

La pompe à chaleur est-elle écologique ?

Comment se chauffer durablement ?



Marius Alonso
Paul Bonin
Thibaut Caillierez
Paul Contat

Yassir Fakri
Marie Humblet Vertongen
Caroline Jeandat
Thibault Papin

2023/2024

Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont les bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : madeleine.akrich@mines-paristech.fr

■ Introduction

“Nous avons décidé d'encourager nos compatriotes, sans interdiction mais en les incitant à changer plus vite, à **développer une filière industrielle de production de pompes à chaleur** qui est un formidable levier de substitution, qui est **beaucoup moins consommateur et émetteur.**” - Emmanuel Macron, 25 septembre 2023¹

Dans le contexte actuel marqué par la nécessité de faire face à une transition énergétique et écologique, le gouvernement a émis l'idée, en mai 2023, d'une potentielle interdiction d'installation de nouvelles chaudières à gaz en 2026². Cette idée a suscité des débats dans les médias et à l'Assemblée Nationale. Depuis 2020 et pour faire face au changement climatique, la France a mis en place une Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) dans laquelle la pompe à chaleur (PAC) prend un rôle principal dans la décarbonation du chauffage³. Avec cette annonce d'Elisabeth Borne, le gouvernement semble avoir fait de la PAC une de ses clés technologiques pour la transition écologique, en voulant faire reculer le développement des chaudières à gaz.

Même si le gouvernement est revenu sur ses propositions en août 2023⁴, elles ont soulevé une série de réactions qui remettent en cause le caractère écologique de l'alternative principale aux chaudières à gaz, la PAC. En effet, des enjeux de fonctionnement ont été évoqués. Comment fonctionne la PAC ? Quel est son bilan écologique et le réseau électrique français peut-il supporter l'implantation massive des PACs ?

Ensuite, des enjeux autour de la performance des PACs ont été soulevés. Une PAC peut-elle s'adapter à tout type de logement et tout type de climat ? Quelles sont les alternatives existantes ?

Puis, des enjeux autour de la production, de l'installation et du financement sont aussi apparus. Doit-on les produire en France ? Nos chauffagistes ont-ils le savoir-faire nécessaire pour installer ces nouveaux équipements ? Comment financer cette solution onéreuse ? Mais aussi, une PAC est-elle vraiment rentable économiquement et peut-on amortir son coût ?

Finalement, des enjeux un peu moins importants mais quand même évoqués reposent sur : quelles nuisances environnementales peut-on imputer aux PACs, et comment les recycler efficacement ?

¹ Déclaration de M. Emmanuel Macron sur la planification écologique, à Paris le 25 septembre 2023

² Ekwater, “Interdiction chaudière gaz : tout ce qu'il faut savoir”, <https://ekwater.fr/blog/marche-de-l-energie/interdiction-chaudiere-gaz/>, Web, 2 août 2023.

³ Ministère de la Transition énergétique. “Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)”. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc#:~:text=Introduite%20par%20la%20Loi%20de,lutter%20contre%20le%20changement%20climatique>. Web, 21 Juillet 2022.

⁴ Ekwater, “Interdiction chaudière gaz : tout ce qu'il faut savoir”, <https://ekwater.fr/blog/marche-de-l-energie/interdiction-chaudiere-gaz/>, Web, 2 août 2023.

Après la fin des chaudières à fioul, ce sont donc les chaudières à gaz qui ont été ciblées par les annonces gouvernementales. Depuis le 1 janvier 2022, la Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020) interdit la mise en place d'un dispositif de chauffage émettant plus de 4 kgCO₂/m²/an (dès 2022, dans les logements individuels et dès 2025, en copropriété). Cette réglementation visait directement les chauffages à énergie fossile comme les chaudières à gaz ou à fioul. Cette potentielle nouvelle interdiction a provoqué l'indignation de tout le secteur gazier. Ce dernier a alors commencé à décrédibiliser la PAC notamment sur ses émissions de gaz à effet de serre (GES) et son coût trop élevé, le tout en proposant des alternatives plus vertes que les chaudières à gaz classiques. De l'autre côté, les scientifiques et le milieu de l'énergie électrique en ont prôné les bienfaits. Les débats autour de l'aspect écologique notamment ont explosé depuis 2022 comme l'indique la figure suivante.

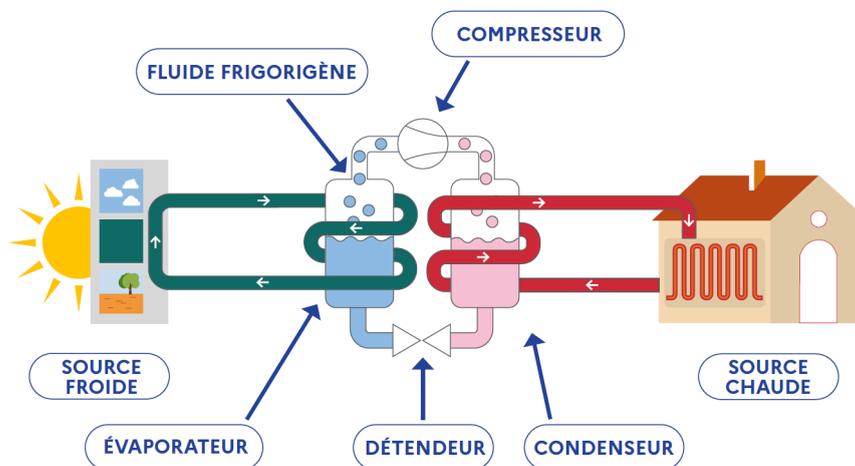


Nombre de documents dans la presse Europress utilisant le terme "Pompe à chaleur" et "éco" dans le paragraphe introductif*

Ce graphique nous permet aussi de nous rendre compte que la PAC était un sujet de débat entre 2006 et 2012 (avec un pic vers 2009) et vers 2019. Cependant, une analyse quantitative de la presse française sur ces périodes nous a permis de nous rendre compte que les débats n'étaient pas du tout les mêmes. En effet, elle était à l'époque présentée comme une technologie écologique pour moderniser sa maison. La mise en place de crédit d'impôt et de la prime à la conversion était les principaux sujets de discussions. Ils montraient déjà une volonté, par le gouvernement, de rénover sa maison et de la rendre plus efficace énergétiquement tout en faisant attention à l'environnement.

Pour l'analyse qui va suivre, nous nous sommes basés sur un ensemble d'articles de presse français, d'articles scientifiques et de rapports d'experts. Nous avons aussi interviewé 4 personnes ayant des points de vue différents sur la question de la PAC : un chercheur du Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes (CES) de l'École des Mines Paris, un rédacteur du rapport "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation" et membre de négaWatt, une association défendant un mix énergétique basé sur l'électricité, un représentant de l'association Coénove, une association défendant un mix énergétique basé sur le gaz vert et une chercheuse chez RTE, réseau de distribution électrique français.

■ Préambule : une pompe à chaleur, comment ça marche ?



Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur⁵

La pompe à chaleur capte les calories d'une source froide extérieure et les rejette dans le milieu à chauffer grâce à un fluide frigorigène. Ce fluide subit un cycle thermodynamique en passant alternativement dans un détendeur et compresseur, tous deux fonctionnant à l'électricité.

Pour bien comprendre les débats autour de la pompe à chaleur, il faut comprendre que derrière un même nom se cachent des technologies différentes⁶ :

- La pompe à chaleur air/air capte l'énergie de l'air extérieur grâce à son module extérieur et rejette directement de l'air chaud à l'intérieur.
- La pompe à chaleur air/eau capte l'énergie de l'air extérieur grâce au même module extérieur, mais les calories captées servent à chauffer de l'eau qui est envoyé dans des radiateurs classiques. C'est le substitut électrique du chauffage par chaudière.
- La pompe à chaleur géothermique capte les calories dans le sol : de l'eau froide est envoyée dans le sol, réchauffée par la chaleur naturelle souterraine puis mis en contact avec le fluide frigorigène.

On distingue deux types de système de pompes à chaleur par géothermie⁷ : pour les maisons individuelles, l'eau circule dans des sondes horizontales, enfouies sous le bâtiment à quelques mètres de profondeur. Pour les immeubles, les sondes sont verticales et peuvent atteindre une centaine de mètres de profondeur, ce qui permet une meilleure récupération du pouvoir réchauffant de la croûte terrestre.

Une telle technologie électrique nécessite un réseau électrique national justement dimensionné. Le réseau français supporterait-il un déploiement massif de pompe à chaleur ?

⁵ Issu de la note de négaWatt et du CLER "Pompes à chaleur et rénovation performante, une combinaison gagnante", page 5, janvier 2023

⁶ Association française des pompes à chaleur (AFPAC)

⁷ Extrait de notre entretien avec le professeur au CES Mines Paris.

■ Un réseau électrique national fragile et un bilan écologique contrasté ?

L'utilisation de la PAC soulève des préoccupations quant à ses impacts sur les infrastructures électriques. L'industrie gazière met aussi en garde sur son bilan écologique global qui semble moins joli qu'annoncé, malgré le fait qu'elle soit largement saluée pour sa contribution à l'efficacité énergétique et à la réduction des émissions de GES par la communauté scientifique.

■ Le réseau électrique supporterait-il un chauffage national à la PAC ?

L'un des arguments majeurs avancés par les associations défendant un chauffage basé sur le gaz est l'incapacité du réseau électrique français actuel à assurer l'équilibre offre-demande suite à un déploiement massif des PACs, et ainsi à une augmentation potentielle de la demande d'électricité.

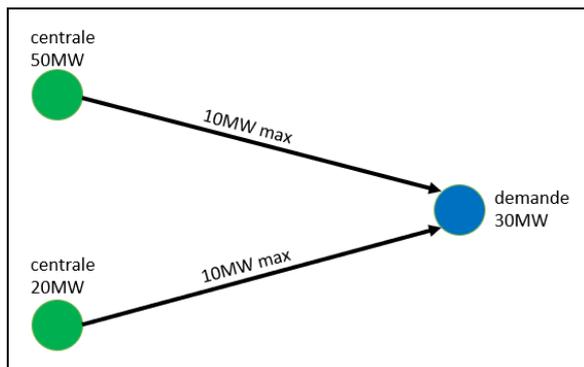
Afin de bien comprendre ce qui se passe en période de pointe, il convient de rappeler quelques principes de transmission de l'électricité. Le réseau électrique se définit simplement par un ensemble de lignes (électriques) permettant de lier des nœuds, qui sont des centrales de production et des points de consommation. Les centres de production d'électricité sont caractérisés par une puissance maximale qu'ils peuvent produire, et les lignes électriques ont également une intensité de courant maximale, et donc une puissance maximale qu'elles sont à même d'acheminer.

