



EXTERNALITES POSITIVES DES PAC HYBRIDES

DES BENEFICES NON VALORISES DANS LE SYSTEME DE
TARIFICATION ACTUEL



AUTEURS

Les travaux ont été réalisés par les personnes suivantes :

- Direction de projet (Artelys) : Arnaud Renaud
- Chef de projet (Artelys) : Claire Lucas
- Modélisation, quantification, calculs économiques (Artelys) : Quentin Gruet

Artelys est une entreprise spécialisée en optimisation, prévision et aide à la décision. A travers la réalisation d'une centaine d'études et de projets logiciels dans le domaine de l'énergie, Artelys est devenu un acteur de référence en optimisation et analyse technico-économique de grands systèmes énergétiques. Artelys a notamment développé une suite logicielle, Artelys Crystal, dédiée à l'optimisation économique de la gestion et des investissements sur les systèmes énergétiques.

Principal gestionnaire de réseau de distribution de gaz en France, **GRDF** distribue, le gaz à plus de 11 millions de clients pour se chauffer, cuisiner, se déplacer, quel que soit leur fournisseur. Pour cela, conformément à ses missions de service public, GRDF conçoit, construit, exploite, entretient le plus grand réseau de distribution d'Europe (204 239 km) dans plus de 9 500 communes, en garantissant la sécurité des personnes et des biens et la qualité de la distribution. Avec l'essor du gaz vert, un gaz renouvelable produit localement, le réseau gaz est un maillon essentiel à la transition écologique. Les collectivités concédantes sont propriétaires des réseaux publics de distribution de gaz. GRDF, en tant que concessionnaire, les accompagne quant à l'utilisation de cette infrastructure dans le cadre de leurs politiques locales : aménagement, construction, rénovation, mobilité, planification et prospective territoriale, politiques énergétiques. GRDF s'inscrit comme un partenaire auprès des collectivités territoriales pour la mise en œuvre de la neutralité carbone au travers de leurs choix de politiques énergétiques et de mobilité durable.

Synthèse

CONTEXTE ET OBJECTIFS

La révision en mars 2020 de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) fixe pour la France un objectif de neutralité carbone en 2050. Pour y parvenir, cette stratégie repose grandement sur l'électrification des usages et le développement des énergies renouvelables, en cohérence avec la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) pour la période 2020 – 2028. Ces changements ne manqueront pas d'avoir des impacts profonds sur les systèmes énergétiques : nature et localisation des moyens de production, structure et volume de la demande énergétique, etc.

Pour le secteur résidentiel, la SNBC envisage un programme très ambitieux de rénovations et l'installation d'un grand nombre de pompes à chaleur (PAC) électriques dans les logements neufs et rénovés. L'électrification des usages du bâtiment, et en particulier du chauffage, pose la question du devenir des réseaux de gaz. Par ailleurs, la PAC hybride (PAC air/eau accompagnée d'une chaudière à condensation gaz en appoint) est une technologie mature possédant de multiples avantages pour le système énergétique.

L'objectif de cette étude est de comparer les bénéfices apportés au système énergétique par les PAC hybrides avec l'impact des PAC avec appoint électrique sur ce même système, ces dernières étant aujourd'hui largement préférées par les consommateurs. Une première réflexion est ensuite menée pour traduire les bénéfices des pompes à chaleur Hybrides dans des mesures incitatives pour les consommateurs.

UNE ANALYSE COMPAREE SUR UN CAS TYPE

Pour cela, l'analyse menée compare les coûts de fonctionnement d'une PAC hybride et d'une PAC purement électrique, dans une **maison individuelle** correspondant à une situation représentative du parc résidentiel français, selon deux approches :

- | **Une approche système**, qui évalue les coûts d'utilisation des PACs du point de vue du système énergétique.
- | **Une approche consommateur**, qui évalue les dépenses de fonctionnement des PACs du point de vue du consommateur.

Les deux PAC étudiées fonctionnent avec un appoint. La **PAC purement électrique** fonctionne seule la plupart du temps. La résistance électrique est sollicitée comme appoint lorsque sa puissance est insuffisante pour compenser les déperditions thermiques du logement. La **PAC hybride** fonctionne selon trois modes : la PAC seule, la chaudière seule ou encore la PAC et la chaudière simultanément. Les modes sont pilotés pour minimiser les coûts systèmes (prix de marché et valorisation capacitaire)¹.

¹ Le mode de pilotage est détaillé dans le paragraphe « PILOTAGE DES SYSTEMES DE CHAUFFAGE » du chapitre 2.

LA PAC HYBRIDE PERMET DE DIMINUER DIRECTEMENT LA PUISSANCE MAXIMALE APPELEE SUR LE SYSTEME ELECTRIQUE

La PAC hybride est dimensionnée avec une part PAC de plus petite puissance et soutire donc une puissance électrique plus faible sur le réseau électrique. De plus, **lors des périodes de grand froid notamment, la PAC s’efface pour fonctionner sur son appoint gaz et apporter une flexibilité notable au système électrique (capacité de production de pointe et réseau).**

Sur le cas type traité, **la pointe électrique du système de chauffage** est nettement diminuée : celle-ci passe de **5,2 kW_e** dans le cas de la PAC avec appoint électrique à **3,6 kW_e** pour la PAC hybride (Tableau 1).

Système de chauffage	Pointe de consommation d'électricité	Puissance souscrite
PAC hybride	3.6 kW _e	9 kVA
PAC avec appoint électrique	5.2 kW _e	12 kVA

Tableau 1 : Pointe de consommation et puissance souscrite des différents systèmes de chauffage

LA PAC HYBRIDE EST AVANTAGEUSE DU POINT DE VUE DU SYSTEME ENERGETIQUE

Sur la période de calcul 2005-2014 et avec un pilotage optimisé de l'équipement de chauffage du logement type étudié, la PAC hybride conduit à des coûts « système » annuels inférieurs de 18% à ceux de la PAC avec appoint électrique. La PAC hybride s’efface lorsque le système électrique est fortement contraint. Les investissements dans des capacités de production de pointe sont donc réduits. Et, l'utilisation des réseaux de transport et de distribution pendant les périodes de congestion est diminuée.

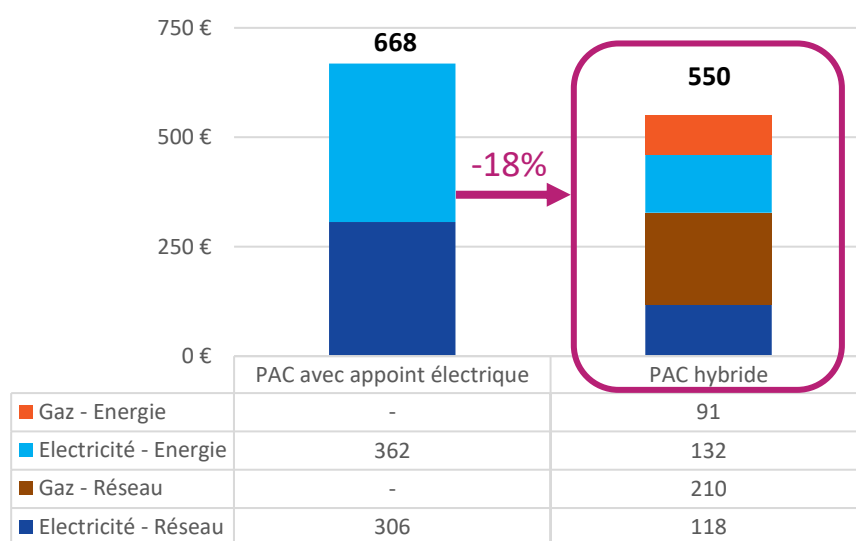


Figure 1 : Coûts moyens HT du chauffage résidentiel du point de vue système pour la PAC avec appoint électrique et pour la PAC hybride

CEPENDANT, LA TARIFICATION ACTUELLE INCITE LES CONSOMMATEURS A CHOISIR LA PAC AVEC APPOINT ELECTRIQUE

La PAC avec appoint électrique est plus avantageuse pour le consommateur : la PAC hybride revient 7% plus cher que la PAC avec appoint électrique. La tarification incite donc les consommateurs à opter pour des PAC avec appoint électrique, alors même qu’elles induisent des coûts plus importants pour la collectivité.

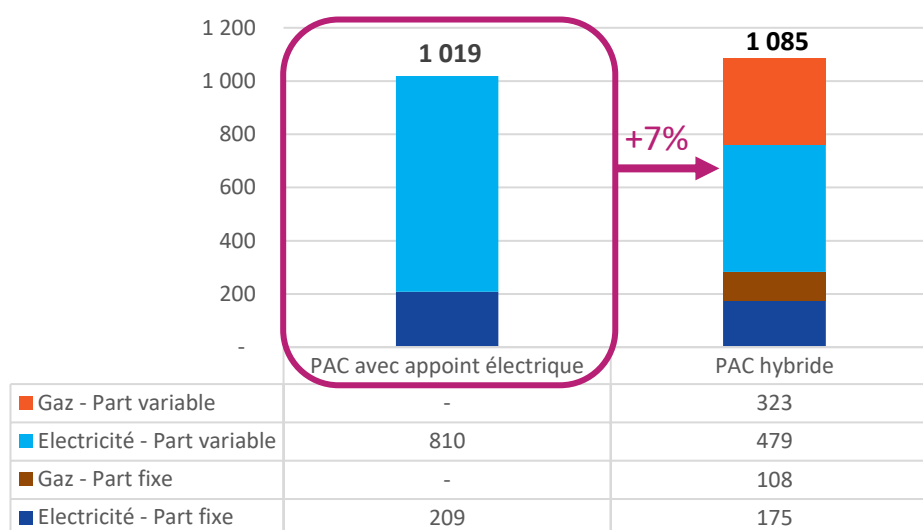


Figure 2 : Coûts moyens TTC du chauffage résidentiel du point de vue du consommateur pour la PAC avec appoint électrique et pour la PAC hybride

PROPOSITION DE 3 MESURES CIBLES

Pour une meilleure adéquation des incitations pour le consommateur aux coûts induits sur le système énergétique français, trois types de mesures, non exclusives, pourraient être envisagées :

- | **Proposition n°1 : une tarification dynamique de l’électricité permettant de valoriser l’effacement permis par la PAC hybride.** Avec le déploiement toujours plus important de la production intermittente d’électricité, la flexibilité de la demande apparait comme un enjeu clef pour la transition énergétique : la PAC hybride peut être un des instruments de cette flexibilisation. Pour ce faire, il faut rapprocher davantage, dynamiquement, les montants payés par le consommateur et les coûts pour le système. Cette tarification dynamique (par exemple horosaisonnaire) devrait tenir compte des coûts engendrés par les pointes et les fortes charges pour le système de production mais aussi pour le réseau de transport, de répartition et de distribution.
- | **Proposition n°2 : Aide financière à l’investissement dans l’équipement hybride.** Actuellement des aides (via MaPrimeRénov’ ou les Certificats d’Economie d’Energie) sont disponibles lors de l’achat de PAC (hybrides ou avec appoint électrique). Ces aides ne permettent pas de distinguer le type d’appoint pour le système (chaudière à condensation ou appoint électrique). Une prime spécifique supplémentaire pour favoriser la chaudière à condensation par rapport à l’appoint électrique par résistance serait justifiée.

