instant à notre connaissance.

4.4 TVA réduite

La chaleur renouvelable bénéficie de plusieurs taux de TVA réduits :

- Taux de TVA de 5,5 % ou 10 % pour les travaux d'amélioration et de rénovation des logements, qui peuvent concerner des installations de chauffage renouvelables⁴⁴.
- Taux de 5,5 % pour l'abonnement à la fourniture par les réseaux d'énergies d'origine renouvelable, pour un montant de 55 M€ par an.
- Taux de 10 % pour le bois de chauffage (non chiffré actuellement).

5. Comment favoriser efficacement l'augmentation de la part de la chaleur renouvelable ?

Comme pour toute énergie renouvelable, la mise en place d'un prix du carbone élevé est l'outil le plus efficace pour favoriser le déploiement des EnRT, car il permet d'orienter spontanément l'adoption de technologies propres par rapport à des technologies carbonées. En particulier, du fait du caractère individuel de ces EnRT, l'efficacité de mécanisme de type tarif d'achat paraît très limitée, les ménages ne produisant pas de chaleur pour la vendre.

Néanmoins, l'adoption de technologies thermiques propres peut être freinée par plusieurs difficultés (manque d'information, difficultés d'accès au crédit, biais cognitifs, irrationalité – *cf. supra*), ce qui justifie la mise en place de politiques d'accompagnement en sus de l'augmentation du prix du carbone. C'est notamment ce qu'a fait la Suède, dont la part de combustibles fossiles pour le chauffage est passée de 60 % en 1980 à 1 % en 2015. La Suède s'est appuyée sur une taxe carbone qui a été portée à un niveau important (120 €/t en 2016), mais aussi sur une prime (supprimée en 2011) pour le raccordement à un réseau de chauffage urbain, la mise en place d'une pompe à chaleur ou d'une chaudière biomasse. Un important travail d'information a par ailleurs été réalisé (campagne d'information, point relais régionaux).

⁴⁴ La décomposition par action n'est pas disponible. L'ensemble des mesures bénéficiant du taux réduit en faveur des travaux représente 5,2 Md€.

5.1 Quel prix du carbone pour favoriser l'adoption d'EnRT ?

En France, les EnRT sont en concurrence avec des technologies soumises à la taxe carbone (chauffage au gaz ou au fioul). Les professionnels du secteur (FEDENE)⁴⁵ estiment qu'une taxe carbone de 50 €/tCO₂ permettrait de rendre les EnRT compétitives face aux moyens de production carbonée. À ce titre, le ré-haussement de la trajectoire de la composante carbone votée en loi de finances initiale pour 2018 augmentera fortement la compétitivité des EnR thermique. La composante carbone atteint 44,6 €/tCO₂ en 2018 et passera à 86,2 €/tCO₂ en 2022 (contre 64,8 €/tCO₂ prévu dans la loi de transition énergétique pour une croissance verte de 2015). Un tel niveau de taxe carbone augmente le prix des moyens de production au gaz de 10 €/MWh en 2018 et de 19,4 €/MWh par rapport à une situation sans taxation du carbone. Si l'on compare aux tableaux 2 et 3, on constate qu'une telle augmentation rend la plupart des moyens de production compétitifs⁴⁶, à l'exception du solaire thermique et des pompes à chaleur⁴⁷.

Les EnRT les plus efficaces présentant des surcoûts relativement faibles, un niveau plus élevé de taxe carbone ne serait pas forcément nécessaire. **Cependant, il est nécessaire que la trajectoire d'augmentation de la taxe carbone soit crédible sur le long terme, comme le souligne notamment la FEDENE.** Plusieurs acteurs du secteur avaient indiqué en 2017 que le manque de crédibilité de la trajectoire française pouvait freiner les investissements dans le secteur. L'inscription de cette trajectoire en loi de finances jusqu'en 2022 va renforcer sa crédibilité.

