

AVIS D'EXPERTS

Mars
2024

Décarboner le chauffage : quelle place pour les pompes à chaleur ?

Décarboner les consommations d'énergie en phase d'usage des logements pour atteindre nos objectifs 2030 et 2050

Objet de cet avis d'experts

L'exploitation des bâtiments représente 47 % des consommations énergétiques françaises et génère 18 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES). Ces émissions sont principalement dues au chauffage et aux besoins thermiques (eau chaude sanitaire, cuisson) qui reposent aujourd'hui encore à plus de 50% sur des énergies fossiles (fioul, gaz fossile).

Passer d'une énergie fossile à un vecteur décarboné devrait permettre d'abaisser rapidement et très significativement (d'un facteur 15 pour le fioul et 10 pour le gaz ¹) les émissions de CO₂.

Toutefois, les solutions ne sont pas universelles pas toutes matures, et ne peuvent s'envisager indépendamment de l'isolation. L'ADEME revient dans ce document sur les conditions de réalisation d'une telle transition.

La décarbonation des vecteurs n'est qu'un des leviers de la transition des bâtiments. La réduction des impacts de la phase d'usage des bâtiments passe par l'activation conjointe des leviers de sobriété, d'efficacité et de décarbonation. Par ailleurs, la phase d'usage des bâtiments n'est pas la seule à avoir un impact environnemental, les émissions scope 3 du bâtiment (c'est-à-dire celles liées aux produits de construction et équipements) représentaient 33% des émissions carbone de la chaîne de valeur du bâtiment en 2019. Enfin, les enjeux énergétiques et climatiques ne sont pas les seuls enjeux auxquels la trajectoire de transition doit répondre. Il faut s'intéresser également à la préservation des ressources matérielles et des sols, à la baisse des émissions de polluants atmosphériques, la précarité énergétique, la santé, l'adaptation au changement climatique...)

¹ calcul réalisé avec ces hypothèses : base empreinte : facteur d'émission électricité 2022 usage chauffage 60gCO₂/kWh, rendement d'une PAC de 2,5 ; facteur d'émission du gaz 242gCO₂/kWh ; facteur d'émission du fioul 384gCO₂/kWh

Ce qu'il faut retenir

L'isolation des bâtiments doit rester une priorité car elle répond à la fois à des enjeux de décarbonation, mais également à des enjeux plus larges de transition du secteur bâtiment (réduction de la consommation énergétique, réduction de la précarité énergétique, dimensionnement plus juste des équipements et donc meilleure efficacité et moindre coût, réduction de la sensibilité des logements à la température extérieure en été comme en hiver, amélioration de la flexibilité de la demande électrique ...).

La décarbonation des usages thermiques des logements de France métropolitaine repose sur deux leviers :

- d'une part, sur le changement des moyens de chauffage utilisant des vecteurs très carbonés (fuel et gaz d'origine fossile) vers des vecteurs moins carbonés (réseaux de chaleur urbains alimentés par des renouvelables et de récupération, électricité (via la pompe à chaleur, y compris géothermique), solaire thermique, bois, gaz renouvelable, ...),
- de l'autre, sur le développement des énergies renouvelables dans les réseaux d'énergie (par exemple : méthanisation, verdissage des réseaux de chaleur, éolien, photovoltaïque...). Les ressources en énergie décarbonée sont limitées et, par conséquent, la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments est un corollaire indispensable à la décarbonation des vecteurs.

La décarbonation du vecteur gaz est indispensable et son usage doit être modifié : Le potentiel de développement des différentes filières de production de gaz décarboné tenant compte des arbitrages avec les autres besoins sur la ressource primaire, varie, selon les scénarios de l'ADEME, entre 130 et 185 TWhPCI en 2050. En comparaison avec la consommation actuelle de gaz (430 TWh), atteindre un mix gazier quasiment décarboné (avec plus de 80% de gaz renouvelable) en 2050 n'est possible que si on divise au moins par deux la consommation de gaz. **A l'horizon 2050, la part du gaz dans le bâtiment devient minime car l'offre de gaz renouvelable est allouée en priorité à des usages du gaz non substituables (transport, industrie).**

Dans les logements neufs, la dynamique de décarbonation de la chaleur est bien engagée grâce à la RE2020, même s'il est possible d'aller encore plus loin pour réduire le poids carbone de l'exploitation de ces bâtiments, à la fois sur l'efficacité énergétique des bâtiments et sur le recours aux ENR et énergies moins carbonées produites sur site ou à proximité.

En logement existant, des solutions alternatives au fioul et au gaz existent, mais avec des niveaux de maturité et des conditions de mise en œuvre différents selon les typologies de logement. Notamment, les logements collectifs en chauffage individuel ont à l'heure actuelle peu d'alternatives au gaz

Zoom sur les pompes à chaleur (PAC)

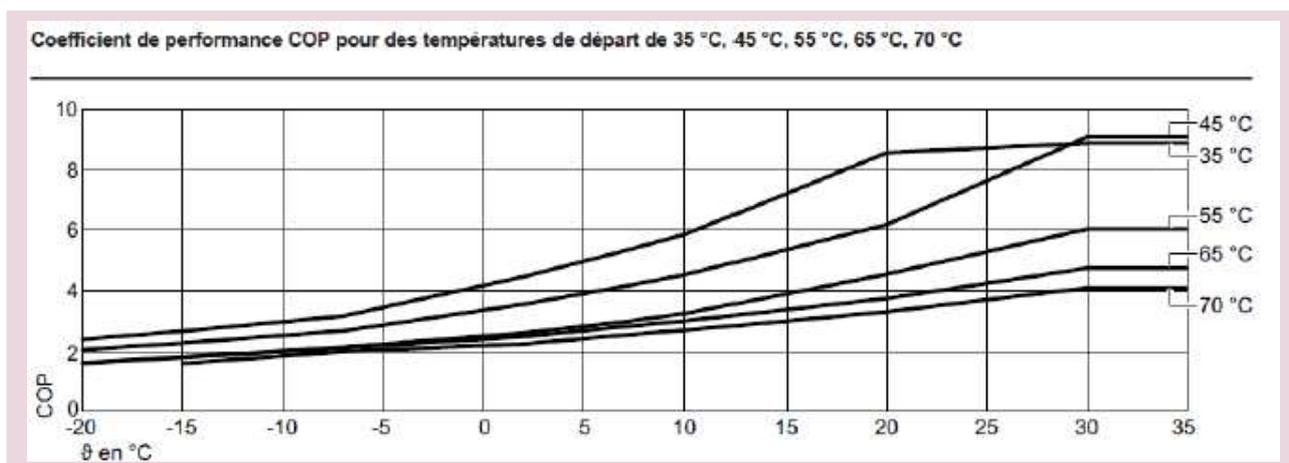
Les performances annuelles normatives des PAC restent toujours supérieures au chauffage électrique à effet joule, qui est par ailleurs actuellement responsable d'une partie très significative de la pointe électrique en hiver¹. La condition pour limiter les appels de puissance associés (et donc de limiter l'impact carbone de l'électricité) est de substituer également une partie du chauffage à effet Joule dans les logements. Ainsi, d'après RTE, la consommation d'électricité dans les bâtiments devrait rester relativement stable entre aujourd'hui et 2030 et même baisser en 2035, sous l'effet conjoint de l'isolation performante et du remplacement du chauffage électrique à effet Joule par des pompes à chaleur.

Le développement des PAC en remplacement du chauffage au gaz et au fioul aura toutefois un impact sur le système électrique : d'après RTE, la pointe de consommation du chauffage électrique pourrait augmenter d'environ 6 GW en 2030, tout en restant absorbable par le système électrique : substituer plus de radiateurs à effet joule par des pompes à chaleur permettrait de réduire cette pointe (-2GW), de même que l'isolation plus généralisée des logements qui installent une PAC (-2GW)².

La pompe à chaleur est donc une solution efficace à promouvoir pour substituer rapidement les chaudières à gaz ou au fioul mais elle n'est pas la seule, doit être correctement réalisée et préférentiellement réalisée après renforcement de l'isolation du bâti.

Le remplacement d'un chauffage fossile par une PAC sans procéder à l'isolation préalable du bâtiment induit certes une baisse rapide des émissions nécessaire à l'atteinte des objectifs 2030, mais conduit à un surdimensionnement de la PAC, donc à un surcoût (à l'investissement et à l'usage). De plus en captant les économies d'énergie les plus rentables, la priorisation des PAC au détriment de l'isolation entraîne une moins bonne rentabilité de cette dernière si elle est mise en œuvre dans un second temps. **Il y a dans tous les cas un réel intérêt à travailler, d'une part, sur l'isolation en amont de la pose d'une PAC afin de pouvoir demander une eau moins chaude (le bâti étant moins déperditif), et, de l'autre, adapter les émetteurs (radiateurs) et la régulation du chauffage afin de profiter au mieux des bonnes performances des PAC, de diminuer sa puissance, son encombrement et les coûts d'investissements associés. La décarbonation réelle et profonde des bâtiments passera donc d'abord par la baisse des besoins puis par l'installation d'appareils de productions performants.**

Une PAC prélève des calories dans un milieu (air extérieur, sol, nappe d'eau) et les transfère dans le logement via des émetteurs de chaleur : sa performance est meilleure si la différence de température entre la source et la température de l'air/l'eau chauffée est plus faible. Pour une température extérieure donnée, le COP (= la performance) pour une eau à 35°C est quasiment le double que pour une eau à 70°C. Ainsi, la PAC sera plus performante si la température de l'eau nécessitée par les émetteurs (radiateurs) est basse. Or, celle-ci dépend des besoins thermiques du bâtiment, et donc de son niveau d'isolation.



