

Série Technique  
Réf AMORCE ENT47  
Mars 2022

**Collectivités :**  
**L'essentiel sur les**  
**Pompes à chaleur**

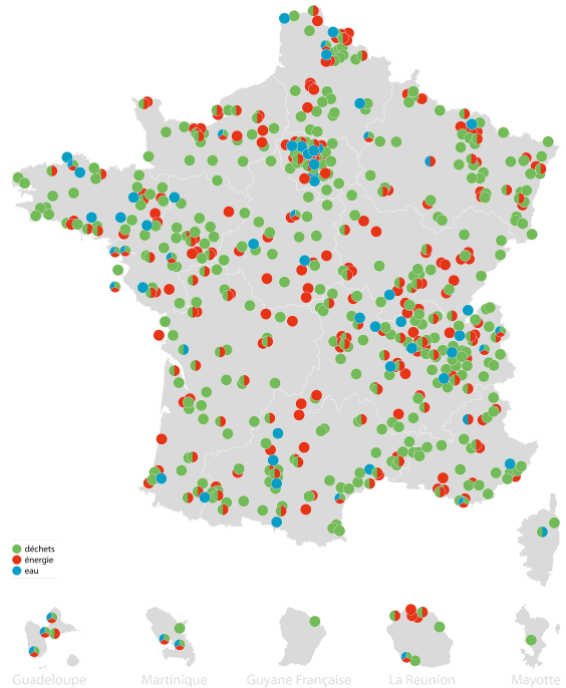


## PRÉSENTATION D'AMORCE

Rassemblant plus de 1 050 adhérents pour 60 millions d'habitants représentés, AMORCE constitue le premier réseau français d'information, de partage d'expériences et d'accompagnement des collectivités (communes, intercommunalités, conseils départementaux, conseils régionaux) et autres acteurs locaux (entreprises, associations, fédérations partenaires) en matière de **transition énergétique** (maîtrise de l'énergie, lutte contre la précarité énergétique, production d'énergie décentralisée, distribution d'énergie, planification) et de **gestion territoriale des déchets** (planification, prévention, collecte, valorisation, traitement des déchets) et de **gestion durable du cycle de l'eau** (préservation de la ressource en eau et économies d'eau, gestion intégrée des eaux pluviales, traitement des pollutions émergentes, valorisation des boues d'épuration).

**Force de proposition indépendante et interlocutrice privilégiée des pouvoirs publics, AMORCE est aujourd'hui la principale représentante des territoires engagés dans la transition écologique.** Partenaire privilégiée des autres associations représentatives des collectivités, des fédérations partenaires et des organisations non gouvernementales, AMORCE participe et intervient dans tous les grands débats et négociations nationaux et siège dans les principales instances de gouvernance française en matière d'énergie, de gestion de l'eau et des déchets.

**Créée en 1987, elle est largement reconnue au niveau national pour sa représentativité, son indépendance et son expertise, qui lui valent d'obtenir régulièrement des avancées majeures** (TVA réduite sur les déchets et sur les réseaux de chaleur, création du Fonds Chaleur, éligibilité des collectivités aux certificats d'économie d'énergie, création de nouvelles filières de responsabilité élargie des producteurs, signalétique de tri sur les produits de grande consommation, généralisation des plans climat-énergie, obligation de rénovation des logements énergivores, réduction de la précarité énergétique, renforcement de la coordination des réseaux de distribution d'énergie, etc.).



## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des collectivités/partenaires locaux ayant participé à notre travail, dont celles qui nous ont fait part de leurs retours d'expérience et qui nous ont fourni des documents pour illustrer cette publication.

## RÉDACTEURS

**Contacts** : Mona GUITOU, [mquitou@amorce.asso.fr](mailto:mquitou@amorce.asso.fr), Maxime SCHEFFLER, [mscheffler@amorce.asso.fr](mailto:mscheffler@amorce.asso.fr)

**Rédacteurs** : Mona GUITOU, Maxime SCHEFFLER, Laurène DAGALLIER

**Comité de relecture** : Julie PURDUE - AMORCE, Gwénéolé LE BARS – AMORCE, Marc DENIS - AMORCE, Michel MAYA - AMORCE, Arnaud MAINSANT - ADEME, Jean-Marc PERCEBOIS - AFPG, Frédéric LEBLANC - ALTEREA, Isabelle GASQUET - CLER, Valérie LAPLAGNE - UNICLIMA

## MENTIONS LÉGALES

©AMORCE – Mars 2022

Les propos tenus dans cette publication ne représentent que l'opinion de leurs auteurs et AMORCE n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y sont contenues.

Reproduction interdite, en tout ou en partie, par quelque procédé que ce soit, sans l'autorisation écrite d'AMORCE.

Possibilité de faire état de cette publication en citant explicitement les références.

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>PRINCIPES TECHNIQUES DE FONCTIONNEMENT.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.</b>	<b>PRINCIPE GENERAL D'UNE PAC : LE CYCLE THERMODYNAMIQUE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR ET DE FROID .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.</b>	<b>TYPES DE TECHNOLOGIES DE PAC .....</b>	<b>12</b>
1.2.1.	LES PAC AEROTHERMIQUES .....	12
1.2.2.	LES PAC GEOTHERMIQUES.....	12
<b>1.3.</b>	<b>DEFINITION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE.....</b>	<b>13</b>
1.3.1.	FACTEURS DE PERFORMANCE TECHNIQUE.....	13
1.3.2.	FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX.....	15
1.3.3.	CERTIFICATIONS .....	17
<b>2.</b>	<b>PERFORMANCES DES PAC SUIVANT LEURS USAGES.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.</b>	<b>LES PAC DANS LES BATIMENTS.....</b>	<b>18</b>
2.1.1.	LES EMETTEURS DE CHAUFFAGE.....	18
2.1.2.	LES CHAUFFE-EAUX THERMODYNAMIQUES .....	18
2.1.3.	LES PAC HYBRIDES .....	19
<b>2.2.</b>	<b>LES PAC EN RESEAUX .....</b>	<b>19</b>
2.2.1.	LES PAC EN RESEAUX DE CHALEUR.....	20
2.2.2.	LES GROUPES FROIDS A COMPRESSION EN RESEAU DE FROID .....	20
2.2.3.	LES BOUCLES D'EAU TEMPEREES .....	21
<b>3.</b>	<b>RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>23</b>

## INTRODUCTION

Chaudière gaz à condensation, convecteur électrique, chaudière biomasse, réseau de chaleur, chaudière fioul... Il existe de nombreux modes de chauffage, et la pompe à chaleur (PAC) en fait partie. La chaudière biomasse, le réseau de chaleur (dans certains cas) et la PAC (dans certains cas) sont des modes de chauffage utilisant une part d'énergie renouvelable plus ou moins importante. Cette dernière a su largement s'imposer sur le marché français au cours des dernières décennies, profitant notamment d'une réglementation et d'une politique favorable au recours à l'énergie électrique.

Les **réglementations** de ces dernières années sont nombreuses et fixent des objectifs ambitieux, comme la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) 2019-2028, la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) ou encore le dispositif Éco-énergie tertiaire, ou décret tertiaire, issu de la loi portant Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (Élan).

La PPE fixe ainsi comme objectif de doubler la capacité installée des énergies renouvelables électriques d'ici 2028, par rapport à 2017. Elle prévoit également une augmentation de 40 à 60 % de la production de chaleur renouvelable en 2028 par rapport à 2017, notamment via l'installation de 6 millions de PAC entre 2016 et 2028. La consommation d'énergie fossile est elle aussi amenée à être réduite, de 35 % en 2028 par rapport à 2012, ce qui correspond à une baisse de 40 % des émissions de gaz à effet de serre issues de la combustion d'énergie, en 2028 par rapport à 1990.

### Objectifs PPE : production de chaleur renouvelable par filière (TWh)

Source : SER

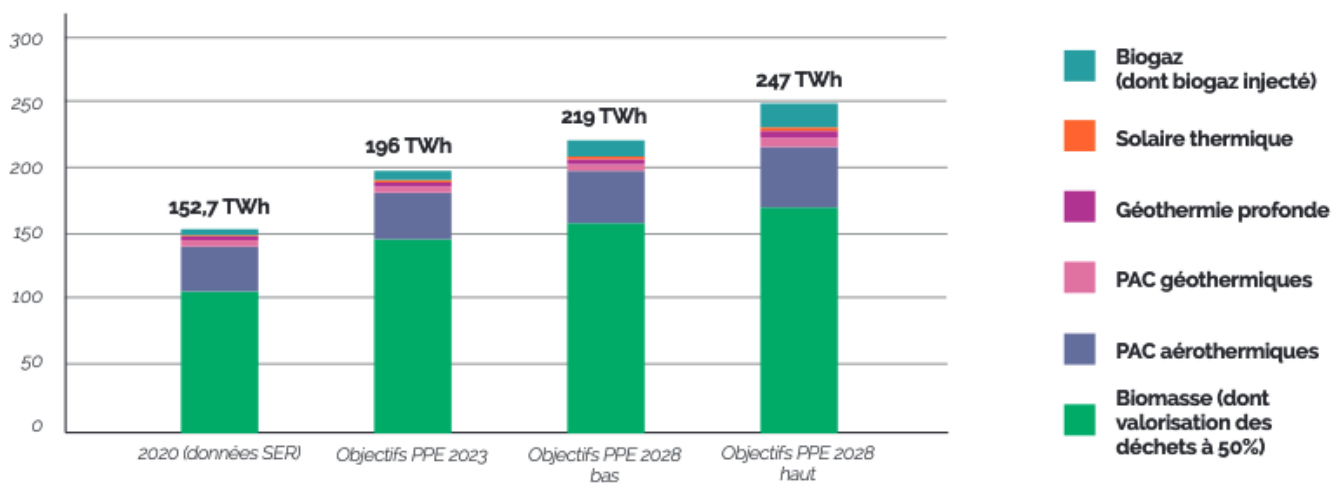


Figure 1 : production de chaleur renouvelable par filière (TWh) – source « Panorama de la chaleur renouvelable et de récupération, édition 2021 » du SER

## Des réglementations du bâtiment favorable aux pompes à chaleur

En 2021 et 2022, plusieurs réglementations qui encadrent la performance énergétique des bâtiments ont évolué ou sont en cours d'évolutions avec des conséquences attendues sur le rythme de rénovation et de maîtrise de la demande en énergie, ainsi que des incidences sur les choix de construction et sur les systèmes énergétiques. Sur les orientations liées au choix des systèmes énergétiques, plusieurs évolutions sont intervenues avec pour conséquence de favoriser l'électrification du chauffage et en particulier les pompes à chaleur.