5.2 Le fonds chaleur devrait être maintenu pour les plus gros projets

Le fonds chaleur a prouvé sa capacité à sélectionner et déclencher des projets de chaleur collective efficaces du point de vue socio-économique. Une hausse du prix du carbone réduira le besoin de soutien du fonds chaleur (les subventions du fonds visant à rendre les projets compétitifs par rapport à des installations au gaz), mais celui-ci ne devrait pas pour autant être abandonné. En effet, des barrières liées à un manque ou une asymétrie d'informations ou à des préférences privées (par exemple, un taux d'actualisation plus élevé que le taux d'actualisation socio-économique) peuvent empêcher la réalisation d'installation efficace du point de vue socio-économique. Les subventions du fonds chaleur, en augmentant la rentabilité privée des opérations, doivent permettre de réduire ces barrières pour les projets socio-économiquement opportuns.

Il convient ainsi de maintenir le fonds chaleur concomitamment à la hausse de la taxe carbone, notamment pour aider à la réalisation des réseaux de chaleur qui présentent un coût fixe important et demandent un certain nombre d'abonnés pour être rentables.

Plus globalement, les bons résultats du fonds chaleur posent la question de l'orientation du soutien aux énergies renouvelables. En effet, la tonne de CO₂ évitée pour le photovoltaïque petite toiture ou l'éolien *offshore* est de plus de 200 €/tCO₂, contre 44 €/tCO₂ évitée pour les technologies les plus coûteuses du fonds chaleur hors chauffe-eau solaire. Or ces EnR électriques sont beaucoup plus soutenues que le fonds chaleur.

⁴⁵ Fédération des services énergies environnement : *Propositions en faveur de la transition énergétique*, octobre 2017.

⁴⁶ Les tableaux 2 et 3 donnent les chiffres pour 2014, où la composante carbone était de 7 €/tCO₂. La hausse du coût pour les moyens de production au gaz par rapport à 2014 est de 8,5 €/MWh en 2018 et de 17,8 €/MWh en 2022.

⁴⁷ Dans les deux cas, ces types d'équipements ne sont pas rentables au niveau individuel, et au niveau collectif/industriel ils ne sont rentables que pour certaines technologies.

5.3 Le soutien pour le chauffage individuel via le CITE pourrait être concentré sur les technologies les plus efficaces

Comme pour la rénovation thermique, les travaux qui ne sont pas rentables socio-économiquement ne devraient pas être soutenus par le CITE. Certaines technologies ne sont aujourd'hui pas rentables et ne devraient pas être soutenues car elles représentent un fort surcoût.

Pour les technologies peu coûteuses, des subventions peuvent être envisagées afin de déclencher les investissements, mais leur calibration devrait tenir compte des possibles effets d'aubaine. Les EnRT peuvent avoir un temps de retour plus important que les moyens de production carbonés, du fait de coûts fixes plus importants. Des subventions pourraient permettre aux consommateurs impatientes de se tourner vers ces technologies. Dans ce cadre, il est justifié de maintenir le CITE et la future prime pour les technologies les moins coûteuses, notamment pour les *chaudières au bois les plus efficaces* (pour éviter trop d'émissions de particules fines). Par ailleurs, dans les zones les plus denses, il est nécessaire de prendre des mesures supplémentaires pour éviter l'usage d'appareils peu efficaces, dont les coûts en termes de pollution sont particulièrement importants dans ces zones. Un CITE différencié par zone étant difficile à mettre en place, des mesures de type prime à la casse pour les installations actuelles et des normes pour les nouvelles constructions permettraient de contribuer à traiter ce problème.

5.4 Primes à la casse

Le recours à des primes à la casse dans le cas des chauffages les plus anciens ou dans les zones denses peut se justifier pour réduire la pollution, qui peut avoir un coût particulièrement élevé dans le cas du chauffage au bois, sous réserve que la prime à la casse incite à l'investissement dans les technologies les plus efficaces. En particulier, une prime à la casse pourrait permettre de déclencher l'investissement pour des ménages qui n'auraient pas investi ou qui auraient investi ultérieurement. Le montant de la prime à la casse doit en tout état de cause être inférieur aux coûts liés aux émissions de particules fines évitées.

