

Union Française de l'Électricité

Des bâtiments écologiques
et confortables :

LE RÔLE DES SOLUTIONS ÉLECTRIQUES PERFORMANTES

Quels bénéfices pour les occupants ?
Quelles conséquences pour le système électrique ?
Quelles recommandations ?

Novembre 2020



Sommaire

Introduction	3
1 Le bâtiment face aux impératifs climatique et énergétique	5
2 Les attentes des occupants : économies, confort et environnement	8
3 Les technologies électriques innovantes répondant à ces attentes et enjeux	9
A. Les pompes à chaleur concilient performance énergétique, technique et climatique	
1. Les PAC aérothermiques	
2. Les PAC géothermiques	
3. Les PAC hybrides	
4. Les chauffe-eaux thermodynamiques	
B. Les systèmes solaires thermiques	
C. Les nouveaux radiateurs à inertie et stockage d'énergie	
D. Les systèmes de ventilation et de traitement de l'air	
E. Les actions d'optimisation active	
F. Les innovations attendues dans les prochaines années	
4 L'intégration de ces technologies dans le système électrique français	22
A. Un réseau qui anticipe l'accueil de ces technologies en toute sérénité	
B. De nouveaux services rendus au réseau grâce au développement des technologies numériques	
C. Des économies d'énergie qui font plus que compenser l'augmentation de la consommation électrique liée au déploiement des solutions performantes	
1. Les prévisions d'évolution de la consommation électrique dans le résidentiel	
2. Les prévisions d'évolution de la consommation électrique dans le tertiaire	
D. L'apport des solutions performantes en période de tension sur le réseau électrique	
1. Pointes journalière et saisonnière : comprendre leurs origines pour mieux cibler les moyens d'actions	
2. Les bâtiments électrifiés offrent des moyens supplémentaires d'actions sur la demande	
Les recommandations de la Commission Prospective et Innovation de l'UFE	30
Lexique	31
Références	32

INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment doit relever de nombreux défis tels que son adaptation au vieillissement de la population, sa nécessaire décarbonation ou encore l'intégration de plus en plus importante du numérique pour sa conception ou lors de son exploitation. Ainsi, l'enjeu d'efficacité climatique pour ce secteur, primordial et concernant toutes les énergies et tous les usages, doit aussi correspondre aux attentes des citoyens qui passent environ 90 % de leur temps dans les bâtiments.

La trajectoire fixée par le Gouvernement dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) prévoit une électrification plus importante des usages pour atteindre les objectifs climatiques en s'appuyant largement sur le caractère décarboné de ce vecteur. Le développement d'usages électriques flexibles et performants dans le bâtiment, secteur encore très émetteur de gaz à effet de serre, prend ainsi tout son sens. Comme le souligne la SNBC, cette électrification doit se réaliser en atténuant les pointes de consommation saisonnières et journalières. Par ailleurs, elle doit intégrer un besoin croissant de confort pour les occupants. Il est de plus essentiel de prendre en compte le contexte économique contraint actuel, et la situation des 3,4 millions de ménages en situation de précarité énergétique¹.

Afin de pouvoir répondre à ces multiples enjeux, il existe d'ores et déjà des solutions électriques performantes pouvant être déployées sur tous les différents segments du bâtiment (neuf comme rénovation, résidentiel comme tertiaire, maisons individuelles comme logements collectifs). Ces technologies de chauffage, de production d'eau-chaude sanitaire ou de ventilation permettent de réaliser de conséquentes économies d'énergies, soulageant d'autant les factures des occupants, tout en contribuant activement à la lutte contre le réchauffement climatique. De plus, l'augmentation continue de la performance des équipements et de l'enveloppe permet de consommer de moins en moins d'électricité tout en gardant un niveau de confort optimal.

Enfin, le réseau électrique français, fort de son maillage territorial et de son haut niveau de qualité et de gestion, accompagne dès à présent, les infrastructures et les mécanismes en déployant l'évolution du mix électrique et l'apparition de nouveaux usages électriques. Le recours à un ensemble de leviers d'actions sur la consommation d'électricité dans le bâtiment permettra par ailleurs de rendre des services au réseau.

Faisant écho aux 21 mesures concrètes proposées par la filière électrique dans son étude 2019, la Commission Prospective et Innovation de l'UFE propose en conclusion des recommandations permettant d'accélérer le déploiement des solutions électriques performantes dans le bâtiment.





1 LE BÂTIMENT face aux impératifs climatique et énergétique

Comme le souligne la loi relative à l'énergie et au climat dans son premier article², l'urgence climatique et écologique structure la politique énergétique française. Les cibles ainsi visées sont principalement: une réduction de la consommation d'énergie de 50 % en 2050 par rapport à 2012, une baisse des consommations d'énergies fossiles de 40 % dès 2030 par rapport à 2012 et une part de 33 % d'énergies renouvelables (EnR) dans la consommation finale d'énergie en 2030.

Dès lors, le secteur du bâtiment fait face à la nécessité de répondre aux objectifs de la transition énergétique engagée par le pays. Celle-ci se structure autour de deux textes, véritables piliers pour l'énergie et le climat, que sont la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) et la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) fixant comme horizon la neutralité carbone en 2050 pour tout le territoire. Dans le secteur du bâtiment cette cible ne pourra être atteinte qu'à la seule condition de suivre une trajectoire ambitieuse de réduction de consommation d'énergie et en basculant vers des vecteurs décarbonés (énergies renouvelables et de récupération EnR&R et électricité). En effet, le bilan national montre l'ampleur de la tâche à accomplir car **le bâtiment est responsable de 23 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) (deuxième secteur le plus émissif après le transport) et de 42 % de la consommation d'énergie finale en 2018**. En outre, un usage en particulier doit concentrer les efforts de sobriété : le chauffage, lui-même à l'origine de 57 % de la consommation d'énergie finale du secteur³.

« le bâtiment est responsable de 23 % des émissions nationales de GES et de 42 % de la consommation d'énergie finale en 2018 »

Au niveau national, la **SNBC fixe un objectif de décarbonation complète des volets résidentiel et tertiaire à l'horizon 2050 grâce à l'efficacité climatique: l'efficacité énergétique au profit des vecteurs énergétiques décarbonés**. Couplée à une disparition progressive des énergies fossiles, le secteur devra ainsi réduire de 40 % sa consommation en énergie finale en 2050 par rapport à 2015. A moyen-terme, la phase exploitation des bâtiments en particulier devra voir ses émissions de GES diminuer de 53 % à l'horizon du 4^e budget carbone (2029-2033) par rapport à 2015. Les efforts à accomplir sont d'autant plus importants que le secteur du bâtiment n'est pas sur la bonne tendance : en émettant 12,4 % de plus que prévu sur la période 2015-2018 il

n'a déjà pas respecté son 1^{er} budget carbone⁵.