### La première concerne le facteur d'émissions de gaz à effet de serre pour l'électricité pour le chauffage.

Alors que celle-ci s'élevait à 180 gCO<sub>2</sub>/kWh dans l'ancien diagnostic de performance énergétique (DPE), et à 210 gCO<sub>2</sub>/kWh dans le label E+C- qui préfigurait la RE2020, le facteur réglementaire est désormais de **79 gCO<sub>2</sub>/kWh** : il a donc été divisé par 2 à 3 avec les nouvelles réglementations<sup>1</sup>. A noter que ce facteur d'émission est de 64 gCO<sub>2</sub>/kWh pour l'électricité pour le rafraîchissement. En effet, les usages de l'électricité présentent des temporalités journalières et saisonnières différentes. Les sources d'énergie utilisées pour la production de l'électricité du réseau pouvant être mobilisées différemment suivant la période de l'année, l'heure, pour diverses raisons de coût, de disponibilité technique, de conditions météorologiques, cela implique des facteurs différenciés pour les usages de l'électricité tels que chauffage, refroidissement, éclairage.

**La seconde concerne le coefficient de conversion en énergie primaire de l'électricité.** Le comptage de l'énergie primaire reflète l'énergie réellement prélevée dans l'environnement sous sa forme brute. L'impact de l'utilisation de l'électricité a également été diminué sur le plan du **comptage de l'énergie primaire** avec un facteur de conversion qui est passé de 2,58 à **2,3**.

Plus précisément, voici les changements intervenus en faveur des pompes à chaleur dans les réglementations :

#### - RE2020 pour la construction des bâtiments neufs :

La RE2020 donne la priorité à la décarbonation de l'énergie dans les bâtiments, en introduisant un seuil maximal d'émissions de gaz à effet de serre des consommations d'énergie. Ce seuil est défini à 4 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour les maisons individuelles, et à 14 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour les logements collectifs, dès l'entrée en vigueur de la réglementation, puis à 6,5 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an à partir de 2025. Ces seuils excluent de fait les chauffages exclusivement au gaz, trop polluants, qui sont la norme dans les logements collectifs neufs actuels.

La RE2020 remplace la RT2012 à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2022 pour les bâtiments à usage d'habitation, et à partir du 1<sup>er</sup> juillet 2022 pour les constructions de bâtiments de bureaux ainsi que ceux dédiés à l'enseignement. Les grandes nouveautés sont l'introduction des indicateurs d'émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie du bâtiment et le renforcement des exigences en termes de confort d'été.

Certains nouveaux indicateurs ainsi que les seuils maximaux fixés pour chacun ont des impacts importants sur les choix des systèmes de chauffage et rafraîchissement :

- L'indicateur Cep,nr (consommation d'énergie primaire non renouvelable) contraint très fortement la possibilité de mettre du chauffage par effet Joule et légèrement la possibilité de chauffer les bâtiments au gaz collectif (il faut pour cela avoir renforcé l'isolation ou l'avoir associée à une PAC) dès 2022.

<sup>1</sup> [RCT55 - Contenu carbone des réseaux de chaleur et de froid, réglementations et bilans GES.](#)

Il existe en réalité plusieurs méthodes de calcul possibles pour le carbone émis par le chauffage électrique et la [Base Carbone](#) de l'ADEME référence deux méthodes de calcul distinctes :

- la **méthode dite "moyenne mensualisée"** qui aboutit à une valeur proche voire inférieure aux 79 gCO<sub>2</sub>/kWh réglementaires pour le chauffage. Elle considère qu'à un instant donné, à un pas de temps mensuel, tous les kWh consommés sur le réseau ont le même contenu CO<sub>2</sub>, quel que soit l'usage qui en est fait.

- la **méthode dite "saisonnalisée mensuelle"** qui aboutit à une valeur plus proche de 130 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>EF</sub> pour le chauffage. Elle cherche à établir un lien entre la variabilité saisonnière des émissions de CO<sub>2</sub> et la variabilité saisonnière des usages et aboutit à des contenus CO<sub>2</sub> plus différenciés entre les usages.

- L'indicateur Ic-énergie (émissions de carbone liées à la consommation d'énergie) est très favorable aux pompes à chaleur étant donné la révision à la baisse du facteur d'émission de l'électricité.

Ces indicateurs sont finalement moins contraignants pour les PAC que pour d'autres systèmes de chauffage et n'imposent pas forcément d'optimiser la performance énergétique de la PAC mise en place. De plus, sur tout type de bâtiments, la forte tendance à l'installation de solutions de systèmes de chauffage réversible (PAC pouvant assurer chauffage et climatisation) pourrait se généraliser du fait d'une consommation d'électricité pour la production de froid non comptabilisée si la climatisation n'est pas déclarée. Cependant, la RE2020 prend en compte le confort d'été, ainsi les systèmes de rafraîchissement passifs sont privilégiés, et l'utilisation de la PAC réversible en rafraîchissement est moins nécessaire.

- **Dispositif Éco-énergie tertiaire pour la maîtrise de l'énergie dans les bâtiments tertiaires existants de plus de 1000 m<sup>2</sup>** : pour mémoire, il fixe des obligations de réduction des consommations d'énergie finale des bâtiments de 40 %, 50 % puis 60 % aux échéances 2030, 2040, 2050 par rapport à une année postérieure ou égale à 2010. Il est apparu que l'expression de la réduction des consommations d'énergie, exprimée en énergie finale plutôt qu'en énergie primaire ou utile, a pour effet de favoriser les PAC par rapport à tout autre système de chaleur ou froid renouvelable ou réseau vertueux alimenté par des EnR&R. En effet, pour un besoin de chaleur donné, seule l'électricité consommée par une PAC sera comptabilisée, et pas la chaleur totale fournie, au contraire de la chaleur renouvelable livrée par un réseau de chaleur (il en est de même pour le froid). Cependant, un projet d'arrêté modificatif pourrait modifier cette approche en énergie primaire<sup>2</sup>.

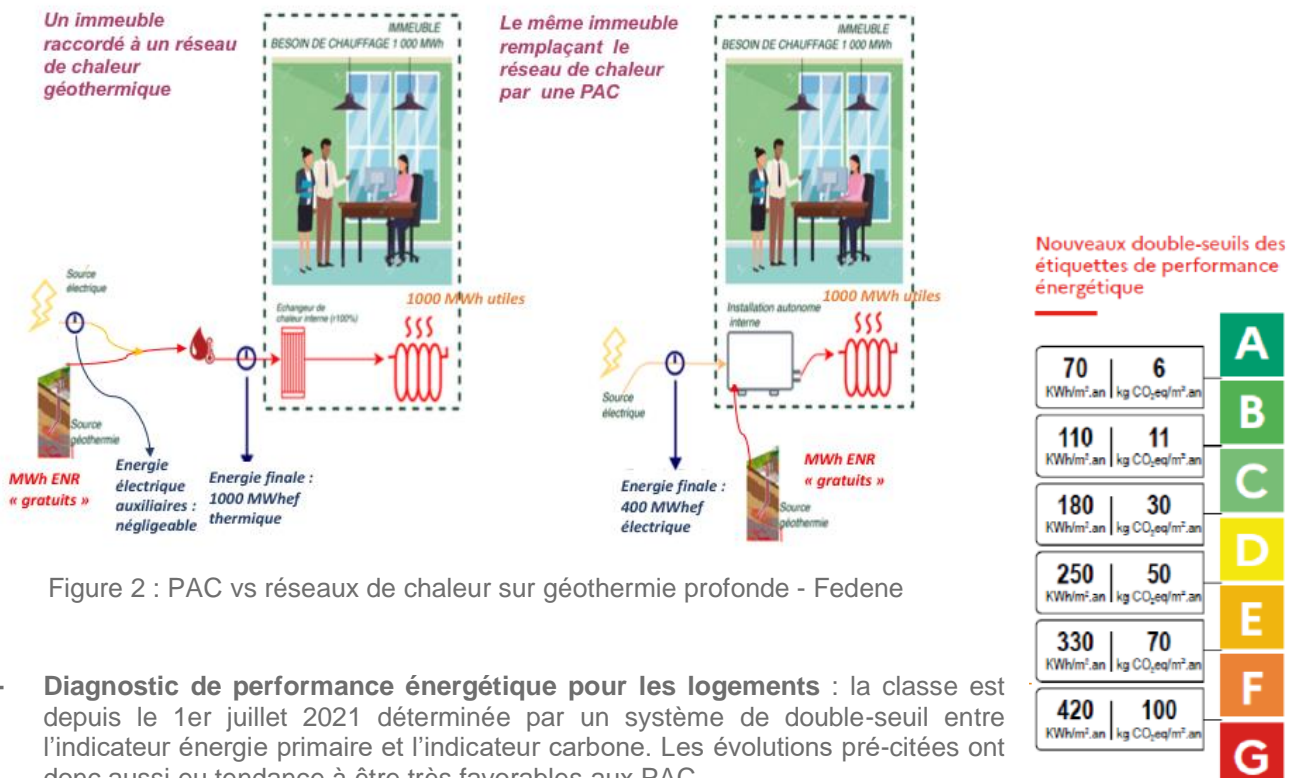


Figure 2 : PAC vs réseaux de chaleur sur géothermie profonde - Fedene

- **Diagnostic de performance énergétique pour les logements** : la classe est depuis le 1er juillet 2021 déterminée par un système de double-seuil entre l'indicateur énergie primaire et l'indicateur carbone. Les évolutions pré-citées ont donc aussi eu tendance à être très favorables aux PAC.

Figure 3 : Double seuil du nouveau DPE logements (source MTE)

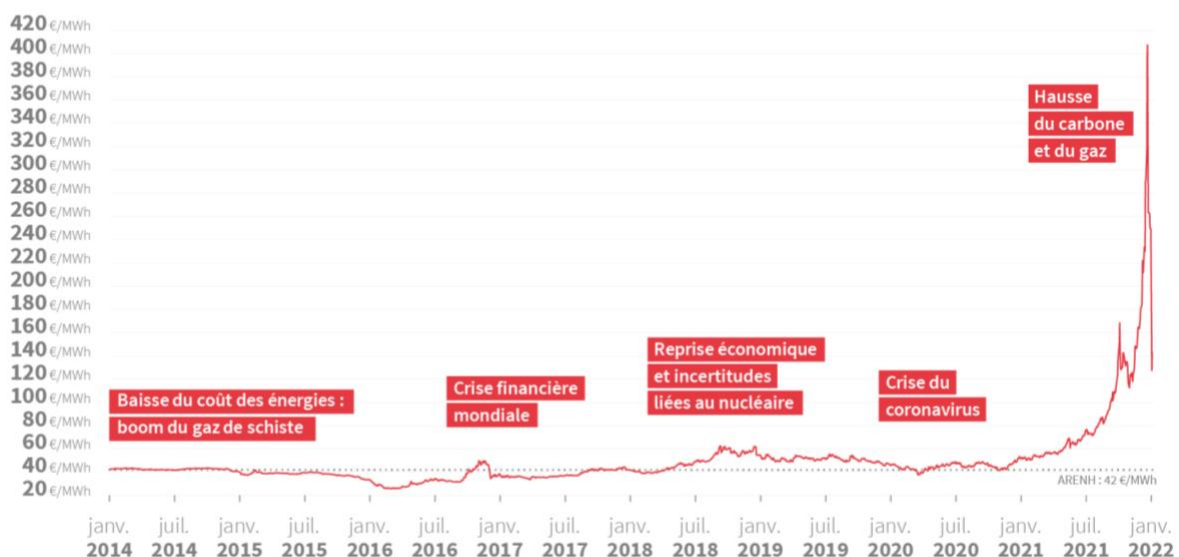
<sup>2</sup> Cet arrêté propose de comptabiliser la quantité d'énergie finale livrée par les réseaux de chaleur (vertueux ou non) à hauteur de 0,77 et par les réseaux de froid à hauteur de 0,25. Cette nouvelle comptabilisation sera confirmée ou non à la sortie du nouveau décret, à l'heure actuelle les quantités d'énergies livrées par réseaux de chaleur et de froid sont comptabilisées à hauteur de 1.