D'après EDF :

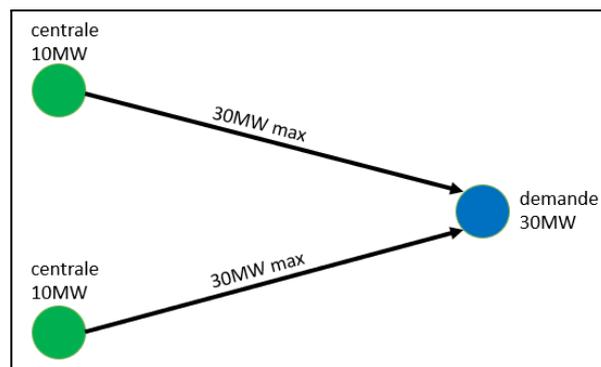
“Chaque hiver, les vagues de froid entraînent des pics de consommation d'électricité. Souvent, ces pics sont enregistrés le soir, entre 18h et 22h car tous les français rentrent chez eux. Ils allument alors simultanément le chauffage, la lumière et leurs autres appareils électroménagers (lave-linge, télévision, ...) ce qui provoque une **très forte demande en électricité**.”⁸

Cet argument invoqué par les gaziers souligne la possibilité d'avoir des problèmes de performance de l'infrastructure électrique, telle qu'une congestion du réseau, menant dans le pire scénario à un délestage. Ce dernier s'agit d'un mécanisme que le gestionnaire du réseau de transport électrique RTE utilise afin de baisser la consommation en cas d'incapacité d'équilibrer l'offre et la demande. Ce scénario pourrait se produire lorsqu'il n'y a pas assez de moyens de production d'électricité pour générer la puissance demandée, ou quand le réseau est faiblement dimensionné. Les deux figures suivantes illustrent ce principe. L'échantillon présenté est simple puisqu'il s'agit d'un réseau électrique connectant deux centrales électriques et un point de consommation grâce à deux lignes électriques. Dans les deux cas, la demande n'est pas satisfaite et on risque d'appliquer des coupures.

⁸ Citation issue du site d'EDF, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/lelectricite-au-quotidien/pics-de-consommation-electrique-en-hiver>



Exemple de réseau faiblement dimensionné



Exemple de manque de moyens de production

Cependant, dans leur rapport qui traite la décarbonation du chauffage publié en décembre 2020, RTE⁹ argue que l'électrification du chauffage via les PACs couplée avec une rénovation thermique des bâtiments ne créerait qu'une augmentation relativement faible de la demande et totalement supportable par le réseau actuel, voire même une baisse. Cette dernière correspondrait à un scénario très optimiste où l'électrification est accélérée et tous les objectifs de la SNBC¹⁰ sont atteints. La rénovation thermique est donc avancée comme une priorité avant l'installation massive de PACs par RTE ainsi que des associations telles que le CLER et négaWatt. Cette rénovation thermique permettrait une demande électrique en chauffage beaucoup moins gourmande et allégerait le réseau de transport électrique.

De plus, la question de délestage est de plus en plus rare grâce aux interconnexions du réseau français avec les réseaux des pays européens voisins. En effet, cette interdépendance permet de sécuriser l'approvisionnement en électricité en Europe, et permet aux gestionnaires du réseau de transport de recourir aux moyens de production des pays voisins en cas de besoin¹¹. La PAC profite donc du réseau électrique français fortement décarboné pour mettre en avant son bilan écologique.

■ Le bilan carbone des PACs

Le gouvernement a présenté la PAC comme la solution nécessaire pour effectuer la transition énergétique des logements. Il reste indéniable que les PACs présentent des avantages écologiques majeurs comparés aux classiques chaudières à gaz ou au fioul. Mais, le bilan écologique de la pompe à chaleur, en particulier sous l'angle du cycle carbone, est remis en cause par ses détracteurs.

Tout d'abord, la PAC possède un bilan carbone relativement faible dû à son utilisation de l'énergie électrique française majoritairement décarbonée. Cependant, en cas de consommation de pointe dépassant les demandes saisonnières, la célèbre association de consommateur UFC-Que Choisir¹² affirme que le bilan écologique serait négativement

⁹ Rapport RTE/Ademe, "Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?", 2020

¹⁰ Stratégie Nationale Bas-Carbone

¹¹ Rapport RTE, SDDR 2019, chapitre 5 : "Les interconnexions"

¹² Chesnais E, "Le gouvernement pourrait pénaliser 40 % des ménages !", UFC-Que Choisir, 06 juin 2023

impacté. En effet, l'utilisation de l'électricité moins propre de nos voisins (allemands par exemple) augmenterait indirectement ses émissions de GES.¹³ En effet, environ 40% de l'électricité européenne est produite à partir de combustible fossile, 20% à partir du nucléaire et 40% à partir du renouvelable.¹⁴ Mais en se basant sur une électricité française, le bilan écologique des PACs est très bon car l'électricité française est principalement basée sur le nucléaire.

Selon le rapport de novembre 2022 de l'association négaWatt sur le rôle de la PAC dans la stratégie de rénovation¹⁵, l'empreinte carbone de la PAC est indéniablement positive. En effet, cette technologie exploite les calories présentes dans l'air, l'eau ou le sol pour produire de la chaleur, limitant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et réduisant considérablement les émissions de GES. Comparativement aux systèmes de chauffage traditionnels, les PACs permettent une réduction significative des émissions de CO₂, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

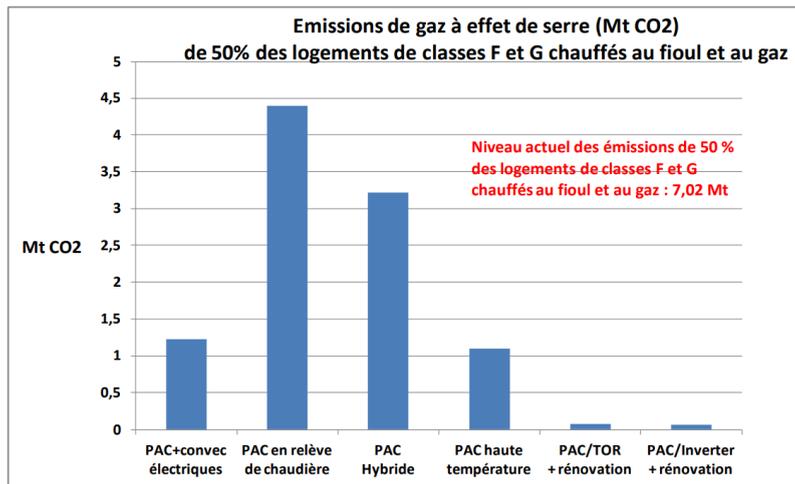
De plus, en cas de pré-rénovation des bâtiments, entraînant une division par 4 des besoins énergétiques, les PACs opèrent dans des conditions exceptionnellement favorables. Cela se traduit par des émissions de GES, des consommations énergétiques et des demandes de puissance nettement réduites. À titre illustratif, pour les logements classés F et G chauffés aux hydrocarbures, une rénovation suivie de l'installation d'une PAC se traduit par une réduction des émissions de GES de l'ordre de 100 et une diminution des consommations d'énergie primaire de 15.

L'association a constaté que parmi les différentes solutions, celles qui préservent une chaudière en tant que dispositif d'appoint sont les moins efficaces pour réduire les émissions de GES. D'autre part, l'option économique qui implique l'utilisation de convecteurs électriques entraîne une diminution significative des émissions, car même pour des températures très basses, la PAC fonctionne, les convecteurs assurant le complément. Toutefois, cette approche engendre une consommation d'électricité élevée et atteint le niveau le plus important de puissance de pointe parmi toutes les solutions analysées, posant ainsi des problèmes sérieux évoqués précédemment.

¹³ Olivier A. "Pétrole, charbon, nucléaire : quel est le mix énergétique des pays de l'UE ?", Touteleurope.eu, 20 janvier 2022

¹⁴ Conseil de l'Union Européenne, "Infographie - Comment l'électricité de l'UE est-elle produite et vendue ?", <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>, 10 mai 2023

¹⁵ Rapport négaWatt, "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie nationale de rénovation", 2022



Émissions de GES des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur (parc à rénover)¹⁶

Ainsi, on peut dire que malgré les tentatives de l'industrie gazière de décrédibiliser le bilan environnemental de la PAC, les industries de l'énergie et les experts scientifiques prônent les bénéfices écologiques de cette dernière. Par contre, on peut se demander : une PAC est-elle adaptable à tout type de logement et de climat ?

■ La PAC, un système performant ?

■ Le coefficient de performance

Une controverse réside dans la valeur du coefficient de performance (COP) qui mesure le nombre de kWh de chaleur produite par kWh d'énergie (électricité ou gaz) consommée. Explicitons la méthode de calcul de l'association négaWatt¹⁷:

$$COP = (0,30 \text{ à } 0,38) \times COP_{théorique}$$

$$\text{avec } COP_{théorique} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Le préfacteur de (0,30 à 0,38) est un facteur correctif qui prend en compte les auxiliaires de la PAC qui consomment de l'énergie, tels que le ventilateur. Les températures sont exprimées en Kelvin : T_f est la température de la source froide et T_c la température de la source chaude.

Prenons une PAC air/air qui capte de l'air extérieur à 0°C et rejette de l'air à 50°C à l'intérieur, son COP ainsi calculé est de 2,26. Pour une PAC géothermique qui récupère une eau sortant du sol à 12°C et produisant une eau à 40°C injectée dans les radiateurs, le COP atteint 3,91. Le COP des PACs peut varier de 2 à 6, suivant la technologie utilisée et les conditions extérieures. Certaines associations invitent à garder un esprit critique sur ces calculs de COP et à ne pas croire les vendeurs sur parole.

¹⁶ Infographie issue du rapport négaWatt 2022 : "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie nationale de rénovation", page 47

¹⁷ Rapport négaWatt 2022, "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation", page 9 et 10

“Notre association est aussi capable de relativiser. Quel est le réel coefficient de performance des PACs ? Si vous écoutez l'AFPAC ou les fabricants de PACs, ils vous donnent des coefficients de performance qui sont extrêmement hauts : 3, 4 voire 5. Nous, on prend des études qui ont été faites par l'ADEME qui sont en train d'être mises à jour et qui montrent que dès que la maison n'est pas isolée et que la température extérieure se dégrade, le coefficient diminue. On peut arriver à des **coefficients plutôt entre 1 et 2, que de 4 et 5**, comme ça a été vendu. Alors sur la moyenne de l'année, peut-être que le coefficient est bon, mais vous voyez, il faut avoir ce **regard critique et lucide**.”¹⁸

Aujourd'hui une PAC eau-eau avec des radiateurs à 45°C a un COP de 6,6¹⁹, cela montre bien que des hautes valeurs existent. Mais elles ne sont peut-être qu'uniquement des valeurs de laboratoire qui ne prennent pas en compte les pertes réelles que subissent une PAC. Cependant il est important d'ajouter que les valeurs de COP doivent rarement descendre en dessous de 3 comme nous l'a affirmé la chercheuse chez RTE :

“RTE est contraint par le législateur à faire des stress tests particulièrement éprouvants pour le réseau électrique, qui comprennent bien sûr des épisodes de froid durable et une production dégradée. De plus, les stress tests sont aussi réalisés avec des **COP dégradés** pour les PACs. Pour le bilan prévisionnel 2035-2050, ce **COP est pris à 3,2** sur l'ensemble du parc. Cette valeur, très conservatrice, est basée sur des expériences constructeur, ainsi que des relevés sur des logements équipés, pour lesquels l'installation et l'opération de la PAC ne se font pas nécessairement de **manière optimale**.”²⁰

La valeur du COP est donc discutée, et ce particulièrement en hiver lorsque la température extérieure devient très faible.