Les conséquences concrètes en termes de performances énergétique et climatique sont importantes. Le rythme de rénovation performante devra ainsi fortement accélérer pour atteindre 500 000 rénovations par an de logements dès la fin du quinquennat présidentiel. **A l'horizon 2050, ce sont 700 000 rénovations par an complètes et réellement performantes qui devront être réalisées, rien que dans le secteur résidentiel, afin de rénover radicalement l'ensemble du parc existant selon les hypothèses de la SNBC⁶**. A court et moyen terme il faut cibler notamment les logements à « consommation énergétique excessive » sur lesquelles les gains sont les plus importants. L'éradication de ce type de logements à l'horizon 2028⁷, inscrite dans les priorités de la loi énergie-climat publiée en novembre 2019, répond en outre à un objectif sociétal de lutte contre la précarité énergétique.

Les réductions de consommation d'énergie ne s'imposent cependant pas uniquement dans le secteur résidentiel. **Le tertiaire, jusqu'à présent grand oublié des politiques publiques, est lui aussi concerné depuis la parution du décret « tertiaire » en juillet 2019**. Celui-ci fixe des objectifs de baisse de consommations d'énergie finale pour le secteur de 40 % en 2030, 50 % en 2040 et 60 % en 2050⁸.

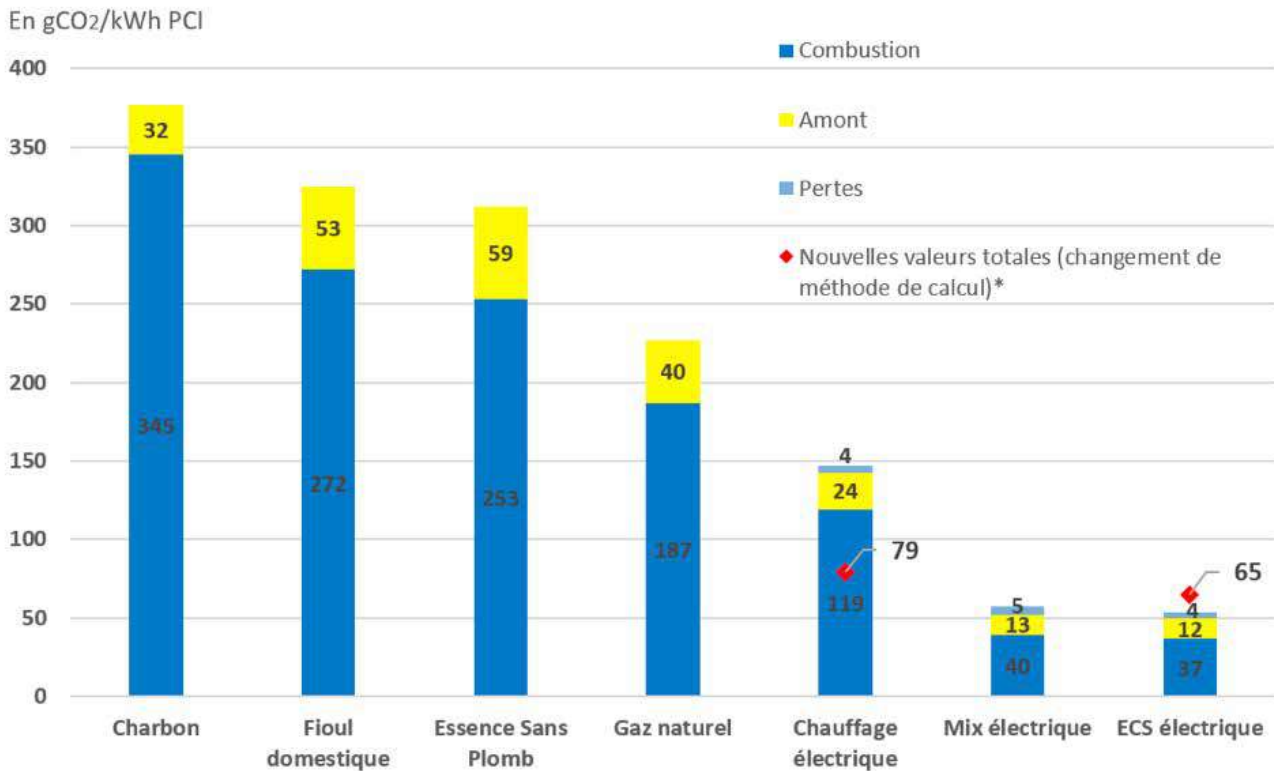
Bien qu'environ 70 % du futur parc de bâtiments en 2050 soit déjà construit, il est primordial d'accroître aussi les niveaux de performance énergie et carbone sur les bâtiments neufs. Cette dernière décennie a été marquée par la RT2012 qui a permis de réduire la consommation en énergie primaire des bâtiments neufs d'un facteur 3 à 4⁹ et a aussi eu pour conséquence de « *réduire légèrement la thermosensibilité de la demande, et donc les tensions sur l'équilibre du système électrique lors des vagues de froid* »¹⁰. De façon plus générale, les différentes réglementations thermiques s'appliquant aux bâtiments neufs depuis cinquante ans ont eu pour effet indirect de diviser par 4 les émissions de CO2 émises par mètre carré pour l'ensemble des résidences principales neuves¹¹. **La dynamique de réduction des émissions est enclenchée mais une accélération des efforts reste nécessaire.**

En ce sens, **l'enjeu principal de la nouvelle réglementation RE2020 est d'intégrer un volet environnemental pour que les futurs bâtiments soient construits de façon compatible avec la SNBC** : les nouvelles normes de construction devront intégrer dès l'été 2021 les émissions de GES tout au long de la vie du bâtiment. Constamment enrichie depuis 2016 et le lancement de l'expérimentation dite « E+C- », cette analyse en cycle de vie des émissions de GES et en énergie primaire en exploitation permet de véritablement cibler les efforts d'amélioration sur la phase de construction qui représente environ 60 % des émissions totales de GES du secteur¹² et sur la phase d'exploitation en « *intégrant un critère sur les émissions de gaz à effet de serre en exploitation et sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment* » rappelé dans les objectifs du Gouvernement sur la RE2020¹³. Les retours des diverses expériences régionales E+C- serviront notamment à fixer un plafond maximal d'émissions carbone¹⁴ pour tout bâtiment neuf.

En plus de diminuer l'impact carbone des bâtiments et de poursuivre l'amélioration de leur performance énergétique, la RE2020 vise à garantir la fraîcheur pendant les étés caniculaires. Les bâtiments neufs devront être en mesure de s'adapter aux conditions climatiques futures et en particulier à la multiplication des vagues de chaleur extrême, pour cela un nouvel indicateur d'évaluation de confort d'été devrait être introduit dans la réglementation¹⁵.