Pour conclure, les différentes réglementations sont favorables aux énergies renouvelables et décarbonées, dont les PAC font partie. Celles-ci sont particulièrement bien positionnées grâce aux émissions de carbone réglementaires faibles de l'électricité et de par le biais induit par le décompte en énergie finale dans le décret tertiaire.

Les PAC sont ainsi favorisées par ces obligations réglementaires, et leur nombre va donc probablement s'envoler dans les années à venir. Cette filière n'avait d'ailleurs pas attendu ces réformes, profitant déjà des augmentations de coût des énergies fossiles (fioul, gaz...). Ainsi, **les ventes de PAC ont plus que triplé entre 2013 et 2020** (903 075 en 2020 contre 292 190 en 2013), **largement portées par les PAC aérothermiques** (900 070 en 2020)<sup>3</sup>. Cette tendance se confirme avec notamment une augmentation de plus de 10 % sur les ventes de PAC aérothermiques entre 2019 et 2020. Parmi ces dernières, la technologie la plus vendue est la **PAC air/air**, avec 729 530 unités vendues en 2020. Cela s'explique par la simplicité d'installation et le coût de cette technologie. Il s'agit malheureusement de la **technologie la moins performante sur le segment des pompes à chaleur**.

Ainsi, même si les PAC utilisent une part d'énergie renouvelable pour leur fonctionnement, toutes ne se valent pas. Il est donc important de prendre en compte les performances de celles-ci avant d'en faire installer. **Ces performances varient en fonction des technologies utilisées, de la source de chaleur, des températures de chauffe ou rafraîchissement recherchées et du climat où elles sont installées.** Par ailleurs, elles consomment malgré tout une part d'électricité, associée à un appel de puissance, qui peut être élevée pour les PAC qui ne fonctionnent pas dans de bonnes conditions d'efficacité. Cela peut être impactant pour la facture des usagers quand on sait que sur les 10 dernières années, le prix de marché de l'électricité a oscillé entre 30 et 60 €/MWh et qu'il a environ quadruplé entre début 2020 et fin 2021 pour atteindre 140 €/MWh, jusqu'à un pic historique de 400 €/MWh début 2022. Pour rappel, cette composante représente un tiers du prix final impactant conséquemment l'utilisateur.

## Évolution du prix de l'électricité\* depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2014 au 04 janvier 2022



\* Évolution des prix de clôture baseload calendar n+1

Figure 4 : Évolution du prix de l'électricité depuis 2001 (en €/MWh) (Source : Opéra Energie)

<sup>3</sup> [Suivi du marché et des prix 2020 des pompes à chaleur individuelles](#), Observ'ER, avril 2021



## La place des pompes à chaleur dans les scénarios énergétiques

Afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050, de nombreuses études sont effectuées pour visualiser la trajectoire à suivre. Ces scénarios sont unanimes sur un point : il faut décarboner et verdir les énergies en France. Pour en arriver à cet objectif, différents scénarios s'offrent à nous et la pompe à chaleur fait partie des technologies les plus valorisées pour arriver aux objectifs de décarbonation.

Le scénario trajectoire de référence de [Futurs énergétiques 2050 - RTE](#) voit la décarbonation du mix énergétique français par l'électrification massive des usages. En effet, ce scénario promeut un passage à 70 % du parc immobilier chauffé à l'électricité, contre 40 % à ce jour en mettant en avant le déploiement des pompes à chaleur.

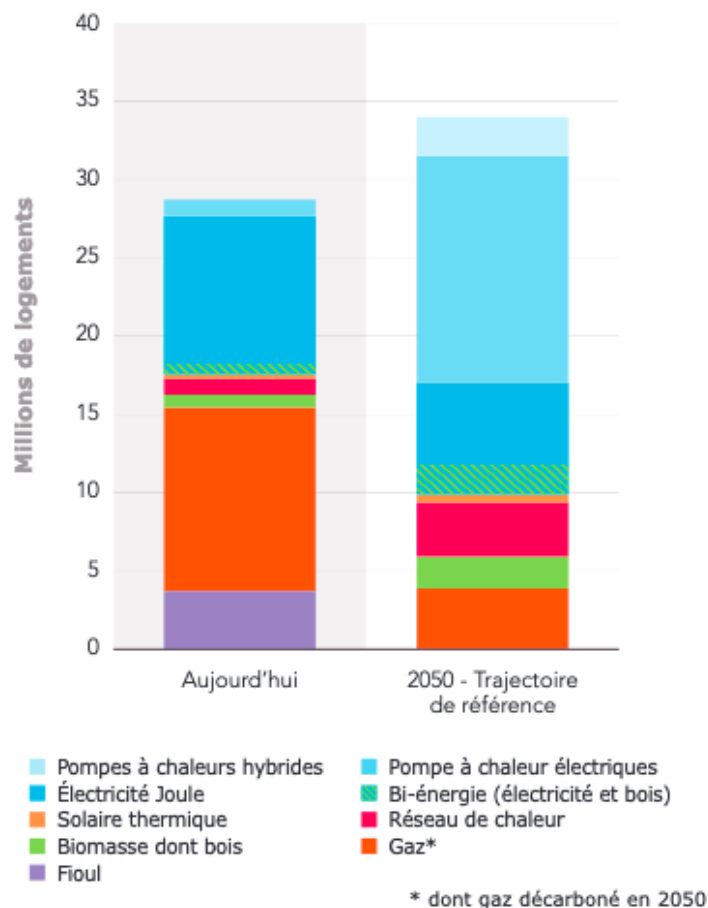


Figure 5 : Évolution du parc de chauffage résidentiel entre aujourd'hui et 2050 dans la trajectoire de référence - RTE

Ce graphique issu du scénario RTE montre l'importance accordée aux technologies PAC dans le mix énergétique français futur de la trajectoire de référence. Ce scénario envisage ainsi que près de 15 millions de logements seront équipés par des PAC électriques en 2050, contre environ 1 million aujourd'hui.

Le scénario tendanciel ADEME [Transition\(s\) 2050 choisir maintenant agir pour le climat - ADEME](#) estime qu'en 2050, les PAC équiperont 35 % du parc de logements soit 11,8 millions de logements, contre 4 % en 2015.

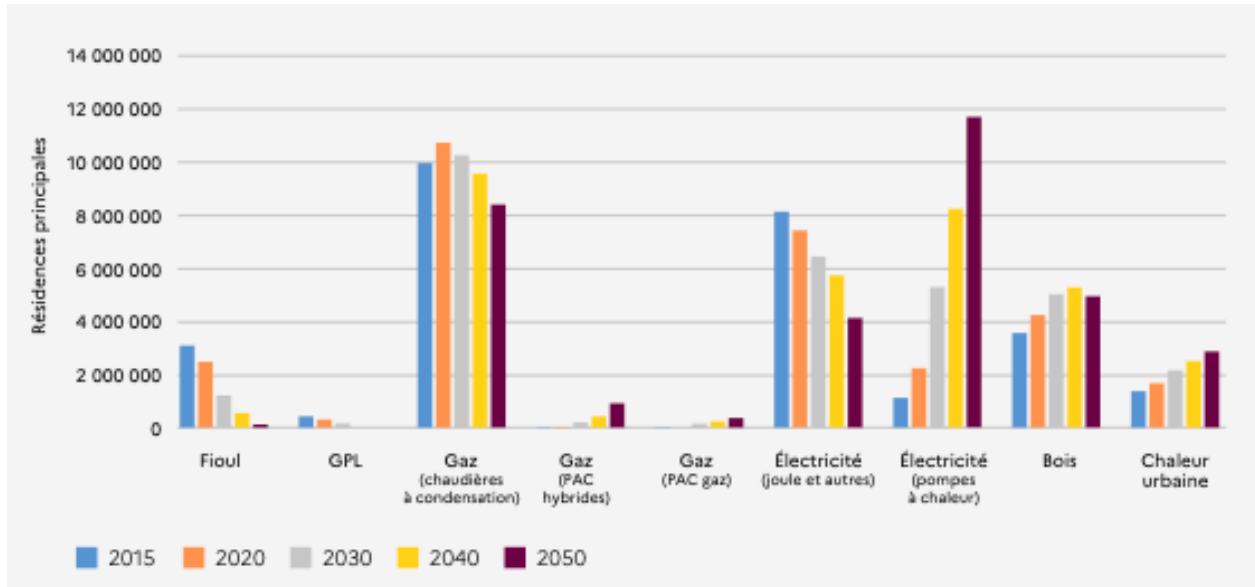


Figure 6 : scénario tendanciel - nombre de résidences principales par équipement de chauffage - ADEME

Tout comme le scénario RTE, le scénario tendanciel de l'ADEME montre qu'une haute importance est donnée aux pompes à chaleur dans le futur énergétique.

Pour finir, le scénario [La transition énergétique au cœur de la transition sociétale - négaWatt 2022](#) encourage l'installation de systèmes de chauffage plus performants, notamment les PAC.

**Nous le constatons dans ces trois scénarios, les PAC sont des technologies phares de la transition énergétique permettant l'atteinte des objectifs de neutralité carbone en 2050. Cependant, pour que ces objectifs soient atteints, il est primordial d'acquérir une connaissance claire sur ce système qui n'est pas adapté à tous les environnements et climats.**

# 1. Principes techniques de fonctionnement

## 1.1. Principe général d'une PAC : le cycle thermodynamique pour la production de chaleur et de froid

Les PAC sont des systèmes thermodynamiques **fiables et éprouvés**, présents sur le marché depuis plusieurs décennies. Le principe consiste à **transférer des calories d'une source froide** (source qui se refroidit lorsque l'on prélève de la chaleur) à **une source chaude** (source à laquelle on transmet la chaleur prélevée) à l'aide d'un fluide frigorigène. Pour le chauffage, la source chaude est le milieu intérieur à chauffer et la source froide l'extérieur où les calories sont prélevées. Pour le rafraîchissement, la source chaude est le milieu extérieur où les calories sont transférées et la source froide le milieu à rafraîchir. Les sources chaudes et froides peuvent être le sol, de l'eau ou de l'air.