■ Le chauffage par PAC en hiver

La question de la performance des PACs en hiver cristallise les débats sur son efficacité énergétique. Jean-Claude Rancurel, Président de l'UNA Couverture Plomberie Chauffage de la CAPEB déclare dans un article du journal économique La Tribune :

“Dès qu'il fait froid dehors, le coefficient de performance des PACs chute drastiquement. **A -5°C, il ne dépasse pas 1 !**”²¹

Cette perte de performance, liée à une augmentation du besoin de se chauffer en hiver, induit une augmentation de la consommation électrique qui inquiète. En effet, ces pics de consommation ne peuvent être suivis par l'infrastructure nucléaire française, faible émettrice de GES, et demandent alors l'usage de modes de productions biens plus polluants. C'est ce que souligne l'UFC-Que Choisir dans un article mettant en doute la réelle efficacité du recours aux pompes à chaleur :

¹⁸ Extrait de notre entretien avec un représentant de l'association Coénove

¹⁹ Extrait de notre entretien avec un membre de négaWatt

²⁰ Extrait de notre entretien avec une chercheuse chez RTE

²¹ Chaudières à gaz contre pompes à chaleur : la bataille des chiffres fait rage - La Tribune no. 7654 - 21 juin 2023

“Il a systématiquement fallu faire appel à des **centrales thermiques** (gaz, fioul et charbon) encore plus émettrices en CO₂ qu’une chaudière à gaz pour répondre à la demande d’électricité lorsque la demande d’électricité est la plus forte.”²²

Dans les pays où les températures sont habituellement froides, la solution trouvée a été d’utiliser des PACs eau-eau et de puiser l’énergie dans le sol. Mais dans des pays plus tempérés connaissant occasionnellement des vagues de froid tels que la France, les défenseurs de la PAC se répartissent principalement en deux camps. D’une part, certains critiquent les résultats de COP obtenus, ou énoncent que la question des vagues de froid doit être rationalisée, c’est le cas du membre de l’association négaWatt interrogé qui affirme:

“Quand il fait très froid - s’il fait -15°C, -20°C - le COP va souffrir. Mais la question, elle ne doit pas être vue comme ça. Elle doit être vue en termes de fréquences des températures.”²³

Ainsi selon eux, ces cas extrêmes de températures restent suffisamment minoritaires en France pour que l’usage de la PAC soit justifié. D’autre part, beaucoup promeuvent l’usage d’une PAC hybride, alliant une PAC classique et une chaudière à gaz afin de répondre aux pics de demande quand les températures ne permettent pas à la PAC de fonctionner de façon optimale, aussi bien écologiquement qu’économiquement. C’est ce que souligne Mohammad H. Abbasi dans une revue d’article traitant de l’usage des PACs pour le chauffage des bâtiments :

“Les PACs hybrides pourraient potentiellement régler le problème de la surcharge du réseau. [...] En couplant un système de contrôle intelligent de la PAC hybride, le système peut automatiquement trouver la **configuration de chauffe la plus optimale**”²⁴

Les questions de performance, notamment par temps froid, des PACs restent épineuses et confrontent principalement les acteurs évoluant spécifiquement dans le secteur de l’énergie. Mais des alternatives sont régulièrement proposées par ces acteurs afin de répondre à leurs inquiétudes.

²² “L’UFC-Que Choisir dénonce un projet lacunaire, au bilan environnemental incertain, et potentiellement très coûteux pour les consommateurs” - UFC-QUE Choisir - 25 juillet 2023

²³ Extrait de notre entretien avec un membre de négaWatt

²⁴ Heat transition in the European building sector: Overview of the heat decarbonisation practices through heat pump technology - Abbasi et al.

■ Quelles alternatives sont proposées pour réussir une transition avec du gaz ?

La transition énergétique vers l'utilisation de pompes à chaleur comme alternative aux énergies fossiles est un défi majeur. Selon le ministère de la transition, en 2018, 54% des logements en France étaient encore chauffés à l'aide d'énergies fossiles.²⁵

L'adaptation du système de chauffage individuel peut présenter des défis. Dans le contexte actuel des habitations individuelles et des appartements, l'utilisation de petites unités individuelles ou multiples est courante, tandis que dans les bâtiments multifamiliaux et commerciaux, une unité centralisée est souvent privilégiée pour assurer le chauffage et la climatisation de plusieurs unités. Les PACs centralisées ne représentent qu'une petite part de la capacité totale installée aujourd'hui. Par exemple, en Europe, seules 10% des unités vendues en 2021 étaient des unités centralisées plus grandes destinées aux logements multifamiliaux. La décision d'opter pour des pompes à chaleur individuelles ou centralisées dépend de divers facteurs, notamment les caractéristiques du bâtiment, les réglementations locales et les besoins spécifiques de chauffage et de refroidissement.²⁶ L'industrie gazière a proposé un certain nombre d'alternatives. Parmi elles, on compte la PAC hybride et les chaudières aux biogaz qui sont présentées comme des technologies de transition.

■ La PAC hybride, une solution de transition ?

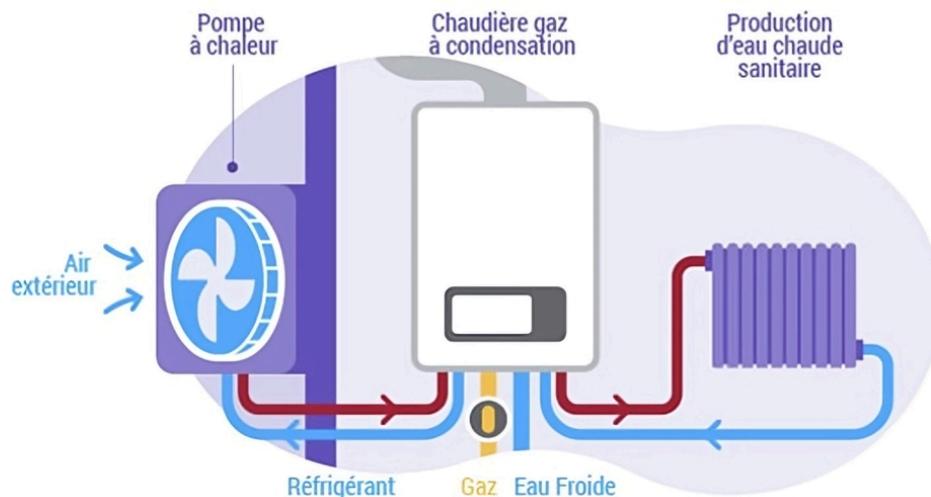


Schéma d'une pompe à chaleur hybride²⁷

Une des solutions proposées par les associations pour le gaz telles que Coénove est l'avantage que représente un système hybride alliant chaudière au gaz et PAC classique. Cette solution, appelée PAC hybride, fonctionne en mode pompe à chaleur quand les températures et la demande sur le réseau électrique le permettent, et en mode chaudière quand cela devient plus intéressant économiquement.

²⁵ Ministère de la transition électrique (2022), chiffres clés logement

²⁶ IEA (2022), The Future of Heat Pumps, Paris

²⁷ Infographie issue du site de l'Habitat Confort d'Alsace :

<https://www.hca67.fr/remplacement-changement-chaudiere-gaz-naturel-strasbourg-bas-rhin.html>

En plus de l'intérêt énergétique du système, on retrouve aussi des arguments de souveraineté, en faisant partiellement reposer le système de chauffage français sur un secteur d'expertise européen et on préserve une partie de l'emploi du secteur. Si ce système est allié à une production de biogaz par la France, elle lui permet une indépendance énergétique en plus d'une source d'énergie faible en carbone et pilotable.

D'autre part, d'après notre entretien avec une chercheuse chez RTE, et afin de limiter la pointe électrique, des études sont menées pour intégrer les PACs hybrides de manière sérieuse, à condition qu'elles changent de mode en fonction du mix électrique courant, et non de la température extérieure. Il est également intéressant d'opter pour les PACs hybrides dans les régions densément peuplées et/ou où le climat est le plus froid (telle que le Grand Est) afin de soulager le réseau. Elle ajoute aussi que :

“Il faut noter que le **nombre d'heures** pendant lesquelles des centrales thermiques sont allumées pour faire face à la pointe est **négligeable** par rapport à l'année entière...”²⁸

Cependant, à cette PAC hybride, des aspects écologiques et économiques posent problème selon le négaWatt. En effet, dans leur rapport de 2022²⁹, ils indiquent que cette solution ne réduit que peu les émissions de GES. Une PAC hybride ne réduirait que de moitié les émissions par rapport aux chaudières actuelles fonctionnant au fioul et au gaz. De plus, économiquement, le membre de négaWatt dénonce l'industrie gazière qui, selon lui, ne cherche qu'à garder leur profit en incitant le consommateur à avoir un contrat gaz avec eux :

“Cependant, notre étude a montré que les **émissions de GES réduisent peu avec la PAC hybride** - environ 40% -, et que ça coûte cher au consommateur car **deux abonnements sont nécessaires**, les factures ne baissent quasiment pas comparé à une chaudière classique.”³⁰

Par conséquent, plusieurs acteurs de la controverse, à savoir RTE et les associations promouvant le gaz, convergent concernant la pertinence d'opter pour les PACs hybrides pour le chauffage, en se reposant sur un réseau de gaz déjà en place et performant afin de tirer le meilleur des deux mondes.

■ Une alternative aux PACs : le verdissement du gaz

En plus du développement des PACs hybrides, les associations représentant les secteurs de l'énergie prônant un mix énergétique basé sur le gaz vert (comme Coénove) soulignent les progrès de l'industrie gazière pour décarboner son énergie et réduire ses émissions de GES. Le débat s'intensifie lorsque l'on aborde la question du biogaz, en particulier en considérant le cycle carbone de cette source d'énergie.