Le principal problème d'une prime à la casse est l'existence d'un effet d'aubaine pour les ménages qui auraient eu recours à des EnRT thermique sans soutien.

Les différentes expériences de prime à la casse devraient ainsi être évaluées pour estimer leur impact sur les émissions de particules fines et le niveau de l'effet d'aubaine, et en fonction des résultats, des primes à la casse pour remplacer les plus anciens modèles pourraient être envisagés. **En particulier, les plus anciens modèles peuvent avoir des durées de vie assez longues, et peuvent donc polluer pendant de longue période, ce qui peut justifier une accélération de leur remplacement.** Ainsi, pour 19 % des ménages ayant une chaudière au fioul individuel et 27 % des ménages ayant un chauffage au bois individuel ont des appareils antérieurs à 1986⁴⁸.

5.5 Normes pour nouveaux bâtiments

La prochaine réglementation thermique fixera la réglementation pour les bâtiments neufs construits après 2020. Ces bâtiments devront tous être à énergie positive (BEPOS) : leur consommation d'énergie non renouvelable devra être inférieure à leur production d'énergie. Une première expérimentation est en cours pour déterminer comment seront calculées la consommation et la production. Dans cette expérimentation, la consommation est égale à la somme de l'énergie primaire non renouvelable pour les 6 usages⁴⁹. On déduit

⁴⁸ Source : Enquête Phébus.

⁴⁹ La RT 2012 avait défini 5 usages : chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation et auxiliaire (ventilateur, PAC). La RT2018 ajoute un 6^e usage, liée à la consommation électrique des habitants du logement (tâche ménagère, usage informatique et multimédia). Ce 6^e usage est relativement indépendant des actions des constructeurs.

ensuite l'énergie autoconsommée et l'énergie exportée sur le réseau électrique ou de chaleur. Ce calcul pose deux questions :

- Il est indiqué que le 6^e usage (l'usage électrique) ne peut être couvert que par de la production d'électricité d'origine renouvelable, alors que les autres usages peuvent être couverts par de la chaleur renouvelable ou de l'électricité renouvelable.
- Le bilan est défini comme une différence entre consommation et auto-consommation/exportation, mais il n'existe pas de normes maximales de consommation. Les constructeurs peuvent donc être incités à réduire les efforts sur la minimisation de la consommation pour installer des EnR électriques fortement subventionnés, comme les panneaux solaires.

Ainsi, dans l'expérimentation BEPOS, les EnR électriques et les EnRT ne sont pas mises au même niveau dans le calcul. Les EnR électriques sont beaucoup plus fortement soutenues, ce qui peut créer une distorsion en leur faveur.

5.6 Taux réduits de TVA

Du fait des externalités liées aux EnRT, les taux réduits de TVA peuvent être justifiés (les taux réduits pouvant être vus comme une forme de subvention pigouvienne). Cependant, comme le souligne un rapport du Conseil des prélèvements obligatoires consacré à la TVA⁵⁰, la subvention doit être égale au coût de l'externalité. Or, les taux réduits de TVA ne permettent pas de viser précisément ce coût⁵¹. La solution optimale serait donc de remplacer ces taux réduits par des subventions. Un CITE ou une prime recentrée, comme présenté au 5.3, pourrait jouer ce rôle.

5.7 Information et qualité

Des mécanismes de type campagne ou point d'information ou la certification des professionnels sont de nature à réduire les problèmes d'information et favoriser l'investissement.

Par ailleurs, il est nécessaire de développer l'information sur le bon usage du chauffage au bois (par exemple sur l'utilisation d'un bois sec) pour les ménages possédant ce type de chauffage, pour réduire les émissions de particules fines.

⁵⁰ Geay C. (2015), « Taxe sur la valeur ajoutée : l'incidence économique de la TVA », *rapport particulier n°3*.