Pour le chauffage, le principe se répète cycliquement :

- La source froide se refroidit dans l'**évaporateur** au contact du fluide frigorigène qui récupère ses calories. Ce réchauffement du fluide le fait passer de l'état liquide à l'état gazeux, à basse pression.
- Le fluide traverse ensuite le **compresseur** où il voit sa pression augmenter. Il se trouve alors à l'état gazeux, à haute pression.
- Le fluide frigorigène transmet ses calories à la source chaude alimentant le réseau de chauffage en traversant le **condenseur**. Le fluide frigorigène repasse ici à l'état liquide, tout en restant à haute pression.
- Il est ensuite détendu par le **détendeur** pour retrouver son état initial, liquide à basse pression.
- Il revient finalement dans l'évaporateur où il va pouvoir recommencer le cycle en étant réchauffé par la source extérieure.

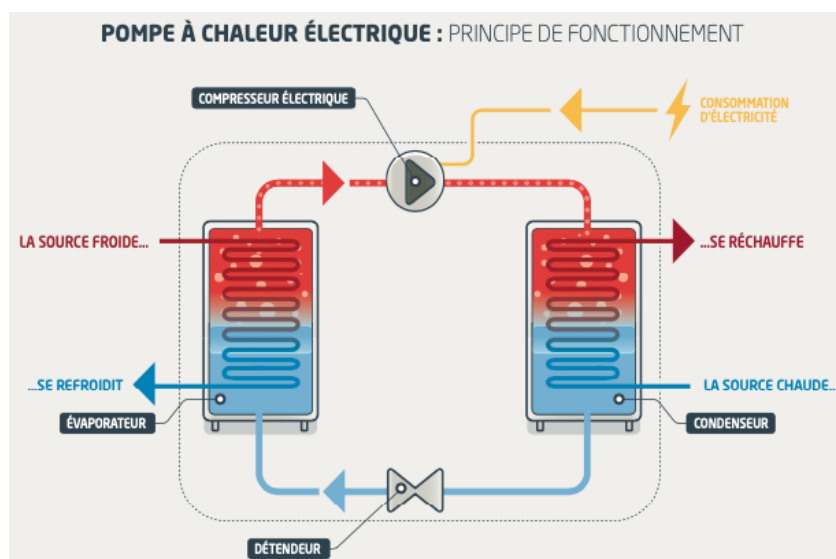


Figure 7 : Pompe à chaleur électrique : principe de fonctionnement, ADEME, 2017

L'étape de **compression** nécessite un **apport d'électricité**, qui n'est **pas considéré comme renouvelable**. En revanche, les propriétés physiques du fluide frigorigène utilisé permettent de produire une **quantité de chaleur entre 1,6 et 7 fois plus importante que la quantité d'électricité** consommée dans ce processus.

Cette chaleur produite dépend de la technologie, de la source extérieure et de la température d'usage. C'est cette chaleur produite qui est renouvelable, puisque provenant d'une source extérieure renouvelable (sol, eau ou air).

Il existe par ailleurs des PAC, très minoritaires sur le marché, dont la compression est effectuée par un processus thermique et non électrique.

Certaines PAC sont **réversibles**, c'est-à-dire qu'elles peuvent **fournir de la chaleur** en hiver, **et du froid** en été. Pour cela, le sens de circulation est inversé, via un système de tuyauterie parallèle. De même, certaines technologies peuvent ne produire que du froid.

## 1.2. Types de technologies de PAC

Les sources chaudes et froides sont variées et peuvent se combiner. Les pompes utilisant de **l'air extérieur** sont dites "**aérothermiques**", tandis que celles puisant des calories dans le **sol** (ou une nappe phréatique) sont dites "**géothermiques**". On parle selon les cas de modèle air/air, air/eau, eau glycolée/eau, sol/sol, sol/eau. Le premier terme désigne l'origine du prélèvement (source froide pour le chauffage) et le deuxième le type de réseau de chauffage.

Dans cette partie, les technologies présentées sont applicables pour du chauffage. Pour l'appliquer au rafraîchissement le mécanisme est inversé : la source chaude devient la source froide et inversement.

Un tableau récapitulatif des technologies, avec leurs avantages et inconvénients, est présenté en Annexe 1 de ce rapport.

### 1.2.1. Les PAC aérothermiques

- La PAC air/air est la pompe **la plus représentée sur le marché français**, très largement devant la PAC air/eau. Cela s'explique par sa **simplicité d'installation** comparé aux autres technologies, ainsi qu'à son **coût d'acquisition moindre** et sa capacité à produire du froid, cette technologie pouvant être **réversible**. La production d'eau chaude sanitaire (**ECS**) **n'est cependant pas compatible**.

Cette technologie se déploie en trois versions :

- Mono-split : un groupe extérieur prélève l'air extérieur, et un groupe intérieur diffuse l'air réchauffé. Ce système convient pour des volumes chauffés réduits (appartements de moins de 70 m<sup>2</sup> par exemple).
- Multi-split : un groupe extérieur prélève l'air extérieur, et plusieurs groupes intérieurs diffusent l'air réchauffé dans plusieurs pièces.
- Solution gainable : un groupe extérieur relié à des gaines conduisent l'air réchauffé dans plusieurs pièces via des grilles de soufflage.

- La PAC air/eau se développe en France depuis plusieurs années, d'abord grâce à la RT2012 en maison individuelle puis boostée par les aides de l'État (CEE, MaPrimeRénov'). Elle peut être **réversible** (selon le type d'émetteur) et est **compatible avec la production d'ECS**.

Cette technologie existe sous deux formes :

- Monobloc : le réseau hydraulique est directement relié au module extérieur.
- Bibloc : le réseau hydraulique passe par un bloc hydraulique installé à l'intérieur du bâtiment, relié au bloc extérieur par un réseau de fluide frigorigène.

### 1.2.2. Les PAC géothermiques

- La PAC eau glycolée<sup>4</sup>/eau : l'eau glycolée circule dans le sol. L'eau peut circuler dans des sondes verticales (à une profondeur variant de 30 à 100 mètres), ou dans des capteurs horizontaux (à une profondeur de l'ordre de 1 mètre). Cette eau glycolée circule en circuit fermé. Elle puise les calories dans le sol et les échange dans la PAC avec le circuit de chauffage à eau via le fluide caloporteur de la pompe. Il y a donc trois circuits fermés.

<sup>4</sup> Afin d'empêcher l'eau de geler, il y a un ajout de glycol dans les circuits d'eau extérieur.

- La PAC sol/eau est proche de la précédente, à la différence que le fluide frigorigène de la pompe circule directement dans le circuit fermé dans le sol. Les sondes utilisées dans cette technologie sont des capteurs horizontaux.
- Les installations de PAC sol/sol ne possèdent qu'un seul circuit. Comme pour les PAC sol/eau, le fluide frigorigène prélève les calories du sol, dans des capteurs horizontaux. Cependant, la diffusion dans le plancher chauffant est directe. Les circuits de prélèvement et de chauffage ne font donc qu'un. Cela nécessite un **volume important de fluide frigorigène**, qui possède un pouvoir de réchauffement global (PRG) **très largement supérieur au dioxyde de carbone. Il participe ainsi grandement au réchauffement climatique en cas de fuites.**
- La PAC eau/eau utilise les calories présentes dans les nappes phréatiques (ou plus rarement dans les lacs ou cours d'eau). Elle nécessite deux puits. Un premier puits en amont de l'écoulement prélève l'eau et la conduit à la PAC où les calories sont transférées vers le circuit de chauffage à eau. L'eau de la nappe est ensuite restituée via le deuxième puits, situé en aval. Cette technologie nécessite la présence d'une nappe peu profonde dont le volume est suffisant et constant.

Les technologies géothermiques permettent de réaliser du "geocooling" en été, la basse température de l'eau de la nappe étant utilisée pour rafraîchir le bâtiment par le plancher qui est alors "rafraîchissant".

## 1.3. Définition des indicateurs de performance

Il est possible de se rendre compte de la performance d'une PAC grâce à plusieurs indicateurs techniques et environnementaux. Certaines données sont obligatoirement fournies par le constructeur ou le distributeur quand d'autres sont optionnelles et attribuées par des organismes certifiés.

### 1.3.1. Facteurs de performance technique

- Le coefficient de performance ou COP est le **rapport entre l'énergie thermique chaude** produite extraite au condenseur (en rouge sur la figure suivante) **et l'électricité consommée au compresseur** (en jaune) pour la produire. Il est également possible de déterminer un COP idéal, appelé COP de Carnot (COP<sub>c</sub>), permettant de rendre compte du rendement idéal de la PAC sans aucune déperdition, comme suit (les températures sont exprimées en Kelvin, soit  $T_K = T_{°C} + 273$ ):

$$COP_c = \frac{T_{chaud}}{T_{chaud} - T_{froid}}$$

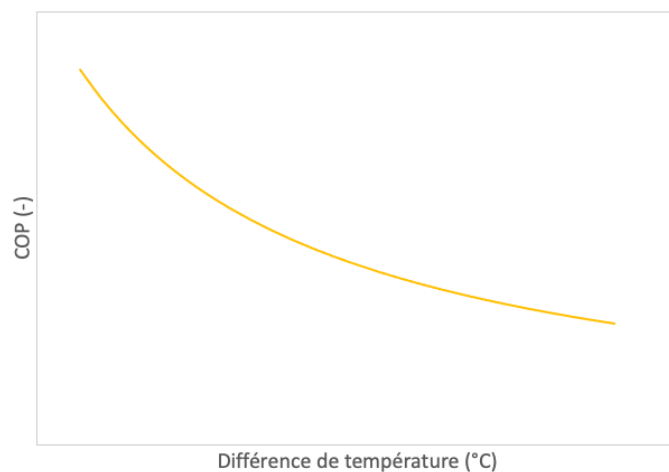


Figure 8 : évolution du COP de Carnot (efficacité maximum du système) en fonction de la différence de température entre la source chaude (fixe) et froide

Cette équation théorique permet de **visualiser que plus la différence entre la température de la source chaude et de la source froide est importante, plus le COP<sub>c</sub> (et par conséquent le COP réel en moindre mesure) est faible**. Cette équation permet de visualiser l'évolution idéale du COP, ainsi le COP réel de la technologie sera forcément moins important : en effet, seules les températures sont prises en compte, mais il faut également prendre la variation de consommation d'énergie électrique utilisée pour compenser la différence de température, ainsi que l'augmentation de production d'énergie thermique.

Ainsi, pour optimiser la performance de sa PAC, la température de la source froide (sur laquelle il n'y a pas de maîtrise) ne doit pas être trop faible : **la performance de la PAC est optimale lorsque la différence de température entre la source froide et la source chaude est la plus faible**. Ceci montre que les PAC aérothermiques pour lesquelles il y a le moins de maîtrise sur l'environnement extérieur ne peuvent pas convenir aux environnements trop froids.