LE FAIBLE CONTENU CARBONE DE L'ÉLECTRICITÉ FRANÇAISE : un atout qui en fait un vecteur de décarbonation à privilégier

La SNBC fixe à 53 % la part de marché de l'électricité en énergie finale dans la consommation des bâtiments en 2050 contre 39 % en 2015¹⁶. En effet, **les solutions performantes de chauffage électrique, caractérisées par leur faible facteur d'émission de gaz effet de serre, ont un rôle de premier plan à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique.**



* Ces valeurs, confirmées dans la PPE, sont désormais applicables dans le neuf. Elles concerneront l'ensemble des bâtiments existants (cf. le processus de fiabilisation du Diagnostic de Performance Énergétique en cours).

« La consommation d'électricité devrait dépasser celle du pétrole et atteindre 31 % en 2040 »

Développer l'usage d'une électricité bas-carbone pour limiter le réchauffement climatique est jusqu'à aujourd'hui une caractéristique française car l'hexagone possède d'ores et déjà un mix décarboné à plus de 90 %. Sur le « Vieux continent », une électrification ambitieuse de l'économie, couplée à une production bas-carbone, est un moyen direct et efficace d'atteindre l'objectif d'une société décarbonée. L'Union européenne se fixant comme objectif de réduire ses émissions de 80 % à 95 % d'ici 2050 par rapport à 1990, l'électrification peut ainsi jouer un rôle majeur¹⁷. Enfin à l'échelle mondiale, **dans son scénario compatible avec l'accord de Paris¹⁸, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit que la part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale devrait dépasser celle du pétrole et atteindre 31 % en 2040 contre 19 % en 2018.**

Selon l'AIE, les efforts sur les EnR, le nucléaire et la capture et le stockage de carbone (la pertinence de développer le CCS varie selon les pays), seront autant d'atout pour décarboner au niveau mondial rapidement la fourniture d'électricité, compensant la forte baisse du charbon et réduisant le facteur d'émission de plus de 75 % d'ici la moitié du siècle.

2 LES ATTENTES DES OCCUPANTS : économies, confort et environnement

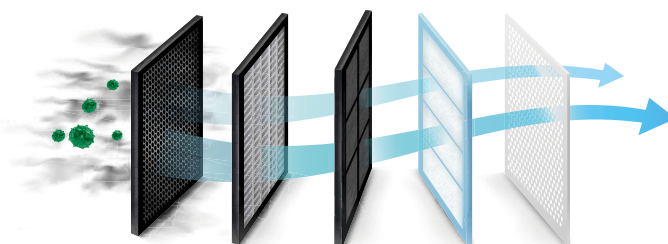
La réalisation de la transition énergétique ne doit pas être ressentie comme imposée à tous avec pour seul objectif la réalisation unique d'objectifs nationaux, une condition nécessaire de son succès étant la prise en compte des attentes des citoyens. Ce constat est particulièrement vrai en ce qui concerne le secteur du bâtiment. **Comme l'a rappelé la filière électrique dans son étude parue en 2019¹⁹, il est nécessaire de faciliter la transition énergétique via le traitement de sujets plus vastes prenant en compte les attentes des usagers des bâtiments, aussi bien résidentiels que tertiaires.** En effet, il est primordial de prendre en compte les besoins en termes de confort thermique et de rafraîchissement mais aussi de qualité de l'air intérieur, tout en évitant des dépenses énergétiques importantes et contraintes. **Le chauffage représentant 66 % des consommations énergétiques d'un foyer et la production d'eau chaude sanitaire 11 %²⁰, les efforts d'efficacité climatique doivent porter en priorité sur ces segments. De plus, avec un montant moyen de 725 € en 2018, la facture de chauffage continue de peser fortement sur le budget des ménages²¹.**

Plus généralement, plusieurs changements profonds de la société française ont un impact sur le bâtiment.

D'une part, l'urbanisation et le développement du secteur tertiaire de la société française, couplés aux évolutions démographiques, bouleversent les modes de vie et de consommation. **Les attentes des particuliers sont croissantes pour que le bâtiment améliore le bien-être et la qualité de vie.** En outre, les nouveaux modes de vie amènent une évolution des fonctionnalités du bâtiment, qui doit être flexible et connecté pour permettre plusieurs usages à la fois (télétravail, télémedecine, maintien et autonomie à domicile...).

D'autre part, la prise de conscience du réchauffement climatique modifie les appréhensions et les attentes des citoyens en matière de politiques énergétiques et climatiques. Ainsi, les occupants du bâtiment exigent de meilleures informations sur l'énergie produite et consommée. Leur fournir une meilleure connaissance de leurs consommations et de leurs émissions est un véritable enjeu. De plus, **le changement climatique conduit à repenser le confort des bâtiments, résidentiels comme tertiaires.** En particulier, une augmentation des besoins de rafraîchissement est attendue dans les prochaines années, accentuée en ville du fait du phénomène d'îlot de chaleur.

Enfin, la digitalisation des usages ouvre de nouvelles possibilités dans la vie et le travail au quotidien. **Un enjeu pour le bâtiment est d'intégrer les technologies numériques au bénéfice des usagers, par exemple via le pilotage des solutions de chauffage et de rafraîchissement ou bien la gestion de la qualité de l'air intérieur.** Concernant ce dernier point, les impacts sont réels pour le secteur tertiaire où l'on estime qu'un air intérieur de bonne qualité peut diminuer le nombre d'arrêts maladie de près de 10 %²², engendrant des gains conséquents pour la santé publique à l'échelle nationale.



3 LES TECHNOLOGIES ÉLECTRIQUES INNOVANTES

répondant à ces attentes et enjeux

Des équipements électriques performants disponibles aujourd'hui permettent, d'une part, de réaliser des économies d'énergie et, d'autre part, d'être faiblement émetteurs de GES. De plus, ces différents dispositifs apportent un gain financier du fait d'une économie d'énergie pendant l'exploitation du bâtiment moyennant un investissement en matière de rénovation. **Ces solutions sont bien sûr complémentaires d'une bonne isolation du bâtiment. De plus, le dimensionnement de la plupart des systèmes énergétiques étant sensible à la performance de l'enveloppe, il est préférable au préalable de procéder à une isolation du bâtiment.** De même, spécifiquement pour la construction, veiller à l'environnement du bâtiment et à son cycle de vie complet tant en termes d'énergies qu'en termes d'émissions de GES permet de promouvoir de meilleures solutions cohérentes avec les objectifs de politiques énergétiques, en recherchant un optimum entre l'isolation et l'efficacité des équipements.