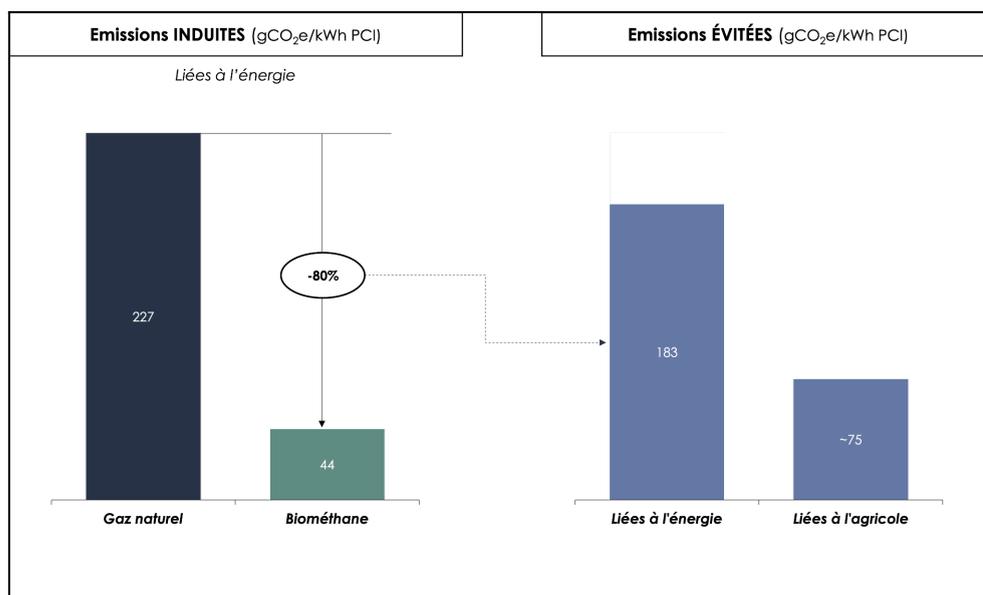
²⁸ Extrait de l'entretien avec une chercheuse chez RTE

²⁹ Rapport négaWatt 2022, “Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation”, page 47

³⁰ Extrait de l'entretien avec un membre de négaWatt

“Là où les énergies renouvelables et décarbonés, renouvelables solaires éoliens, c'est 10 grammes (équivalent CO₂), 10 à 20 grammes. Le nucléaire, c'est 10 grammes et les **gaz verts**, dont je vais vous parler ensuite, issus d'un méthaniseur, c'est **47 grammes**.”³¹

Le biogaz, issu de la biomasse, est souvent présenté comme une alternative verte, car il recycle le dioxyde de carbone (CO₂) issu de la décomposition de matières organiques. Concernant l'énergie, la production et la combustion biogénique du biométhane induisent 44 gCO₂e/kWh (voir figure suivante) en considérant l'ensemble du cycle de vie. La substitution du gaz naturel (227 gCO₂e/kWh) par le biométhane permet ainsi de réduire 80% des émissions de GES.



Comparaison des émissions de GES induites pour du gaz naturel et du biométhane.³²

Face à ces alternatives, la chaudière au gaz vert émerge comme une option intéressante. Elle combine l'utilisation de gaz produit à partir de sources renouvelables, comme la biomasse ou l'électrolyse de l'eau, avec une technologie de combustion plus propre. Cependant, la comparaison entre la chaudière au gaz vert et la PAC ne se limite pas uniquement à l'empreinte carbone. Elle englobe également des considérations économiques, sociales et infrastructurelles.

Malheureusement, le biogaz représente aujourd'hui 2% du gaz injecté dans le réseau français. Ainsi, augmenter la production de ce biogaz de manière drastique est un engagement fort pris par Engie qui a annoncé que le biogaz représenterait 20% de la consommation totale d'ici à 2030.³³ Cette décision inquiète les défenseurs de l'environnement comme le think tank The Shift Project. Selon eux, le risque de “lock-in”

³¹ Extrait de l'entretien avec un représentant de l'association Coénove

³² Infographie issue de Carbone4, “Biométhane et climat : font-ils bon ménage?”, <https://www.carbone4.com/publication-biomethane-climat>, août 2021

³³ Godelier M, “Chaudières à gaz contre pompes à chaleur : la bataille des chiffres fait rage”, La Tribune, 21 juin 2023.

technologique est fort et cela inciterait à installer des technologies dépendant du gaz sur une longue durée :

“Une réduction progressive de la consommation de gaz ne doit pas générer de verrouillage technologique, car **le risque est fort que la production de biogaz ne soit pas au niveau attendu en 2050** (le volume de biométhane devrait représenter de environ 100 TWh selon le scénario le plus « sobre » de l'ADEME à environ 340 TWh selon le très optimiste GRT Gaz, en passant par 120 TWh dans le Plan de transformation de l'économie française – PTEF du Shift Project ou environ 160 TWh dans le scénario AMS-SNBC 2019). Or la durée de vie d'une chaudière gaz est d'environ 20 ans, idem pour une chaudière/PAC gaz hybride. **Installer des technologies dépendantes du gaz au-delà de 2030 ne devra donc se faire qu'avec grande parcimonie.**”³⁴

L'industrie gazière, comprenant chauffagistes et producteurs de gaz, exprime des préoccupations quant à l'impact de la transition vers des solutions bas carbone sur ses activités. La montée en puissance des PACs pourrait entraîner une diminution de la demande de gaz traditionnel, mettant ainsi en péril près de 230 000 emplois. Il faut donc accompagner cette transition par une formation des chauffagistes afin qu'ils puissent installer ces nouveaux équipements de manière efficace et durable, souligne François Deroche, président de l'AFPAC.³⁵ Cette transition soulève également la question du réseau de gaz existant, dont le coût d'installation a été supporté par la collectivité. Un abandon précipité de ce réseau pourrait représenter un gaspillage d'investissements et créer des perturbations dans l'approvisionnement énergétique. Il faut donc verdir le gaz et non interdire les chaudières selon Jean-Charles Colas-Roy, président de Coénove.³⁶

Ainsi, la transition vers des solutions de chauffage bas carbone ne peut se faire sans prendre en compte les dimensions économiques et sociales. Il est nécessaire d'encourager des politiques et des stratégies qui favorisent une transition équilibrée, prenant en compte la diversité des solutions disponibles et préservant autant que possible les emplois existants. La coexistence de la PAC, du biogaz, de la chaudière au gaz vert et d'autres alternatives doit être envisagée de manière pragmatique pour assurer une transition énergétique réussie, à la fois efficace sur le plan environnemental et équitable sur le plan social.

On voit donc que l'industrie gazière fait son possible pour proposer des alternatives aux PACs et ne pas perdre tout son marché avec des technologies de transitions. De plus, elle souligne l'importance de continuer l'utilisation de ces infrastructures gazières qui ont coûté cher au contribuable et qui se verrait inutile dans le cas d'un passage à la PAC massive. Enfin, elle insiste aussi sur la menace que représente cette transition sur les emplois. Cependant, cette transition doit se faire de façon efficace sur le plan environnemental, social, infrastructurel et économique via des politiques publiques.

³⁴ The Shift Project, “Chaudière gaz : oui, il faut interdire leur installation dans la plupart des cas, estime le Shift Project”, Web, 31 juillet 2023

³⁵ M. Godelier, “Pompes à chaleur : comment le gouvernement veut faire émerger une grande filière française”, La Tribune, 26 septembre 2023

³⁶ C. Armand et J. Raynal, “Fin des chaudières à gaz : tout comprendre sur cette bombe sociale”, La Tribune, 8 juin, 2023

■ Quelles politiques publiques mettre en place pour aider au déploiement des PACs ?

Il est utile de s'attarder sur la rentabilité de la PAC, qui est souvent décriée comme excessivement chère et complexe. Une justification des coûts peut être un élément primordial pour les futurs consommateurs, et pour les décideurs politiques et économiques. Si il est impossible pour le consommateur de supporter seul les coûts de la transition vers la PAC, il en revient alors à l'état de fournir les incitations et aides suffisantes.

■ Installer une PAC, un investissement rentable pour le consommateur ?

Aujourd'hui, la pompe à chaleur est une solution très onéreuse pour la plupart des ménages. Lorsqu'il s'agit de choisir pour l'installation de leur futur mode de chauffage, de nombreux consommateurs sont encore refroidis par le prix d'installation. D'autres encore, sont mal orientés et finissent avec des installations de mauvaise facture ou totalement inadaptées. Se pose alors la question de l'action gouvernementale, qui peut être de nature multiple : subventions, incitations, prêts à taux zéro ou encore régulations.

Lorsque, en mai 2023, l'État a l'idée d'une loi visant à interdire à la vente les chaudières à gaz (à la suite de celles aux fioul en 2022), de vives réactions et inquiétudes chez les associations de consommateurs sont apparues. Elles se préoccupent de la réduction de la diversité des solutions de chauffage offertes, et du coût élevé de celles restantes. L'association de consommateurs de l'UFC-Que Choisir s'en fait le porte voix dans la presse :

“En outre, au regard des aides actuelles pour acquérir une pompe à chaleur aérothermique (eau-eau et air-eau), rendre obligatoire l'achat d'un tel équipement entraînerait un surcoût pour les ménages pouvant atteindre **7 000 €, par rapport à celui d'une nouvelle chaudière à gaz**, une somme que les consommateurs ne peuvent pas tous déboursier du jour au lendemain.”³⁷

Pour les foyers n'ayant pas accès aux réseaux de chaleur, il ne resterait que les condensateurs électriques, très gourmands en énergie, et les pompes à chaleur, dont le prix d'installation reste bien plus élevé que ses concurrents. L'UFC-Que Choisir annonce par exemple un coût en moyenne deux à trois fois plus important, en se basant sur une revue des prix réalisée par Soleval³⁸.

Par ailleurs, de nombreuses études scientifiques sur le sujet ont montré que la PAC, quelle que soit son type, est un dispositif nécessitant davantage d'investissement de capital³⁹. C'est l'une des conclusions que tire un article portant sur la rentabilité des solutions de chauffage bas carbone, appliqué au cas spécifique du Royaume-Uni :

³⁷UFC-Que Choisir, “L'UFC-Que Choisir dénonce un projet lacunaire, au bilan environnemental incertain, et potentiellement très coûteux pour les consommateurs”, juillet 2023

³⁸Soleval, “Se chauffer mieux et moins cher”, Juin 2019, p. 33, <https://www.soleval.org/ressources/item/se-chauffer-mieux-et-moins-cher.html>

³⁹ M. Ryland, 2022, Heating economics evaluated against emissions: An analysis of low-carbon heating systems with spatiotemporal and dwelling variations

“Cela montre que **des dépenses d'investissement élevées sont nécessaires** pour une solution optimale de pompes à chaleur dans la plupart des habitations, ce qui est probablement un facteur limitant pour de nombreux utilisateurs.”⁴⁰

Ce surcroît d'investissement peut-il être rentabilisé, face à d'autres plans de décarbonation du chauffage (réemploi de chaudières à gaz avec du biogaz, autres formes de chauffage à biomasse, convecteurs électriques) ?