Source : donnée constructeur, exemple pour une PAC air/eau

Exemple : Pour un bâtiment chauffé au gaz ou au fossile sur un régime de température classique (radiateurs à 70°C), la pose d'une PAC air-eau sans isolation et sans changement des émetteurs peut conduire à une performance annuelle environ 2 fois moins bonne avec une puissance installée 3 fois plus importante qu'après isolation.

En logements collectifs, la baisse des besoins thermiques du bâtiment collectif sera nécessaire pour diminuer les régimes de températures dans les émetteurs (radiateurs), réduire les puissances en jeu et permettre l'installation d'ENR.

L'hybridation d'un système, qui consiste à mixer les systèmes (énergie fossile et énergie renouvelable, ou énergies renouvelables complémentaires (PAC+ bois), PAC hybride électricité + gaz), **peut se révéler pertinente lorsqu'il n'est pas possible de procéder à court terme à une rénovation performante du ou des logements (voir avis d'expert ADEME sur la rénovation performante, à paraître).**

Le développement de la pilotabilité de la demande des bâtiments est un élément clé de la décarbonation de la chaleur. L'isolation, parce qu'elle permet de supprimer et décaler les consommations de chauffage, joue un rôle central.

¹ : source : Etude ADEME – RTE sur le chauffage, 2018, https://assets.rte-france.com/prod/public/2021_01/Rapport%20chauffage_RTE_Ademe.pdf. En France, 9,5M de logements sont chauffés à effet joule en 2018, pour seulement 1 à 2 Millions de logements chauffés avec des pompes à chaleur. Le chauffage électrique contribue pour plus d'un tiers à la puissance appelée en période hivernale.

² BP RTE 2023-2035, synthèse p 84, gain de l'ordre de 2 GW sur la pointe en 2030 en augmentant de 100 000 le nombre de rénovations performantes annuelles sur les logements installant une PAC ; gain de 2 à 3 GW sur la pointe en 2030 en augmentant le rythme annuel de remplacement de radiateurs électriques par des PAC de ~150000 logements par an.

Principales recommandations de l'ADEME

L'ADEME recommande de :

Privilégier les approches globales qui allient isolation et énergie décarbonée. Dans les logements existants, les aides financières doivent orienter les ménages en priorité vers des rénovations performantes. Lorsque ce n'est pas possible (capacité financière du ménage limitée, non disponibilité de la main d'œuvre ...), elles doivent être calibrées afin de respecter les préconisations techniques associées aux gestes de rénovation pour ne pas hypothéquer la performance à terme.

Faire appel à l'ensemble des énergies décarbonées et en favoriser le développement. Au-delà de l'action sur les équipements du bâtiment, la décarbonation du bâtiment repose également sur la capacité de développement de toutes les filières d'énergies renouvelables. Des mesures doivent donc être prises pour accélérer leur développement (solaire thermique, réseaux de chaleur, ENR électriques, gaz renouvelable).

Cibler les logements chauffés aux énergies fossiles (fioul et gaz) : renforcer le ciblage « passoire carbone » dans la politique de rénovation des logements déjà engagé en 2024¹, développer un « aller vers » les ménages chauffés au gaz et au fioul au-delà de la simple mise à disposition d'aides financières, faire un suivi de la prise de décision de ces ménages. Dans le cas où les solutions techniques performantes ne sont pas déployables à court terme, les ménages doivent être incités à entreprendre une rénovation performante afin de réduire au maximum l'impact carbone de leur logement.

Sécuriser la stratégie de développement des pompes à chaleur. Les PAC ont un rôle clé à jouer dans la décarbonation de la chaleur des bâtiments. Cependant, il est nécessaire d'en sécuriser le déploiement via un soutien à la recherche et développement (identifier le juste niveau d'isolation à atteindre avant d'installer une PAC, développer des systèmes adaptés à toutes les typologies de bâtiments, développer des équipements avec des fluides frigorigènes à faible impact environnemental...), d'organiser de la remontée et du partage de données sur la performance des PAC en conditions réelles d'utilisation, d'appuyer l'industrialisation de la filière, de former sur toute la chaîne de valeur afin d'assurer des installations de qualité, et, enfin, de conditionner les aides financières aux pompes à chaleur à des critères permettant d'assurer leur performance (isolation, capacité de modulation de puissance, pilotabilité...).

Envisager l'arrêt de l'installation de chaudières à gaz uniquement dans les situations où les solutions technologiques alternatives sont matures et développer les alternatives dans les autres cas. Les solutions alternatives au chauffage au gaz sont encore peu matures en logements collectifs équipés de chauffage individuel, pour des questions de coûts, d'encombrement et de faisabilité technique. En logement collectif chauffé par du chauffage collectif, des alternatives se développent. Cette typologie de logement pourra être prioritairement alimentée par des énergies renouvelables d'ici la fin de la décennie.

Dans les maisons individuelles, les alternatives au chauffage au gaz sont matures, la fin de leur installation peut donc d'ores et déjà être envisagée.

Considérer également les besoins de froid. Au regard de l'augmentation des épisodes de chaleur dégradant considérablement l'habitabilité de nombreux logements, il est nécessaire de prendre en compte les besoins de froid, de communiquer sur les bons gestes pour se protéger de la chaleur (protections solaires, ventilation...) et de déployer des systèmes de rafraîchissement efficaces et peu consommateurs (brasseurs d'air, géocooling...).

1 : voir les évolutions de Ma Prime Rénov en 2024 : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20231012_MPR_DP.pdf

Mettre en place un bonus écologique pour les PAC : sans pour autant ralentir l'accélération de leur déploiement qui reste la priorité, l'ADEME recommande le développement progressif de politiques publiques d'incitation vers les matériels les plus performants sur l'ensemble de la chaîne de valeur (par exemple un bonus pour les PAC les plus performantes au regard des objectifs environnementaux, intégrant le contenu carbone lié à leur fabrication, à l'instar du bonus véhicules électriques qui se met en place). Ce dispositif, allant au-delà de l'étiquette énergie actuellement en place, aurait également des impacts positifs pour la ré-industrialisation en France et en Europe de l'ensemble de la chaîne de valeur, et tirerait l'ensemble de la filière vers le haut.

1. Contexte de la décarbonation du bâtiment

La décarbonation de la phase d'usage des logements répond à plusieurs enjeux. Tout d'abord, des **enjeux énergétiques et climatiques**. La trajectoire de décarbonation de la France implique d'accélérer dès aujourd'hui l'effort engagé dans tous les secteurs, dont le secteur du bâtiment. En phase d'usage, les logements en France métropolitaine consomment 30% de l'énergie finale française et émettent 10% des émissions de gaz à effet de serre. Leur trajectoire de transition se focalise sur deux échéances :

- A court terme, en 2030, la trajectoire est cadrée par les exigences de la Directive Efficacité Énergétique de 2023 (baisse d'environ 30% des consommations d'énergie finale de la France en 2030 (par rapport à 2012)), et pour le carbone, l'objectif Fit for 55 (réduction de 55% des émissions de l'Union Européenne en 2030).
- A plus long terme, en 2050, l'objectif français est celui de la neutralité carbone.

Des enjeux géopolitiques ensuite, pour répondre aux enjeux récents de tension sur l'approvisionnement en gaz, qui est pour sa quasi-totalité importé.

2. Les enjeux de la décarbonation des usages chauffage et eau chaude sanitaire dans le bâtiment

2.1 La décarbonation des vecteurs énergétiques n'est qu'un des leviers de la transition des bâtiments

La décarbonation du bâtiment est entendue ici comme la baisse des émissions de gaz à effet de serre liée à l'usage des bâtiments, et en particulier à ses usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson) reposant encore largement sur des énergies fossiles (fioul, gaz de réseau fossile). Elle est un levier clé de la transition écologique du bâtiment, mais elle n'est pas le seul levier à actionner pour réduire son impact environnemental :

- La réduction des impacts de la phase d'usage des bâtiments passe par l'activation conjointe des leviers de sobriété, d'efficacité et de décarbonation. L'ensemble des scénarios prospectifs actuels (et notamment les scénarios Transition(s) 2050, mais également celui de la Stratégie Nationale Bas Carbone) combine l'ensemble de ces leviers.
- La phase d'usage des bâtiments n'est pas la seule à avoir un impact environnemental. L'ensemble du cycle de vie du bâtiment a en effet des incidences environnementales. Les travaux récents menés dans le cadre de la Feuille de route décarbonation du cycle de vie du bâtiment ont mis en lumière qu'en 2019, les émissions scope 3 du bâtiment (c'est-à-dire celles liées aux produits de construction et équipements) représentaient 33% des émissions carbone de la chaîne de chaleur du bâtiment.