Synthèse des différentes technologies électriques performantes de chauffage et de production d'eau-chaude sanitaire

	Chauffage	Rafraîchissement & climatisation	Production d'eau chaude sanitaire	Reste à charge maximal pour un ménage modeste	Coût moyen à l'achat	Coût de maintenance
Pompe à chaleur aérothermique Air/Air	✓✓✓✓	R/C		€€**	€€€	
Pompe à chaleur aérothermique Air/Eau	✓✓✓	R*	✓✓	€€	€€€€	
Pompe à chaleur géothermique	✓✓✓	R*	✓✓	€€	€€€€€	
Pompe à chaleur hybride	✓✓✓	R*	✓✓	€€	€€€€	
Chauffe-eau thermodynamique			✓✓✓	€	€	
Chauffe-eau solaire individuel			✓✓✓✓	€€	€€	
Système solaire combiné	✓✓✓✓		✓✓✓✓	€€	€€€€	
Nouveaux radiateurs électriques	✓			€	€	Aucun
Réseau de chaleur (PAC en tête de réseau)	✓✓✓✓		✓✓✓✓	€€	€€€€	

NB : Les performances indiquées dans la colonne « Chauffage » correspondent aux situations où les solutions présentées couvrent 100 % des besoins de chauffage du logement.

*En inversant leur mode de fonctionnement les PAC sur vecteur eau peuvent rafraîchir le bâtiment. De plus, elles peuvent aussi fournir de la climatisation sous-réserve d'installer des ventilo-convecteurs.

**Mis à part les CEE, les PAC Air/Air ne bénéficient pas d'autres dispositifs de soutien financiers.

A. LES POMPES À CHALEUR CONCILIENT PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE, TECHNIQUE ET CLIMATIQUE



La pompe à chaleur (PAC) est la cinquième énergie renouvelable (EnR) française, après la biomasse, l'hydraulique, les biocarburants et l'éolien : la production de chaleur renouvelable des équipements de la filière PAC s'établit à 28 TWh en 2018²³, en hausse de 6 % sur un an. La PAC présente un fort potentiel de développement en particulier en maison individuelle (neuf et rénovation) et dans le tertiaire. Elle peut aussi être adaptée au segment du logement collectif dans lequel elle est émergente. Des objectifs ambitieux de développement sont affichés dans la PPE qui vise un point de passage à 39,6 TWh en 2023, avec un objectif à 10 ans de 44 à 52 TWh en 2028 selon la trajectoire²⁴.

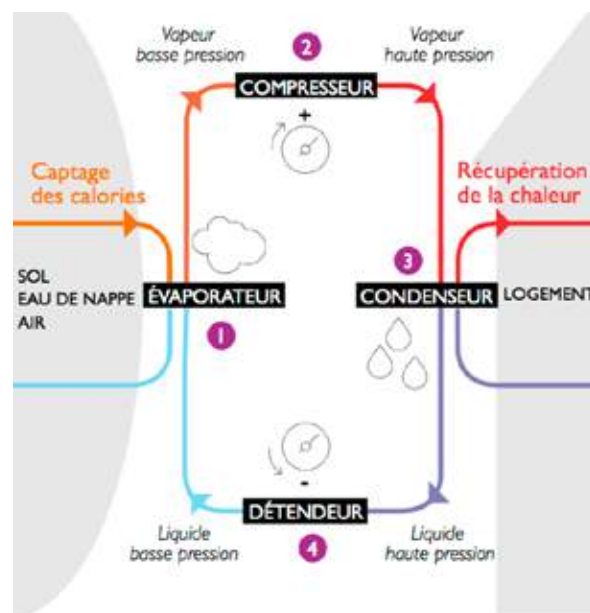
Cette solution électrique a aussi un rôle important à jouer au niveau européen, comme le rappelle l'association Eurelectric²⁵ : « dans le secteur des bâtiments, l'efficacité énergétique est la première source de réduction d'émissions, suivie par l'électrification grâce à l'adoption de pompes à chaleur »²⁶. **A l'échelle européenne plus de 11,8 millions d'unités sont installées, faisant de cette technologie la pierre angulaire de la fourniture de chaleur en Europe, chauffant environ 10 % des bâtiments**²⁷. De plus, 2020 constitue une année charnière pour la commission européenne qui s'apprête à lancer une vague de rénovation dans le cadre du Green New Deal, partant du constat que 75 % du chauffage et du refroidissement est toujours généré par des énergies fossiles au sein de l'Union européenne tandis que 19 % seulement l'est via une source renouvelable²⁸. La France est le premier marché national (devant l'Italie et l'Espagne) mais cette solution est aussi en plein développement dans des pays au climat plus rude tels que la Suède, les Pays-Bas, l'Allemagne et la Finlande²⁹.

Fonctionnement d'une pompe à chaleur

Les pompes à chaleur captent l'énergie renouvelable présente dans le milieu naturel (sol, air, eau) pour la restituer sous forme de chaleur dans un circuit de chauffage ou pour assurer la production d'eau sanitaire du logement. Faciles à installer, d'une durée de vie comprise entre 15 ans et 20 ans, les pompes à chaleur sont des systèmes fiables qui affichent d'excellents rapports prix/performances. **Malgré des coûts d'investissement importants, elles sont rapidement rentabilisées grâce aux gains réalisés sur la facture de chauffage.**

La pompe à chaleur prélève de la chaleur d'une « source froide » (sol du jardin, air environnant ou eau d'une nappe phréatique), augmente son niveau de température et restitue une chaleur à une température plus élevée dans le logement.

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



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

Figure 2: Schéma de principe de la pompe à chaleur (Source : ADEME)

Afin de vérifier la performance des pompes à chaleur pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire il est important de distinguer deux paramètres : le coefficient de performance (COP) et le coefficient de performance saisonnier (SCOP).

Le COP d'une PAC est le rapport entre la quantité de chaleur produite pour le bâtiment et l'énergie électrique consommée (par le compresseur)³⁰ mesurée en énergie finale, calculé dans des conditions spécifiques de fonctionnement (température d'air et d'eau) et pour un certain taux de charge.

Le SCOP d'une PAC est, quant à lui, calculé ou mesuré sur une saison de chauffe. Il est défini comme le ratio de la production thermique annuelle de la PAC et de l'appoint (en kWh) sur la consommation électrique annuelle de la PAC et de l'appoint (en kWh)³¹. Ce dernier indicateur est plus représentatif des conditions de fonctionnement du système sur une saison de chauffe que le COP.