La rentabilité à long terme peut se faire sur les coûts d'opérations, qui correspondent essentiellement aux coûts de l'énergie. Il est difficile de se prononcer sur ceux-ci tant ils sont sensibles aux conjectures économiques et politiques. Certains acteurs du monde de la recherche et de l'industrie s'essaient néanmoins à leur calcul, élaborant différents scénarios d'évolution du marché. Par exemple, le temps de retour sur investissement a été calculé, pour un remplacement du chauffage dans un bâtiment n'ayant pas accès aux solutions de réseau de chaleur :

“Les pompes à chaleur se sont révélées compétitives en termes de dépenses énergétiques [...] par rapport aux systèmes de chauffage utilisant l'électricité, le GPL ou le mazout. **La période de retour sur investissement**, hors subventions européennes et sur la base des prix moyens de l'électricité, du GPL et du fioul domestique entre 2012 et 2021, **était respectivement de 6,7-7,8 ans, 4,1-6,1 ans et 6,7-6,9 ans.**”⁴¹

Cependant, la rentabilité reste incertaine, et l'État doit donc y pourvoir pour produire les incitations suffisantes. Faute de moyens, il peut être tenté de prioriser certains investissements au détriment d'autres, et élaborer ainsi une stratégie d'aides. En lien avec les problématiques d'efficacité face au froid, de nombreux acteurs et travaux de recherche⁴² réaffirment l'importance des conditions climatiques dans la stratégie de chauffage à suivre. Là où le climat est plus rude, une pompe à chaleur hybride, ou géothermique, ou bien une alternative gaz se justifie. Au contraire, là où le climat est plus doux, une pompe à chaleur air-eau ou air-air est plus adaptée, et une pompe à chaleur réversible peut se justifier. D'autres encore⁴³ proposent de prioriser davantage les logements éloignés des infrastructures énergétiques (gaz, réseaux de chaleur, ...) lors de l'installation de PACs. C'est l'avis que partage une chercheuse dans le secteur, interrogée à ce sujet :

“Les acteurs ne perdent pas non plus de vue l'aspect régional de la contrainte climatique en France. Par exemple, **le Grand Est** est assez densément peuplé et continental. Il est sans doute alors intéressant d'opter pour **des solutions PAC hybrides** soulageant le réseau, en profitant de l'infrastructure Gaz déjà existante. Au contraire, **dans le Sud, la PAC réversible est plus intéressante** car elle fait office de climatisation en été.”⁴⁴

⁴⁰ M. Ryland, 2022, Heating economics evaluated against emissions: An analysis of low-carbon heating systems with spatiotemporal and dwelling variations

⁴¹ P. Gradziuk, 2022, Heat Pump Installation in Public Buildings: Savings and Environmental Benefits in Underserved Rural Areas

⁴² J. Zimny et al, 2015, Polish heat pump market between 2000 and 2013: European background, current state and development prospects

⁴³ Hannon, M. J. 2015. Raising the temperature of the UK heat pump market: Learning lessons from Finland.

⁴⁴ Extrait de l'entretien avec la chercheuse chez RTE

Il semble bien que l'action de l'État soit nécessaire dans tous les cas^{45,46} pour absorber l'investissement initial conséquent, afin de ne pas faire peser intégralement sur les ménages le poids de la transition.

■ Quelle politique publique adopter ? Comment inciter les consommateurs à l'achat et lancer le marché de la PAC ?

L'État propose, pour faire face aux coûts d'installation, plusieurs aides et subventions. Il y a d'abord les prêts à taux zéro, Eco-PTZ⁴⁷, qui s'appliquent aux opérations de rénovation énergétique du bâtiment et à l'investissement dans des solutions électrifiées de chauffage. Les ménages, sous conditions de revenus, peuvent aussi bénéficier des primes MaPrimeRénov'⁴⁸ pour les mêmes travaux.

Cependant, ces subventions et aides à l'investissement montrent aussi leurs limites. Il existe des abus, et une part non négligeable des financements accordés par l'Etat aboutissent dans des projets dont les vertus de sobriété énergétique sont douteuses (pompes à chaleur sous-dimensionnées dans des logements mal isolés, pompes à chaleur hybrides ou complétées par un autre mode de chauffage là où ce n'était pas réellement nécessaire ...). Cela a été dénoncé par la Cour des Comptes :

“Cette aide [MaPrimeRénov'] est ciblée sur des travaux « mono-geste », qui se limitent à une rénovation partielle, en ne traitant qu'un seul type de travaux (modification de l'isolation ou reprise de la ventilation ou changement du système de chauffage, sans traitement global), et n'est conditionnée par **aucun diagnostic énergétique préalable**, ni **aucune ambition de gain énergétique**. Ces travaux mono-gestes ont représenté **73 % des dossiers aidés**”⁴⁹

L'Etat contraint depuis peu les particuliers souhaitant bénéficier du dispositif MaPrimeRénov' à se faire accompagner par un tiers de confiance de l'espace France Rénov', comme le préconise l'avis public⁵⁰ rendu conjointement par les associations Négawatts et CLER.

Ainsi, de nombreuses installations de pompes à chaleur dans les dernières décennies se sont avérées de piètre facture (performances très limitées, COP étonnamment faible, ...). Les nombreuses subventions et aides mises en place attirent des professionnels peu scrupuleux, voire donnent lieu à des systèmes organisés d'arnaques. On dénombre ainsi de nombreuses plaintes :

“C'est la crainte des professionnels [les nouvelles annonces gouvernementales sur les PACs incitant au développement des fraudes], alors que la rénovation énergétique est déjà largement subventionnée et fait l'objet depuis plusieurs

⁴⁵ J. Rosenow, 2022, Heating up the global heat pump market, Nature Energy, Volume 7.

⁴⁶ Hannon, M. J. 2015. Raising the temperature of the UK heat pump market: Learning lessons from Finland.

⁴⁷ Ministère de l'économie, “Comment l'éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ) peut-il faciliter la rénovation énergétique de votre logement ?”

⁴⁸ Ministère de l'économie, “MaPrimeRénov' : la prime pour la rénovation énergétique”

⁴⁹ “Le soutien aux logements face aux évolutions climatiques et au vieillissement de la population”, Cour des comptes, Octobre 2023

⁵⁰ “Pompes à chaleur et rénovation performante, une combinaison gagnante”, négaWatt & CLER, avril 2023

années de nombreux comportements délictueux. **L’an dernier, plus de 10 000 plaintes et signalements ont été enregistrés** sur la plateforme SignalConso [...].”⁵¹

Pour garantir aux particuliers l’accès à des prestations de bonne qualité, l’État a mis en place les dispositifs de certificat d’économie d’énergie (CEE)⁵², qui sont décernés aux installateurs/rénovateurs et aux projets qu’ils mènent. Il est allé plus loin, en rendant nécessaire l’obtention d’un tel certificat pour accéder aux primes et prêts gouvernementaux.

Enfin, le prix relativement élevé de la pompe à chaleur peut être remis en question. Le marché de l’installation et de l’entretien du chauffage a été chamboulé par l’avènement de la PAC, et le nombre de professionnels habilités vient à manquer⁵³. D’autres acteurs de la fourniture de PACs peuvent aussi profiter de leur position avantageuse pour gonfler les prix. Son prix reflète-t-il le coût réel d’une telle installation ? Les industriels profitent-ils de l’appel d’air et des subventions liés à l’ambition gouvernementale ? C’est ce que pense par exemple un membre de négaWatt, avec lequel nous avons eu l’opportunité de nous entretenir :

“Le marché dérive totalement à cause d’un **effet d’opportunisme** : il y a beaucoup de demande pour peu d’offres, et les prix s’envolent”⁵⁴

On peut alors se demander s’il est possible de baisser les prix en augmentant la disponibilité en professionnels certifiés et en réglementant davantage le marché ? Le membre de négaWatt, interrogé sur la question, poursuit :

“Il faudrait **plafonner les prix** en fonction du type de prestation réalisée (matériaux, temps de pose, surface, etc.)”⁵⁵

La hausse des prix déjà très importants n’est qu’une partie des problèmes et des freins qui peuvent peser sur l’approvisionnement en PACs, amené à augmenter massivement. Il faut aussi s’intéresser aux capacités de production de pompes à chaleur, et à la souveraineté sur ces capacités. Enfin, comme il a déjà été évoqué auparavant, la disponibilité en professionnels qualifiés pour les installer et les entretenir est une question qui se pose de plus en plus.

■ Comment développer une filière “made in France” de la PAC ?

Les objectifs du gouvernement sont d’atteindre la production annuelle d’un million de PACs en France en 2027 (PAC air/eau ou sol/eau, pour remplacer les chaudières). C’est trois fois plus qu’actuellement : l’Europe est bien plus compétente dans le chauffage à combustion, là où les composants électroniques, utilisés pour la fabrication de PACs, proviennent en grande majorité d’Asie. L’enjeu est donc de relocaliser la production en développant les filières techniques et industrielles sur le territoire national.

⁵¹ J.-C. Bourbon, “Pompes à chaleur : attention aux arnaques”, La Croix, 3 octobre 2023

⁵² Ministère de l’écologie, “Dispositif des Certificats d’économies d’énergie”

⁵³ M. Lalanne, “Le déficit d’artisans ralentit la rénovation énergétique du bâtiment”, Les Echos, 4 octobre 2023

⁵⁴ Extrait de notre entretien avec le membre de négaWatt

⁵⁵ Extrait de notre entretien avec le membre de négaWatt

La PAC nécessite également des visites de contrôle régulières pour s'assurer qu'elle fonctionne bien (et donc que son rendement énergétique est bon) et qu'il n'y a pas de fuites de liquides frigorigènes. Des centres de formation doivent donc voir le jour, pour former les 30 000 nouveaux installateurs avec la qualification RGE (Reconnu Garant de l'Environnement) que réclament Emmanuel Macron, toujours d'ici 2027.

■ Un manque de compétences actuellement..

On compte aujourd'hui 15 fabricants de PACs en France - dont 3 seulement sont français - répartis sur 32 sites de production⁵⁶. Différents acteurs du secteur ont réagi à aux objectifs annoncés par Emmanuel Macron, tels que l'AFPAC ou des fabricants de PACs. Selon eux, si l'objectif absolu d'un million de PACs annuelles est réaliste et réjouissant, l'état actuel de l'industrie française n'est pas à la hauteur :

“Avoir un marché d'un million de pompes à chaleur par an d'ici 2030, c'est une ambition importante et réaliste, partagée par la filière [...] mais sans tenir compte de l'origine des PACs et pas d'ici 2027 [...]. **Une usine, ça ne se construit pas en quelques mois.**”⁵⁷

assure un représentant de l'AFPAC. Même constat chez le fabricant allemand Vaillant Group, un des leaders européens du chauffage et qui produit notamment des PACs pour le marché français. Il s'interroge également sur l'importance future de la demande :

“Le million de pompes à chaleur, c'est faisable, mais en 2027 je ne pense pas, au vu des capacités de production en France. Par ailleurs, la question sera celle du marché, qui ne sera peut-être pas à 1 million de PACs installées en 2027 ; mais nous exportons.”⁵⁸

L'association Coénove, moins optimiste, rappelle que si la France compte bien des sites de production, environ 50% des pièces viennent d'Asie⁵⁹.