- Les enjeux énergétiques et climatiques ne sont pas les seuls enjeux environnementaux auxquels la trajectoire de transition doit répondre. On peut notamment citer les défis de la préservation des ressources matérielles et des sols, ou encore ceux de la baisse des émissions de polluants atmosphériques. Et les enjeux environnementaux ne sont pas les seuls à prendre en compte dans une perspective de transition juste, les enjeux sociaux et sanitaires sont en effets également importants.

2.2 L'isolation de l'enveloppe : une priorité

L'isolation du logement concerne ses murs, son toit, son plancher bas et ses ouvertures. Couplée à une ventilation efficace, elle comporte de nombreux avantages :

- Elle permet de réduire le besoin en chauffage du logement, et donc de nécessiter des équipements thermiques plus petits, moins coûteux et plus efficaces (et, dans le cas du chauffage au bois, moins polluants). L'isolation a aussi pour vertu de réduire la température de l'eau des émetteurs (pour les systèmes à eau), elle améliore l'efficacité des pompes à chaleur et chaudières à condensation.
- Elle rend les logements moins sensibles à la température extérieure. En hiver, elle limite la thermosensibilité de la production de chauffage et donc les risques liés aux pics de consommations sur le réseau électrique. Elle concourt à la flexibilité de la demande électrique. En été, elle permet de se protéger contre les épisodes caniculaires, sous réserve d'une bonne ventilation et d'une bonne protection contre le soleil.
- Elle permet aussi de limiter les investissements dans des systèmes de production d'électricité qu'ils soient renouvelables ou nucléaires.
- Elle est clé pour réduire la facture à long terme, et donc la précarité énergétique.

Aussi, l'isolation des bâtiments doit rester une priorité car elle répond à la fois à des enjeux de décarbonation, mais également à des enjeux plus larges de transition du secteur bâtiment.

2.3 La décarbonation des usages thermiques : condition nécessaire mais non suffisante

La décarbonation des usages thermiques repose sur deux leviers :

- **D'une part, le changement de vecteurs très carbonés, que sont le fuel ou le gaz d'origine fossile, vers des vecteurs moins carbonés que sont les réseaux de chaleur urbains, le bois, l'électricité (via la pompe à chaleur), le gaz renouvelable... faisant appel à des sources décarbonées.** Ce changement de vecteur pour la chaleur est un sujet qui concerne tous les bâtiments, y compris ceux qui sont déjà isolés et qui vont devoir changer leur système de production (bâtiments construits après 2000). Le choix d'une source d'énergie plutôt qu'une autre au niveau doit dépendre à la fois de caractéristiques intrinsèques au logement (caractéristiques architecturales, localisation proche ou non d'un réseau...), mais également d'une vision d'ensemble sur la disponibilité de la ressource et sur le contexte local (problématiques de qualité de l'air ...).
- **De l'autre, la baisse du contenu carbone des énergies, qui s'obtient en développant un réseau énergétique reposant sur des sources d'énergie moins carbonées** (énergies renouvelables, nucléaire). La décarbonation des logements dépend donc en partie de la capacité de développement des filières de développement des énergies renouvelables.

Les ressources en énergie décarbonée sont limitées. L'usage du bois (voir avis ademe sur la biomasse <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6860-biomasse-enjeu-strategique-de-la-transition-ecologique.html>) pour l'énergie doit se faire en cohérence avec les usages autres qu'énergétiques (matériaux de construction, meubles...), la capacité de production de biogaz dans les trois filières de production (méthanisation, pyrogazéification couplée à la méthanation (pour injection

de méthane de synthèse dans les réseaux) et power-to-methane) dépend de la disponibilité des ressources primaires (par exemple les produits et sous-produits de l'agriculture pour la méthanisation) et leur capacité technico-économique, celle en électricité dépend des capacités de développement des énergies renouvelables et/ou du nucléaire. **Pour cette raison, la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments est un corollaire indispensable à la décarbonation des vecteurs.**

Le fioul : l'enjeu de son éradication

3,6 millions de résidences principales étaient chauffées au fioul en 2020 (SDES, 2022). Il s'agit pour la quasi-totalité de maisons individuelles. 71% sont des étiquettes E, F ou G du Diagnostic de Performance Energétique (DPE), du fait du poids carbone important du fioul.

Dans les scénarios Transition(s) 2050, le fioul disparaît du bâtiment dans 3 des 4 scénarios (S1, S2 et S3). Dans le scénario 4, il reste des logements chauffés au fioul en 2050, mais les émissions du secteur sont bien plus élevées que l'enveloppe qui lui est allouée par la Stratégie Nationale Bas Carbone, et la société française, doit, dans ce scénario, faire appel à des technologies de puits carbone technologique encore peu matures à l'heure actuelle. La décarbonation des bâtiments implique donc la sortie du fioul.

Le gaz : le double enjeu du développement du gaz renouvelable et du repositionnement de sa place dans le bâtiment

Le développement du gaz renouvelable¹

Le gaz représentait 17 % de la consommation d'énergie finale en France en 2022 (288 TWhPCI, données corrigées des variations climatiques), principalement pour le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et la production d'électricité. **Ce gaz est en quasi-totalité d'origine fossile et importé.** Sa combustion a émis la même année 17 % des émissions totales de gaz à effet de serre de la France (80 MtCO₂eq). Outre sa combustion, sa production et son transport sont également à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 17 MtCO₂eq². Dans l'objectif de neutralité carbone en 2050, **l'enjeu est à la fois le développement du gaz d'origine renouvelable et la diminution de la consommation de gaz, en particulier d'origine fossile.** Cette réduction de la consommation de gaz et l'augmentation de la production de gaz renouvelable sur le territoire national permettra en outre d'améliorer la balance commerciale de la France et de renforcer son indépendance énergétique.

Face à une situation actuelle où l'injection de biométhane représente moins de 1 % du gaz consommé en France, le reste étant du gaz d'origine fossile importé, **la décarbonation du gaz d'ici 2050 est un défi de taille. Toutefois, le potentiel de développement des différentes filières de production de gaz renouvelable (méthanisation, couplage méthanisation avec le power-to-methane, pyrogazéification) à l'horizon 2050 est très important par rapport à aujourd'hui.** En tenant compte des arbitrages avec les autres besoins sur la ressource primaire, le niveau de production de gaz décarboné varie entre 130 TWhPCI et 185 TWhPCI en 2050. Ces faibles volumes, comparés à la consommation actuelle de gaz (entre 30 % et 43 %), traduisent les limites des ressources disponibles pour la production de gaz. L'atteinte de la neutralité carbone passe donc nécessairement par une diminution de la demande en gaz et/ou par le développement de solutions technologiques de captage et de stockage du carbone, stratégies qui présentent évidemment des impacts industriels et territoriaux très différents.

La politique environnementale et énergétique française devra prendre la forme d'un **soutien à l'innovation dans les technologies et de dispositifs de garanties d'origine**, déjà en place, qui assure la traçabilité du biométhane injecté dans le réseau.

¹ Section issue de Transition(s) 2050, Choisir maintenant, Agir pour le Climat

² Calcul d'après le facteur d'émission amont du gaz naturel du réseau en France en 2015 (Base CarboneR), issu de l'étude « Analyse du cycle de vie de la chaîne gazière » – GRT gaz, TIGF, STORENGY, GRDF, ELENGY de 2018. Les émissions de méthane provenant des infrastructures gazières représentent 2 % des émissions de méthane en France

Le développement massif de la méthanisation pose la question de son appropriation par la société, de sa cohérence avec les autres enjeux environnementaux (biodiversité, eau...), et des modèles agricoles associés. Pour cette raison, des dispositifs de certification comme Qualiméthà®, déployé depuis 2020 en France, demandent à être systématisés, voire perfectionnés à l'aune des retours d'expérience des projets.

Les coûts de production du gaz renouvelable sont et resteront plus élevés que celui du gaz fossile et son incorporation dans le mix gaz pourra impacter le prix facturé aux consommateurs. La compétitivité du gaz renouvelable dépendra donc d'une baisse de ses coûts de production. **Dans le cas où la rentabilité des projets de production de gaz renouvelable n'est pas assurée par le marché, le maintien et le développement de systèmes de tarifs d'achat est efficace.** Ce mécanisme, qui permet de garantir au producteur de gaz une rémunération à un prix fixe à long terme, sera certainement fondamental pour les filières émergentes comme la gazéification et le power-to-methane.

L'évolution de la place du gaz dans le bâtiment

Aujourd'hui, 12 millions de ménages se chauffent au gaz de réseau d'origine fossile. L'atteinte de la neutralité carbone en 2050 va nécessiter de réduire drastiquement cet usage émetteur de CO₂ mais cette transition doit s'envisager progressivement suivant les types de logement en trouvant des solutions de substitution vertueuses adaptées à chaque cas de figures et aux différentes typologies de logement.

Il est possible de laisser des logements alimentés au gaz dans le parc à condition que le gaz qui les alimente soit décarboné, et que leur consommation globale soit limitée pour ne pas aller au-delà des ressources en biogaz. Cela implique, d'une part, de diminuer la part totale des logements chauffés au gaz et, de l'autre, que les logements chauffés au gaz soient rénovés de manière plus performante que leurs homologues de la même étiquette afin de réduire leur consommation unitaire.