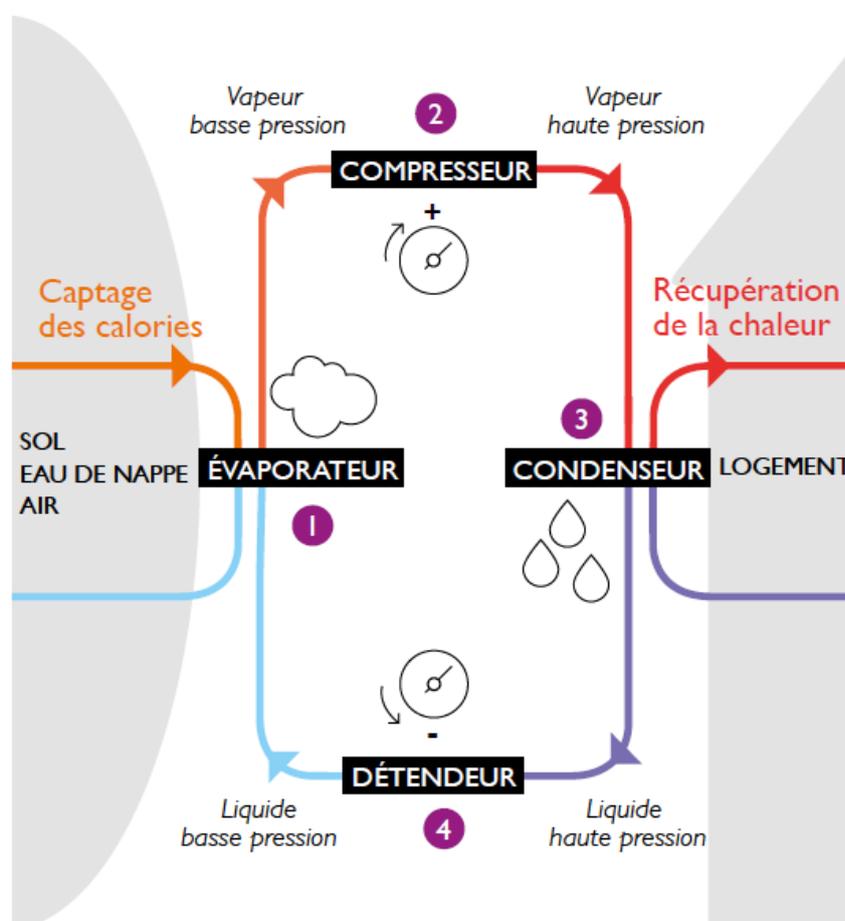
⁵¹ « Ainsi, il peut apparaître justifié *a priori* de taxer moins les biens qui présentent un impact positif sur l'environnement (en France, par exemple les travaux d'amélioration de la performance énergétique réalisés dans des logements sont soumis au taux de TVA 5,5 % tandis que les autres travaux de rénovation sont taxés à 10 %). Pour autant, la fiscalité pigouvienne doit être égale à l'écart entre le coût marginal environnemental et le prix de marché, et les contraintes européennes pesant sur les taux de TVA ne permettent pas nécessairement de le faire. » (page 61).

Annexes

Annexe 1 : fonctionnement d'une pompe à chaleur

La pompe à chaleur est constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un fluide frigorigène à l'état liquide ou gazeux selon les organes qu'il traverse. Ces organes sont au nombre de quatre : l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur.