Plus l'écart entre la température de la source extérieure et celle de la distribution de chaleur produite à la sortie de la PAC est faible, plus le SCOP sera élevé, et inversement. C'est la raison pour laquelle dans le neuf les solutions de PAC par plancher chauffant (35 °C) ou émetteurs moyenne température (45 °C) sont à privilégier. Dans l'existant, et en rénovation de bâtiments chauffés initialement par une chaudière (bois, gaz fossile ou non, ...), le maintien des anciens radiateurs (par exemple ceux en fonte) peut nécessiter l'installation d'une PAC à haute température (65-75 °C) afin de couvrir tous les besoins en chaleur du logement³².

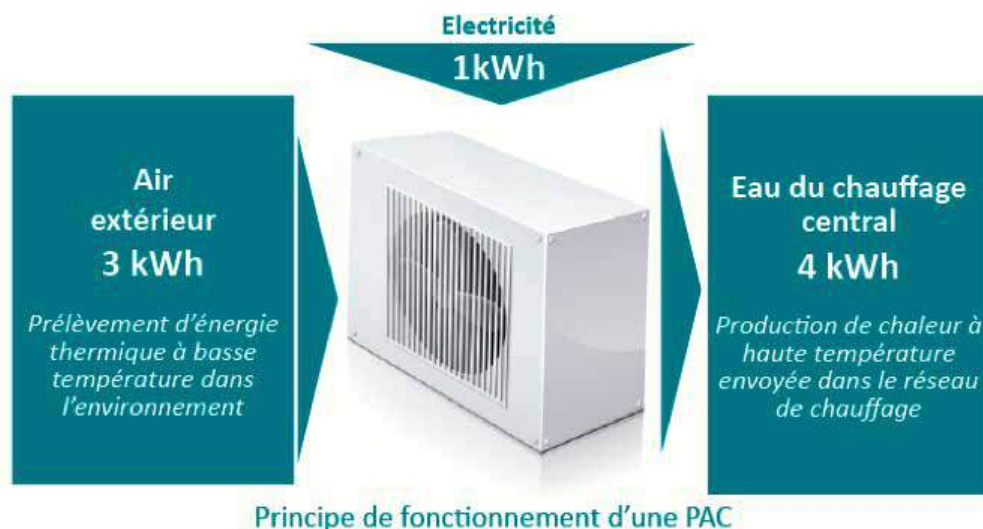


Figure 3: Principe de fonctionnement d'une PAC (Source : UFE)

À partir du principe de base de la pompe à chaleur, plusieurs systèmes existent, avec des performances et des possibilités d'application différentes. On peut regrouper les PAC destinées au chauffage des logements en deux grandes familles :

- Les PAC géothermiques qui puisent la chaleur dans le sol (sol/eau³³) ou l'eau d'une nappe (eau/eau) par l'intermédiaire d'un réseau de capteurs ou de forages ;
- Les PAC aérothermiques qui puisent la chaleur directement dans l'air ambiant, extérieur ou intérieur au logement, et qui la restituent directement dans l'air intérieur (air/air) ou via un circuit d'eau chaude (air/eau).

Le parc de PAC en 2017 est de 7,1 millions d'équipements installés (secteurs résidentiel et tertiaire confondus), dont 78 % de PAC air/air, 13 % de PAC air/eau, 6 % de chauffe-eau thermodynamiques (géothermiques ou aérothermiques) et 3 % de PAC géothermiques³⁴.

Les SCOP minimaux réglementaires permettant une mise sur le marché des différents types de PAC sont les suivants :

SCOP	PAC air/air	3,8
	PAC air/eau ou eau/eau à basse température	3,1
	PAC air/eau ou eau/eau à haute température	2,8

Figure 4 : SCOP minimaux en 2020 calculés dans des conditions normalisées correspondant au climat de Strasbourg avec une période de froid marquée (Source : Directive ECODESIGN)

1. LES PAC AÉROTHERMIQUES

La PAC air/air est surtout intéressante en remplacement de chauffages électriques existants et dans le neuf³⁵. Cette solution est adaptée sur tous les segments de la construction neuve : résidentiel et tertiaire, maisons individuelles comme logements collectifs. Elle présente par ailleurs la caractéristique d'être réversible, offrant ainsi la possibilité de rafraîchir ou climatiser le logement en été³⁶ en fonction de son dimensionnement. De plus, dans ce mode de fonctionnement, les PAC air/air gardent des performances saisonnières élevées soumises, comme pour le mode chauffage, à la directive ECODESIGN. Ainsi, les performances minimales sont de 4,6 pour des puissances inférieures à 6 kW et de 4,3 pour des puissances comprises entre 6 kW et 12 kW. Les produits disponibles sur le marché affichent pour la majorité des performances saisonnières en mode froid comprises entre 5 et 7, contre 2,3 pour les climatiseurs mobiles susceptibles par ailleurs d'être mal installés. Son déploiement doit se faire une fois que des solutions de rafraîchissement passives nécessitant un travail sur le bâti (conception architecturale adaptée, bon niveau d'isolation, optimisation des surfaces vitrées, ventilation naturelle, optimisation de la ventilation mécanique) et sur les systèmes (technologies adiabatiques par exemple, technologies de réseaux urbains de froid renouvelables...) ont été mises en place, celles-ci pouvant garder le coût énergétique de production de froid sous contrôle. Il convient de noter que l'évaluation de l'impact réel de l'utilisation des PAC air/air au phénomène d'îlot de chaleur urbain en période de températures élevées ne fait pas l'objet de consensus dans la littérature scientifique. Certaines publications montrant un effet significatif en milieu urbain dense³⁷, d'autres montrant un effet négligeable³⁸.



La PAC air/eau est moins coûteuse que la solution géothermique, elle peut facilement être mise en place dans un logement équipé d'un chauffage central, quel que soit le combustible utilisé. Généralement, une PAC air/eau chauffe l'eau d'un circuit de chauffage propre à un bâtiment mais, placée à la tête d'un réseau de chaleur, ce type de pompe à chaleur permet aussi d'élever efficacement la température de l'eau préalablement chauffée par la source principale du réseau. Les émetteurs de chaleur peuvent être un plancher chauffant, des radiateurs basse température et/ou des ventilo-convecteurs. Comme la PAC air/air, la PAC air/eau peut être réversible (en faisant circuler de l'eau froide dans un plancher) et être utilisée comme solution de rafraîchissement. De plus, elle peut aussi fournir de la climatisation sous-réserve d'installer des ventilo-convecteurs (ou des batteries terminales à eau froide) dès la conception. Le principe de ventilo-convection est assuré par les calories de l'eau qui sont produites par la PAC arrivant au ventilo-convecteur. Ces calories sont ensuite transférées par le biais d'un échangeur ainsi que d'un ventilateur dans la pièce qui doit être refroidie.