-
- | **Proposition n°3 : Abonnement conjoint électricité et gaz conditionné à l'utilisation d'une PAC hybride.**
Diminuer la part fixe des abonnements électriques pour les utilisateurs de PAC hybrides se justifie du fait d'une moindre charge du réseau électrique pendant les périodes critiques. Cette préoccupation est actuellement très présente, notamment au Québec qui a déjà mis en place un tel abonnement conjoint.

Executive Summary

CONTEXT AND OBJECTIVES

The french National Low Carbon Strategy (SNBC) published in March 2020 sets a goal of carbon neutrality for France by 2050. This strategy relies heavily on the electrification of uses and the development of renewable energies, in line with the multi-year energy program for the 2020 – 2028 period. These changes are likely to impact deeply the energy system: nature and location of production capacities, structure and volume of energy demand, etc.

The SNBC considers a very ambitious program of renovations and the installation of a large number of electric heat pumps (HP) for the residential sector, in new and renovated housings. The electrification of building uses, and in particular heating, raises the question of the future role of gas networks. In addition, the hybrid heat pump (HHP, air/water heat pump with a gas condensing boiler as back-up) is a mature technology with multiple advantages for the energy system.

The objective of this study is to compare the benefits of the hybrid heat pump for the energy system with the impact of the electric heat pump, the latter including an electric back-up and being widely preferred by current consumers. A first reflection on economic incentive measures is then carried out for consumers to benefit from the advantages of hybrid heat pumps.

A COMPARATIVE ANALYSIS ON A CASE STUDY

The analysis carried out compares the operating costs of a hybrid heat pump and a purely electric heat pump, in a single-family housing corresponding to a situation representative of the French housing stock. Two approaches are considered:

- | A **system approach**, which evaluates the costs of using the heat pumps from the point of view of the energy system.
- | A **consumer approach**, which evaluates the operating expenses of the heat pumps from the point of view of the consumer.

The two heat pumps studied operate with a backup. The **purely electric heat pump** works alone most of the time. The electric resistance is used as a back-up when the heat pump capacity is not sufficient to compensate for the housing heat loss. The **hybrid heat pump** operates in three modes: the heat pump alone, the boiler alone or the heat pump and boiler simultaneously. The modes are managed to minimize the system costs (market price and capacity valorisation).

THE HYBRID HEAT PUMP DIRECTLY REDUCES THE PEAK POWER DEMAND ON THE POWER SYSTEM

The hybrid heat pump is composed of a smaller heat pump capacity than the purely electric heat pump and therefore requires less power from the power network. In addition, **during periods of extreme**

cold, the hybrid heat pump operates on its gas back-up and provides significant flexibility to the power system (peak production capacity and network).

In the case under study, the **power peak of the heating system** is significantly reduced, from **5,2 kW** for the electric heat pump to **3,6 kW** for the hybrid heat pump.

THE HYBRID HEAT PUMP PROVIDES ECONOMIC BENEFITS FOR THE ENERGY SYSTEM

Over the 2005-2014 calculation period and with optimized control of the heating equipment in the housing under study, the hybrid heat pump leads to annual "system" costs that are 18% lower than those of the heat pump with an electric back-up. The hybrid heat pump is switched off when the power system is strongly constrained. Investments in peak production capacities are therefore reduced. And, the use of transmission and distribution networks during periods of congestion is reduced.

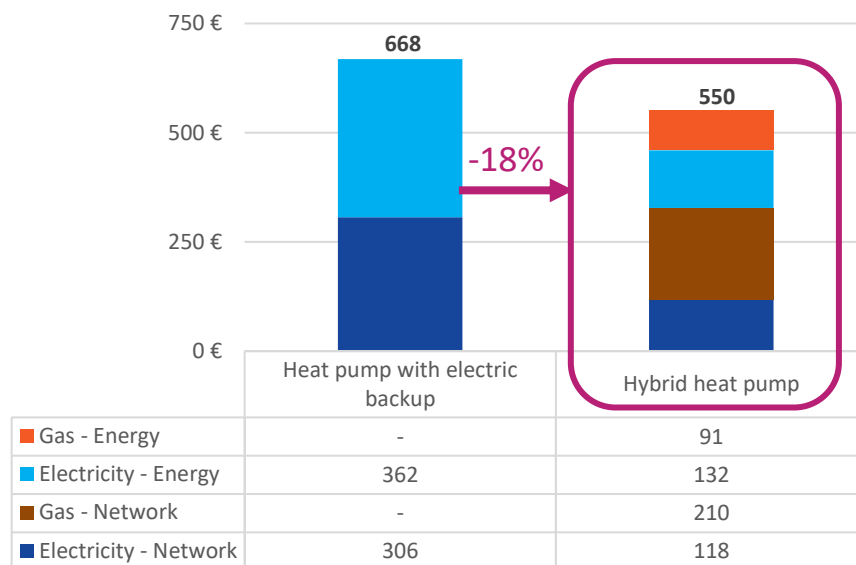


Figure 3 : Average costs before tax for residential heating from a system point of view for the heat pump with electric back-up and for the hybrid heat pump

HOWEVER, THE CURRENT PRICING INCITES CONSUMERS TO CHOOSE HEAT PUMPS WITH ELECTRIC BACK-UP

The heat pump with electric back-up is more profitable for the consumer: the hybrid heat pump costs 7% more than the electric heat pump. The current pricing system incites consumers to choose heat pumps with electric back-up, even though they result in higher costs for the community.

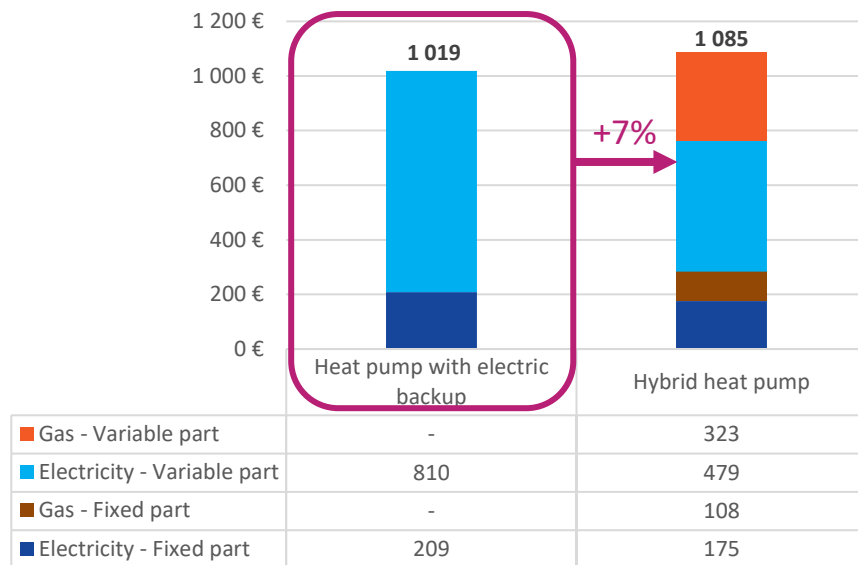


Figure 4 : Average residential heating costs (including tax) from the consumer point of view for the heat pump with electric backup and for the hybrid heat pump

PROPOSAL OF 3 TARGET MEASURES

To better match consumer incentives with the costs incurred by the French energy system, three types of non-exclusive measures could be considered:

- | **Proposal n°1: Dynamic pricing of electricity to enhance the value of load management made possible by the hybrid heat pump.** With the ever-increasing development of intermittent power production, demand flexibility appears to be a key issue for the energy transition. The hybrid heat pump can be one of the instruments for this flexibility. To this end, the amounts paid by the consumer and the costs for the system must be brought closer together dynamically. This dynamic pricing (e.g., on a time-season basis) should take into account the costs generated by peaks and heavy loads for the power generation system but also for the transmission, dispatch and distribution network.
- | **Proposal n°2: Financial support for investment in hybrid equipment.** Currently, subsidies (via *MaPrimeRénov'* or the Energy Savings Certificates) are available for the purchase of heat pumps (hybrid or with electric back-up). These subsidies do not distinguish between the type of auxiliary system (condensing boiler or electric auxiliary system). A specific additional bonus to promote the condensing boiler compared to the electric booster heater would be justified.
- | **Proposal n°3: Joint electricity and gas subscription conditioned on the use of a hybrid heat pump.** Reducing the fixed part of electricity subscriptions for users of hybrid heat pumps is justified by the fact that the power network is less loaded during critical periods. This concern is currently very present, particularly in Quebec, which has already implemented such a joint subscription.