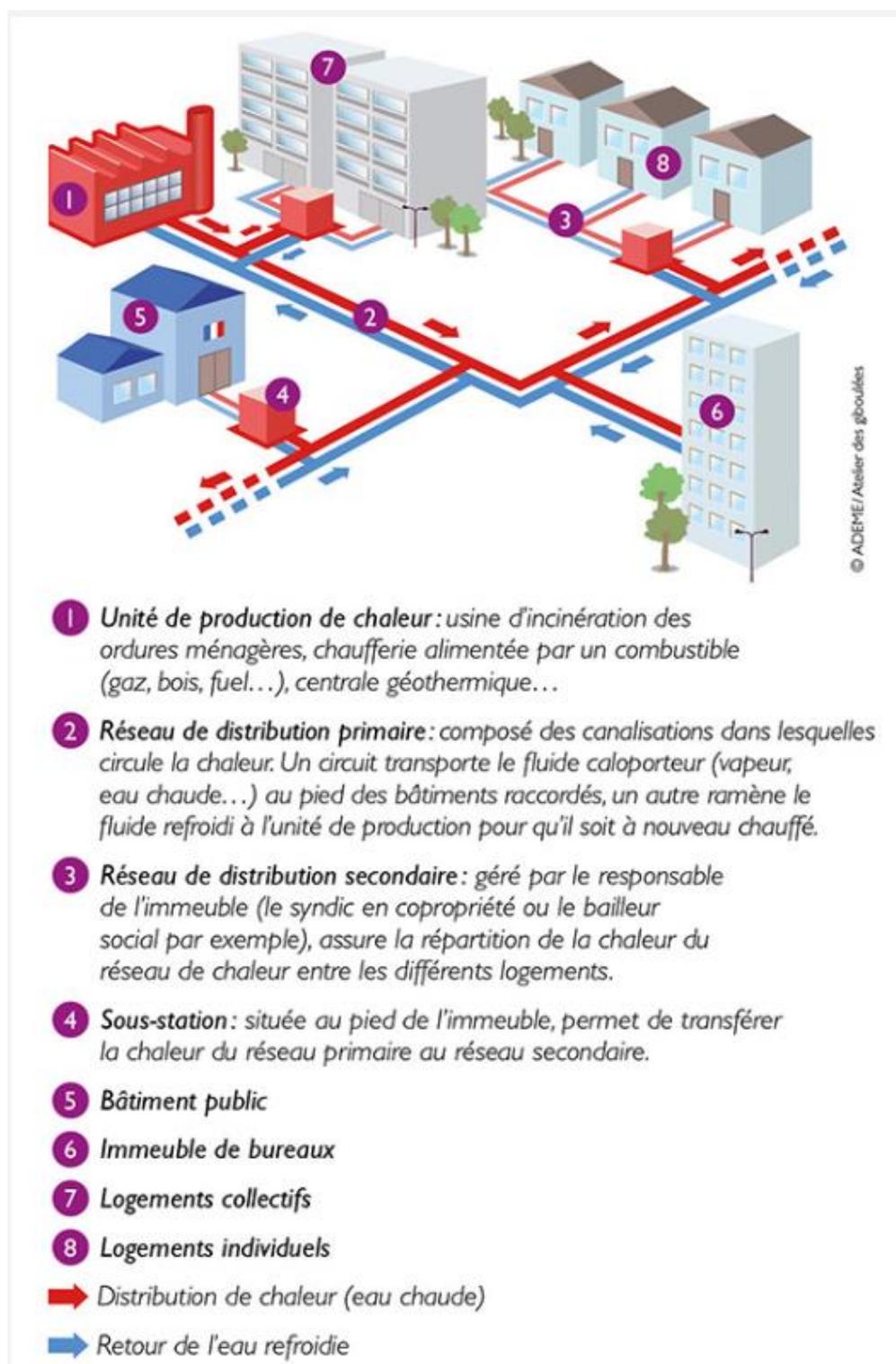
Schéma de principe de la pompe à chaleur



- 1 La chaleur prélevée à l'extérieur est transférée au fluide frigorigène qui se vaporise.
- 2 Le compresseur électrique aspire le fluide frigorigène vaporisé. La compression élève la température du fluide frigorigène.
- 3 Le fluide frigorigène cède sa chaleur à l'eau du circuit de chauffage, à l'eau sanitaire ou directement à l'air du lieu à chauffer. Le fluide frigorigène se condense et revient à l'état liquide.
- 4 Le détendeur abaisse la pression du liquide frigorigène qui amorce ainsi sa vaporisation.

Source : ADEME, Installer une pompe à chaleur.

Annexe 2 : fonctionnement d'un réseau de chaleur



Source : ADEME.