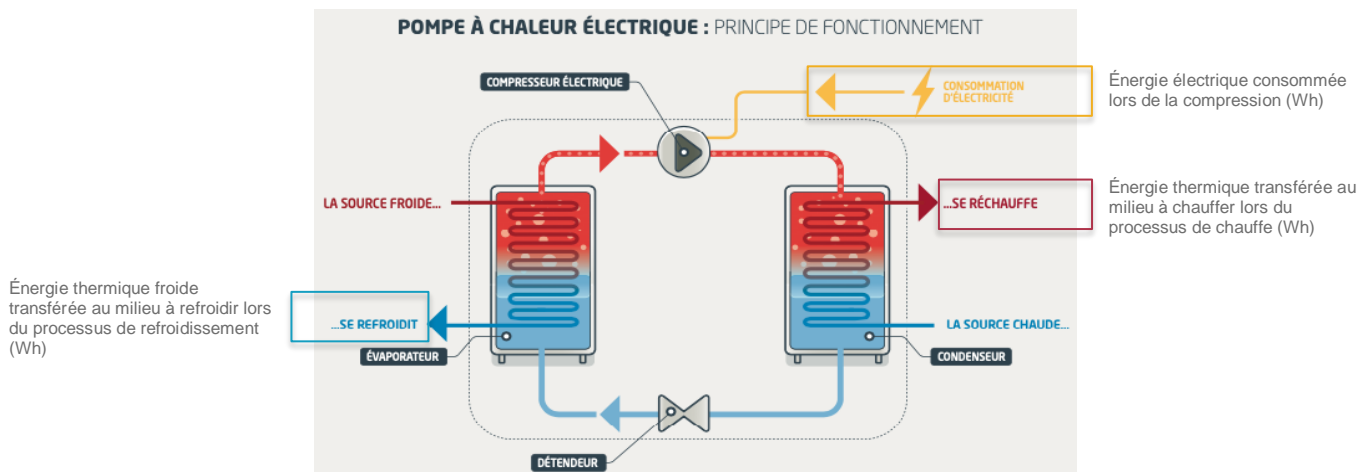


Figure 7 : Pompe à chaleur électrique : principe de fonctionnement, ADEME, 2017

Le COP est un rapport supérieur à 1, le plus souvent compris entre 3 et 6. Ce facteur permet de rendre compte dans des conditions optimales d'utilisation des performances de la PAC. Il permet d'avoir un ordre d'idée de la performance de la technologie mais n'offre pas d'information sur les performances en conditions réelles d'utilisation (il ne prend en compte que la performance de la PAC, mais pas celle du système global des pompes auxiliaires par exemple). Concrètement, pour une PAC de COP 3, pour 1 MWh d'énergie électrique consommé, 3 MWh d'énergie thermique sont restitués.

Plus le COP est élevé, plus la PAC est performante. Une PAC est considérée comme rentable énergétiquement si son COP est supérieur à 4. En effet, au niveau national on considère qu'il faut exploiter 2,3 kWh de combustible fossile ou nucléaire pour obtenir 1 kWh électrique, ainsi une PAC a un intérêt énergétique si elle présente un COP annuel (prenant en compte le fonctionnement réel de la PAC, dont les périodes de fonctionnement non optimales) supérieur à 2,6, revenant à un COP système de 4 minimum<sup>5</sup>.

Les conditions de test sont déterminées selon la norme NF EN 14511 et le COP est généralement communiqué avec les deux températures d'entrée (source froide extraite du milieu extérieur) et de sortie (source chaude du milieu à chauffer).

- **Le COP froid ou EER (Energy Efficiency Ratio) est l'équivalent du COP pour le processus de refroidissement.** Il est le **ratio entre la puissance thermique froide** (en bleu sur le schéma ci-dessus) obtenue à l'évaporateur dans des conditions d'utilisation de test idéales et **l'électricité consommée** (en jaune) pour la produire définis selon la norme NF EN 14511.

<sup>5</sup> Les pompes à chaleur en question, Climaxion

Les COP sont des indicateurs théoriques sur les performances d'une pompe à chaleur **dans des conditions de température données. Une même technologie utilisée dans des conditions différentes n'aura pas les mêmes performances.** Pour obtenir des performances énergétiques optimales, les conditions d'utilisation de la PAC doivent être similaires à celles de test. De même, pour que ces **performances soient représentatives, il faut avoir le COP de la PAC dans différentes conditions de températures.**

Enfin, le COP permet de comparer deux technologies similaires (ex : air/air). Il n'est pas possible de comparer les performances de deux systèmes différents à partir de leur seul COP (ex : air/air et air/eau), les conditions de test pour l'obtention de cet indicateur étant différentes.

- Le Facteur de Performance Saisonnier (FPS ou SCOP) est un indicateur plus proche des performances réelles. Comme le COP, c'est le **ratio de la production de chaleur réelle sur la consommation électrique réelle**, mais sur une saison de chauffe, c'est à dire avec différentes conditions de température. Le SCOP est propre à chaque condition climatique, à chaque année et peut varier d'une année sur l'autre.

D'après la directive européenne sur l'étiquetage énergétique 2010/30/UE (complétée par le règlement délégué UE n°626/2011), les fabricants doivent faire apparaître l'indice SCOP sur leur produits grâce à un système de gradation avec des lettres allant de A+++ à G (du plus performant au moins performant). Pour classer les appareils, les conditions de test sont indiquées dans la norme NF EN 14825. Ce classement prend en compte des facteurs de fonctionnement différents, notamment la température extérieure en fonction de la localisation du matériel et divise l'Europe en trois zones dont les températures sont définies comme suit : Athènes pour les climats chauds, Strasbourg pour les climats tempérés et Helsinki pour les climats froids. Ainsi, un même produit n'aura pas le même SCOP selon sa localisation et n'aura pas les mêmes performances.

- Le SEER (Seasonly Energy Efficiency Ratio) est le facteur de performance saisonnier pour le refroidissement. Comme le SCOP, il est déterminé dans des conditions réelles d'utilisation indiquées dans la norme NF EN 14825. Il n'y a qu'une seule zone climatique de test en condition réelle pour toute l'Europe. Les températures de calcul du SEER sont de 20°C en intérieur et de 28°C en extérieur.
- L'ETAS représente l'efficacité énergétique saisonnière, mesurée sur une saison entière de chauffe. Ce facteur est très important, puisque la performance traduite par l'ETAS permet de définir s'il est possible de bénéficier ou non d'aides à l'installation.

Il faut porter une attention particulière à prendre en compte tous les éléments du système (variabilité des températures, auxiliaires de certaines PAC, etc.) lors du calcul des facteurs de performance en condition de test ou en condition réelle.

### 1.3.2. Facteurs environnementaux

- Le fluide frigorigène dans le cycle thermodynamique de fonctionnement permet les **différents transferts de chaleur** au sein de la PAC. Le fluide varie en fonction des technologies. Ces fluides frigorigènes sont très polluants, et certains sont interdits. C'est le cas notamment des CFC (Chlorofluorocarbures) et HCFC (Hydrochlorofluorocarbures). Il est important d'effectuer régulièrement la maintenance du matériel pour rechercher les éventuelles fuites<sup>6</sup>, comme l'impose la réglementation sur ces fluides. En effet **les fluides frigorigènes contribuent à l'effet de serre**. Les fluides frigorigènes les plus utilisés sont les HFC (Hydrofluorocarbures). Le fluide R410A est le plus présent sur le marché et présente un PRG de 2038, soit un pouvoir de réchauffement sur 100 ans 2038 fois supérieur au CO<sub>2</sub><sup>7</sup>.
- Le taux d'EnR&R permet de calculer la quantité d'énergies renouvelables et de récupération d'une PAC. C'est une information assez controversée au niveau français. Le taux d'EnR&R est le **ratio entre**

<sup>6</sup> <http://www.chaleur.net/qu-est-ce-qu-une-pac/fonctionnement/fluide-frigorigene.php>

<sup>7</sup> ADEME, CODA STRATEGIES. 2021. La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires - état des Lieux 2020 – Synthèse, 13 pages

**l'énergie renouvelable et l'énergie totale.** Ce taux est calculé différemment selon les structures et peut donc varier (voir Annexe 2).

Plusieurs résultats sur le taux d'EnR&R peuvent ressortir, selon si le taux de conversion entre l'énergie primaire et finale est pris en compte ou non.

À l'échelle nationale, c'est la directive européenne 2018/2001 qui définit ce taux, même si certaines structures disposent de leur propre méthodologie de calcul.

- Le calcul de froid renouvelable a été communiqué dans un acte délégué lors de la fin de l'année 2021 amendant [l'Annexe VII de la directive UE 2018/2001](#) concernant la méthode de calcul de la quantité d'énergies renouvelables utilisée pour le refroidissement et les réseaux de froids, le calcul détaillé est disponible en Annexe 2.



### 1.3.3. Certifications

Zoom sur les certifications possibles d'une PAC<sup>8</sup>

Nom de la certification/norme	Garanties	Délivrée par
<b>NF PAC ou NF 414</b>	Pour les PAC aérothermiques ou géothermiques - conformité aux normes françaises, européennes, internationales et à la norme 14511-2 - niveau de qualité et de performance	AFPAC (Association Française pour la Pompe à Chaleur)
<b>EN 14511-2</b>	- conditions d'essai pour les PAC aérothermiques et géothermiques	
<b>NF EN 14825</b>	- conditions de performance et méthodes d'essai des climatiseurs - formules permettant de calculer les SCOP et SEER en fonction du type d'appareil	
<b>HP Keymark</b>	- niveau de qualité et de performance	EHPA (European Heat Pump Association) contrôles réalisés par le CETIAT (Centre Technique des Industries Aérauliques et thermiques)
<b>NF S 31-010</b>	- niveau sonore (de toutes les technologies)	
<b>NF X10-970</b>	Pour les PAC géothermiques	
<b>Label Qualipac</b>	Pour les installateurs de PAC - qualification RGE de l'installateur	Qualit'EnR
<b>Écolabel européen Pompe à Chaleur<sup>9</sup></b>	- niveau de qualité et de performance - qualité environnementale	

Tableau 1 : Certifications, labels et normes les plus communément utilisées

<sup>8</sup> [https://www.m-habitat.fr/pac/caracteristiques-pac/normes-sur-les-pompes-a-chaaleur-4959\\_A](https://www.m-habitat.fr/pac/caracteristiques-pac/normes-sur-les-pompes-a-chaaleur-4959_A)

<sup>9</sup> <https://www.green-pac.fr/certification-pompe-a-chaaleur/>

## 2. Performances des PAC suivant leurs usages

### 2.1. Les PAC dans les bâtiments

Toutes les PAC sur vecteur eau présentées dans la partie précédente peuvent être mises en place dans un bâtiment. Elles peuvent être installées de manière individuelle (une par logement, il est dans ce cas primordial de bien étudier l'intégration des unités extérieures de l'acoustique associée), ou de manière collective (une ou plusieurs PAC pour un immeuble). Elles sont, dans les deux cas, raccordées à un réseau de chauffage qui alimente les émetteurs de chauffage.