Table des matières

AUTEURS.....	2
SYNTHESE.....	3
TABLE DES MATIERES	10
1 LA PAC HYBRIDE, LEVIER D'UNE TRANSITION ENERGETIQUE RAPIDE, SECURISEE ET SOUTENABLE	11
2 METHODOLOGIE ADOPTEE ET PRINCIPALES HYPOTHESES	13
3 PRINCIPAUX RESULTATS.....	18
4 MESURES CIBLES	22
GLOSSAIRE	24
5 ANNEXES	25
6 REFERENCES	33

1 La PAC hybride, levier d'une transition énergétique rapide, sécurisée et soutenable

La politique de transition énergétique de la France, inscrite notamment dans la SNBC et la PPE, oriente vers une réduction des moyens de production pilotables et une électrification des usages. Ceci fait évoluer fortement les contraintes sur le système électrique. Le développement des ENR électriques intermittentes demande davantage de disposer de solutions pour répondre à la demande en énergie lorsque la production est arrêtée ou réduite, par exemple la nuit ou les jours sans vent. L'électrification du chauffage contraint de plus en plus les infrastructures de production et de réseaux électriques, au détriment notamment des infrastructures gazières qui supportaient jusque-là une partie de la demande (Figure 5). L'efficacité des moyens de chauffage électriques et la rénovation permettront à terme, de réduire ces contraintes, sans les supprimer.

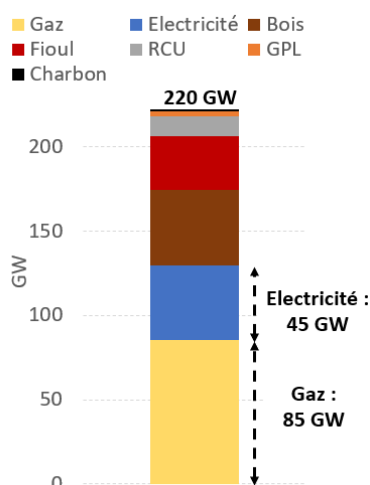


Figure 5 : Décomposition de la puissance moyenne appelée le 28 février 2018 (pic de consommation) pour la couverture des besoins de chauffage des bâtiments en France métropolitaine (hors Corse). Source : GRDF à partir de données de RTE, GRTgaz, Téréga et du CEREN

Les solutions de chauffage hybrides, telles que les pompes à chaleur hybrides, couplant une pompe à chaleur électrique de puissance optimisée et une chaudière performante au gaz, sont des solutions identifiées comme permettant de décarboner et flexibiliser la demande de chauffage, pour un triple bénéfice :

- | **Assurer l'équilibre offre demande** en utilisant les ressources existantes de l'infrastructure gazière (stockage, transport, distribution) lorsque les infrastructures électriques ne sont pas suffisantes pour répondre à la demande instantanée. Ces ressources gazières existantes sont conçues pour répondre aux besoins de pointe les plus extrêmes.
- | **Augmenter la résilience** du système énergétique en permettant de soulager le réseau électrique local, en cas de défaillance d'un moyen de production ou d'une ligne de transport, en basculant tout ou partie de la demande de chauffage, de l'électricité vers le gaz.
- | **Augmenter la décarbonation des bâtiments.** Les PAC hybrides peuvent être réglées pour optimiser l'intégration des énergies renouvelables électriques lorsqu'elles sont disponibles. Le complément

d'alimentation au gaz est un débouché pertinent pour le biométhane, produit localement et facilement à stocker pour un usage saisonnier.

Les avantages de ces solutions sont déjà reconnus dans les derniers scénarios énergétiques prospectifs français². Pour autant, le développement actuel est très loin de refléter ce besoin à 2050, puisque les ventes actuelles de PAC hybrides en France n'excèdent pas 5 000 pièces par an.

Les objectifs de la présente étude sont donc :

- | **L'analyse et la quantification des freins économiques au développement des solutions hybrides.** Les coûts des PAC hybrides sont évalués (i) pour le consommateur au regard du système de tarification actuel et (ii) pour le système énergétique dans son ensemble. Ces coûts sont comparés à ceux d'une PAC électrique utilisant une résistance électrique comme appoint. L'analyse permet de quantifier les pénalités économiques portées actuellement par les PAC hybrides en termes d'investissement à l'achat et d'abonnement énergétique.
- | **L'identification de mesures financières incitatives** qui permettraient aux utilisateurs des PACs hybrides de bénéficier d'une part des gains économiques générés par la PAC hybride sur le système énergétique.

² RTE prévoit au moins 2,5 millions d'hybrides en 2050 (https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf), l'ADEME en prévoit jusqu'à 5,7 millions (<https://transitions2050.ademe.fr>)

2 Méthodologie adoptée et principales hypothèses

APPROCHE

La méthodologie suivie consiste à modéliser le fonctionnement d'une PAC hybride dans une maison individuelle correspondant à une situation représentative d'une moyenne du parc existant et neuf en France. La maison individuelle choisie, d'une surface de 110 m², est raisonnablement isolée, située en zone H2, raccordée au réseau de distribution de gaz et possède un circuit d'eau interne pour le chauffage centralisé.

L'utilisation de la PAC hybride est analysée suivant deux approches :

- | **Une approche système**, qui évalue les coûts pour le système énergétique impliqués par l'utilisation de la PAC hybride. Ces coûts sont de deux types : les coûts de l'énergie et les coûts de réseaux. Les taxes ne sont pas considérées dans cette approche.
- | **Une approche consommateur**, qui évalue les dépenses du point de vue du consommateur liées au fonctionnement de la PAC hybride. Ces dépenses tiennent compte de la facture énergétique à la fois pour l'abonnement électrique et pour l'abonnement gaz. Les taxes appliquées actuellement pour un consommateur sont incluses.

Ces coûts et dépenses sont ensuite comparés à ceux de la même maison individuelle se chauffant grâce à une PAC avec appoint électrique, système de chauffage dont le déploiement se démocratise actuellement en France.

La méthodologie permet ainsi de comparer les coûts de la PAC hybride et de la PAC avec appoint électrique du point de vue de la collectivité (ie du système énergétique global) et du point de vue du consommateur.

DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS DE CHAUFFAGE

Le fonctionnement des équipements de chauffage du logement type est simulé au pas de temps horaire, sur dix années climatiques, avec les données de température comprise entre 2005 et 2014 pour la région Centre – Val de Loire. A partir de ces données de température, un modèle de déperdition thermique du bâtiment est élaboré afin de calculer les besoins de chauffage, en énergie utile, pour chaque heure dans le logement, prenant en compte à la fois la température extérieure, une température de consigne qui varie entre 16°C et 19°C en fonction de la plage horaire ainsi qu'une inertie thermique du bâtiment permettant de diminuer la sensibilité du modèle aux aléas météorologiques très ponctuels. Ce modèle de déperdition thermique est complété avec la prise en compte de trois rendements représentant la capacité du système de chauffage à satisfaire la température de consigne : les rendements d'émission, de distribution et de régulation.

Rendement	Valeur
Emission	0.97
Distribution	0.95
Régulation	0.99

Tableau 2 : Rendements d'émission, de distribution et de régulation utilisés dans le modèle de déperdition thermique

Le modèle aboutit à des besoins utiles annuels moyens de chauffage de 13,3 MWh_{th} sur une période de chauffe comprise entre début octobre et fin avril.

A partir de ce modèle de déperdition thermique, deux systèmes de chauffage sont dimensionnés³. Les PAC envisagées dans cette étude⁴ sont compatibles à la fois pour des PAC hybrides et pour des PAC avec appoint électrique :

- | **PAC hybride** : ce système est composé d'une PAC électrique de faible puissance, complétée par une chaudière à condensation THPE. La règle arbitrée par la filière sur le dimensionnement de la PAC hybride (**qui va être déclinée dans un guide de dimensionnement publié prochainement**) est la suivante : la puissance de la pompe à chaleur pour une température extérieure de 0°C et une température de départ de 50°C doit être comprise entre 40 et 60 % des déperditions de la maison à température de base⁵. Un modèle de PAC de puissance thermique 4,5 kW_{th} répond à ces conditions⁶. Celle-ci est accompagnée d'une chaudière à condensation THPE de 25 kW et de rendement supposé constant et égal à 0,92 (sur PCS).
- | **PAC avec appoint électrique** : ce système est composé d'une PAC électrique de plus forte puissance, complétée par un appoint électrique en back-up. Les normes françaises d'installations de pompes à chaleur⁷ prescrivent une puissance thermique de la PAC comprise entre 70% et 100% des déperditions à la température de base. La PAC de puissance thermique 6 kW_{th} répond ses conditions⁸. Celle-ci est accompagnée d'un appoint électrique de 6 kW et de rendement égal à 1.

Les COP des PAC dépendent de la température extérieure et de la température de sortie d'eau et sont illustrées dans la Figure 6 ci-dessous.

³ Les règles de dimensionnement des systèmes de chauffage font apparaître les notions de température de base (-6°C dans cette étude) et déperditions thermiques à la température de base (6,3 kW_{th} dans notre cas).

⁴ Les modèles utilisés sont ceux proposés par le fabricant *De Dietrich*,

⁵ [Une vision commune sur le dimensionnement de la PAC hybride - GRDF.FR](#)

⁶ Sa puissance thermique pour une température extérieure de 0°C et une température de départ de 50°C est de 3,55 kW_{th} (soit entre 40% et 60% de 6,3 kW_{th}).

⁷ Normes issues du Document Technique Unifié 65.16 datant de juin 2017

⁸ Sa puissance thermique à la température de base est de 4,54 kW_{th}

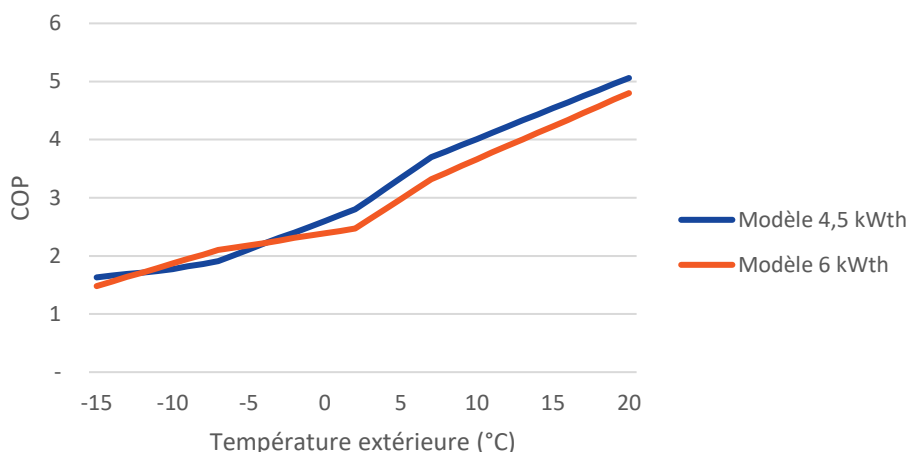


Figure 6 : COP des PAC utilisées dans la modélisation en fonction de la température extérieure, données fabricants, hors appoint

Bien que la PAC soit réputée pour être un équipement de chauffage très performant, il est important de prendre en compte les variations de COP avec la température : ces variations impactent directement la consommation du système et donc son impact sur le système électrique. Une vérification a posteriori a été menée afin de garantir un SCOP supérieur à 2,8 sur l'utilisation des PAC, le SCOP étant le coefficient de performance saisonnier et pouvant être calculé comme le ratio entre l'énergie produite par la PAC et l'électricité consommée par la PAC lors d'une année.