Dans l'ensemble des scénarios Transition(s) 2050, la part du gaz dans le bâtiment baisse significativement d'un facteur 3 à 4 car l'offre de gaz renouvelable est, dans tous les scénarios, allouée en priorité à des usages du gaz non substituables. Ces usages prioritaires sont notamment le transport longue distance (poids lourds, bus et autocars en particulier) ; les industries à haute température (par exemple les fours verriers ou les hauts fourneaux) ; le gaz matière première. Dans certains scénarios, les logements collectifs avec chauffage individuel déjà équipés au gaz sont considérés comme des usages difficilement substituables du gaz car il y est plus difficile de modifier les systèmes existants : ils constituent un « talon de consommation » de gaz pour les logements.

Les réseaux de chaleur : l'enjeu de leur verdissement et de leur déploiement

Les réseaux de chaleur et de froid permettent d'optimiser le dimensionnement et l'utilisation de moyens de production centralisés et locaux présentant une efficacité énergétique et économique intéressante pour la collectivité et les usagers. Ainsi, ces réseaux sont un moyen pertinent de distribuer des énergies renouvelables et de récupération qui ne pourraient pas être transportées autrement jusque dans les centres urbains denses (biomasse - par l'intermédiaire de chaudières à bois dotées de filtres pour limiter les émissions de polluants atmosphériques, géothermie, solaire thermique, énergies de récupération, essentiellement la chaleur issue des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)).

Le contenu CO₂ des réseaux de chaleur est en constante baisse depuis bientôt 10 ans. Les scénarios Transition(s) 2050 illustrent les voies possibles de décarbonation des réseaux. Des livraisons essentiellement couvertes par des EnR&R à l'horizon 2050 impliquent des efforts importants pour diminuer la part des réseaux de gaz. **La tendance commune à chacun des scénarios est l'accroissement significatif de la biomasse dès 2030, qui continue sa montée en puissance jusqu'en 2050. Dans une moindre mesure, la géothermie devra également croître pour suppléer les réseaux de gaz** (en particulier

dans S2 et S3). **Les UIOM représentent entre un quart et un tiers de la production suivant les scénarios, même si leur croissance est limitée en comparaison des autres énergies.** Les autres énergies renouvelables, telles que la chaleur de récupération, le biogaz et le solaire thermique, gardent une part relativement faible dans le mix énergétique des réseaux de chaleur.

La biomasse énergie : l'enjeu clé de disponibilité de la ressource

La biomasse énergie regroupe à la fois le bois utilisé par les ménages (appareils indépendants de chauffage type inserts, poêles ainsi que les chaudières dans les maisons et les immeubles collectifs), les chaufferies biomasse dans l'industrie, l'agriculture, le collectif et le tertiaire, ainsi que la chaleur renouvelable produite par les cogénérations biomasse et la part renouvelable de la chaleur produite par les unités de valorisation énergétique des déchets urbains. **La biomasse énergie utilisée en combustion, première énergie renouvelable en France avec près de 35 % de la production d'énergie renouvelable, a un rôle majeur à jouer dans la transition énergétique, en particulier par la production de chaleur.** Dans le secteur collectif/tertiaire, son développement passe par le développement des réseaux de chaleur. S'agissant du chauffage au bois domestique, il s'agit de remplacer à un rythme rapide les appareils indépendants de chauffage au bois peu performants (foyers, poêles, inserts) par des équipements plus performants en termes de rendement énergétique et de qualité de l'air, mais aussi d'augmenter le nombre de ménages équipés dans un contexte de maintien constant de la consommation de bois à l'échelle nationale.

Le développement des filières de biomasse présente des enjeux importants : **environnementaux** (atténuation du changement climatique par une réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à un recours plus faible aux énergies fossiles ; qualité de l'air, valorisation des cendres...) **enjeux relatifs à la ressource biomasse, enjeux économiques** (contribution à l'économie locale, à l'indépendance énergétique du pays et des territoires, bonne prévisibilité sur les coûts...), **enjeux sur les performances énergétiques** (les chaudières biomasse sont des technologies éprouvées à haut rendement énergétique. Il convient néanmoins de poursuivre le développement et la mise en place des meilleures technologies disponibles et d'être vigilant quant à leur dimensionnement et leur bonne exploitation.

L'électricité : vecteur clé de la transition, entre incertitude sur les volumes de demande et besoin de flexibilité

Le mix électrique français est actuellement peu carboné en opération, notamment du fait de l'importance du parc nucléaire. Le caractère peu carboné du mix électrique français, en phase de production, s'explique par l'importance du parc nucléaire, qui est complété par un parc de production hydraulique, éolien et photovoltaïque. Par conséquent, ce parc de production consomme relativement peu de matières fossiles en opération, hors périodes de pointe.

Si depuis 2010, la consommation d'électricité est relativement stable en France, sa part dans les usages est amenée à croître très significativement en pourcentage dans tous les scénarios de l'ADEME : de 27 % aujourd'hui, il pourrait être de 42-56 % en 2050. Décarbonée et/ou renouvelable, son utilisation croissante est nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone.

Dans les bâtiments, selon RTE, malgré l'électrification du chauffage, la consommation d'électricité devrait rester relativement stable entre aujourd'hui et 2030 et même baisser en 2035, sous l'effet conjoint de l'isolation performante et du remplacement du chauffage électrique à effet Joule par des pompes à chaleur.

Le chauffage électrique à effet joule est responsable d'une partie de la pointe électrique en hiver. D'après les travaux de RTE, **la condition pour limiter les appels de puissance associés (et donc de limiter**

l'impact carbone de l'électricité) est de remplacer une partie du chauffage à effet Joule par des pompes à chaleur dans les logements.

2.4 Logements neufs : une dynamique de décarbonation engagée

Les exigences de décarbonation du chauffage et de l'eau chaude sanitaire sont déjà en place dans le bâtiment neuf avec l'application de la RE2020 qui fixe un seuil d'émission de 4 kg CO₂eq/m²/an pour la maison individuelle (pour la production d'énergie) rendant la solution gaz fossile seule pour la production de chauffage et d'ECS impossible. Pour le logement collectif, une dérogation est pour le moment mise en place mais il en sera de même à partir de 2025.

Les bâtiments neufs d'aujourd'hui ne représenteront toutefois qu'une faible part du parc en 2050. En fonction des hypothèses sur le déploiement ou non d'une sobriété immobilière permettant de mieux utiliser le parc existant, la part des logements construits après 2015 dans le parc de logements en 2050 peut en effet varier de 12% (scénario 1 de Transition(s) 2050 à 36% (scénario 3).

Il est cependant possible d'aller plus loin sur l'efficacité énergétique des logements neufs et sa contribution à la décarbonation, notamment :

- Diminuer les besoins de chauffage et de refroidissement. Pour le secteur du logement, il est fort probable que le niveau imposé par la RE2020 notamment en matière de besoins de chauffage et de refroidissement ne soit pas encore optimum. Concrètement, cela veut dire prévoir un renforcement du besoin bioclimatique maximal "Bbio max", quelle que soit la zone climatique. A titre d'illustration, une étude récente menée par l'AICVF, dont l'objectif était de comparer les besoins de chauffage des bâtiments conçus RE2020 avec les exigences de Labels étrangers (bâtiment passif) a montré, malgré des comparaisons de dispositifs qui n'ont pas la même métrique que le bâtiment RE2020 n'est jamais passif au sens des Labels MINERGIE & PassivHaus. Le besoin de chauffage du bâtiment RE2020 ne respecte celui du bâtiment passif que pour la zone climatique H3. Pour la zone H2b, le besoin de chauffage du bâti RE2020 est le double de celui du passif, le ratio monte à 2,5 pour la zone H1a. Le système de chauffage et/ou l'ECS importe peu : ce qui dimensionne c'est le besoin de chauffage. Ainsi, en 2040, dans le scénario 2, l'ensemble des bâtiments construits atteint un niveau d'exigence compatible avec le label PassivHaus. Les voies de progrès identifiées à ce jour consisteraient notamment à :
 - Renforcer l'isolation des parois opaques et des baies (menuiseries et portes extérieures)
 - Renforcer la perméabilité à l'air. Pour le secteur du logement notamment, mais qui doit être étudié pour d'autres typologies de bâtiment, un renforcement de la perméabilité à l'air devrait être envisagée.
 - Consolider le traitement des ponts thermiques
- Systématiser le recours aux énergies renouvelables et moins carbonées produites sur site ou à proximité (chaleur renouvelable, RCU peu émetteurs de GES, photovoltaïque, géothermie, ...) quand cela est pertinent. Cette disposition concourrait notamment à contribuer aux dispositions de la loi relative à accélération de la production énergies renouvelables.
- Optimiser les réseaux existants pour améliorer leur taux d'énergies renouvelables
- Encourager l'autonomie énergétique des bâtiments (Bâtiment à énergie positive) en ayant recours aux énergies renouvelables et aux systèmes de stockage. Des études de modélisation et également sur l'ACV sont nécessaires pour avancer sur ce sujet.