#### 2.1.1. Les émetteurs de chauffage

- Les radiateurs basse température fonctionnent à une température comprise entre 45°C et 50°C et procurent une chaleur douce agréable. Dans le cas d'une rénovation, les radiateurs déjà présents peuvent parfois être réutilisés, à condition qu'ils soient bien dimensionnés. L'utilisation de ces émetteurs nécessite une bonne isolation des bâtiments dans lesquels ils sont placés.
- Le plancher chauffant basse température est constitué de tubes placés en serpentin et noyés dans une dalle de béton. La grande surface de chauffage permet une diffusion constante de la chaleur, très confortable. Cet émetteur est complexe à mettre en place dans le cadre d'une rénovation. Il est donc plus adapté à la construction neuve. Il existe également des planchers chauffants-rafraîchissants adaptés à l'existant suite à une rénovation grâce à leur faible épaisseur et à l'absence de chape liquide.
- Les ventilo-convecteurs à eau sont des émetteurs de chaleur par air, raccordés au réseau de chauffage à eau de la pompe à chaleur. Ils diffusent l'air chauffé dans les pièces via des ventilateurs.
- Les ventilo-convecteurs à détente directe diffusent dans les pièces l'air réchauffé par passage sur une batterie d'échange où circule directement le fluide caloporteur de la pompe à chaleur.

Par ailleurs, les PAC peuvent être installées conjointement à un autre système de chauffage, pour en améliorer les performances ou les services, ou être utilisées uniquement pour la production d'ECS. Certaines pompes à chaleur permettent la production de chauffage et d'ECS, ce sont des **PAC double service**. Elles assurent le chauffage du bâtiment, et une partie de la chaleur du fluide frigorigène est utilisée pour chauffer l'eau. Le chauffe-eau possède une résistance électrique pour chauffer l'eau en appoint lorsque la PAC est arrêtée.

#### 2.1.2. Les chauffe-eaux thermodynamiques

Les chauffe-eaux thermodynamiques (CET) sont des équipements de production d'ECS constitués d'une PAC et d'un ballon d'eau chaude. Il s'agit d'une solution innovante et d'une alternative intéressante aux chauffe-eaux traditionnels. Tout comme les PAC, il en existe plusieurs types.

- Les CET aérothermiques utilisent les calories présentes dans l'air, sont simples à installer et s'intègrent facilement dans le cadre d'une rénovation. Ils récupèrent l'air ambiant (prélevé directement dans le bâtiment), l'air extrait (directement raccordé sur la VMC) ou l'air extérieur (à l'aide d'une unité extérieure). Les CET sur air ambiant ont pour inconvénient de rafraîchir l'air du local où ils sont installés, ils doivent donc être installés dans un local non chauffé. Les CET aérothermiques sont de loin les plus répandus. Les CET sur air extrait sont les plus efficaces mais nécessitent l'existence d'une VMC. Comme pour les PAC, les CET sur air extérieur sont soumis aux variations climatiques. Ils sont peu encombrants mais peuvent être bruyants.

**Il est vivement déconseillé d'augmenter le volume ventilé pour répondre aux besoins d'ECS.**

Les performances d'un CET aérothermique dépendent de :

- La température de l'air ambiant (diminution de 2 % par degré en moins)
- La température de consigne (fonctionnement optimal à 55°C)
- La dimension du ballon (la performance est meilleure lorsque le ballon est vidé régulièrement)
- L'emplacement du ballon (idéalement dans un local à température constante)

- Les CET héliothermiques valorisent l'énergie solaire via des capteurs évaporatifs solaires. Le fluide frigorigène est réchauffé par l'énergie solaire qui la transfère à la pompe à chaleur. Le volume de fluide frigorigène ici est supérieur aux autres types de CET.
- Comme pour les PAC géothermiques, les CET géothermiques récupèrent la chaleur du sol via des capteurs horizontaux ou verticaux. Ils nécessitent donc des travaux et des surfaces de terrain importants (mais tout de même moins importants que pour les besoins de chauffage). Ces CET sont les moins répandus.

Le marché des CET est en pleine expansion, avec de plus en plus d'équipements installés chaque année.

### 2.1.3. Les PAC hybrides

Les PAC hybrides combinent deux équipements : une PAC air/eau et une chaudière à haut rendement (généralement alimentée au gaz). La PAC va fonctionner la majeure partie du temps, tandis que la chaudière va prendre le relais lorsque les températures extérieures vont baisser, pour compenser les performances à la baisse de la PAC. La régulation très fine de cet équipement permet de choisir le mode de chauffage à privilégier, en fonction de la température extérieure, du rendement des équipements et du coût des énergies. Ainsi, le rapport coût/rendement est toujours optimisé. Les PAC hybrides sont généralement aérothermiques, puisque le besoin de pallier des températures trop faibles est moins important avec des PAC géothermiques. Ces systèmes restent peu répandus à ce jour.

## 2.2. Les PAC en réseaux

Un réseau de chaleur (ou de froid) est constitué d'installations de production ou de récupération de chaleur (ou de froid), d'un réseau primaire de canalisations transportant la chaleur (ou le froid) jusqu'aux sous-stations où l'échange thermique est effectué, et un réseau secondaire de type boucle d'eau se trouve à l'intérieur des bâtiments livrés.

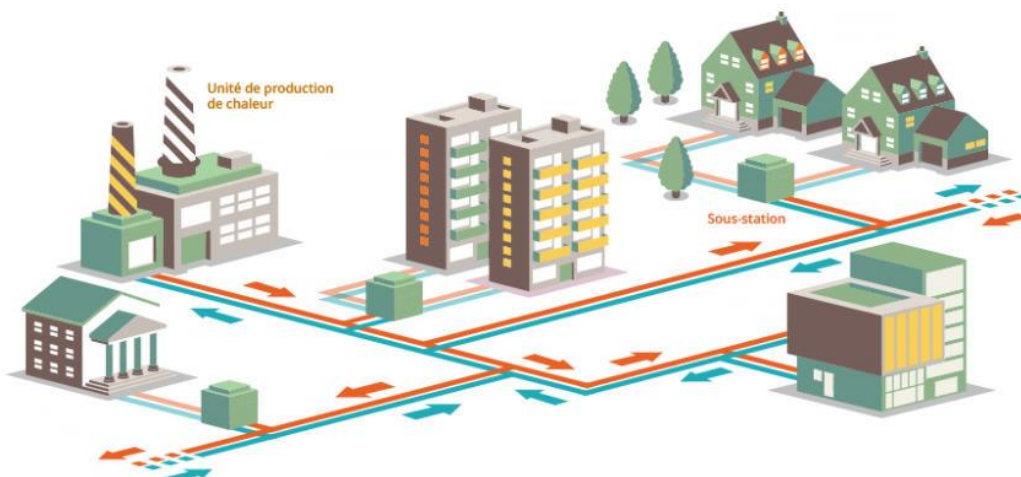


Figure 9 : Schéma de principe d'un réseau de chaleur (Source ADEME Île-de-France)

Il existe de nombreux moyens de production de chaleur ou de froid, et il est possible de les coupler pour faire varier le mix énergétique et garantir un prix de vente stable de la chaleur ou de froid

Certains réseaux sont également capables de fournir du chaud et du froid, grâce aux technologies des thermofrigopompes (TFP) ou des pompes à chaleur réversibles. C'est une PAC dont l'énergie utile est à la fois l'énergie prélevée sur les sources froides et celle rejetée sur la source chaude. Les calories émises par la production de froid au niveau de sa source chaude sont utilisées par la production de chaleur au niveau de sa source froide.

### 2.2.1. Les PAC en réseaux de chaleur

D'après l'enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid (EARCF), seulement 5 % des réseaux de chaleur ont recours à des PAC dans leur production, majoritairement comme production d'appoint : très peu ne produisent de la chaleur qu'à partir de celles-ci.

En effet, sur 26,1 TWh d'énergie livrée, 378,5 GWh proviennent de PAC, soit un peu plus d'1 % des livraisons. En 2020, 47 réseaux de chaleur utilisent des PAC<sup>10</sup>, 55 % de ces PAC sont des PAC géothermiques.

4 % des réseaux utilisent des PAC réversibles ou des thermofrigopompes pour produire à la fois du chaud et du froid.

### 2.2.2. Les groupes froids à compression en réseau de froid

Comme expliqué précédemment, il est possible d'utiliser une PAC pour produire du chaud mais également du froid. Les technologies utilisées pour en produire sont appelées groupes froids, qui peuvent être à compression ou à absorption. Ce sont des technologies ne permettant de produire que du froid, sans possibilité de réversibilité.

	Fonctionnement	EER	Avantages	Inconvénients
Compression	Groupe froid classique fonctionnant sur le principe du cycle thermodynamique du fluide frigorigène (évaporateur, compresseur, condenseur, détendeur). La source froide peut être l'air extérieur sec ou humide, ou bien une eau de nappe ou de rivière.	3 à 3,5	Technologie la plus courante. A l'échelle d'un réseau de chaleur, systématiquement réalisé si présence d'une source froide de type nappe ou rivière. Possibilité de réversibilité du système pour produire de la chaleur en hiver et du froid en été, qui permet de garantir la stabilité de la température de la nappe.	D'après le rapport de l'EARCF du SNCU, les groupes froids à compression présentent des performances énergétiques favorable pour l'air humide et l'eau, cependant ces performances sont moindres lorsque l'air sec est utilisé pour l'évacuation <sup>11</sup> .
Absorption	Cycle thermodynamique appliqué au mélange eau et bromure de lithium. Le compresseur fonctionnant à l'électricité dans le cas d'un groupe froid classique est remplacé par un absorbeur et un concentrateur fonctionnant à l'énergie calorifique. La source froide est une tour aéroréfrigérante ou une nappe d'eau froide.	0,6 à 0,7 Besoin de refroidissement au niveau de la source froide deux fois supérieur à celui d'un GF à compression.	Adapté à de la valorisation d'un réseau de chaleur alimenté par une énergie de récupération. Pas de fluide frigorigène à fort pouvoir de réchauffement climatique.	Rendement faible.

Tableau 2 : comparaison des groupes froids

<sup>10</sup> [RCE 38, Enquête sur le prix de vente de la chaleur et du froid en 2020](#)

<sup>11</sup> [Résultats de l'enquête annuelle, édition 2021, SNCU](#)

Le froid des groupes froids à compression représente 96 % du froid produit<sup>9</sup>. Les 4 % restants sont des groupes froids à absorption, des PAC réversibles, thermofrigopompes ou du freecooling.

### 2.2.3. Les boucles d'eau tempérées<sup>12</sup>

Les boucles d'eau tempérées (BET) sont des réseaux permettant à la fois de livrer de la chaleur et du froid grâce à un fluide calo-frigo-porteur allant de -3°C à 40°C. Tout comme les réseaux de chaud et de froid, une BET est composée de la production d'équilibrage centralisée, de réseaux de distribution via la boucle tempérée et la production de chaleur et de froid décentralisée constituée d'une ou plusieurs PAC, groupes froids et/ou TFP.

- Gestion en boucle simple : la production décentralisée n'est pas à la charge du gestionnaire. Les indicateurs de contenu CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ACV (Analyse du Cycle de Vie) et EnR&R sont calculés comme pour un réseau de chaleur ou de froid classique.