COÛTS DE L'APPROVISIONNEMENT ENERGETIQUE

L'approche système prend en compte les coûts associés à l'achat de l'énergie et à son acheminement (coût réseau). Les taxes ne sont pas incluses dans cette approche. Les coûts sont basés sur des historiques de la période 2005 – 2014. Cette période est cohérente avec celle des historiques de température sur lesquelles sont simulés les équipements de chauffage.

- | Pour **l'électricité**, le coût du réseau est modélisé par des chroniques de coûts unitaires de réseau chronologiques, plafonnés aux coûts marginaux, avec coûts des pertes et cascades élaborés par la CRE. Le coût de l'énergie, quant à lui, provient des chroniques de prix Spot day-ahead (source : EPEX Spot), auquel un amortissement des valeurs capacitaires est intégré.
- | Pour le **gaz**, le coût de l'énergie est représenté par des chroniques des prix moyens mensuels sur le hub NBP⁹ puis, à partir de sa création, des prix moyens mensuels sur le PEG¹⁰. Le coût du réseau a été déterminé en se basant sur la valeur de l'ATRD d'un logement ayant les mêmes caractéristiques que le logement type choisi dans l'étude et se chauffant exclusivement avec du gaz via une chaudière à condensation THPE. En effet, d'un point de vue du réseau, un logement se chauffant via une PAC hybride doit réserver la même capacité de réseau qu'un logement se chauffant au gaz et génère donc les mêmes coûts.

⁹ Le NBP est le National Balancing Point, lieu d'échange virtuel pour la vente, l'achat et l'échange de gaz naturel au Royaume-Uni

¹⁰ Le PEG est le Point d'Echange de Gaz français, équivalent du NBP pour la France.

L'**approche consommateur** intègre les parts fixes et variables des prix de fourniture de gaz et d'électricité. Les tarifs réglementés de vente de l'année 2021 ont été pris en compte pour représenter le prix actuel TTC payé par le consommateur pour le fonctionnement de son système de chauffage.

- | Pour l'**électricité**, le choix s'est porté sur un abonnement *Heures Pleines/Heures Creuses* correspondant à un niveau de puissance souscrite déterminé a posteriori en fonction de la pointe de consommation électrique des systèmes de chauffage considérés. Ainsi, un abonnement à 9 kVA a été choisi pour le système avec PAC hybride et un abonnement à 12 kVA est privilégié pour le logement utilisant une PAC avec appoint électrique.
- | Pour le **gaz**, l'abonnement résidentiel a également été déterminé a posteriori en fonction du volume de consommation de la PAC hybride. Le choix s'est porté sur le tarif B0, adapté pour les particuliers consommant entre 1 et 6 MWh PCS de gaz par an.

Les différents coûts sont synthétisés dans le Tableau 3 ci-dessous.

Energie	Approche système (données 2005 – 2014)	Approche consommateur (données 2021)
Electricité	<p>Réseau : Coûts BT unitaires horaires des réseaux</p> <p>Energie : Prix spot de l'électricité</p>	TRV - abonnement <i>Heures Pleines/Heures Creuses</i> 9 kVA pour la PAC hybride, 12 kVA pour la PAC électrique
Gaz	<p>Réseau : Valeur de l'ATRD équivalente à celle d'un logement chauffé par une chaudière à condensation THPE</p> <p>Energie : Prix mensuels du gaz NBP puis PEG</p>	TRV – abonnement correspondant à un profil B0

Tableau 3 : Synthèse des coûts d'approvisionnement énergétique

PILOTAGE DES SYSTEMES DE CHAUFFAGE

L'appoint gaz ou électrique des systèmes de chauffage considérés dans la présente étude sont pilotés selon plusieurs modes décrits ci-dessous.

La **PAC électrique** peut fonctionner seule ou avec son appoint électrique lorsque la puissance thermique maximale de la PAC n'est pas suffisante pour compenser les déperditions thermiques du logement. Ainsi, la chaleur produite par l'appoint complète celle produite par la PAC afin de garantir un confort thermique aux occupants du logement. Ce mode de pilotage induit un fonctionnement de l'appoint sur en moyenne 269 heures de l'année, soit 6% de la période de chauffe.

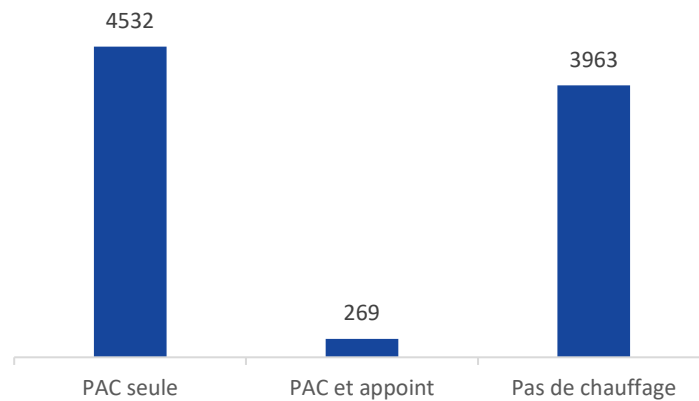


Figure 7 : Moyenne annuelle du nombre d'heures d'utilisation de chaque équipement de chauffage de la PAC avec appoint électrique

La **PAC hybride** fonctionne selon trois modes : (1) la PAC seule, (2) la chaudière seule et (3) la PAC et la chaudière simultanément. Le pilotage est réalisé de sorte à minimiser les dépenses énergétiques, calculées sur la base des coûts système de l'énergie. Ainsi, lorsque le système électrique est très contraint et que par conséquent l'électricité est très chère sur le marché, la chaudière gaz est sollicitée. A l'inverse, lorsque l'avantage tarifaire est donné à l'électricité, la PAC est mobilisée pour produire la chaleur. Le troisième mode (utilisation simultanée de la PAC et de la chaudière) est utilisé uniquement lorsqu'il est économiquement préférable d'utiliser la PAC mais que celle-ci n'est pas assez puissante pour compenser les déperditions thermiques du logement. La chaudière apporte dans ce cas le complément thermique nécessaire pour garantir le confort dans le logement (de façon analogue à l'appoint électrique). Selon ce mode de pilotage, la chaudière est utilisée en moyenne pendant 1 533 heures de l'année, soit 32% de la période de chauffe. Sur ces 1 533 heures, elle fonctionne seule sur 867 heures (19% de la période de chauffe) et avec la PAC sur 666 heures (13% de la période de chauffe).

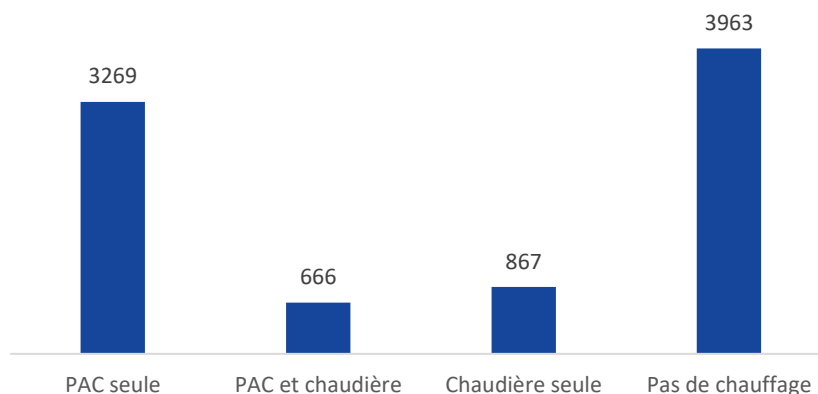


Figure 8 : Moyenne annuelle du nombre d'heures d'utilisation de chaque équipement de chauffage de la PAC hybride

3 Principaux résultats

LA PAC HYBRIDE PERMET DE DIMINUER DIRECTEMENT LA PUISSANCE MAXIMALE APPELEE SUR LE SYSTEME ELECTRIQUE

L'équipement hybride permet de diminuer la pointe électrique du système de chauffage : celle-ci passe de **5,2 kW_e** dans le cas de la PAC avec appoint électrique à **3,6 kW_e** pour la PAC hybride (Tableau 4). Ces valeurs de pointe électrique justifient par ailleurs les puissances électriques souscrites dans chacun des cas étudiés : 12 kVA pour la PAC avec appoint électrique et 9 kVA pour la PAC hybride.

Système de chauffage	Pointe de consommation d'électricité	Puissance souscrite
PAC hybride	3.6 kW _e	9 kVA
PAC avec appoint électrique	5.2 kW _e	12 kVA

Tableau 4 : Pointe de consommation et puissance souscrite des différents systèmes de chauffage

De plus, les pointes de consommation électrique de la PAC électrique et de la PAC hybride ne sont pas synchrones. La pointe de la PAC avec appoint électrique apparaît lorsque les besoins de chauffage sont les plus élevés (période de grand froid notamment) et par conséquent lorsque le réseau électrique est très contraint. Lors de ces périodes de forte tension, **la PAC hybride s'efface généralement** pour fonctionner sur son appoint gaz et soulager le réseau électrique. Cette temporalité de la pointe est observable dans la Figure 9 ci-dessous : la chaudière à gaz est largement privilégiée lorsque les températures sont les plus rudes¹¹ et les soutirages électriques sont alors nuls sur ces périodes. Par ailleurs, la pilotabilité « prix » de la PAC hybride favorise l'utilisation de la PAC lorsque les tarifs de l'électricité sur les marchés diminuent. On observe ainsi une consommation d'électricité pendant quelques heures pour la PAC hybride en dehors de la période du pic électrique.