« La très grande majorité des PAC actuellement en vente sur le marché français peut fonctionner sans difficulté à des températures extérieures très froides jusqu'à -15 °C/-20 °C. »

La très grande majorité des PAC aérothermiques actuellement en vente sur le marché français peut fonctionner sans difficulté à des températures extérieures très froides jusqu'à -15 °C/-20 °C dans le respect de la Directive ECODESIGN. Ainsi, à -7 °C, les COP mesurés sont supérieurs à 1,5 et les pompes à chaleur

les plus performantes atteignent un coefficient de performance de l'ordre de 3. Quelques valeurs de COP à -10 °C à -15 °C indiquent des performances de l'ordre de 2 ou 2,5 à ces températures, exceptionnelles en France³⁹.

Les PAC aérothermiques peuvent donc être dimensionnées et fonctionner sans appoint sans difficulté. En pratique l'installation d'un appoint est courante et est principalement due à une optimisation technico-économique qui peut s'avérer plus en adéquation pour des situations et climats ponctuellement très rigoureux.

2. LES PAC GÉOTHERMIQUES

Les PAC géothermiques, puisant la chaleur dans le sol (PAC sol/eau) ou bien dans l'eau d'une nappe (PAC eau/eau) par l'intermédiaire d'un réseau de capteurs ou de forages, se raccordant également à un circuit de chauffage central. Ce type de PAC est très performant quelle que soit la température hivernale (il n'y a donc pas besoin d'un système de chauffage d'appoint).

Les capteurs sont installés à la profondeur requise pour que la température y soit à peu près constante toute l'année et toujours suffisante. **C'est la technologie qui dispose du rendement le plus élevé, mais dont le coût d'investissement est le plus important.**

De plus, **les PAC géothermiques sur réseau pour la production de froid sont une alternative performante aux climatiseurs individuels.** En ce sens, depuis 2018, le Fonds Chaleur⁴⁰ finance également les projets de production de froid renouvelable les plus efficaces, dont ceux faisant appel aux PAC géothermiques sur réseau. Le soutien au froid renouvelable via le Fonds Chaleur et la reconnaissance du froid renouvelable dans la directive sur les énergies renouvelables sont des enjeux notables pour soutenir les pompes à chaleur géothermiques, dans le tertiaire notamment.

3. LES PAC HYBRIDES

Ce dispositif, relativement récent, est l'association de deux systèmes : **une pompe à chaleur air/eau qui assure le confort de chauffage la majorité du temps et une chaudière à condensation gaz ou fioul qui prend le relais lorsque les températures chutent** et que la pompe à chaleur devient moins performante⁴¹. Les modèles dédiés à la rénovation des maisons individuelles sont majoritairement « bi-bloc », c'est-à-dire qu'ils comprennent un équipement intérieur (unité intérieure de la PAC et de la chaudière) qui s'installe à la place de l'ancienne chaudière ainsi qu'un équipement extérieur, l'unité extérieure de la PAC. De plus, les PAC hybrides sont dites « double-service » car elles permettent de produire également de l'eau-chaude sanitaire en plus du chauffage.

Le fonctionnement de la PAC est prioritaire. Mais **l'installation d'une régulation « intelligente » permet d'optimiser le fonctionnement de l'ensemble**, PAC seule, chaudière seule ou les deux simultanément. L'utilisateur a alors le choix entre plusieurs stratégies de pilotage : minimiser sa facture de chauffage et d'eau chaude, ses émissions de CO₂ ou encore diminuer sa consommation d'énergie. De plus, cette technologie est testée pour participer aux mécanismes de flexibilité sans perte de confort (projet européen H2020 de participation à la réserve primaire). A noter qu'aujourd'hui cette stratégie de régulation est définie lors de l'installation et requiert une intervention pour être modifiée. En fonction de ce choix, des rendements instantanés de la PAC et de la chaudière, du prix des deux énergies et de leur contenu en CO₂, la régulation intelligente décide du fonctionnement de la PAC, de la chaudière ou des deux. Ainsi, la PAC hybride fonctionne dans les conditions économiques et/ou environnementales les plus favorables. **Pour une installation correctement dimensionnée, la PAC assure de 60 % à 90 % de l'énergie annuelle de chauffage et d'eau chaude sanitaire**⁴².

Le marché actuel de la PAC hybride est dédié au parc existant de maisons individuelles, essentiellement chauffées au fioul dans des bâtiments mal isolés, où elle peut constituer une solution de transition vers des systèmes énergétiques bas carbone. Ce peut être une solution pertinente dans le neuf dans les bâtiments dans une logique de chaufferie collective. Contrairement aux autres types

« la PAC hybride fonctionne dans les conditions économiques et/ou environnementales les plus favorables. »

de PAC pour lesquelles une isolation en amont du dimensionnement de l'installation de chauffage est préférable, ce type de solution offre une grande résilience à une isolation réalisée *a posteriori*, son niveau de performance restant au niveau attendu. Une PAC hybride régulée sur le critère CO₂ serait par structure la technologie la plus optimale d'un point de vue environnemental.

Par rapport à une chaudière au fioul ou au gaz, cette solution permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre à plusieurs titres. Tout d'abord, grâce à sa pompe à

chaleur qui valorise l'énergie renouvelable de l'air extérieur c'est autant de gaz effet de serre qui ne sont pas rejetés dans l'atmosphère. Par ailleurs, le contenu moyen en gaz à effet de serre de l'électricité en France étant plus faible que celui du fioul ou du gaz, la consommation d'électricité de la PAC engendre moins de gaz à effet de serre que le même service rendu par une chaudière fioul ou gaz. En outre, combinée à la PAC, le remplacement de l'ancienne chaudière par une chaudière nouvelle génération (chaudière à condensation) plus performante procure également un gain au niveau des rejets de gaz à effet de serre.

Par rapport à une PAC électrique, cette solution amène un potentiel de flexibilité et de résilience lorsqu'elle contribue à ajuster la charge sur le réseau électrique aux moments opportuns (pointe journalière, pointe saisonnière, indisponibilité, surproduction...). Par conséquent, c'est une technologie qui favorise l'intégration des moyens de productions variables pour autant qu'elle soit pilotable et pilotée.

4. LES CHAUFFE-EAUX THERMODYNAMIQUES

Les PAC peuvent produire de l'eau-chaude sanitaire (ECS) de deux façons différentes⁴³ :

- **Avec une PAC double-service** qui assure les deux fonctions. La PAC assure le chauffage de la maison et l'eau du ballon est chauffée en récupérant une partie de la chaleur du fluide frigorigène. Quand la PAC ne fonctionne pas, une résistance électrique chauffe l'eau sanitaire. L'eau chaude issue de la PAC est dirigée soit vers les émetteurs de chauffage, soit vers le ballon d'eau chaude.
- **Avec un chauffe-eau thermodynamique (CET)** qui est un équipement comprenant une PAC spécifique et un ballon de stockage (150 à 300 litres) de l'eau chaude produite. Cet équipement fiable offre une solution intéressante pour chauffer l'eau sanitaire.