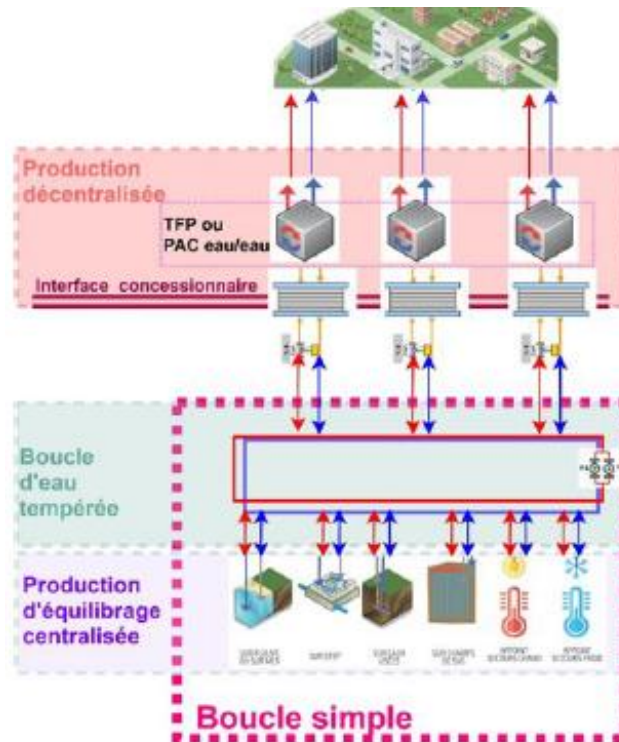


Figure 10 : schéma d'une BET en boucle simple

<sup>12</sup> [Méthodologie de calcul – indicateurs de l'enquête nationale des réseaux de chaleur et de froid urbains - SNCU](#)

- Gestion en boucle complète : la production décentralisée est à la charge du gestionnaire. Les contenus CO<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> ACV sont calculés comme pour un réseau de chaleur ou de froid classique, mais le taux d'EnR&R est calculé en prenant en compte davantage de paramètres (voir **Pour aller plus loin**).

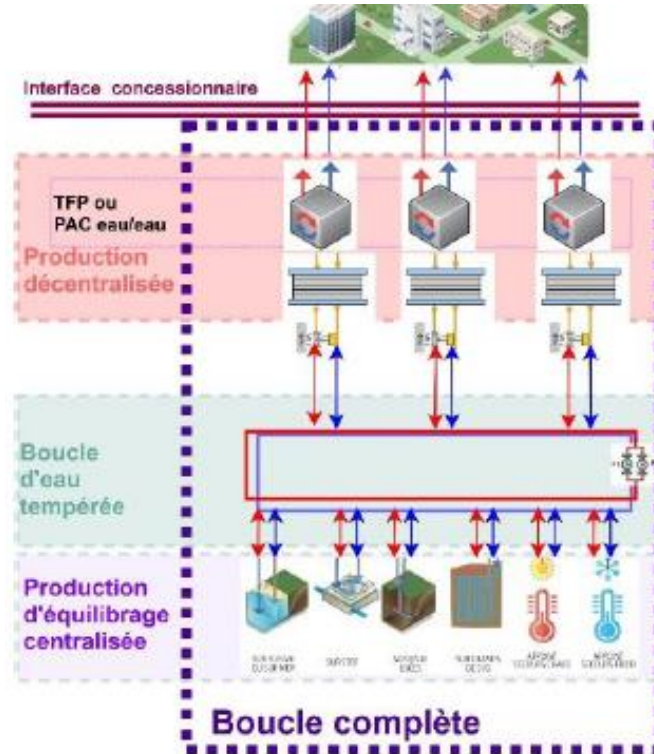


Figure 11 : schéma d'une BET en boucle complète

Les PAC représentent une faible part de production de chaleur pour les réseaux de chaleur, mais restent très largement majoritaires pour les réseaux de froid, où le nom le plus approprié est groupe froid.

**Pour aller plus loin :**

Le taux d'EnR&R d'une boucle complète est déterminé comme suit par le SNCU dans l'Enquête Annuelle sur les Réseaux de Chaleur et de Froid :

$$T\%EnR\&R_{chaud} = bfps * (1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(1 - T\%i_{Pci}) * Pci] + \sum_{i=1}^n Ea_i_{non\ EnR\&R}}{\sum_{i=1}^n Sci})$$

Avec :

Bfps = 0 si FPS.moy < 2,63 avec FPS.moy = Sci chaud / 0 nElec.chaud sinon Bfps = 0

T%iPci = Taux %EnR&R de la production centralisée Pci (%)

Pci : production de chaleur i de la production centralisée (MWh)

i=1nSci = somme de la production totale de chaleur en aval de la production décentralisée (MWh)

Ea,i Energies actives : consommation d'énergie active du système i en MWh, permettant de transférer la chaleur extraite d'un milieu vers un autre. Elle est électrique dans le cas d'une PAC. Ea,i = Ea,i(EnE&R) + Ea,i(NON-EnR&R)

FPS.moy = facteur de performance de toute la prod décentralisée

## 3. Recommandations

### Comment anticiper l'installation d'une PAC ?

**Des travaux d'isolation et de rénovation sont incontournables** avant toute installation de PAC dans un bâtiment existant. En effet, cette étape permet de rendre le système plus efficace et d'améliorer ses performances : la **diminution des besoins en chauffage entraîne une diminution de la consommation**.

Suite à la rénovation, il faut **investir dans des études de faisabilité**, afin d'éviter des surcoûts de maintenance ou de mauvais dimensionnement de système. De même, il faut diagnostiquer l'installation électrique pour éviter tout problème lors d'appel de puissance.

Pour les PAC géothermiques, la profondeur des sondes géothermiques peut compliquer l'accès au matériel et peut engendrer des problèmes de maintenance et rajouter des coûts pour de l'appoint si la technologie est mal dimensionnée.

Pour les PAC aérothermiques, les problèmes de **nuisance sonore** sont à anticiper en plus des problématiques climatiques. En effet, l'implantation d'une PAC dans une cour fermée ou à proximité d'un mur amplifie les bruits générés.

Pour le rafraîchissement, l'installation de PAC aérothermiques peut favoriser l'apparition **d'îlots de chaleur urbains** entraînant ainsi un cercle vicieux de besoin augmentant en même temps que la consommation.

De même, il faut anticiper les **effets rebond** de consommation que peuvent engendrer l'installations de PAC produisant du chaud et du froid : les économies énergétiques effectuées sur la saison de chauffe peuvent être perdues à cause d'une consommation excessive et mal maîtrisée de froid en été.

Pour finir, en coût global (comprenant l'installation, l'utilisation et la maintenance), une PAC peut ne pas engendrer d'économies financière, les économies étant majoritairement **énergétiques et sur les émissions de GES**.

### Quels indicateurs regarder pour installer une PAC ?

La prise en compte de la **zone climatique** ainsi que du **caractère rural ou urbain** de la zone d'implantation est primordiale afin d'anticiper au mieux les performances réelles.

Comme indiqué précédemment, **une même PAC n'aura pas les mêmes performances dans deux différents climats**, peu importe le COP chaud ou froid annoncé. Il est crucial de prendre en compte les indices de performances réels que sont le SCOP et le SEER ou l'efficacité énergétique saisonnière ainsi que de comptabiliser tous les matériels auxiliaires nécessaires au bon fonctionnement du système. De même, une implantation excessive de PAC aérothermiques en ville peut entraîner la création **d'îlots de chaleur urbains** et amplifier les **nuisances sonores**.

Les performances des PAC **dépendent principalement des températures des sources froides et chaudes**. Plus la différence entre ces deux températures est **faible**, plus la PAC est **performante**. Il est donc intéressant de privilégier une **source froide avec une température constante**, et des **émetteurs basse température**.

Il est possible d'être accompagné dans le choix des PAC utilisées grâce aux **normes et labels** disponibles, garants de qualité et de performance.

### Comment une PAC peut être installée ?

**L'installation et la maintenance** d'une pompe à chaleur doivent être effectuées par un **technicien certifié RGE**. Il est très important d'effectuer des **maintenances régulières**, comme l'impose la réglementation, d'une part pour vérifier le maintien des performances dans le temps, d'autre part pour contrôler l'étanchéité du circuit

de fluide frigorigène, les fluides frigorigènes ayant un PRG bien supérieur au CO<sub>2</sub>. Le volume de fluide frigorigène varie selon les technologies, toutes n'ont donc pas le même impact en cas de fuite.

De même, il faut souscrire à un contrat d'exploitation. Il est préférable de passer des marchés spécifiques et de mettre des engagements sur la performance de la technologie, avec des pénalités afin d'inciter à une maintenance et utilisation correcte.

### Quelles aides peuvent-être sollicitées lors de l'installation d'une PAC ?

Le Fonds chaleur n'accompagne que les projets de PAC géothermiques pour le chaud et les groupes froids à absorption et TFP en récupération de chaleur fatale ou BET.

Les Certificats d'économies d'énergie peuvent être mobilisés pour les PAC air/eau et eau/eau dans les bâtiments résidentiels et tertiaires.

Pour les ménages, le dispositif MaPrimeRénov' constitue une aide qui varie selon le niveau de revenus pour les PAC de type air/eau et eau/eau.

### Quels acteurs liés à la politique urbanistique et énergétique des collectivités sont à prendre en compte ?

L'allumage des PAC nécessite un **apport ponctuel fort en électricité**. Il faut anticiper la possibilité de devoir renforcer le réseau de distribution pour cet allumage, ce qui peut potentiellement ajouter des coûts supplémentaires.

Le processus de refroidissement en été des **PAC aérothermiques** favorise l'apparition **d'îlots de chaleur urbains**. De plus, ce processus est **énergivore** et peut diminuer les avantages écologiques du mode "chauffage" de celle-ci. Il est donc primordial de **contrôler l'essor des PAC** pour éviter ce cercle vicieux et encourager des méthodes de rafraîchissement passives ou collectives (réseaux de froids urbains, végétalisation, inertie thermique et orientation des bâtiments, rafraîchissement nocturne, protections solaires, etc.). Comme indiqué précédemment, l'installation de PAC aérothermiques peut également engendrer des nuisances sonores.

Il est important de n'utiliser ces technologies que lorsque cela s'avère nécessaire. Le meilleur moyen de faire des économies d'énergies est d'en réduire sa consommation grâce à la rénovation et à la sobriété énergétique.



## CONCLUSION

L'industrie des pompes à chaleur est en pleine croissance. Technologie pouvant permettre de produire du chaud et/ou du froid, elle est très attirante. Cependant, il est à ce jour toujours compliqué de trouver de la littérature adaptée permettant de déterminer correctement quelle est la technologie la plus optimale pour sa collectivité.