¹¹ La période représentée correspond au jour de la pointe de consommation électrique de la PAC avec appoint électrique

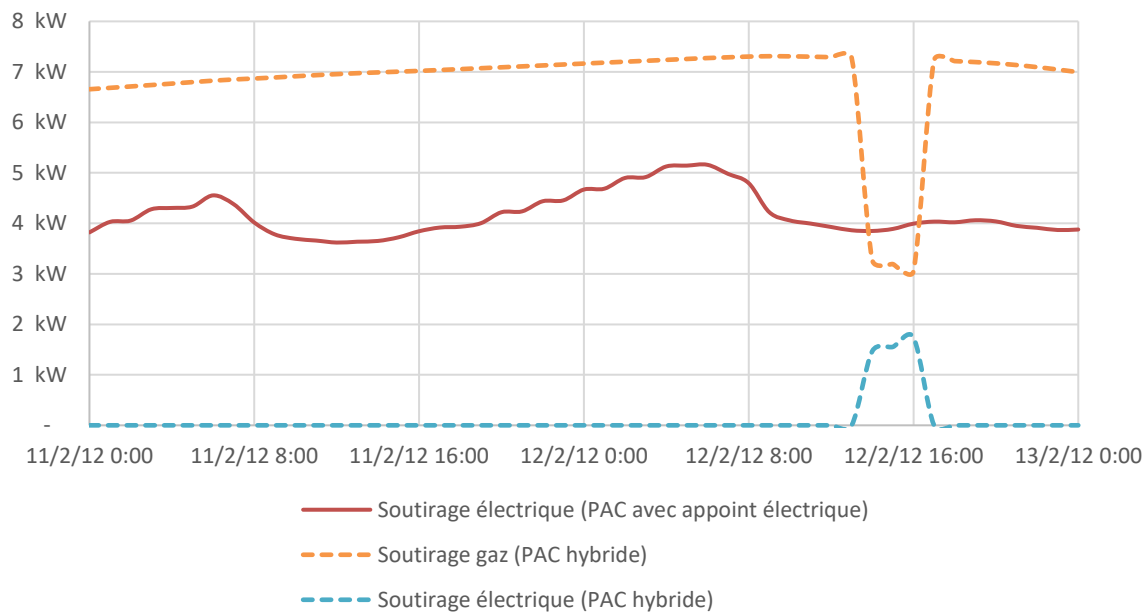


Figure 9 - Soutirages sur les réseaux électrique (kW_e) et de gaz (kW PCS) de la PAC avec appoint électrique et de la PAC hybride pour les journées des 11 et 12 février 2012

Enfin, l'équipement hybride induit **des soutirages électriques 40% plus faibles** que ceux de la PAC avec appoint électrique. Il consomme en revanche plus d'énergie finale que la PAC avec appoint électrique : 7 MWh_{ef} toutes énergies confondues contre 4,8 MWh_{ef}. L'écart de consommation d'énergie est moins important en énergie primaire et favorable cette fois-ci à la PAC hybride : 10,6 MWh_{ep} contre 11 MWh_{ep} pour la PAC avec appoint électrique¹². Les résultats de la consommation d'énergie de chacun des systèmes de chauffage sont renseignés dans le Tableau 5 ci-dessous.

Système de chauffage	Consommation d'énergie finale	Production d'énergie	Contribution au besoin de chauffage
PAC hybride	PAC : 2,8 MWh _e	PAC : 9,4 MWh _{th}	PAC : 71%
	Chaudière : 4,2 MWh PCS	Chaudière : 3,9 MWh _{th}	Chaudière : 29%
PAC avec appoint électrique	PAC : 4,7 MWh _e	PAC : 13,1 MWh _{th}	PAC : 99%
	Appoint : 0,1 MWh _e	Appoint : 0,1 MWh _{th}	Appoint : 1%

Tableau 5 - Contribution au besoin de chauffage des différents équipements

LA PAC HYBRIDE EST AVANTAGEUSE DU POINT DE VUE DU SYSTEME ENERGETIQUE

La PAC hybride présente des coûts système inférieurs à ceux de la PAC avec appoint électrique : 550 € HT de coûts annuels pour le réseau et l'énergie contre 668 € HT pour la PAC avec appoint, soit **18% de**

¹² Le ratio entre énergie finale et énergie primaire est considéré à 2,3 pour l'électricité et à 1 pour le gaz

différence entre les deux systèmes de chauffage à l'avantage de la PAC hybride. Plusieurs facteurs expliquent cet avantage. Tout d'abord, la pilotabilité de la PAC hybride lui permet de choisir au pas de temps horaire l'énergie la moins coûteuse d'approvisionnement pour le système. La PAC s'efface lorsque le système électrique est fortement contraint, ce qui limite la nécessité des investissements dans les capacités de production de pointe. Ainsi, malgré une consommation d'énergie finale annuelle supérieure à la PAC avec appoint électrique (7 MWh contre 4,8 MWh), l'approvisionnement énergétique se révèle moins cher que celui associé à ce dernier équipement. Par ailleurs, la PAC hybride génère des puissances appelées moindres sur le réseau de distribution électrique (maximum 3,6 kW_e contre 5,2 kW_e pour la PAC avec appoint). Enfin, ces puissances sont majoritairement appelées en dehors des périodes de congestion du réseau de distribution, ce qui limite à nouveau les coûts.

La PAC hybride s'avère donc être une solution pertinente dans l'optique de minimiser les coûts globaux du système énergétique.

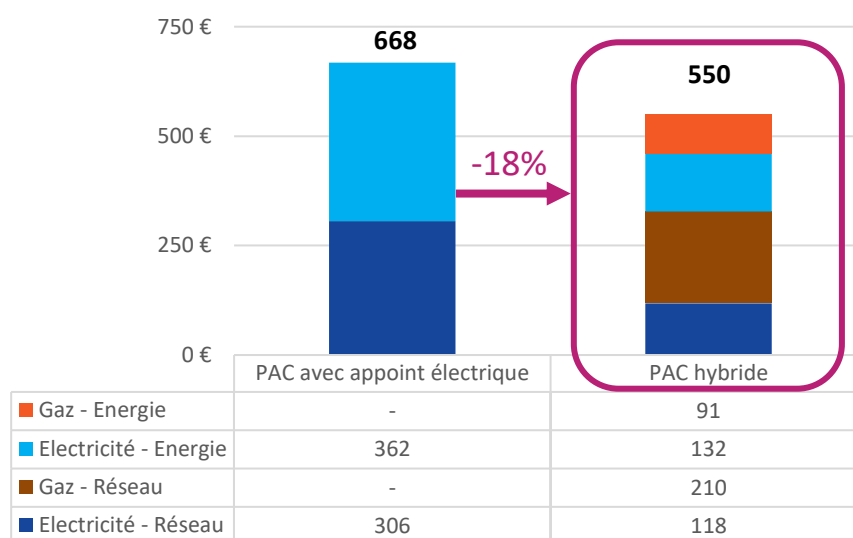


Figure 10 : : Coûts moyens HT du chauffage résidentiel du point de vue système pour la PAC avec appoint électrique et pour la PAC hybride

CEPENDANT, LA TARIFICATION ACTUELLE INCITE LES CONSOMMATEURS A CHOISIR LA PAC AVEC APPOINT ELECTRIQUE

La PAC avec appoint électrique est le système le plus avantageux pour le consommateur avec des dépenses annuelles TTC de 1 019€ contre 1 085€ pour la PAC hybride, soit **7% de différence à l'avantage de la PAC avec appoint électrique**. Les consommateurs sont donc incités pour un même confort thermique à choisir une PAC avec appoint électrique, alors même que celle-ci induit des coûts plus importants pour le système énergétique.

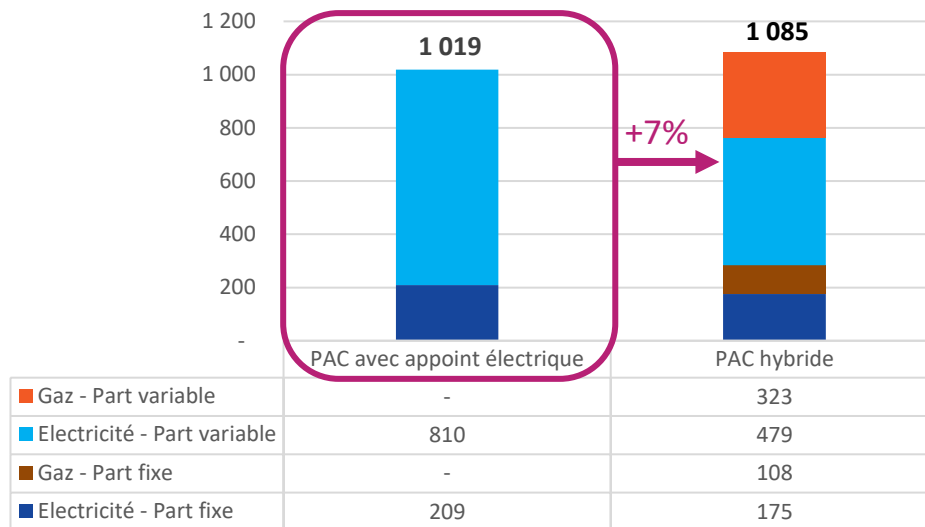


Figure 11 : Coûts moyens TTC du chauffage résidentiel du point de vue du consommateur pour la PAC avec appoint électrique et pour la PAC hybride

La tarification actuelle de l'électricité ne permet pas de valoriser la capacité d'effacement des équipements de chauffage hybride. La PAC hybride permet de diminuer la puissance maximale soutirée de 31 %, quand la part fixe de l'abonnement électrique est seulement diminuée de 16 %. Par ailleurs, la PAC hybride nécessite de souscrire à deux abonnements (électricité et gaz) et induit par là-même des coûts fixes supplémentaires pour le consommateur.

L'analyse de la présente étude montre donc un déséquilibre notable entre l'incitation tarifaire donnée au consommateur et son impact économique sur le système énergétique dans son ensemble.