“J'attire votre attention sur la **différence entre produire et assembler**. [...] Sur la pompe à chaleur, les cartes-mères et les compresseurs, c'est des technologies où **les asiatiques ont tellement d'avance** qu'il n'est pas du tout sûr qu'on réussisse à intégrer ces technologies. Et c'est une très grosse partie des pompes à chaleur.”⁶⁰

Favoriser trop rapidement les PACs au détriment des autres modes de chauffage aurait alors un double effet négatif. Premièrement, notre empreinte carbone augmenterait en raison de la part des énergies fossiles dans les moyens de productions asiatiques, et notamment chinois. Coénove interroge : une pompe à chaleur dont la moitié des composants sont fabriqués puis transportés depuis l'Asie est-elle plus bas carbone qu'une

⁵⁶ C. De Sèze, “Un million de pompes à chaleur par an ? « Attention à ne pas vouloir aller plus vite que la musique »”, 20Minutes, 27 septembre 2023

⁵⁷ C. De Sèze, “Un million de pompes à chaleur par an ? « Attention à ne pas vouloir aller plus vite que la musique »”, 20Minutes, 27 septembre 2023

⁵⁸ F. Stassi, “La filière française de la pompe à chaleur juge les objectifs d'Emmanuel Macron difficiles à tenir”, L'Usine Nouvelle, 16 octobre 2023

⁵⁹ ADEME, “Etat des lieux des filières de la pompe à chaleur : Marché, emplois, coûts - Situation 2019”, librairie.ademe.fr/cadic/7231/marche_emplois_couts_filieres_pac_2022_rf.pdf, p. 52

⁶⁰ Extrait de notre entretien avec un représentant de l'association Coénove

chaudière à gaz produite intégralement en Europe ? D'autant que le secteur du chauffage à gaz compte miser dans les prochaines années sur le biogaz français, pour remplacer les gaz fossiles importés⁶¹. Deuxième effet négatif : les industriels asiatiques seraient favorisés par rapport aux industriels européens, bien plus experts en technologies de combustion qu'en électronique. Or, la production de chaudières à gaz est à 90% européenne. C'est ainsi 230 000 emplois en France qui seraient concernés⁶².

■ ... mais un certain potentiel de développement ?

Malgré ce manque actuel de savoir-faire, la filière française est en avance sur ses concurrents européens. La France est le premier consommateur de PACs en Europe avec 3 millions d'unités vendues en 2022, soit une augmentation de 39% par rapport à 2021. Mais c'est aussi un des premiers producteurs avec 2 900 PACs géothermiques et 347 000 PACs air/eau mises sur le marché en 2022⁶³. Pour suivre la demande en croissance permanente depuis plusieurs années, certaines entreprises françaises bien implantées se préparent à investir dans de nouvelles capacités. Ainsi Atlantic, numéro deux du marché en Europe, va investir 30 millions d'euros dans l'extension de son site de Billy-Berclau (Pas-de-Calais) et y installer une école de formation de techniciens et installateurs⁶⁴. Du côté du groupe Intuis, on cherche à relocaliser au maximum la production des composants : l'acier et le cuivre viennent déjà de France (ArcelorMittal), les ventilateurs de France ou d'Allemagne, les échangeurs de France ou d'Italie. Le groupe cherche désormais à augmenter la part de compresseurs en provenance de Slovénie pour remplacer les compresseurs asiatiques actuellement utilisés. Intuis revendique ainsi 80% de composants d'origine européenne dont plus de 50 % français, ce qui lui a permis d'obtenir le label Origine France Garantie.⁶⁵

“La France est de loin le **leader européen de la production de PACs air/eau** [et] représente plus de 50% des unités vendues en France en 2021.”⁶⁶

note ainsi l'AFPAC. L'industrie française se démarque également par l'innovation, avec par exemple les groupes Intuis et Panasonic qui ont tous deux adopté un nouveau gaz frigorigène, le R290, qui émet moins de particules que les autres fluides.⁶⁷

Tous ces éléments assurent à la France une très bonne place dans le marché européen de la PAC, marché en constante croissance depuis plus de dix ans.

⁶¹ Extrait de notre entretien avec un représentant de l'association Coénove

⁶² Question écrite n°06196 de P. Bonnacarrère dans le JO Sénat, “Evolution de la filière gaz”, publication du 6 avril 2023, p. 2317. <https://www.senat.fr/questions/base/2023/qSEQ230406196.html>

⁶³ AFPAC, “Le poids de la filière PAC en France - Chiffres année 2022”, www.afpac.org/file/238654/

⁶⁴ F. Stassi, “Dix chiffres pour comprendre le marché français de la pompe à chaleur”, L'Usine Nouvelle, 26 septembre 2023

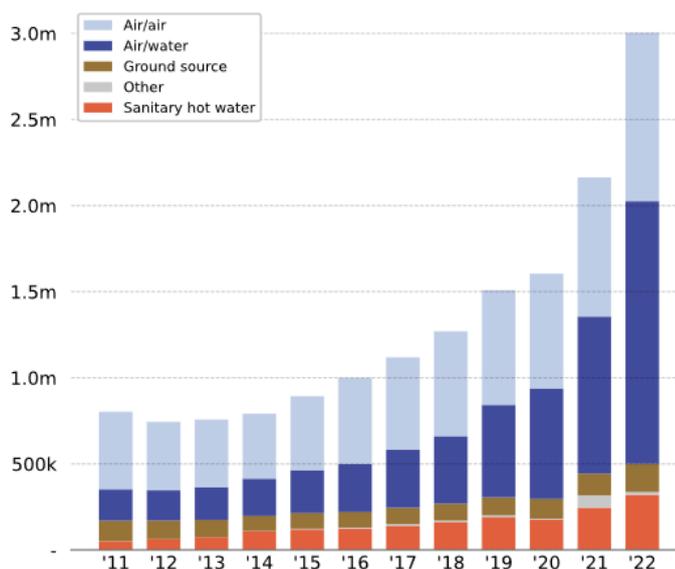
⁶⁵ F. Stassi, “La filière française de la pompe à chaleur juge les objectifs d'Emmanuel Macron difficiles à tenir”, L'Usine Nouvelle, 16 octobre 2023

⁶⁶ M. Godelier “Chaudières à gaz contre pompes à chaleur : la bataille des chiffres fait rage”, La Tribune (France) no.7654, 21 juin 2023

⁶⁷ F. Stassi, “La filière française de la pompe à chaleur juge les objectifs d'Emmanuel Macron difficiles à tenir”, L'Usine Nouvelle, 16 octobre 2023

“Le ratio import/export reste équilibré malgré la demande croissante de pompes à chaleur sur le territoire. En effet, on constate une certaine force d’innovation et un dynamisme important sur les travaux R&D français qui permettent de tempérer les forces de frappes commerciales asiatiques, notamment via la démocratisation de technologies types PAC air/eau, dont la fabrication n’est pas entièrement délocalisée.”⁶⁸

révèle ainsi le rapport 2022 de l’ADEME sur l’état de la filière française de PACs. Considérée comme une filière stratégique par l’Union Européenne pour réduire notre impact carbone, la PAC bénéficie de politique favorable dans tous les pays de l’UE. Ce facteur cumulé avec l’amélioration de son efficacité énergétique et la baisse de son coût ont fait passer les ventes annuelles de la PAC de 500 000 en 2006 à 3 millions en 2022, avec notamment une augmentation de 39% de 2021 à 2022⁶⁹.



Développement des ventes par type de PACs de 2011 à 2022 (les PACs air/air sont celles ayant une fonction de chauffage principal)⁷⁰

On estime ainsi à 5 millions le nombre de PACs qui seront vendues par an en 2030 en Europe, avec notamment le développement des marchés allemand, italien et français en forte croissance, et anglais aujourd’hui quasi-inexistant.⁷¹ Le rapport 2022 de l’ADEME sur l’état de la filière française de PACs, pourtant positif sur l’état actuel de l’industrie française de la PAC, souligne cependant que celle-ci n’est pas encore assez robuste pour soutenir la forte croissance nécessaire. Les mesures gouvernementales en faveur de la PAC ont depuis 2018 directement entraîné une hausse de la demande en Europe, que les entreprises peinent à satisfaire :

⁶⁸ ADEME, “Etat des lieux des filières de la pompe à chaleur : Marché, emplois, coûts - Situation 2019”, librairie.ademe.fr/cadic/7231/marche_emplois_coouts_filiere_pac_2022_rf.pdf, p. 52

⁶⁹ EHPA, “European Heat Pump Market and Statistics Report 2023”, www.ehpa.org/news-and-resources/publications/european-heat-pump-market-and-statistics-report-2023/, pp. 7-8

⁷⁰ Infographie issue de EHPA, “European Heat Pump Market and Statistics Report 2023”, www.ehpa.org/news-and-resources/publications/european-heat-pump-market-and-statistics-report-2023/

⁷¹ “Le défi de bâtir une filière française des pompes à chaleur”, AFP, 25 septembre 2023

“Face à cette forte demande, une pénurie de compétences et de profils se fait sentir sur l’ensemble des activités de la filière, d’autant que la PAC requiert des connaissances, compétences et techniques spécifiques auxquelles il est nécessaire d’être formé. [...] Par ailleurs, le manque de compétences qualifiées pourrait être un frein à l’innovation et à la démocratisation de nouvelles technologies au sein de la filière.”⁷²

Pour inciter les entreprises à investir dans la PAC, le gouvernement français a pris plusieurs mesures. D’abord, un crédit d’impôts à hauteur de 20 à 25% de l’enveloppe de projets pour les technologies air/air comme air/eau. Cette aide devrait représenter 300 millions d’euros d’investissement. Ensuite, l’Etat s’engage à proposer du foncier aux entreprises qui accélèrent leurs investissements, ainsi qu’à leur proposer un suivi administratif personnalisé. Cette mesure aurait déjà permis de convaincre le groupe Atlantic d’investir en France plutôt qu’en Europe de l’Est. Enfin, une enveloppe de 30 millions d’euros devrait être versée par le plan France 2030 pour la R&D, afin d’accélérer l’innovation⁷³.

Les investissements à faire pour développer la filière sont conséquents, et il reste à convaincre les utilisateurs de se tourner vers cette solution bas-carbone qui reste malgré tout bien plus chère que les autres modes de chauffage. Il est cependant légitime, au vu des investissements gouvernementaux passés et futurs, de continuer à questionner le bilan écologique de la PAC.

■ Quel impact écologique pour la PAC en dehors des émissions carbonées ?

L’impact écologique de la pompe à chaleur en tant qu’appareil électronique volumineux vaut le coup d’être évoqué, au-delà de la simple consommation électrique du moteur, même s’il s’agit d’une question subsidiaire quant à son importance.

■ Les fluides frigorigènes

Premièrement, les fluides frigorigènes utilisés dans les PACs sont un sujet de préoccupation récurrent. Les premières pompes à chaleur fonctionnaient avec de l’ammoniac. Ce gaz présente la meilleure performance frigorigène possible, mais il est toxique et inflammable, raison de son abandon progressif au début du XX^e siècle. A partir des années 1930, l’ammoniac est remplacé par les gaz dits CFC, responsables du fameux trou dans la couche d’ozone. Ces derniers sont interdits depuis le protocole de Montréal de 1987. Ces gaz avaient un PRP⁷⁴ de l’ordre de 10 000⁷⁵. Ils ont été remplacés par les gaz

⁷² ADEME, “Etat des lieux des filières de la pompe à chaleur : Marché, emplois, coûts - Situation 2019”, https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/7231/marche_emplois_coouts_filiere_pac_2022_rf.pdf, p. 55

⁷³ M. Godelier, “Pompes à chaleur : comment le gouvernement veut faire émerger une grande filière française”, La Tribune (France) no. 7712, 26 septembre 2023

⁷⁴ Potentiel de Réchauffement Planétaire : mesure évaluant la capacité d’un gaz à contribuer au réchauffement climatique par rapport à celle du dioxyde de carbone (CO₂).