Par ailleurs, il est nécessaire que ces avancées s'accompagnent d'un contrôle technique obligatoire de la performance réelle du bâtiment, de la phase de conception jusqu'à deux ans d'exploitation avec suivi

des consommations à l'aide d'outils d'évaluation (ex : inspirés du projet SEREINE3) ainsi que de la mise en œuvre d'un contrat de performance énergétique pour toute nouvelle opération incluant une garantie de performance énergétique. Pour ce faire, ce sont non seulement les méthodologies de mesure et d'évaluation qui doivent être consolidées, mais il est également nécessaire de progresser sur le volet des responsabilités juridiques et assurancielles.

2.5 Solutions alternatives au fioul et au gaz disponibles dans les logements existants : une diversité de solutions, des niveaux de maturité différents

En maison individuelle, l'offre de système de chauffage alternatif au fioul et au gaz est suffisamment mature. Elle inclut à la fois les solutions de remplacement (PAC en substitution, Chaudière à granulés, système solaire combiné, PAC hybride) et les solutions d'hybridation (poêle à granulés ou insert, d'un système solaire, pour l'ECS : Couplage avec CESI ou CET). C'est l'ensemble des solutions qui doivent être envisagées lors d'un projet.

En logements collectifs, la maturité des solutions alternatives dépend de la nature collective ou individuelle du chauffage :

- En chauffage collectif : l'offre peut être considérée comme mature, sous condition d'être associée à une isolation de l'enveloppe du bâtiment. Les alternatives au chauffage par le fioul et le gaz seul doivent toutes être explorées : raccordement à un réseau de chaleur, chaudière bois et solution de chaudière en relève de pompe à chaleur ou de chaudière bois, couplage à une installation solaire thermique pour la production d'ECS.
- En chauffage individuel : les solutions techniques sont moins matures, elles nécessitent encore des travaux de recherche et développement, notamment pour étudier plus précisément les conditions de faisabilité de déploiement des PAC air extrait/air en remplacement du fuel ou du gaz (et notamment le poids carbone de solutions consistant à installer des PAC par logement ou par petit groupe de logements).

2.6 Zoom sur la Pompe à Chaleur (PAC) pour le chauffage : un allié de la décarbonation, sous conditions

Les pompes à chaleur sont des équipements de chauffage et de climatisation thermodynamique à partir d'énergie renouvelable ou de récupération. En mode production de chaud, elles prélèvent des calories dans une source d'énergie appelée source froide tels que l'air extérieur, l'eau de nappe ou de mer, les eaux usées, le sous-sol pour les transférer à plus haute température vers un autre milieu (appelé source chaude) tel qu'un bâtiment, un local, un logement, un process ... Il existe donc diverses technologies de PAC selon la ressource énergétique captée et le vecteur de distribution des calories côté source chaude (PAC aérothermique si la source est l'air, géothermique si la source est l'eau).

La grande majorité des pompes à chaleur fonctionnent à l'électricité ; leurs performances énergétiques se traduisent par le coefficient de performance (COP) qui correspond au rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie électrique consommée par la PAC. Le COP sera d'autant plus important que l'écart de température entre la source froide et la source chaude sera faible, et donc que la température d'émission côté bâtiment est basse.

³ le projet SEREINE est piloté l'AQC avec le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), l'INES (Centre de recherche et de formation sur l'énergie solaire et le bâtiment, Armines (Association de recherche de l'école des Mines), le COSTIC (Comité scientifique et technique des industries climatiques), l'Université de Savoie Mont Blanc – département mathématiques, et NOBATEK / INEFF 4

Les PAC géothermiques

D'un point de vue technique, les PAC géothermiques ont des meilleures performances réelles que les PAC aérothermiques en raison de la température stable du sous-sol, elles ne nécessitent pas d'appoint électrique en cas de température extérieure très froide contrairement aux PAC sur air, ni de risques de givrage. A titre d'exemple, lors de la campagne de mesure réalisée sur 106 maisons rénovées BBC dans le cadre du projet Perf in Mind, le COP des PAC des 2 maisons disposant de PAC géothermiques était de 5,13 (Enertech, 2021). Par ailleurs, quand elles peuvent être mise en œuvre, elles évitent de contribuer au développement des îlots de chaleur en milieu urbain. Dans les immeubles de logements collectifs ou tertiaire elles permettent un gain de place avec la suppression des équipements généralement installés en toiture terrasse (PAC sur air), ne génèrent aucune nuisance sonore, elles sont adaptées à diverses sources (sol, eaux usées, eau de mer, ...), enfin il est possible d'assurer un rafraîchissement direct peu consommateur d'énergie (géocooling) en contournant la pompe à chaleur si un changement d'émetteurs est possible (plancher rafraîchissant, ventilo convecteurs...), c'est aussi une technologie qui se prête bien au stockage intersaisonnier.

Cependant, le coût des PAC géothermiques est plus élevé en raison du système de captage à mettre en place (sonde, capteurs enterrés, échangeurs, ...); c'est un réel surcoût par rapport au coût de PAC sur air (où l'élément de captage de l'énergie est réduit à un échangeur intégré à la PAC). Pour les sources froides basées sur l'eau (eau de nappe, eau de mer, eau usées), les coûts de maintenance peuvent être un peu plus élevés. Pour les PAC géothermiques proprement dites, une difficulté généralement rencontrée est l'adjonction nécessaire de deux compétences (une compétence sous-sol (foreurs) et une compétence surface (installateurs)) très différentes. Dans le bâti l'existant, il peut exister des impossibilités techniques pour mettre en place une PAC géothermique, ce qui est beaucoup moins le cas pour des PAC sur air. Enfin, comme pour la géothermie en général, il n'est pas simple de communiquer sur ces technologies de PAC géothermiques dans la mesure où elles ne sont pas visibles.

Les PAC aérothermiques

Les PAC aérothermiques (air/eau et air/air) prendront une part importante dans la substitution des chaudières gaz et fioul dans un grand nombre de situations. Elles permettent en effet une grande efficacité énergétique du système (rendement de 3 à 5 fois meilleur qu'une chaudière) et une décarbonation de l'énergie. **Cette approche doit toutefois être nuancée et la PAC devra être déployée progressivement pour en assurer la pleine efficacité :** si les solutions techniques existent dans le résidentiel individuel, il est encore nécessaire d'approfondir les connaissances sur leurs performances réelles.

En effet, **leurs performances sont dépendantes de l'environnement dans lequel elles sont installées** (climat, qualité du bâti, qualité du dimensionnement et des réseaux de distribution, réglages, température de distribution ...).

En maison individuelle

En maison individuelle, la performance d'une PAC aérothermique va dépendre de nombreux facteurs (qualité du dimensionnement et de l'installation, températures extérieures et intérieures demandées, type d'émetteur, régime d'eau chaude produite ...).

Des études sont en cours pour documenter les performances des pompes à chaleur dans différents cas de figures :

- Des tests de pompes à chaleur dans un laboratoire semi-virtuel sont en cours de réalisation par EDF R&D et ont permis de démontrer, que, pour une PAC bien dimensionnée, installée et réglée, le Coefficient de Performance (COP) peut rester autour de 3 en moyenne annuelle et ce même dans une maison mal isolée et dans des climats du Nord de la France.

- Des instrumentations complémentaires sont en cours dans le cadre du projet de recherche Perf in Mind 2 financé par l'ADEME et dont les résultats seront disponibles avant la mi 2024
- Une campagne de mesure de grande ampleur (100 PAC en maison individuelle instrumentées dans toute la France) vient d'être lancée en partenariat avec la DGEC. Les performances des systèmes seront suivies pendant 2 saisons de chauffe.

Ces mesures en laboratoire et sur site permettront de calibrer les politiques publiques et mieux orienter les ménages vers le choix de solutions performantes.

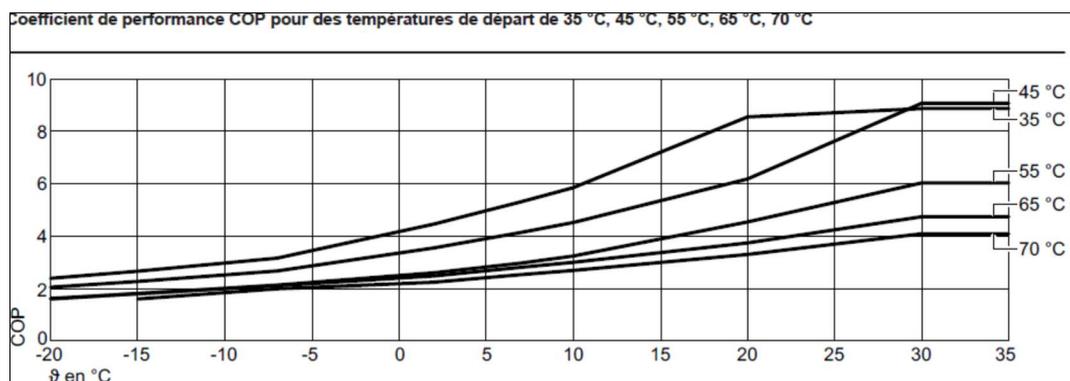
Dans tous les cas, **s'il est admis que le niveau d'isolation de la maison joue sur la performance des PAC, le niveau d'isolation minimal permettant d'assurer cette performance n'est pas encore établi et plusieurs études scientifiques dans différents pays européens ont montré qu'une pompe à chaleur peut atteindre des performances intéressantes même dans un logement peu isolé.** Le rôle de l'isolation sur la performance des PAC est illustré par la figure ci-dessous, issue de données constructeurs. Pour une température extérieure donnée, le COP (= la performance) pour une eau à 35°C est quasiment le double que pour une eau à 70°C. Ainsi, la PAC sera plus performante si la température de l'eau nécessitée par les émetteurs (radiateurs) est basse. Or, celle-ci dépend des besoins thermiques du bâtiment, donc de son niveau d'isolation et du dimensionnement des émetteurs.