4 Mesures cibles

PROPOSITION N°1 : TARIFICATION DYNAMIQUE DE L'ELECTRICITE PERMETTANT DE VALORISER L'EFFACEMENT PERMIS PAR LE CHOIX DE LA CHAUDIERE A CONDENSATION COMME SYSTEME D'APPOINT A LA PAC

Avec la production intermittente, la flexibilité de la demande apparait comme un enjeu clef pour la transition énergétique : **la PAC hybride peut être un des instruments de cette flexibilisation.**

Pour ce faire, il faut rapprocher davantage, dynamiquement, les montants payés par le consommateur et les coûts pour le système. Cette **tarification dynamique** doit tenir compte des coûts engendrés par les pointes et les fortes charges pour le système de production **mais aussi pour le réseau de transport, de répartition et de distribution.**

La part fixe de l'abonnement pourrait, elle aussi, dépendre, au moins pour une part, de la pointe réalisée sur les jours les plus chargés (type PP1, PP2¹³) et non seulement de la pointe annuelle.

PROPOSITION N°2 : AIDE FINANCIERE A L'INVESTISSEMENT DANS L'EQUIPEMENT HYBRIDE

Actuellement des aides (via MaPrimeRénov' et les Crédits d'Economie d'Energie) sont disponibles lors de l'achat de PAC (hybrides ou avec appoint électrique). Ces aides ne permettent pas de distinguer le type d'appoint idéal pour le système (chaudière à condensation ou appoint électrique)

Une **prime spécifique supplémentaire pour favoriser la chaudière à condensation par rapport à l'appoint électrique par résistance serait justifiée.** Le passage d'un chauffage électrique par effet joule à un chauffage au gaz sur les jours de forte pointe conduit à des gains pour le système. Sur la base des estimations réalisées dans la présente étude, une prime complémentaire de 3 000 euros pourrait être justifiée. Il ne s'agit là que d'une première estimation sur un exemple représentatif de la moyenne du parc de logements qui mérite d'être affinée et précisée. **Il est toutefois certain qu'un bonus à la solution hybride est justifié.**

Cette mesure, non exclusive par rapport aux autres propositions, est actuellement mise en place en Italie, où les PAC hybrides sont plus aidées que les PAC avec appoint électrique, permettant ainsi un essor de la filière.

PROPOSITION N°3 : ABONNEMENT CONJOINT ELECTRICITE ET GAZ CONDITIONNE A L'UTILISATION D'UNE PAC HYBRIDE

¹³ Les jours PP1 et PP2, « Période de Pointe 1 » et « Période de Pointe 2 », correspondent à des journées de forte consommation d'électricité. Elles sont déterminées à J-1 par RTE, à hauteur de 15 jours par an pour les PP1 et 25 jours par an pour PP2.

Diminuer la part fixe des abonnements pour les utilisateurs de PAC hybrides se justifie du fait d'une moindre charge du réseau électrique pendant les périodes critiques. Cette préoccupation est actuellement très présente, notamment au Québec qui a mis en place un tel abonnement conjoint entre HydroQuébec (société d'État québécoise responsable de la production, du transport et de la distribution de l'électricité au Québec) et Energir (principale entreprise de distribution de gaz naturel au Québec).

Sur la base de cette première étude, **une réduction de 200 euros de l'abonnement** dans le cadre de ce type de souscription pourrait être envisagée. Pour assurer la bonne utilisation de la PAC hybride comme outil de flexibilisation, la garantie d'un pilotage tenant compte des contraintes pesant sur le système électrique pourrait être un des éléments du contrat. Les investissements effectués pour le déploiement à grande échelle des compteurs électriques communicants Linky seraient ainsi valorisés.

Un pilotage, plus simple, seulement basé sur la température extérieure peut aussi être envisagé, au moins dans un premier temps ; c'est d'ailleurs ce qui est fait au Québec.

En échange de l'engagement contractuel garantissant un bénéfice pour le système énergétique, une compensation financière pour les consommateurs serait un moyen de récompenser leur décision d'investissement dans une PAC hybride. De nombreuses pistes sont à explorer pour rétrocéder tout ou une partie de ces 200 euros au consommateur : un crédit d'impôt annuel (dont le contrôle peut être assuré avec les preuves de maintenance annuelle), une adaptation de la tarification de l'énergie ou bien des catégories d'abonnements proposés. Une réflexion plus approfondie sur ce sujet pourrait être engagée pour déterminer une ou plusieurs mesures applicables en France et en adéquation avec un déploiement des PAC hybrides bénéfique à la fois pour le système énergétique et pour les consommateurs.

Glossaire

ATRD	Accès des Tiers au Réseau de Distribution
COP	Coefficient de performance
CRE	Comité de Régulation de l'Énergie
ECS	Eau chaude sanitaire
HT	Hors Taxe
kVA	KiloVolt-Ampère, unité de puissance utilisée dans le choix de l'abonnement électrique
kW	Kilowatt, unité de puissance
kW_e	Kilowatt électrique, unité de puissance
kW_{th}	Kilowatt thermique, unité de puissance
kWh	Kilowattheure, unité d'énergie correspondant à une puissance d'un kilowatt pendant une heure
MW	Mégawatt, unité de puissance
MW_e	Mégawatt électrique, unité de puissance
MWh	Mégawattheure, unité d'énergie correspondant à une puissance d'un mégawatt pendant une heure
MWh_e	Mégawattheure électrique, unité d'énergie correspondant à une puissance d'un mégawatt électrique pendant une heure
MWh_{th}	Mégawattheure thermique, unité d'énergie correspondant à une puissance d'un mégawatt thermique pendant une heure
PAC	Pompe à chaleur
PAC Hybride	Pompe à chaleur air/eau accompagnée d'une chaudière à condensation gaz en back-up
PCI ou PCS	Pouvoir calorifique inférieur ou supérieur
SCOP	Coefficient de performance saisonnier
THPE	Très Haute Performance Energétique
TRV	Tarifs Réglementés de Vente de l'énergie
TTC	Toute Taxe Comprise

5 Annexes

5.1 Revue de littérature : synthèse des bénéfices long terme des PAC hybrides

Les PAC hybrides sont des systèmes de chauffage efficaces, composées d'une PAC de faible puissance et d'une chaudière à condensation THPE qui réalise l'appoint. Actuellement, les pouvoirs publics, à travers la SNBC notamment, se focalisent principalement sur le déploiement des PAC avec appoint électrique. Cependant, de nombreuses études analysent l'impact de l'installation à grande échelle de PAC hybrides. Les avantages à long terme des PAC hybrides peuvent être classés en trois parties :

- | Bénéfices pour le consommateur
- | Bénéfices pour le système énergétique
- | Bénéfices environnementaux

5.1.1 Bénéfices pour le consommateur

LA PAC HYBRIDE EST FACILE A INSTALLER EN REMPLACEMENT D'UNE CHAUDIERE A GAZ

Pour des logements se chauffant actuellement grâce à une chaudière à gaz, l'installation d'une PAC hybride est d'autant plus facile qu'elle ne nécessite pas un remplacement de tout le système de chauffage interne au logement, comme le **réseau hydraulique** et **l'ensemble des radiateurs**, là où pour avoir une utilisation optimale des PAC électriques, un changement de l'ensemble des émetteurs en émetteurs à basse température est nécessaire. [1, 5] Ce remplacement du système de chauffage interne est coûteux et apporte des désagréments aux ménages souhaitant installer des PAC électriques.

LA PAC HYBRIDE EST UN SYSTEME DE CHAUFFAGE MOINS ENCOMBRANT QU'UNE PAC ELECTRIQUE

Contrairement aux PAC électriques, l'ajout d'un ballon d'eau chaude n'est pas nécessaire dans le cas d'une PAC hybride, la chaudière à haute performance énergétique permettant de produire de l'ECS instantanément. Le dimensionnement plus faible de la PAC diminue la taille et le bruit de l'équipement, ce qui devrait par ailleurs améliorer l'acceptabilité du déploiement à grande échelle. [5]

LA PAC HYBRIDE EST COMPATIBLE AVEC DES RENOVATIONS PAR ETAPE PERMETTANT D'ACCELERER LE RYTHME DE RENOVATION

Une rénovation lourde est actuellement très **coûteuse** pour être effectuée à grande échelle. Il faut compter entre 700 et 1 200 €/m² pour des travaux d'amélioration de l'isolation¹⁴. Le prix moyen d'une maison étant de 2 200€/m², une rénovation lourde revenant à au moins 30% des prix moyens d'une maison est difficile à mettre en place à grande échelle.

Le rythme de rénovation actuel est par ailleurs trop lent par rapport à ce qui est prévu par la SNBC en France. Aujourd'hui, entre 100 000 et 200 000 rénovations complètes équivalentes sont effectuées par an, or il faudrait atteindre un rythme de l'ordre de 340 000 rénovations BBC équivalentes¹⁵ annuelles jusqu'en 2030 et 740 000 rénovations annuelles jusqu'en 2050 [9]. Cet écart est d'autant plus important que les rénovations sont effectuées actuellement en majorité dans des logements sociaux détenus par des organismes publics, logements pour lesquels la rénovation à grande échelle est plus facile à mettre en place. [7]

La PAC hybride, par son dimensionnement et sa flexibilité, est **adaptée à des logements de degrés de rénovation variés**. [1, 2] Ainsi, il n'y a pas de contrainte au déploiement immédiat des PAC hybrides et toute étape de rénovation supplémentaire permettra de réduire la consommation énergétique du logement tout en évitant un surdimensionnement initial coûteux du système de chauffage, conduisant par la suite à un usage non optimal de la PAC, peu modulante. En comparaison, dans le cas d'une PAC électrique, la rénovation énergétique complète du logement est fortement recommandée en amont de l'installation car un surdimensionnement de l'installation de chauffage représente un surcoût non négligeable à l'achat et à l'usage.