⁷⁵ Ministère de la transition écologique, “Substances à impact climatique, fluides frigorigènes”, <https://www.ecologie.gouv.fr/substances-impact-climatique-fluides-frigorigenes>, 8 novembre 2023.

HFC, qui n'attaquent pas la couche d'ozone mais contribuent encore fortement au réchauffement climatique (PRP de l'ordre de 1 000⁷⁶). Ce fort potentiel de réchauffement suscite des craintes quant aux conséquences de potentielles fuites de gaz qui pourraient profondément déséquilibrer l'impact écologique des PACs en contribuant significativement au réchauffement climatique. Cependant, un membre de l'association négaWatt souligne que de gros progrès ont été faits tant dans le domaine des gaz frigorigènes que dans les manières d'éviter les fuites. Les fuites de gaz frigorigènes sont désormais quasi négligeables, et ne posent pas de problème sanitaire particulier, à condition d'effectuer une maintenance annuelle de l'installation. De plus, de nouvelles générations de gaz frigorigènes font leur apparition afin de remplacer les gaz HFC. De nos jours, les gaz dits HFO sont prometteurs, avec un PRP de 4. L'ammoniac fait également son retour pour les installations de grande taille. Certaines technologies utilisent également du CO₂ (PRP de 1, par définition) ou du propane (PRP de 3). Cependant, ces nouvelles technologies mettront probablement plusieurs années avant d'être industrialisées et produites à grande échelle, toujours selon un membre de négaWatt. Lorsque l'appareil est en fin de vie, le gaz est récupéré presque sans perte, afin d'être réutilisé. Ainsi, la question des gaz frigorigènes est relativement marginale dans l'étude de cette controverse.

■ Le recyclage

La question du recyclage des composants des PACs et leur analyse en cycle de vie est d'une importance capitale. En effet, la durabilité réelle de ces systèmes dépend de leur capacité à être recyclés et de leur impact global tout au long de leur existence, de la production à l'élimination. Une meilleure gestion des déchets électroniques et une conception axée sur le recyclage peuvent contribuer à réduire l'empreinte environnementale de la technologie pompe à chaleur. Comme évoqué ci-dessus, les gaz frigorigènes nécessitent un traitement particulier afin d'être récupérés et recyclés, et non libérés dans l'environnement, avec l'impact néfaste que l'on connaît. Il convient donc de procéder à la dépose et au recyclage d'une vieille pompe à chaleur en s'adressant à un professionnel du secteur⁷⁷. Si elle n'est pas réparable, la PAC sera dépolluée et recyclée. Une fois le gaz frigorigène retiré, la pompe à chaleur pourra être recyclée de manière similaire à n'importe quel appareil électronique. Pour le moment, le volume des PACs sur le marché ne semble pas suffisant pour dédier une filière de recyclage à cet équipement. Toutefois, au regard du potentiel de croissance de la filière, cette possibilité pourrait devenir pertinente⁷⁸.

■ Les nuisances sur l'environnement

Enfin, les PACs ne sont pas exemptes de certaines nuisances sur l'environnement dans lequel elles sont implantées. Sur un plan esthétique d'abord, installer une PAC à air sur une façade est relativement disgracieux, voire même interdit quand la façade en question est dans une zone urbaine dont l'architecture est protégée par un classement aux

⁷⁶ Ministère de la transition écologique, "Substances à impact climatique, fluides frigorigènes", <https://www.ecologie.gouv.fr/substances-impact-climatique-fluides-frigorigenes>, 8 novembre 2023.

⁷⁷ AFPAC, "La Pompe à Chaleur : Au prisme de l'économie circulaire", <https://www.afpac.org/file/214010/>, 1 janvier 2020.

⁷⁸ AFPAC, "La Pompe à Chaleur : Au prisme de l'économie circulaire", <https://www.afpac.org/file/214010/>, 1 janvier 2020.

monuments de France. Par exemple, on a du mal à imaginer pouvoir massivement poser des pompes à chaleur à air sur les façades des immeubles haussmanniens à Paris. Au-delà du droit d'installer ou non une PAC sur son logement, l'installation d'un élément disgracieux dans le paysage pourrait être une source de conflits de voisinage, si cet élément est visible depuis la rue. Par ailleurs, l'unité intérieure de chauffage (le "split" pour une PAC air/air) est relativement disgracieuse, particulièrement dans un intérieur ancien. Pour les PACs air/eau, la température de chauffage de l'eau n'est pas suffisamment élevée pour être réinjectée dans un système de chauffage avec des radiateurs en fonte, rendant ces derniers caduques, selon un membre de l'association Coénove. La pertinence esthétique et fonctionnelle de la PAC pour des logements anciens peut donc être questionnée.

De plus, une pompe à chaleur à air représente une nuisance sonore du fait de son puissant ventilateur, qui peut poser problème tout d'abord aux habitants de l'unité d'habitation, mais également dans le cadre de relations de voisinage immédiat. Le bruit émis par l'unité extérieure d'une pompe à chaleur est compris entre 45 et 65 décibels (dB)⁷⁹, ce qui correspond à peu près au niveau sonore d'une conversation. S'il est donc couvert en journée par les bruits du quotidien, ce bourdonnement peut s'avérer gênant la nuit. On imagine que dans le cas de l'équipement d'un immeuble entier, ce problème peut être additif et atteindre des niveaux sonores plus importants encore.

⁷⁹ Engie, "Quel bruit fait une pompe à chaleur et comment le réduire ?", <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/pompe-a-chaleur-bruit.html>, 16 décembre 2022.

■ Conclusion

Le présent travail a cherché à analyser et présenter les enjeux qui sous-tendent le débat autour des bénéfices écologiques des pompes à chaleur. Étant donné les forts débats qu'elle suscite, cette question se révèle fondamentale même si elle fait partie d'un plus grand ensemble de questions soulevées. L'issue du débat sera donc déterminante pour l'avenir du système de chauffage en France et en Europe, surtout dans le cadre de son implantation massive prévue dans les années à venir. Ce travail s'est d'abord attaché à présenter les mécanismes qui ont conduit à l'émergence de la controverse, pour ensuite décrire les points de débat et les arènes de la controverse, et enfin montrer comment cette dernière s'inscrit dans un débat plus général sur les conséquences sociales, écologiques et économiques des pompes à chaleur.

L'idée récente du gouvernement concernant la potentielle interdiction des chaudières à gaz a déclenché des débats houleux entre industrie gazière, gouvernement, associations œuvrant pour la transition écologique et associations défendant les consommateurs. En effet, l'industrie gazière, craintive de la potentielle perte de ses parts de marchés, met l'accent sur le bilan écologique mitigé de la PAC, la potentielle incapacité de nos infrastructures électriques à assumer son implantation massive, ainsi que ses mauvaises performances par températures extérieures froides. Les associations pour la transition écologique arguent que cette transition doit se faire avec un chauffage à la PAC car elle présente un bilan carbone indéniablement meilleur que les chaudières à gaz. Cependant, elles insistent sur le fait qu'une part de nos efforts doit aussi se concentrer sur la rénovation thermique préalable des logements. L'industrie gazière et les associations défendant un mix énergétique fondé sur le gaz vert soulignent les progrès effectués dans le milieu pour verdifier leur énergie. Ils proposent aussi des alternatives aux PACs tels que les PACs hybride et les chaudières au biogaz comme solution de transition.

De plus, installer une PAC demande un budget important que certains ménages ne peuvent pas s'autoriser. C'est pour cela que certaines associations de consommateurs ont appelé le gouvernement à revoir sa copie afin d'éviter la mise à mal du pouvoir d'achat des français dans un contexte d'inflation. En guise de réponse, le gouvernement a mis en place diverses aides et primes, ainsi qu'une politique de fabrication française de la PAC avec des financements aux entreprises spécialisées pour qu'elles continuent à se développer en France.

Finalement, nous avons vu que la PAC pouvait poser d'autres problèmes plus pratiques tels que l'impact écologique des fluides frigorigènes, notre capacité à les recycler, ainsi que des nuisances esthétiques et sonores.

En somme, il semble difficile de penser qu'à court terme la PAC s'imposera dans les ménages français. Malgré tout, elle semble indispensable pour réussir la transition écologique.

■ Remerciements

Nous vous remercions pour l'attention que vous avez pu apporter à la lecture de ce rapport. Nous souhaitons adresser nos vifs remerciements à Alexandre Mallard et Wilfried Coussieu pour leur disponibilité et leurs conseils avisés lors de la réalisation de ce travail. Nous souhaitons, de la même façon, remercier toutes les personnes qui ont accepté de nous aider à construire cet article en répondant à nos questions.

■ Matériel et méthodes

Le présent travail résulte tout d'abord d'une analyse de la presse nationale, d'articles scientifiques et différents rapports d'experts de l'association négawatt, de RTE, de l'ADEME, de l'IEA et de l'Assemblée Nationale.

La base de données Europresse a été consultée au moyen de la recherche "LEAD= "pompe à chaleur" & écolo*" pour trois périodes de temps différentes : entre 2005 et 2012, entre 2018 et 2020 et enfin après 2021. Les corpus de documents recueillis pour chaque équation ont fait l'objet d'une analyse sémantique avec la plateforme CorTexT. Les regroupements de termes nous ont permis d'identifier de nouveaux acteurs de la controverse et de nouvelles notions en lien avec les débats autour de la pompe à chaleur. Notre étude bibliographique a été complétée par la lecture et l'analyse d'articles scientifiques issus du domaine de l'ingénierie, de l'énergie et des sciences de l'environnement, mais également par une littérature plus institutionnelle formée de plusieurs rapports publics portant sur l'évolution et les recommandations d'utilisation et d'implémentation des pompes à chaleur en France. Pour ce faire, d'autres bases de données plus appropriées (Scopus, Web of Science) ont été consultées avec un équation de recherche similaire : "heat pump" or "heat pumps" puis filtré les domaines de la controverse (ingénierie de l'énergie, écologie, politiques publiques,...). Cette recherche faite sur les articles scientifiques depuis 2010 nous a permis de cerner différents nœuds de la controverse, qui nous ont par la suite servis à construire les parties de notre article et cibler nos axes de recherche. L'observation de la quantité d'articles au cours des 30 dernières années nous a également permis de localiser la controverse dans le temps et la mettre en lien avec les différents acteurs et événements de ces dernières années.

Ce travail initial a permis l'élaboration de grilles de questions adressées à quatre acteurs de la controverse analysée, au cours d'entretiens semi-directifs. Les témoignages de ces acteurs, qui occupent tous des fonctions différentes, ont été retranscrits puis analysés, et des extraits pertinents ont été exploités dans ce document. Nous avons eu l'occasion d'échanger avec :

- un professeur au Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes à l'Ecole des Mines de Paris - PSL ;
- un des co-rédacteurs du rapport négaWatt "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation" et membre de l'association;
- un représentant de l'association Coénove, association prônant un mix énergétique basé sur le gaz vert;
- une chercheuse chez RTE, le gestionnaire du réseau de transport énergétique français.

Il convient toutefois de souligner que notre enquête a été effectuée dans un laps de temps assez restreint - trois mois - et que le corpus de témoignages aurait gagné à être enrichi.