Il y a dans tous les cas un réel intérêt à travailler, d'une part, sur l'isolation en amont de la pose d'une PAC afin de pouvoir demander une eau moins chaude (le bâti étant moins déperditif), et, de l'autre, adapter les émetteurs (radiateurs) et la régulation du chauffage afin de profiter au mieux des bonnes performances des PAC. Cela permettra, notamment, de diminuer la taille de la pompe à chaleur et les coûts d'investissements associés.

Par ailleurs, l'évolution de la performance des PAC en fonction des besoins thermiques d'une maison (i.e. leur capacité de modulation) reste encore un point sur lequel des recherches sont nécessaires. En effet, la capacité de modulation des PAC, c'est-à-dire, de leur capacité à rester performantes quel que soit le niveau d'isolation de la maison, est clé pour la stratégie de décarbonation, et notamment pour l'enchaînement entre isolation et changement d'équipement. Par exemple, dans une maison (100m²) peu isolée, la puissance nécessaire du système de chauffage est de l'ordre de 10 KW dans les conditions les plus extrêmes (le jour le plus froid de l'hiver, la nuit, sans occupants). Après une isolation compatible avec les classes A ou B du DPE, la puissance nécessaire dans ces conditions sera réduite à 3 à 4 KW et la machine fonctionnera la majeure partie de l'année à moins de la moitié de cette puissance. Des recherches sont en cours pour étudier la capacité de la PAC à répondre aux nouveaux besoins tout en gardant sa performance.

De telles exigences sur la modulation seront portées par les autorités françaises dans le cadre du règlement écoconception qui vise les pompes à chaleur.

Figure - Evolution du COP en fonction de la température extérieure et de la température de départ chauffage



Source : données constructeurs

En logement collectif

En logements collectifs, **il existe encore très peu de retours d'expérience sur des PAC collectives** installées dans l'existant pour le chauffage.

Le principal frein est pour le moment la montée en compétence des acteurs dans ce domaine. Viennent ensuite les contraintes d'intégration (place en toiture et capacité à supporter les équipements, possibilité de réaliser le forage, nuisances acoustiques potentielles...) qui sont plus importantes qu'en maison individuelle. Par ailleurs, les PAC n'ont pas encore la maturité suffisante pour les besoins haute température (bâtiments anciens non rénovés notamment) sauf en remplaçant les émetteurs pour abaisser la température et sont encore peu adaptées aux logements sans boucle d'eau chaude existante.

Là encore, **la baisse des besoins thermiques du bâtiment collectif sera nécessaire pour diminuer les régimes de températures dans les émetteurs et réduire les puissances en jeu.** Cette réduction permettra de rendre possible l'installation d'une PAC (place en chaufferie, place en extérieur, nuisances associées...) et de générer les économies attendues. En effet, « *une rénovation partielle ne suffit pas à diminuer suffisamment les régimes de températures pour être en adéquation avec les capacités de la très grande majorité des PAC disponibles sur le marché et garantir ainsi des consommations optimisées* » (Pouget Consultants, 2023).

Zoom sur l'hybridation

Les solutions d'hybridation consistent à faire fonctionner conjointement une PAC et un autre équipement de chauffage (chaudière gaz ou biomasse, insert ou poêle à bois, radiateurs électriques...) qui prend le relai lors des périodes froides quand la PAC est moins performante et/ou pour produire de l'ECS. L'hybridation fait partie des solutions pour accélérer la sortie des énergies fossiles, mais elle reste encore très peu développée. Il est donc nécessaire de l'étudier en détail dans les années à venir pour en valider la pertinence et la faisabilité.

Par exemple, l'hybridation peut notamment se révéler pertinente pour les installations collectives de grande puissance, notamment lorsque la copropriété n'est pas en capacité de procéder à une rénovation performante (voir avis d'expert ADEME sur la rénovation performante, à paraître), c'est-à-dire d'organiser les travaux en procédant d'abord par l'isolation (par exemple, lorsqu'une chaudière gaz en fin de vie tombe en panne). Il peut alors être techniquement pertinent d'installer un double équipement en s'assurant du bon dimensionnement pour que le second équipement ne prenne la relève que lorsque la PAC ne peut fonctionner de manière performante du fait de la faible isolation du logement. Lors de l'isolation du logement, l'équipement d'appoint ne sera plus nécessaire et sera déposé, évitant ainsi d'installer des pompes à chaleur surdimensionnées qui perdraient ensuite en

performance et durée de vie lors de l'isolation car elles seraient amenées à fonctionner en dehors de leurs plages de fonctionnement.

Plus généralement, l'intérêt des PAC hybrides dépendra fortement de leur capacité à avoir un coût plus avantageux que les PAC électriques. Ces solutions à double équipement doivent cependant faire l'objet d'une discussion entre MonAccompagnateurRénov et le ménage, car elles supposent, d'une part, d'avoir la place d'héberger un double équipement dans le logement, et, de l'autre, les capacités financières pour assurer un double entretien et ce double investissement (voire, le cas échéant, de continuer à être abonné au gaz).

2.7 Zoom sur l'eau chaude sanitaire

Même si les enjeux en termes de consommations sont plus faibles (en moyenne, on consomme 6 fois plus d'énergie pour le chauffage que pour la production d'eau chaude), des solutions performantes existent également pour la production d'eau chaude sanitaire seule (lorsque la production est indépendante de celle du chauffage).

On peut citer les deux principaux systèmes ayant recours aux ENR qui sont :

- Le chauffe-eau thermodynamique (CET) constitué d'une pompe à chaleur et d'un ballon de stockage.
- Le chauffe-eau solaire individuel (CESI) constitué de panneaux solaires thermiques et d'un ballon de stockage.

Ces deux systèmes permettent de faire environ 50% d'économies par rapport à un chauffe-eau classique.

Dans la mesure où ils font appel à des ballons de stockage qui sont sources de pertes, il conviendra dans tous les cas de se poser les bonnes questions :

- Sur le volume d'eau chaude nécessaire par jour afin d'adapter la taille du ballon à sa juste consommation et éviter de stocker trop d'eau et donc d'augmenter les pertes
- Sur la température de stockage de l'eau : un réglage à 55°C maximum est préconisé
- Sur l'isolation de son chauffe-eau : on pourra rajouter une couche d'isolant si le ballon se trouve dans un volume non chauffé.

Les données d'instrumentation disponibles sur la performance de ces équipements financées par l'ADEME sont les suivantes :

- Les données collectées dans le cadre du projet Panel Elecdom, financé par l'ADEME et RTE, dont l'objectif est de mettre à disposition des données fiables relatives aux consommations électrodomestiques en France, actualisées annuellement. Basé sur des enregistrements collectés dans 100 logements métropolitains représentatifs, il vise à évaluer de manière dynamique l'impact des évolutions sociétales et des modes de consommation (produits, comportements). Le panel comporte 4 chauffe-eaux thermodynamiques. Les consommations mesurées en troisième année pour ces équipements sont très supérieures aux résultats des 2 années précédentes. Deux phénomènes expliquent cette augmentation : d'une part, le paramétrage de la mise en route de la résistance d'appoint (il semble que les participants modifient les réglages de leur CETI, ce qui a une influence sur sa consommation (logements 1007 et 930)), de l'autre, des dysfonctionnements (l'eau chaude d'un logement est produite exclusivement grâce à la résistance électrique sur une période de l'année).
- Celles collectées dans le cadre du projet de recherche Perf in Mind, dans des maisons rénovées BBC. Là encore, l'échantillon concerné est de petite taille, 5 logements ayant pu faire l'objet d'une analyse détaillée. Il met en évidence, sur certains logements, un même phénomène de

déclenchement de l'appoint qui impacte la performance. « Le plus souvent, l'appoint des ballons thermodynamiques se déclenche lorsqu'on leur demande de produire de l'ECS à une température trop élevée par rapport à ce que leur compresseur peut fournir, soit généralement 45 à 48°C. Si on les règle à une consigne supérieure, le COP apparent se dégrade. Il est donc important de choisir ces systèmes en connaissance de cause et de les régler à une température la plus basse acceptable par le ménage » (Enertech, 2021).

Même si aucune conclusion ne peut être tirée du fait de la taille très restreinte de ces échantillons, « il semble que les chauffe-eaux thermodynamiques soient des équipements certes performants, mais moins robustes que les chauffe-eaux à effet Joule. **Ils nécessitent une formation des usagers au niveau des réglages ainsi qu'une surveillance accrue afin de limiter le fonctionnement de la résistance d'appoint.** Une étude détaillée sur un échantillon de plus grande taille paraît nécessaire pour confirmer/infirmier cette observation. Celle-ci permettrait de mieux comprendre les problèmes rencontrés et de mettre en œuvre des mesures correctives afin de ne pas limiter le gisement d'économies d'énergie. » (Enertech, 2022).