Il est donc nécessaire d'être vigilant sur plusieurs points :

- Une même technologie n'aura pas les mêmes performances selon sa localisation géographique et son environnement climatique : les PAC aérothermiques en plein essor **ne sont pas installables partout**,
- Il existe plusieurs méthodes de calcul du taux d'EnR d'une PAC. Il est donc compliqué de déterminer ses performances environnementales,
- Le **SCOP et le SEER** sont les indicateurs les plus proches de la réalité pour faire l'état des lieux des technologies les plus performantes selon des critères climatiques et d'utilisation particuliers,
- Les labels et certifications, non obligatoires, sont de bons indicateurs de performances délivrés par des organismes indépendants,
- Les **coûts annexes** d'installation de PAC peuvent être lourds, il est important de les prendre en compte (renforcement du réseau de distribution, étude de faisabilité, maintenance, etc.),
- Toutes les technologies ne sont pas éligibles au Fonds Chaleur,
- La multiplication du nombre de PAC aérothermiques en milieu urbain amplifie les phénomènes **d'îlots de chaleur urbains** et favorise les **nuisances sonores**,
- Les économies d'énergies engendrées lors de l'installations d'une PAC pour le chauffage peuvent être contrebalancées par **l'utilisation excessive de la climatisation en été**.

## Glossaire

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie  
AFPAC : Association Française pour la Pompe à Chaleur  
BET : Boucle d'eau tempérée  
Cep,nr : Consommation d'énergie primaire non renouvelable  
CET : Chauffe-Eau Thermodynamique  
COP : Coefficient Optimum de Performance (pour une pompe à chaleur : rapport entre la chaleur produite et l'énergie électrique consommée) / ratio d'efficacité énergétique d'un appareil climatique  
DPE : Diagnostic de Performance Energétique  
EARCF : Enquête Annuelle sur les Réseaux de Chaleur et de Froid  
ECS : Eau Chaude Sanitaire  
EER : Energy Efficiency Ratio  
EnR : Énergies Renouvelables  
EnR&R : Énergies Renouvelables et de Récupération  
eqCO<sub>2</sub> : Équivalent CO<sub>2</sub>  
FEDENE : Fédération des Services Énergie et Environnement  
FPS/SCOP : Facteur de Performance Saisonnier/ Seasonal Coefficient of Performance  
GES : Gaz à Effet de Serre  
Ic-énergie : émissions de carbone liées à la consommation d'énergie  
PAC : Pompe À Chaleur  
PPE : Programmation Pluriannuelle de l'Énergie  
PRG : Potentiel de Réchauffement Global  
RE2020 : Réglementation Environnementale de 2022  
RT2012 : Réglementation Thermique de 2012  
SEER : Seasonly Energy Efficiency Ratio  
SNCU : Syndicat National du Chauffage Urbain et de la Climatisation Urbaine  
TFP : Thermo-frigo-pompe

# Annexes

## Annexe 1 – tableau récapitulatif des technologies

Type	Technologie	Source froide	Source chaude	COP	Coût rapporté à un logement	Appoint nécessaire	ECS	Rafraîchissement	Avantages	Inconvénients
Aérothermique	Air / Air	Air : les calories sont prélevées dans l'air extérieur	Air : les calories sont restituées dans le bâtiment via des émetteurs diffusant un air réchauffé	●	À partir de 11 000 €	Oui	●	Possible Peu recommandé	- Coût d'installation par rapport aux pompes géothermiques - Utilisable en appartement à chauffage individuel	- Dépendant de la température de l'air prélevé, donc du climat. Peu recommandé dans les régions aux hivers rigoureux - COP généralement plus faible que les pompes géothermiques - Pas d'aides financières possibles (CEE, MaPrimeRénov...) - Économies hivernales limitées par l'utilisation de la climatisation en été - Vigilance nécessaire sur le niveau de bruit vecteur eau - Confort thermique inférieur au vecteur eau - Participe à l'amplification des îlots de chaleur urbains
	Air / Eau	Air : les calories sont prélevées dans l'air extérieur	Eau : les calories sont restituées dans un réseau d'eau alimentant un plancher chauffant ou des radiateurs	●	À partir de 11 000 €	Oui par grand froid	●	Possible, sauf si radiateur Peu recommandé	- Système simple - Coût d'installation par rapport aux pompes géothermiques - Peu de fluide frigorigène - Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant - Confort thermique supérieur au vecteur air	- Dépendant de la température de l'air prélevé, donc du climat. Peu recommandé dans les régions aux hivers rigoureux - COP généralement plus faible que les pompes géothermiques - Économies hivernales limitées par l'utilisation de la climatisation en été - Vigilance nécessaire sur le niveau de bruit - Participe à l'amplification des îlots de chaleur urbains
	Eau glycolée / Eau	Eau glycolée : les calories sont prélevées dans le sol via un réseau de capteurs enterrés	Eau : les calories sont restituées dans un réseau d'eau alimentant un plancher chauffant ou des radiateurs	●	À partir de 13 500 €	Non	●	Possible, sauf si radiateur Plus recommandé (pas de risque d'îlot de chaleur)	- Adapté aux climats rigoureux - Peu de fluide frigorigène - Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant	- Complexités administratives (déclaration pour forage...) - Coûts élevés (forages...) - Solide expérience de l'installateur et du foreur nécessaire
	Sol / Eau	Sol : les calories sont prélevées dans le sol via un réseau de fluide caloporteur	Eau : les calories sont restituées dans un réseau d'eau alimentant un plancher chauffant ou des radiateurs	●	À partir de 12 800 €	Non	●	Possible, sauf si radiateur Plus recommandé	- Système simple - Coût limité pour une PAC géothermique - Adapté aux climats rigoureux	- Nécessité d'un grand terrain pour les sondes géothermiques horizontales (1,5 à 2 fois la surface à chauffer)
Géothermique	Sol / Sol	Sol : les calories sont prélevées dans le sol via un réseau de fluide caloporteur	Sol : les calories sont restituées via le même réseau de fluide caloporteur alimentant un plancher chauffant	●	À partir de 12 800 €	Non	●	Possible Plus recommandé	- Système simple - Coût limité pour une PAC géothermique - Adapté aux climats rigoureux	- Nécessité d'un grand terrain pour les sondes géothermiques horizontales (1,5 à 2 fois la surface à chauffer) - Volumes de fluides frigorigènes importants (GES très puissants) - Technologie de plancher spécifique - Impact potentiel sur le milieu naturel (nappe) - Études poussées nécessaires sur la nappe (niveau, débit, qualité de l'eau...)
	Eau / Eau	Eau : les calories sont prélevées dans l'eau d'une nappe phréatique	Eau : les calories sont restituées dans un réseau d'eau alimentant un plancher chauffant ou des radiateurs	●	À partir de 13 500 €	Non	●	Possible, sauf si radiateur Plus recommandé	- Adapté aux climats rigoureux - Peu de fluide frigorigène - Adaptation possible à un réseau de chauffage central existant	- Études poussées nécessaires sur la nappe (niveau, débit, qualité de l'eau...) - Complexités administratives (déclaration pour forage...) - Coûts élevés (forages...) - Solide expérience de l'installateur et du foreur nécessaire

## Annexe 2 - Modes de calcul des taux EnR&R d'une PAC

Structure	Calcul du taux	Conditions	Commentaires
Taux d'énergie renouvelable en énergie finale <b>Directive UE 2018/2001 du Parlement Européen et du Conseil – Annexe VII<sup>13</sup></b>	$\%_{EnR\&R} = \frac{E_{EnR\&R}}{E_{produite}}$ <p>- Pour le chauffage :</p> <p>Soit <math>\%_{EnR\&amp;R} = 1 - \frac{1}{FPS}</math> et <math>E_{EnR\&amp;R} = E_{produite} - E_{elec\ consommée}</math></p> <p>- Pour le refroidissement :</p> $E_{RES-C} = Q_{CSupply} \times S_{SPFP}$ $= (Q_{CSource} - E_{INPUT}) \times S_{SPFP}$ <p>Avec <math>S_{SPFP}(\%) = \frac{SPFP_{HIGH} - SPFP_{LOW}}{SPFP_{HIGH} - SPFP_{LOW}}</math></p>	<p>Pour le chauffage :</p> <p>Si <math>FPS \geq \frac{1,15}{\eta}</math> (En France : si <math>FPS \geq 2,63</math>)</p> <p>Sinon <math>E_{EnR\&amp;R} = 0</math></p>	<p>L'approche est en énergie finale et cette méthode est donc la plus favorable aux PAC.</p> <p>Exemple : taux d'ENR&amp;R de 75 % pour une PAC de FPS 4.</p>
Taux d'énergie renouvelable en énergie primaire (notamment dans une note ADEME de proposition vis-à-vis du décret tertiaire)	$\%_{EnR\&R} = \frac{E_{EnR\&R}}{E_{produite}}$ <p>soit</p> $\%_{EnR\&R} = 1 - \frac{2,3}{FPS}$ <p>avec</p> $E_{EnR\&R} = E_{produite} - E_{elec\ consommée}$	$E_{consommée, EP} = 2,3 * E_{consommée}$	<p>L'approche est en énergie primaire et cette méthode est donc moins favorable aux PAC. Elle a néanmoins un sens physique.</p> <p>Exemple : taux d'ENR&amp;R de 43 % pour une PAC de FPS 4.</p>

Pour une PAC de COP 4 les deux premières méthodes obtiennent un taux d'EnR&R de 75 % et la méthode de l'ADEME de 43%.

### Définitions :

$E_{EnR\&R}$  : Quantité annuelle de chaleur renouvelable produite par une pompe à chaleur  
 $E_{produite}$  : Quantité annuelle totale de chaleur produite par une pompe à chaleur  
 $E_{consommée}$  : Quantité d'électricité consommée annuellement pour le fonctionnement de la pompe à chaleur  
 $E_{consommée, EP}$  : Quantité d'électricité consommée annuellement pour le fonctionnement de la pompe à chaleur  
FPS : facteur de performance saisonnier d'une pompe à chaleur  $FPS = \frac{E_{produite}}{E_{consommée}}$   
 $\eta$  : inverse du facteur de conversion en énergie primaire de l'électricité (diffère suivant les pays de l'UE)

$E_{RES-C}$  : Quantité d'énergie renouvelable pour le refroidissement  
 $Q_{CSupply}$  : Énergie frigorifique fournie par le système de rafraîchissement  
 $Q_{CSource}$  : Quantité de chaleur rejeté à la source chaude par le système de rafraîchissement  
 $E_{INPUT}$  : Consommation énergétique du système de rafraîchissement  
 $S_{SPFP}$  : FPS moyen estimé  
 $SPFP$  : efficacité du système de rafraîchissement exprimé en facteur de performance primaire  
 $SPFP_{LOW}$  : FPS minimum  
 $SPFP_{HIGH}$  : FPS maximum

<sup>13</sup> Le calcul du taux d'ENR d'une PAC raccordée à un réseau de chaleur définie par la FEDENE est aligné sur la directive européenne (Méthodologie de calcul, indicateurs de l'enquête nationale des réseaux de chaleur et de froid urbains, mise à jour mars 2021, Fedene).

**AMORCE**

18, rue Gabriel Péri – CS 20102 – 69623 Villeurbanne Cedex

Tel : 04.72.74.09.77 – Fax : 04.72.74.03.32 – Mail : [amorce@amorce.asso.fr](mailto:amorce@amorce.asso.fr)

[www.amorce.asso.fr](http://www.amorce.asso.fr) -  [@AMORCE](https://twitter.com/AMORCE)