■ Références

■ Articles de presse généraliste / presse professionnelle

Godelier M. (2023, 26, 09). "Pompes à chaleur : comment le gouvernement veut faire émerger une grande filière française". La Tribune. [Consulté le 10/10/2023]

Godelier M. (2023, 21, 06). "Chaudières à gaz contre pompes à chaleur : la bataille des chiffres fait rage". La Tribune. [Consulté le 21/01/2023]

Armand C et Raynal J. (2023, 08, 06) "Fin des chaudières à gaz : tout comprendre sur cette bombe sociale". La Tribune. [Consulté le 10/10/2023]

Stassi F. (2023, 16, 10), "La filière française de la pompe à chaleur juge les objectifs d'Emmanuel Macron difficiles à tenir". L'Usine Nouvelle. [Consulté le 13/01/2024]

Stassi F. (2023, 26, 09), "Dix chiffres pour comprendre le marché français de la pompe à chaleur". L'Usine Nouvelle. [Consulté le 13/01/2024]

De Sèze C.(2023, 27, 09), "Un million de pompes à chaleur par an ? « Attention à ne pas vouloir aller plus vite que la musique »". 20Minutes. [Consulté le 13/01/2024]

M. Lalanne. (2023, 04, 10), "Le déficit d'artisans ralentit la rénovation énergétique du bâtiment". Les Echos.

J.-C. Bourbon. (2023, 03, 10), "Pompes à chaleur : attention aux arnaques". La Croix.

(2023, 25, 09), "Le défi de bâtir une filière française des pompes à chaleur". AFP. [Consulté le 13/01/2024]

■ Sites Web

Association française pour la pompe à chaleur (AFPAC). Web. Disponible sur <https://afpac.org>. [Consulté le 15/11/2023]

Ekwateur. (2023, 02 août), "Interdiction chaudière gaz : tout ce qu'il faut savoir". Web. Disponible sur <https://ekwateur.fr/blog/marche-de-l-energie/interdiction-chaudiere-gaz/> . [Consulté le 30/12/2023]

Ministère de la Transition énergétique. (2022, 21 juillet). "Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)". Web. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc#:~:text=Introduite%20par%20la%20Loi%20de,lutter%20contre%20le%20changement%20climatique> [Consulté le 12/12/2023]

Chesnais E, (2023, 6 juin) "Le gouvernement pourrait pénaliser 40 % des ménages !", UFC-Que Choisir, Disponible sur <https://www.quechoisir.org/actualite-interdiction-des-chaudieres-a-gaz-le-gouvernement-pourrait-penaliser-40-des-menages-n108178/#:~:text=Le%2022%20mai%20dernier%2C%20malgr%C3%A9,%C3%A0%20gaz%20dans%20l'existant.> [Consulté le 30/11/2023]

The Shift Project. (2023, 31, 07). "Chaudière gaz : oui, il faut interdire leur installation dans la plupart des cas, estime le Shift Project". Disponible sur <https://theshiftproject.org/article/decarbonation-du-batiment-concertation-publique-juillet2023/>. [Consulté le 21/01/2023]

Olivier A. (2022, 20, 01). "Pétrole, charbon, nucléaire : quel est le mix énergétique des pays de l'UE ?". Web. Touteurope.eu. Disponible sur <https://www.touteurope.eu/economie-et-social/le-mix-energetique-des-etats-membres-de-l-union-europeenne/>. [Consulté le 16/01/2024]

Conseil de l'Union Européenne. (2023, 10 mai). "Infographie - Comment l'électricité de l'UE est-elle produite et vendue ?". Disponible sur <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/how-is-eu-electricity-produced-and-sold/>. [Consulté le 18/01/2023]

Ministère de la transition écologique, (2023, 8 novembre). "Substances à impact climatique, fluides frigorigènes". Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/substances-impact-climatique-fluides-frigorigenes>. [Consulté le 19/01/2024]

Engie, (2022, 16 décembre). "Quel bruit fait une pompe à chaleur et comment le réduire ?" Disponible sur <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/pompe-a-chaleur-bruit.html>. [Consulté le 19/01/2024]

UFC-Que Choisir. (juillet 2023). "L'UFC-Que Choisir dénonce un projet lacunaire, au bilan environnemental incertain, et potentiellement très coûteux pour les consommateurs". Disponible sur <https://www.quechoisir.org/action-ufc-que-choisir-interdiction-des-chaudieres-a-gaz-l-ufc-que-choisir-denonce-un-projet-lacunaire-au-bilan-environnemental-incertain-et-potentiellement-tres-couteux-pour-les-consommateurs-n109126/>. [Consulté le 19/01/2024]

Ministère de l'économie. (2024, 2 janvier). "Comment l'éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ) peut-il faciliter la rénovation énergétique de votre logement ?". Disponible sur <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/eco-pret-a-taux-zero-ptz-renovation-performance-energetique>. [Consulté le 19/01/2024]

Ministère de l'écologie. (2024, 12 janvier) Dispositif des Certificats d'économies d'énergie". Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/dispositif-des-certificats-deconomies-denergie> [Consulté le 19/01/2024]

Ministère de l'économie. (2023, 23 juin) "MaPrimeRénov' : la prime pour la rénovation énergétique". Disponible sur <https://www.economie.gouv.fr/particuliers/prime-renovation-energetique> [Consulté le 19/01/2024]

Ministère de la transition électrique. (2022) chiffres clés logement. Disponible sur <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-logement-2022/29-consommation-denergie> [Consulté le 18/01/2024]

■ Articles de revue scientifique

Ryland M. (2022). Heating economics evaluated against emissions: An analysis of low-carbon heating systems with spatiotemporal and dwelling variation, *Energy and Buildings*, Volume 277.

Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822007320>

Gradziuk P. (2022). Heat Pump Installation in Public Buildings: Savings and Environmental Benefits in Underserved Rural Areas, *Energies* 2022, Volume 15. Disponible sur <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/7903>

Zimny J et al. (2015). Polish heat pump market between 2000 and 2013: European background, current state and development prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume. 48(C). Disponible sur <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v48y2015icp791-812.html>

Hannon, M J. (2015). Raising the temperature of the UK heat pump market: Learning lessons from Finland, *Energy Policy*, Volume 85. Disponible sur

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515002347>

Rosenow J.(2022). Heating up the global heat pump market, *Nature Energy*, Volume 7. Disponible sur <https://www.nature.com/articles/s41560-022-01104-8>.

■ Littérature grise

Gasquet I, Dufournet C et Sidler O, association négaWatt. (2022). *Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation*. 60 pages. [Consulté le 10/10/2023]

ADEME. (2019). *Se chauffer mieux et moins cher*. 35 pages.

<https://www.soleval.org/ressources/item/se-chauffer-mieux-et-moins-cher.html>.

[Consulté le 19/01/2024]

RTE, Ademe. (2020). *Réduction des émissions de CO2, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?*. 268 pages. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/etude-ademe-rte-decarboner-chauffage-dans-secteur-du-batiment-lhorizon-2035> [Consulté le 10/10/2023]

RTE. (2019) *Schéma décennal de développement du réseau*. 462 pages. Disponible sur : <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau> [Consulté le 17/01/2024]

Negawatt, CLER. (2023). *Pompes à chaleur et rénovation performante, une combinaison gagnante*. 15 pages.

https://negawatt.org/IMG/pdf/comprendre_pompes-a-chaleur-et-renovation-performante_une-combinaison-gagnante.pdf. [Consulté le 19/01/2024]

Cour des comptes. (2023). *Le soutien aux logements face aux évolutions climatiques et au vieillissement de la population*. 82 pages. Disponible sur :

<https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/20231026-CEC-Soutien-aux-logements-face-aux-evolutions-climatiques.pdf>. [Consulté le 19/01/2024]

AFPAC. (2020). *La Pompe à Chaleur : Au prisme de l'économie circulaire*, 86 pages. Disponible sur : <https://www.afpac.org/file/214010>. [Consulté le 19/01/2024]

IEA (2022). *The Future of Heat Pumps*, IEA, Paris, disponible sur : <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>, License: CC BY 4.0 [Consulté le 19/01/2024]

Nowak T. et Westring P., EHPA. (2023). *European Heat Pump Market and Statistics Report 2023*, Disponible sur : <https://www.ehpa.org/news-and-resources/publications/european-heat-pump-market-and-statistics-report-2023/>. [Consulté le 17/01/2024]

ADEME, le Centre Technique et Scientifique du Bâtiment, In Extenso Innovation Croissance. (2021). *Etat des lieux des filières de la pompe à chaleur : Marché, emplois, coûts - Situation 2019*. 58 pages. Disponible sur : https://librairie.ademe.fr/cadic/7231/marche_emplois_coûts_filières_pac_2022_rf.pdf [Consulté le 14/01/2024]

AFPAC. (2023). *Le poids de la filière PAC en France - Chiffres année 2022*. 2 pages. Disponible sur : <https://www.afpac.org/file/238654/> [Consulté le 14/01/2024]

■ Images, photographies, tableaux et graphiques

Image de la page de couverture : Issus de "Tout savoir sur la pompe à chaleur multisplit", Les Installateur.fr, Disponible sur <https://lesinstallateurs.fr/guide-pompe-a-chaaleur/pourquoi-comment-choisir-pompe-chaaleur-multisplit/>

Gasquet I, Dufournet C et Sidler O, association négaWatt. (2023). *Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur*. [Schéma] Infographie issue de "Comprendre - Pompes à chaleur et rénovation performante, une combinaison gagnante" coécrit par négaWatt et Cler, page 5 [Consulté le 09/11/2023]

Gasquet I, Dufournet C et Sidler O, association négaWatt. (2022). *Émissions de GES des différentes solutions mettant en œuvre les pompes à chaleur (parc à rénover)*. [Graphique] Infographie issue du rapport négaWatt 2022 : "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie nationale de rénovation", page 47 [Consulté le 26/12/2023]

Amant S, Joly A, Cassagnaud C, Carbone4. (2021). *Comparaison des émissions de GES induites pour du gaz naturel et du biométhane*. [Graphique] Infographie issus de Carbone4, "Biométhane et climat : font-ils bon ménage ?", Disponible sur <https://www.carbone4.com/publication-biomethane-climat> [Consulté le 28/12/2023]

[Graphique] Infographie issue du site web de l'Habitat Confort d'Alsace (société spécialisée dans les travaux de chauffage). Disponible sur : <https://www.hca67.fr/remplacement-changement-chaudiere-gaz-naturel-strasbourg-bas-rhin.html> [Consulté le 18/01/2024]

■ Entretiens

Entretien avec un professeur au Centre d'Efficacité Énergétique des Systèmes à l'Ecole des Mines de Paris - PSL, le 7 novembre 2023.

Entretien avec un des co-rédacteurs du rapport négaWatt "Rôle de la pompe à chaleur dans la stratégie de rénovation" et membre de l'association, le 9 novembre 2023.

Entretien avec un représentant de l'association Coénove, association prônant un mix énergétique basé sur le gaz vert, le 15 novembre 2023.

Entretien avec une chercheuse chez RTE, le gestionnaire du réseau de transport énergétique français, le 27 novembre 2023.