Le projet de recherche Perf in Mind 2 permettra également de documenter les performances des chauffe-eaux thermodynamiques et de mieux comprendre leurs conditions de fonctionnement optimales

Les conclusions sont les mêmes concernant les chauffe-eaux solaires. Les campagnes de mesures menées ces dernières années ont montré des résultats disparates avec des résultats très bons sur certains systèmes.

Les recommandations sont également les mêmes que pour le chauffe-eau thermodynamique : la performance étant très sensible à la taille du ballon et à la température de stockage. Il conviendrait d'orienter les aides pour limiter le volume et renforcer l'isolation des ballons.

2.8 Les bâtiments : un rouage clé de la pilotabilité de la demande d'électricité

Le fonctionnement du réseau électrique nécessite un équilibre permanent entre la production d'électricité (l'offre) et la consommation d'électricité (la demande). La pilotabilité désigne alors la capacité à moduler (à la hausse ou à la baisse) l'offre et/ou la demande d'électricité pour assurer cet équilibre. Historiquement, la pilotabilité est principalement assurée côté offre par des centrales de production thermique (gaz, fioul et charbon notamment) qui sont mises en service pour répondre à des pics de consommation. Toutefois, avec la fermeture programmée de ces centrales (charbon et fioul) et l'augmentation des besoins de flexibilité, de nouvelles solutions côté offre et côté demande seront nécessaires.

Dans tous les scénarios Transition(s) 2050, la pilotabilité de la demande progresse et s'applique au chauffage des bâtiments : suivant les scénarios, 25 à 40 % des besoins de chauffage sont supposés pilotables. Ces évolutions reposent sur l'adhésion des consommateurs, notamment résidentiels. La sensibilisation des consommateurs aux bénéfices de cette pratique pour le réseau électrique est une condition sine qua non à son appropriation, mais d'autres mesures doivent également l'accompagner (développement de nouvelles offres tarifaires avec des prix variant dans le temps pour refléter les fluctuations du marché de l'électricité, d'équipements de pilotabilité à distance...)

Aussi, le développement de la pilotabilité de la demande des bâtiments est un élément clé de la décarbonation de la chaleur. L'isolation, parce qu'elle permet de décaler les consommations de chauffage, joue un rôle central. Le développement d'incitations tarifaires pour les occupants est également à développer.

3. Les préconisations de l'ADEME

3.1 Privilégier les approches globales qui allient isolation et énergie décarbonée

Parce qu'elle est centrale dans l'atteinte de nombreux objectifs environnementaux, y compris la décarbonation de la chaleur, l'isolation des logements doit rester une priorité, à la fois dans le neuf et en rénovation.

Cela signifie développer des aides à la rénovation qui permettent l'atteinte de hauts niveaux de performance (niveau BBC-rénovation), en permettant le financement du projet pour tous (prise en compte les dépenses connexes (qui peuvent représenter jusqu'à 50% du coût d'un projet de rénovation BBC), reste à charge nul pour les ménages en précarité énergétique) et en s'assurant de la performance réelle des rénovations (maîtrise d'œuvre, test d'étanchéité à l'air).

Les aides financières doivent orienter les ménages en priorité vers des rénovations performantes. Cependant, cette disposition peut se heurter à de nombreux obstacles qu'il conviendrait de documenter finement, et notamment :

- Absence de solvabilité du ménage. Quelles dispositions prévoir si le ménage n'est pas en capacité de régler le reste à charge associé au Pilier Performance ? Cette question ne se pose sans doute pas seulement pour les ménages les plus modestes.
- Absence d'offre (professionnels de travaux, AMO) disponible. Comment gérer les situations d'urgence (panne d'équipement) dans un contexte de montée en puissance forte du Pilier Performance ?
- Absence de disponibilité du ménage pour mener des travaux de rénovation d'ampleur. En effet, les travaux BBC demandent une grande disponibilité en temps du ménage, même si les travaux sont suivis par un professionnel. Les ménages ne seront pas tous en capacité de dégager le temps disponible, surtout en cas de panne d'un appareil, par nature imprévisible.
- Absence de disponibilité du locataire, difficulté propre aux travaux en site occupé.

Pour toutes ces raisons, il nous semble important de réfléchir à un dispositif souple qui s'adapte aux contraintes du ménage (par exemple : changement de la chaudière dans l'urgence par une solution renouvelable, puis programmation des travaux dans un second temps...).

Lorsque la rénovation globale n'est pas possible, les aides financières doivent être calibrées afin de respecter les préconisations techniques associées aux gestes de rénovation pour ne pas hypothéquer la performance à terme. Celles-ci sont rassemblées dans le document Travaux par étape, points de vigilance (<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/5492-travaux-par-etapes-les-points-de-vigilance.html>). Par exemple :

- Pour des poêles à bois, des radiateurs électriques peuvent être prévus temporairement et supprimés en fin de parcours de rénovation, laissant le poêle assurer seul les besoins de chauffage du logement au niveau BBC-rénovation.
- Pour des réseaux à eau chaude, la mise en place d'un ballon tampon en cours de rénovation peut aussi être programmée (encombrement à prévoir en début de chantier).

3.2 Faire appel à l'ensemble des énergies décarbonées et en favoriser le développement

La décarbonation de la chaleur passera par une diversité de source d'énergies décarbonées qui doivent toutes être étudiées : pompe à chaleur, bois, réseaux de chaleur, solaire thermique... En milieu urbain,

par exemple, privilégier le déploiement de réseaux de chaleur pour les bâtiments collectifs et aider financièrement l'installation de boucle d'eau chaude à l'intérieur des logements.

Au-delà de l'action sur les équipements du bâtiment, la décarbonation du bâtiment repose également sur la capacité de développement de filière d'énergies renouvelables. Des mesures doivent donc être prises pour accélérer ce développement, et notamment du gaz renouvelable, du solaire thermique et des réseaux de chaleur en définissant des règles de priorisation en fonction des contextes du bâti et des enjeux locaux.

3.3 Cibler les logements chauffés aux énergies fossiles (fioul et gaz)

Ajouter un ciblage « passoire carbone » à la politique de rénovation des logements

Une politique de décarbonation des logements doit cibler ceux qui sont chauffés au fioul et au gaz. Il ne s'agit pas exactement des mêmes logements que les passoires énergétiques.

Parmi les logements chauffés au fuel, seuls 44,4% sont des passoires (étiquettes F et G). Un objectif à 2030 de sortie de 75% des chaudières fuel du parc demanderait à remplacer des chaudières dans des logements jusqu'à la classe C.

Parmi les logements chauffés au gaz, seuls 12,1% sont des passoires. Remplacer 20% des chaudières gaz à 2050 demanderait à remplacer des chaudières dans des logements E, et sans doute D (en effet, au vu des exceptions concernant les 3 millions de logements collectifs chauffés au gaz en individuel, il est probable que certaines passoires actuelles seront concernées par les exceptions).

Aussi, au regard des enjeux de décarbonation du secteur résidentiel à 2030, la focale sur les seules passoires énergétiques n'est pas suffisante. Si le ciblage de la politique sur les passoires se justifie pour des raisons de lutte contre la précarité énergétique, elle doit être élargie sur les « passoires carbone ». En effet, tout logement dont le niveau d'émission carbone à 11 kg CO₂/m²/an (soit la fourchette haute en carbone de l'étiquette B) nécessite de voir son niveau d'émission baisser. Ainsi, la focale sur les seules passoires risque de passer à côté des enjeux de décarbonation.

Résidences principales par classe de performance énergétique (étiquettes DPE) selon les caractéristiques du logement, au 1er janvier 2022 (En milliers de logements)

	A	B	C	D	E	F	G	Total	Passoires	Très énergivores
Energie de chauffage										
Électricité	447	656	2 376	3 541	2 464	964	769	11 218	1 733	7
	4,0 %	5,8 %	21,2 %	31,6 %	22,0 %	8,6 %	6,9 %	100 %	15,4 %	0,1 %
Gaz	4	106	3 614	4 473	2 647	1 063	428	12 335	1 491	234
	0,0 %	0,9 %	29,3 %	36,3 %	21,5 %	8,6 %	3,5 %	100 %	12,1 %	1,9 %
Fioul et autres produits pétroliers	-	1	229	817	938	926	659	3 570	1 585	169
	0,0 %	0,0 %	6,4 %	22,9 %	26,3 %	25,9 %	18,5 %	100 %	44,4 %	4,7 %
Bois et réseau de chaleur	51	197	820	876	537	201	176	2 859	377	101
	1,8 %	6,9 %	28,7 %	30,7 %	18,8 %	7,0 %	6,2 %	100 %	13,2 %	3,5 %

Source : SDES

Aussi, la politique de rénovation doit développer des mesures spécifiques pour les logements gaz et fioul. Il pourrait s'agir :

De la fin de toute aide financière à des systèmes fonctionnant aux énergies fossiles seules

De l'inclusion de l'ensemble des logements chauffés au fioul et au gaz d'origine fossile dans les dispositifs existants de bonus réservé aux passoires thermiques.