LA PAC HYBRIDE EST MOINS CHERE QU'UNE PAC ELECTRIQUE ET PERMET DE BENEFICIER DE LA FLEXIBILITE ET LA RESILIENCE DE LA BIENERGIE

Les **coûts d'investissement et d'installation pour acquérir une PAC hybride sont plus faibles** que ceux d'une PAC électrique, de l'ordre de 25% à 50% moins chers. [2, 5, 7]

La PAC hybride permet de réduire la facture énergétique des logements dans le cas du développement à grande échelle et de la mise en place de **marchés adaptés valorisant la flexibilité et la résilience**. Même avec la tarification actuelle, l'installation d'une PAC hybride par rapport à une PAC avec appoint électrique peut amener dès aujourd'hui une réduction de la facture énergétique de jusqu'à 50% au Royaume-Uni [1], et la démocratisation du **marché de l'effacement** sur le système électrique permettrait un bénéfice pour un logement équipé de PAC hybride de l'ordre de 150 £/an au Royaume-Uni [2]. Aussi, une PAC hybride permet une remontée en température rapide et efficace, donnant la possibilité à un logement d'arrêter son système de chauffage pendant une période d'absence sans observer un pic de consommation lors du rallumage, comme ce se fait actuellement avec des

¹⁴ Ordre de grandeur des travaux d'amélioration de l'isolation conseillé par [La Maison Saint Gobain](#)

¹⁵ Une rénovation BBC équivalente permet de transformer un logement en Bâtiment Basse Consommation, label décerné lorsque la consommation du logement passe sous un seuil réglementaire dépendant de la zone géographique et de l'altitude. Plus d'infos sur [Le Guide Rénovation Effinergie](#)

chaudières à gaz qui suivent les besoins en chauffage du logement (une PAC électrique est plus efficace lors d'une utilisation régulière et constante). [5]

Aujourd'hui, aucune valeur n'est placée sur la résilience d'un équipement. Or cette **résilience** est un **atout** non négligeable de la PAC hybride par rapport à une PAC électrique : en cas d'incidents techniques (coupure de courant à cause de la mise en arrêt d'une centrale électrique) ou naturels (chute d'un arbre sur une ligne du réseau électrique), la PAC hybride peut satisfaire les besoins de chauffage d'un logement tout en diminuant grandement la consommation électrique du logement : cela permet d'éviter les coupures d'approvisionnement sur le réseau. [2] Aussi, dans le cas d'une coupure de courant généralisée, l'utilisation d'une batterie de véhicule électrique (en Vehicle To Grid) peut garantir une puissance nécessaire au bon fonctionnement de la chaudière à condensation pendant plusieurs jours, le temps nécessaire pour que le réseau se rétablisse.

LA PAC HYBRIDE PERMET AUX CONSOMMATEURS DE DEVENIR ACTEURS DE LA TRANSITION

Les PAC hybrides permettent de transformer les consommateurs en contributeurs actifs de la transition énergétique. La PAC hybride facilite l'intégration des énergies renouvelables et l'optimisation du système énergétique. Elles contribuent ainsi, à l'échelle de chaque logement, au projet de transformation de la société.

COMME UNE PAC ELECTRIQUE, LA PAC HYBRIDE APPORTE UN BON CONFORT THERMIQUE

En plus de leur grande efficacité, les PAC sont des équipements multi-usages : chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation. Comme les besoins de climatisation sont enclin à augmenter dans les prochaines décennies à cause du changement climatique, l'installation d'une pompe à chaleur dans un logement est un choix intéressant pour à la fois décarboner le chauffage résidentiel, mais aussi pour garder un confort thermique en cas de températures extrêmes, lors de vagues de froid comme de chaleur. [3] A noter, une PAC ne peut servir de climatiseur uniquement pour des logements possédant un plancher ou un plafond chauffant, ce qui est assez rare dans le cas d'un logement en rénovation.

5.1.2 Bénéfices pour le système énergétique

LE DEPLOIEMENT MASSIF DE PAC HYBRIDES PERMET LA REDUCTION DE LA POINTE ELECTRIQUE, DIMINUANT AINSI LES INVESTISSEMENTS NECESSAIRES DANS LES CAPACITES DE PRODUCTION DE POINTE

De par son efficacité, la PAC hybride, au même titre que la PAC électrique, permet de réduire la pointe électrique d'un logement par rapport à une habitation se chauffant à l'électricité actuellement. [3]

Cependant, la PAC hybride bénéficie d'un moyen de flexibilité non négligeable et peut être pilotée de manière à limiter sa consommation au moment d'une pointe électrique sur le réseau : par rapport à

une PAC électrique, une PAC hybride permet de diminuer la pointe annuelle de consommation d'électricité de l'ordre de 2 kW_e par logement, soit diminuer sa consommation électrique de près de 30% au moment où le réseau électrique est le plus contraint. [5] Dans certains cas, la pointe électrique de la PAC électrique est plus de 2 fois supérieure à celle de la PAC hybride. Par ailleurs, ce résultat est illustré dans la présente étude : la capacité réservée par une maison individuelle se chauffant grâce à une PAC électrique est nettement supérieure à celle de la PAC hybride, nécessitant à cette occasion un abonnement électrique de 12 kVA contre 9 kVA pour la PAC hybride.

Ainsi, des scénarios alternatifs à la SNBC qui intègrent un large déploiement des PAC hybrides prévoient une diminution de 5 à 10 GW de capacités installées de pointe à l'échelle de la France entière à horizon 2050 en comparaison à la SNBC. Les capacités de pointe étant par nature des installations fonctionnant sur des courtes périodes de l'année, elles peinent à trouver une rentabilité et se trouvent à contre-courant des ambitions annoncées en matière de transition environnementale. [6 et 7] Pour donner un ordre de grandeur, les capacités installées de centrale à fioul et à charbon en France étaient de 5,4 GW en 2020. A horizon 2035, le déploiement de PAC hybrides à la place de PAC électriques conduirait à diminuer la pointe de 1,4 GW par million d'installations. [11]

LA REDUCTION DE LA POINTE ELECTRIQUE INDUITE PAR LE DEPLOIEMENT MASSIF DES PAC HYBRIDES DIMINUE LES BESOINS D'INFRASTRUCTURES DE RESEAUX (PARTICULIEREMENT SUR LE VOLET DISTRIBUTION)

L'électrification de la consommation résidentielle et notamment celle du chauffage représente une part importante de l'augmentation de la pointe d'ici à 2050. Le coût subséquent sur les infrastructures de réseau risque d'être fortement augmenté dans le cas où les objectifs d'efficacité énergétique ne sont pas atteints. Ainsi, si le rythme des rénovations était plus faible que prévu, ne pas rénover 3% des logements conduirait à un accroissement de la pointe de consommation électrique de 10% par rapport à ce qui est prévu dans la SNBC. [8]

Les PAC hybrides offrent une possibilité de limiter ce risque en réduisant la pointe nette de consommation. [8] L'installation de 6 millions de PAC hybrides permettrait de réduire ce surcoût de près de 40%, principalement au niveau des réseaux locaux (BT et HTA). Dans le cas où les efforts sur l'efficacité sont en phase avec les objectifs, l'installation des PAC hybrides conduit à une diminution de la pointe nette moyenne par commune de 4%.

Par rapport à un scénario 100% électrique pour satisfaire les besoins de chauffage, le déploiement des PACs hybrides pourraient permettre une diminution du surplus d'installations de réseaux de transport et de distribution d'électricité de 16% à 50% au Royaume-Uni à horizon 2050. [1]

LA FLEXIBILITE DE LA PAC HYBRIDE AUGMENTE LA CAPACITE DE RESILIENCE DU SYSTEME ENERGETIQUE

Avec le déploiement à grande échelle des sources de production d'électricité intermittentes, les besoins de flexibilité augmentent grandement, de tel sorte qu'il devient crucial de trouver de nouvelles

sources de flexibilité provenant de la pilotabilité de la demande. L'installation de ballons d'eau chaude en accompagnement des PAC électriques ainsi que le déploiement des véhicules électriques permet d'apporter de la flexibilité quotidienne au système énergétique dans son ensemble (directement en phase avec la production d'électricité par panneaux solaires, dont les cycles de production sont quotidiens). La pilotabilité des PAC hybrides peut permettre d'apporter l'outil de flexibilité nécessaire à l'échelle hebdomadaire. [10]

La capacité des PAC hybrides à pouvoir s'effacer sur les réseaux électriques est une capacité permettant de soulager le réseau en cas de tension forte (par exemple lors d'évènements climatiques particuliers comme un système anticyclonique en Europe pendant une dizaine de jours réduisant grandement la production d'origine éolienne, ou bien des incidents locaux rendant inutilisables certaines lignes du réseau électrique et accroissant ainsi la tension sur le réseau). [1, 2, 8] Un arbitrage peut être effectué pour favoriser un effacement lié au dimensionnement des réseaux locaux et/ou à un effacement lié au parc de production d'électricité. Cet arbitrage pourrait passer par un signal prix communiqué au logement prenant en compte ces deux dimensions.

LE DEPLOIEMENT A GRANDE ECHELLE DES PAC HYBRIDES ENTRAINE UNE REDUCTION DES COÛTS GLOBAUX DU SYSTEME ENERGETIQUE

A l'échelle européenne, l'installation à grande échelle de PAC hybrides (70% du chauffage est assuré par des PAC électriques et 30% par des PAC hybrides) pourrait réduire les coûts de fonctionnement du système énergétique de 1,6 Mds €/an à horizon 2050 par rapport à un scénario dans lequel tous les besoins de chauffage résidentiel sont assurés par des PAC électriques. [4]

En considérant des coûts plus globaux et une optimisation plus importante du système énergétique, certaines études présentent des coûts économisés bien plus importants à l'échelle européenne. En effet, les gains effectués sur le coût des systèmes de chauffage (entre 4,7 et 47 Mds €/an, les PAC hybrides coûtant moins cher que les PAC électriques) et les gains sur les coûts d'infrastructures (entre 9,5 et 17 Mds €/an, les PAC hybrides permettant une diminution des pointes électriques) permettent largement de compenser les dépenses supplémentaires liées à l'énergie de chauffage (jusqu'à 7 Mds €/an, le coût de production du biométhane étant, en moyenne, supérieur au coût de production de l'électricité renouvelable). En fonction des scénarios d'ambition de déploiement des PAC hybrides différente, l'installation à large échelle des PAC hybrides permet ainsi des économies comprises entre 3,4 Mds €/an et 81,8 Mds €/an pour l'ensemble de la société européenne, en incluant les dépenses liées à la production d'électricité qui peuvent soit diminuer jusqu'à 17,8 Mds €/an, soit augmenter jusqu'à 3,8 Mds €/an. [1]

A l'échelle du Pays de Galles, jusqu'à 1,5 Mds £/an [2] peuvent ainsi être économisés, en prenant en compte les économies réalisées par optimisation du parc de capacités installées et du réseau électrique.