Tout comme les PAC pour le chauffage, les CET existent en plusieurs versions.

- **Les CET aérothermiques**, qui représentent la quasi-intégralité du marché grâce à leur simplicité de mise en œuvre, et qui valorisent les calories:
 - Soit de l'air ambiant du local où est installé l'appareil (le tiers du marché actuel des CET).
 - Soit de l'air extrait. Cet équipement est efficace mais nécessite l'existence d'un système de ventilation. De fait il ne peut être installé que dans des logements neufs ou lors d'une rénovation lourde⁴⁴.
 - Soit de l'air extérieur (plus de la moitié du marché actuel).
- **Les CET géothermiques**, qui récupèrent l'énergie stockée dans le sol via des capteurs enterrés. Ces systèmes sont plus chers mais aussi plus performants (de l'ordre de 15 % à 20 %).
- **Les CET héliothermiques**, qui valorisent directement l'énergie solaire via des panneaux solaires thermiques. Ces équipements sont pour le moment très peu développés en France. Cette technologie se caractérise par un coefficient de performance élevé pouvant atteindre jusqu'à 7 kW restitué pour 1 kW consommé⁴⁵.

A l'instar des cumulus électriques à effet Joule, le stockage dans le ballon permet de décaler l'appel de puissance sur le réseau électrique et ainsi de lisser la courbe de charge, en profitant de l'électricité marginale disponible pendant les heures où elle est largement décarbonée (en France, le pilotage des ballons d'ECS permet déjà d'économiser annuellement l'équivalent des émissions de CO₂ de plus de 300 000 automobiles⁴⁶). A ce titre, ce système fait partie des équipements contribuant à l'optimisation de l'équilibre offre-demande du réseau électrique. Le pilotage des CET, tout comme des ballons Joule, est une source importante de flexibilité pour le réseau de distribution et ce besoin est amené à se renforcer pour répondre aux ambitions nationales du développement de l'éolien et du photovoltaïque dont la production est variable⁴⁷. La PPE prévoit ainsi que les effacements pourraient représenter un potentiel de 6 500 MW en 2028 (contre plus de 1 000 MW en 2019). Enfin, couplé à une installation photovoltaïque, le CET permet également de stocker localement sous forme de chaleur le surplus d'électricité produite en journée qui n'est pas autoconsommé.

En général, les CET sont équipés d'un appoint effet Joule. Cependant, en fonction de la performance du CET, l'eau peut être chauffée entièrement par la PAC sans recours à l'appoint électrique.

Cet appoint est utile uniquement pour répondre à des besoins plus importants d'eau chaude sanitaire.

S'il est difficile de dire précisément les économies réalisées grâce à un CET, d'une part car cela dépend de la performance de l'équipement précédemment installé et d'autre part car celles-ci ne sont pas différenciées dans la facture d'énergie, **on peut estimer, selon les installateurs et les fournisseurs, que les économies réalisées peuvent aller jusqu'à 70 % (uniquement sur l'ECS)⁴⁸.**

CET aérothermiques			CET Géothermiques
CET sur air extérieur	CET sur air ambiant	CET sur air extrait	
APPOINT			
Oui, par résistance électrique	Oui, par résistance électrique	Oui, par résistance électrique	Oui, par résistance électrique
AVANTAGES			
Solution la plus simple et la moins onéreuse à installer	Solution simple et plus performante que le CET sur air extérieur	Solution CET aérothermique la plus performante	- Adapté aux climats rigoureux - Hautes performances
CONTRAINTES			
- Baisse des performances due à la baisse de températures de l'air - Augmentation des pertes statiques du ballon	En refroidissant le local dans lequel il est installé, le CET génère des consommations de chauffage en plus	- Solution plus onéreuse - Nécessité d'une installation de ventilation mécanique centralisée	- Surface libre nécessaire dans le jardin - Coût du forage

Figure 5 : Pour éclairer le choix d'un CET (Source : ADEME)

Le CET est surtout installé dans les maisons individuelles⁴⁹. En logement collectif, un ensemble de contraintes rend l'installation plus compliquée. De plus, le CET ayant besoin de place lors de son installation, une réflexion en amont autour de son emplacement est, de fait, facilitée dans le neuf. Ainsi, on assiste à un fort déploiement de cette solution performante depuis quelques années dans la construction neuve⁵⁰ :

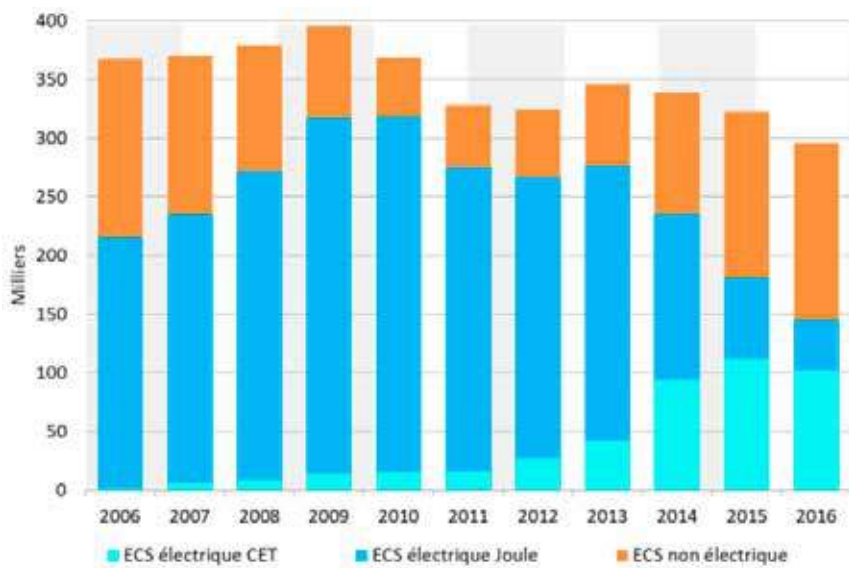


Figure 6 : Répartition des solutions de production d'ECS dans la construction neuve entre 2005 et 2016 (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité »)

Certaines trajectoires de développement⁵¹ peuvent conduire à **une part d'ECS électrique de 60 % sur l'ensemble du parc résidentiel à horizon 2035 avec près de 10 millions de logements équipés d'un CET.**