Développer un « aller vers » les ménages chauffés au gaz et au fioul au-delà de la simple mise à disposition d'aides financières

La logique actuelle des politiques de rénovation vis-à-vis des logements privés repose sur l'incitation financière dont les ménages peuvent se saisir pour réaliser des travaux de rénovation. Or, l'ambition de retirer 75% des chaudières fioul et 20% des chaudières gaz du parc de logements d'ici 2030 demande l'adoption d'une posture plus proactive vis-à-vis de ces ménages afin de dépasser l'ensemble des freins aux travaux.

Faire un suivi de la prise de décision des ménages chauffés au fuel et au gaz

Un enjeu clé sera de s'assurer que l'incitation envoyée aux ménages sera suffisante pour induire un rythme de décarbonation des logements fuel et gaz suffisant. Point positif, les dernières analyses disponibles dans le récent rapport IPSOS pour RTE montrent que 8% des Français déclarent avoir l'intention de changer leur système de chauffage dans les 3 ans à venir (18% à 5 ans), ce qui est plutôt encourageant. Cependant, 22% des propriétaires de chauffage au fuel qui envisagent d'en changer se projettent sur une nouvelle chaudière fuel, et 34% pour les propriétaires de chauffage au gaz.

Aussi, il est important de mettre en place un dispositif spécifique de suivi (sondage, focus groups...) avec des ménages chauffés au gaz et au fuel afin de documenter les freins auxquels ils sont confrontés, mais également les leviers d'action dont la puissance publique dispose. Notamment, il sera important de suivre la part des propriétaires de chauffage fuel ou gaz qui décident de renouveler leur appareil sur la même énergie, mais juste en se passant des aides.

Mettre en place un accompagnement spécifique destiné au logement social

En 2015, les logements (résidences principales) détenus par les bailleurs sociaux étaient majoritairement chauffés au gaz, plus que la moyenne nationale (52% des logements sociaux, contre 35% à l'échelle nationale). La moitié des logements sociaux chauffés au gaz (soit environ 900 000 logements) était équipée de chauffage gaz individuel, configuration pour laquelle les solutions alternatives sont les moins matures (Enerter).

3.4 Sécuriser la stratégie de développement des pompes à chaleur

Les pompes à chaleur ont un rôle clé à jouer dans la décarbonation de la chaleur des bâtiments. Cependant, il est nécessaire d'en sécuriser le déploiement via les actions suivantes :

- **Soutien à la recherche et développement :**
 - Poursuivre les recherches pour déterminer le juste niveau d'isolation à avant d'installer une PAC afin d'atteindre un bon niveau de performance à la fois à l'échelle du logement et à celle du parc de logements dans son ensemble et atteindre nos objectifs de neutralité carbone en 2050.
 - Développement de systèmes alimentés en énergie renouvelable adaptés à toutes les typologies de bâtiment (développement de produits compacts, sans unité extérieure, passage au chauffage collectif en subventionnant l'ajout de boucles d'eau...)
 - Développement de produits avec des fluides frigorigènes à faible impact environnemental (propane, CO2...) et adaptés à tous les besoins.
- **Organisation de la remontée et du partage de données sur la performance des PAC en conditions réelles d'utilisation.** Cela peut passer, par exemple, par l'introduction d'un bonus « suivi de consommation » pour les logements PAC connectées ou par l'obligation d'affichage du COP en temps réel. Cela permettrait de consolider les connaissances sur les performances réelles des pompes à chaleur, et mieux orienter la politique publique.
- **Appui à l'industrialisation de la filière** pour assurer un approvisionnement de machines et de composants (notamment les compresseurs et unité extérieures) françaises / européennes

- **Formations sur toute la chaîne de valeur** (prescription, dimensionnement, installation, maintenance) afin d'assurer des installations de qualité
- **Conditionnement des aides financières aux pompes à chaleur à des critères de performances minimaux.** L'installation de pompes à chaleur pourrait être conditionnée :
 - **A une analyse du logement pour s'assurer qu'il est en capacité de fonctionner dans des conditions satisfaisantes avec une pompe à chaleur**, sur le modèle de ce qu'il se fait en Irlande (<https://www.seai.ie/grants/home-energy-grants/heat-pump-systems/>), où les ménages qui font une demande d'aide reçoivent une aide complémentaire pour payer un Technical Assessment qui a pour but de valider le fait que le logement est « Heat Pump Ready ». En France, cela pourrait passer par une validation par MonAccompagnateur Renov.
 - **A la réalisation (et donc au financement systématique) de toute opération technique permettant une baisse des régimes de température et donc une amélioration du COP :** désembouage, ré-équilibrage du réseau, présence d'émetteurs basse température (permettant de fonctionner aussi pour le rafraîchissement du bâtiment) ou, le cas échéant, remplacement des émetteurs, installation d'une régulation terminale performante.
 - Il serait aussi intéressant d'intégrer un critère sur la capacité de modulation de puissance de la PAC dans les aides.

Plus particulièrement, le **développement des PAC géothermiques** nécessite la mise en place de politiques de soutien qui visent à :

- **Améliorer l'organisation et l'animation des réseaux locaux d'acteurs en accélérant le déploiement d'animateurs géothermie dans chaque région.** La géothermie de surface fait appel à un réseau d'acteurs très diffus (installateurs de PAC, bureaux d'études sous-sol et surface, foreurs, énergéticiens, exploitants...) ce qui rend plus complexe l'organisation de la filière. Il apparaît ainsi comme prioritaire d'améliorer la structuration et l'animation du réseau d'acteurs par la mise en place d'animateurs géothermie dédiés dans chaque région.
- **Améliorer l'accès des acteurs (foreurs, bureaux d'études, maîtres d'ouvrage...) aux données de potentiel géothermique sur l'ensemble des territoires :** l'amélioration de l'accès aux données sur les installations existantes de PAC géothermiques et leur potentiel permettraient aux prescripteurs, aménageurs et promoteurs d'être mieux informés et ainsi de développer cette solution quand elle est pertinente.
- **Investir en R&D (optimisation des COP/fluides frigorigènes des PAC, diminution des coûts de forage, optimisation des équipements de stockage et de production...):** en termes d'investissement en recherche et développement, les sujets prioritaires devraient concerner, entre autres, l'optimisation des COP et fluides frigorigènes des PAC, la diminution des coûts de forage, ou encore l'optimisation des équipements de stockage et de production...

3.5 Lier interdiction du gaz et maturité des solutions technologiques

Dans les maisons individuelles, les solutions alternatives sont suffisamment matures et une interdiction est donc envisageable dans les années à venir. Cette interdiction pourrait être nécessaire pour atteindre le rythme de remplacement visé

En revanche, les solutions alternatives au chauffage au gaz restent encore peu matures en logements collectifs équipés de chauffage individuel. Aussi, il est important de ne pas interdire l'usage du gaz dans les logements tant que les solutions en énergie renouvelable ne sont pas considérées comme matures et déployables à grande échelle à un coût raisonnable.

3.6 Considérer les besoins de froid

Le projet de recherche RESILIANCE, qui a simulé son évolution aux horizons 2050 et 2100 dans différents scénarios climatiques, montre qu'en l'absence de mesures d'adaptation, les logements actuels sont inadaptés au changement climatique. Dans certaines zones (zone urbaine avec îlot de chaleur...) ou pour certains logements (non traversants, difficiles à ventiler la nuit...), des équipements spécifiques de refroidissement devront être envisagés dans les prochaines décennies.

Il est donc important de ne pas réfléchir seulement aux usages chauffage/eau chaude sanitaire, mais à la combinaison chauffage / rafraîchissement. En effet, le changement d'équipement thermique est une opportunité pour anticiper les besoins de rafraîchissement du bâtiment, et s'assurer que ceux-ci seront assurés par les moyens les plus performants possibles (i.e. plutôt une pompe à chaleur réversible qu'un climatiseur mobile peu efficace). Un enjeu majeur pour le futur sera d'éviter le recours massif aux appareils peu performants. L'augmentation des consommations liées à la production de froid pourrait par ailleurs être une conséquence du développement massif des PAC réversibles (i.e. en capacité de produire de la chaleur et du froid).

Pour s'en prémunir, il est nécessaire **d'anticiper les besoins de froid et déployer, d'une part, des systèmes de rafraîchissement actif (brasseurs d'air) particulièrement efficaces et peu consommateurs, et, de l'autre, des systèmes actifs de rafraîchissement à haute efficacité énergétique** (puits climatique, geocooling, géothermie, rafraîchissement adiabatique, double flux...) en intégrant dans le bâtiment les systèmes d'émission de froids adaptés (soufflage d'air, ventilo-convecteurs, planchers rafraîchissants...).

Les aides financières à la rénovation doivent ainsi évoluer pour prendre en compte les enjeux de confort d'été (et, plus généralement, l'ensemble des enjeux d'adaptation au changement climatique). Il s'agit par exemple de **financer des changements d'émetteurs qui soient compatibles avec la production de froid en cas de pose de PAC performante** (géothermique ou air/eau). Le changement d'émetteur doit donc être pleinement intégré aux aides financières, voire l'aide aux pompes à chaleur conditionnée à la présence / au changement d'émetteurs. Cela permettra d'anticiper l'usage d'une climatisation plus efficace lors des canicules à venir, et d'éviter que les ménages doublent leur équipement de chauffage d'un équipement de climatisation peu performant (type climatiseur mobile).