Grâce aux bénéfices économiques apportés par les PAC hybrides au système dans son ensemble, cette technologie est considérée comme étant une *no-regret technology*, [7] c'est-à-dire une technologie

dans laquelle des investissements de grande ampleur peuvent être réalisés dans les prochaines décennies. Le développement d'une telle technologie apporte des bénéfices de manière quasi-certaine au système dans sa globalité.

LES PAC HYBRIDES SONT DES OUTILS DE PILOTABILITE ET D'OPERATIONNABILITE POUR LE SYSTEME ENERGETIQUE DANS SON ENSEMBLE

Le déploiement des PAC hybrides permet d'introduire un outil opérationnel de pilotabilité supplémentaire pour les smart grids, répondant à un besoin non satisfait de capacité d'effacement sur des durées dépassant la journée. De plus, ceci permet de tirer pleinement profit des compteurs communicants pour optimiser l'intégration des ENR et l'optimisation des infrastructures. Les bénéfices opérationnels de la pilotabilité des PAC hybrides permettent non seulement de diminuer les contraintes du système de production d'électricité mais aussi de faciliter la gestion des réseaux de transport, de répartition et de distribution.

5.1.3 Bénéfices environnementaux

GRACE A LEUR EFFICACITE, LES PAC HYBRIDES ET LES PAC ELECTRIQUES PERMETTENT DE REDUIRE IMMEDIATEMENT LA CONSOMMATION D'ENERGIES FOSSILES

L'utilisation d'équipements de chauffage efficace permet de réduire la consommation d'énergie primaire, et donc de réduire la consommation d'énergies fossiles, lors du remplacement de système de chauffage fonctionnant aux énergies fossiles (chaudière à gaz, chaudière à fioul et même chauffage électrique dans le cas d'un mix électrique carboné). Ainsi, une baisse des émissions de CO₂ s'ensuit grâce à l'installation de PAC, qu'elles soient 100% électriques ou accompagnées d'un appoint gaz efficace (chaudière à haute performance énergétique). [3]

Avec le déploiement quasi-systématique des PAC hybrides au Royaume-Uni, une diminution des émissions cumulées entre 2020 et 2050 peut atteindre jusqu'à 106 Mt CO₂. [2] Ceci est permis par la capacité des PAC hybrides à choisir à tout instant l'énergie la plus décarbonée, grâce à un pilotage fin qui pourra être mis en place par une utilisation poussée des compteurs intelligents. [1]

LA PILOTABILITE DE LA PAC HYBRIDE PERMET DE CHOISIR A TOUT INSTANT L'UTILISATION DE L'ENERGIE LA MOINS CARBONNEE INDUISANT AINSI UNE DECARBONATION DU CHAUFFAGE RESIDENTIEL

Les PAC hybrides, bénéficiant de l'avantage de la biénergie, peuvent choisir en tout instant de fonctionner en utilisant l'énergie la moins carbonée entre le gaz et l'électricité. Une électricité décarbonée est facilement utilisable par la PAC hybride pour satisfaire les besoins de chauffage d'un logement.

Dans le cas d'une vague de froid pendant laquelle les renouvelables ne permettent pas de décarboner suffisamment le mix électrique, il peut être plus avantageux d'utiliser du gaz directement par la chaudière à très haute performance énergétique de la PAC hybride que d'utiliser ce gaz pour produire de l'électricité dans des centrales à gaz et d'utiliser cette électricité par la PAC.

Grâce à cette capacité de pilotabilité, les PAC hybrides permettent de diminuer les émissions de CO₂ de 3,5 Mt CO₂/an en France à horizon 2035 pour un déploiement de 2 millions de PAC hybrides en remplacement de chaudières à gaz. Ainsi, en 2035, par rapport aux pompes à chaleur électriques, les PAC hybrides permettent de **réduire la pointe sans augmenter les émissions de CO₂. [11]**

LA PAC HYBRIDE PEUT PERMETTRE DE DECARBONER LE CHAUFFAGE RESIDENTIEL DE MANIERE MOINS COUTEUSE POUR LE SYSTEME GLOBAL

A l'échelle de l'Union Européenne, les émissions annuelles énergétiques de Gaz à Effet de Serre peuvent diminuer de 42,5 Mt CO₂/an par l'hybridation de 30% des PAC dans l'ensemble du parc résidentiel européen en 2050 comparé à la situation actuelle. Cette décarbonation est plus économique que ce qui est accessible dans un scénario 100% électrique, les économies réalisées étant de l'ordre de 1,6 Mds €/an sans prendre en compte l'optimisation du parc de capacités installées. [4]

Actuellement la décarbonation du chauffage résidentiel est envisagée par une rénovation lourde couplée à l'installation d'une PAC électrique, non accessible pour tous les milieux sociaux. Le développement à large échelle des PAC hybrides, associée à une rénovation par étape du bâti, permettrait en France la décarbonation des logements de manière moins coûteuse. L'utilisation, pour chaque secteur, des vecteurs et technologies les plus adaptés permettrait de réduire les coûts de la décarbonation de 14 Mds €/an, dont 5 Mds €/an pour le résidentiel en misant sur le déploiement à large échelle des PAC hybrides, dans des scénarios alternatifs à la SNBC. [8] L'effacement au moment de la pointe électrique est le phénomène prépondérant dans ces économies de coûts pour le système dans son ensemble.

LA TECHNOLOGIE DE LA PAC HYBRIDE EST NON SEULEMENT MATURE MAIS AUSSI ELLE SE SUBSTITUE FACILEMENT A UNE CHAUDIERE DE MANIERE IMMEDIATE, CE QUI LA REND DEPLOYABLE rapidement A GRANDE ECHELLE

La facilité d'installation mentionnée dans la section précédente relative aux bénéfiques pour les consommateurs est aussi valable ici, reposant notamment sur la non-nécessité de remplacer tout le système de chauffage interne au logement comme le réseau hydraulique et l'ensemble des émetteurs. [1, 5] En substitution directe à des chaudières à gaz, les PAC hybrides permettent une baisse immédiate et rapide des émissions de GES.

Cette facilité d'installation, couplée à sa capacité à décarboner le chauffage résidentiel, fait des PAC hybrides des équipements de chauffage résidentiel intéressant à déployer dès à présent à grande échelle. Le nombre d'installations en 2019 étaient encore uniquement de 32 000 équipements en France, Allemagne, Royaume-Uni, Italie et Pays-Bas [1]

Leur relativement faible coût d'investissement, leur efficacité, leur résilience, leurs bénéfices environnementaux et leur compatibilité au smart grid font des PAC hybrides des solutions pertinentes pour un déploiement à grande échelle dès aujourd'hui. [1, 5]

LA PAC HYBRIDE PERMET UNE OPTIMISATION DE L'UTILISATION DE LA BIOMASSE A LA FOIS DE MANIERE GLOBALE MAIS AUSSI LOCALE, POUVANT PERMETTRE UNE ADHESION DE LA POPULATION A UN PROJET D'ECONOMIE CIRCULAIRE NECESSAIRE POUR LA TRANSITION ENVIRONNEMENTALE

Le développement des PAC hybrides est utile pour montrer à la population les bénéfices d'un système multi-énergie, en termes de résilience et de sécurité d'approvisionnement. La sensibilisation de la population aux problématiques du changement climatique et de la sécurité d'approvisionnement énergétique va permettre d'accélérer la production de biogaz de manière locale, ce qui pourrait dynamiser les zones rurales [1, 2]

Le déploiement à grande échelle des PAC (électriques ou hybrides) permettra de développer une filière et un ensemble d'emplois, estimés à près de 54 000 pour la production, l'installation et la maintenance en Europe. [3] La filière des chaudières étant bien développée en Europe et les pièces à haute valeur ajoutée des PAC étant majoritairement importées d'Asie, la démocratisation des PAC hybrides permettra de créer de la valeur directement en Europe, grâce au petit dimensionnement de la PAC pour le système PAC hybride.

Aussi, les PAC hybrides permettent de se couvrir de deux risques majeurs directement liés à la transition : les rythmes de rénovation et de déploiement des énergies renouvelables. En effet, grâce à la possibilité d'installer une PAC hybride dans un logement en cours de rénovation et à sa capacité à choisir l'énergie la plus décarbonée, la PAC hybride est adaptée non seulement à la transition environnementale mais aussi à une société post-transition dans laquelle la neutralité carbone est atteinte.

6 Références

1. **Guidehouse.** *Unlocking the hybrid potential in European buildings.* 2021.
2. **Navigant, a Guidehouse company.** *Benefits of Hybrid Heat Systems in a Low Carbon Energy System.* 2020.
3. **European Copper Institute.** *Integrating technologies to decarbonise heating and cooling.* 2018.
4. **European Commission, Directorate-General for Energy.** *Decentralised heat pumps: system benefits under different technical configurations: METIS Studies, study S6.* 2019.
5. **Element Energy Limited.** *Hybrid Heat Pumps.* 2017.
6. **Artelys/Coénove.** *Quelles alternatives en 2050 pour une neutralité carbone dans le résidentiel.* 2019.
7. **ENGIE, TSE et Terra Nova.** *Quelles solutions pour une Transition Energétique économique et résiliente.* 2022.
8. **GRDF.** *Estimation de l'impact sur les réseaux électriques entre 2020 et 2050 du scénario AMS de la SNBC.* 2021.
9. **Direction Générale de l'Energie et du Climat.** *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat.* 2020.
10. **European Commission, Directorate-General for Energy.** *Mainstreaming RES: flexibility portfolios: design of flexibility portfolios at Member State level to facilitate a cost-efficient integration of high shares of renewables.* 2019.
11. **RTE et ADEME.** *Evaluation de scénarios possibles pour décarboner le chauffage dans le secteur du bâtiment à l'horizon 2035.* 2020.