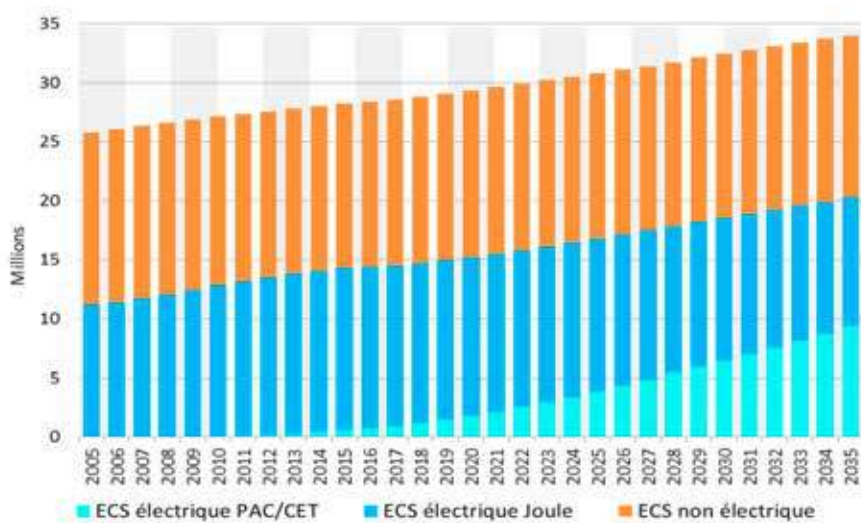


Figure 7 : Projection de la répartition des solutions de production d'eau chaude sanitaire jusqu'en 2035 (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », d'après CEREN)

En ce qui concerne le secteur tertiaire, l'ECS a été produite pour 31 % des surfaces par une solution électrique⁵². Un changement massif des chauffe-eaux par effet Joule au profit des CET est à prévoir d'ici 2035 (dans les bâtiments neufs et rénovés).

	2017	2035
Pompe à chaleur	20 %	24 %
Chauffe eau thermodynamique	8 %	29 %
Chauffe eau effet Joule	72 %	47 %

Figure 8 : Répartition par technologie des surfaces dont la production d'ECS est électrique en 2017 et 2035 (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité »)

B. LES SYSTÈMES SOLAIRES THERMIQUES



L'énergie solaire est disponible partout, gratuite à l'usage, renouvelable et non polluante. Il est simple de la capter pour produire de la chaleur. **Grâce à des équipements robustes et fiables, l'énergie solaire permet de fournir une part importante des besoins de chauffage et d'eau chaude pendant de nombreuses années.** Leurs prix connaissent peu de fluctuations et ces installations ont aussi l'avantage de diminuer les rejets de polluants et de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On distingue deux technologies solaires thermiques principales⁵⁴.

Le Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) est la solution la plus simple à mettre en œuvre. Grâce à un principe fiable, il permet de chauffer une partie de l'eau sanitaire de la maison et peut couvrir, selon la région et la taille de l'installation :

- 50 % à 80 % des besoins moyens annuels d'eau chaude sanitaire
- La totalité des besoins à la belle saison

De plus, le CESI consomme peu d'électricité (uniquement pour le circulateur) et diminue les rejets de GES de 45 % à plus de 70 % selon l'appoint utilisé quand l'ensoleillement est insuffisant.

Plusieurs types de CESI sont disponibles : le CESI monobloc, optimisé ou bien à éléments séparés (circulation forcée ou thermosiphon). Tous ont différents niveaux de complexité et de coût, mais aussi de performance. Par exemple, un CESI à circulation forcée (une pompe électrique entraîne la circulation d'un fluide caloporteur) aura des performances supérieures en hiver par rapport à une installation équipée d'un thermosiphon (circulation du fluide par convection naturelle).

Le Système Solaire Combiné (SSC) est une installation solaire thermique qui permet de produire à la fois l'ECS et le chauffage d'un logement. Il valorise donc encore mieux l'énergie solaire. **Le chauffage solaire peut couvrir entre 40 % et 60 % des besoins de chauffage d'un foyer selon sa localisation géographique.** Les systèmes solaires combinés peuvent s'installer partout, mais conviennent particulièrement bien aux régions froides et bien ensoleillées, où la période de chauffage est plus longue. Le chauffage solaire offre d'intéressantes perspectives d'économie en intersaison, et cela partout en France. Un appoint reste néanmoins indispensable et aura un impact sur la performance du système⁵⁵. **Les couplages bois/solaire ou PAC/solaire offrent une bonne couverture par les énergies renouvelables.**

Les deux systèmes solaires thermiques présentés ci-dessus sont les plus efficaces d'un point de vue de la consommation en énergie et d'un point de vue des émissions de GES.

C. LES NOUVEAUX RADIATEURS À INERTIE ET STOCKAGE D'ÉNERGIE



Les nouvelles générations d'équipements de chauffage électrique permettent de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ tout en améliorant le confort des utilisateurs. Bien que 3 à 4 fois moins performants que les PAC et le solaire (cf. infra), ces solutions peuvent être les seules alternatives sur certains secteurs. **Face à d'anciens appareils énergivores, la mise en place d'équipements modernes induit une réduction immédiate de la facture d'électricité, variable suivant les installations et les comportements des ménages.** En particulier, depuis 2018, les nouveaux radiateurs électriques intègrent des fonctions avancées et innovantes telles que la

détection de présence et d'absence, la détection de fenêtre ouverte ou bien l'indication du niveau de consommation intégré dans une certification NF⁵⁶. Ces technologies permettent au radiateur électrique de chauffer la pièce au bon moment, selon les besoins et le rythme de vie, tout en apportant une chaleur douce et homogène. A ce titre, **les substituer aux anciens appareils énergivores, notamment les convecteurs électriques, contribue à la dynamique nationale de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO₂**⁵⁷.

De plus, s'il est connecté et donc pilotable, **le radiateur électrique peut également participer à l'équilibrage du système électrique à l'échelle d'une ou deux heures.** Il apporte son concours aux besoins croissants de flexibilité consécutifs au développement des énergies renouvelables et à la maîtrise de la pointe journalière principalement liée à l'éclairage et à la cuisson. Cette fonctionnalité est rendue possible, d'une part, grâce à la connectivité de nouveaux équipements et, d'autre part, grâce au déploiement des **radiateurs à inertie** (ou à accumulation). Ceux-ci exploitent la capacité d'inertie thermique d'un matériau (fonte, brique réfractaire, céramique...) ou liquide (huile ou glycol) capable d'accumuler de la chaleur transmise par des résistances électriques puis de la restituer lentement par rayonnement.

A l'inverse des radiateurs à inertie thermique, les radiateurs à stockage d'énergie sont à l'heure actuelle peu répandus, mais une nouvelle génération de radiateur intelligent avec batterie intégrée qui facilite l'autoconsommation et les économies d'énergies est en cours de développement. **Ces radiateurs à stockage d'énergie** sont composés d'éléments chauffants assurant une sensation de chaleur immédiate et un confort optimal (bloc de chauffe en pierre naturelle assurant une inertie thermique et panneau rayonnant infrarouge), de capteurs ainsi que d'une batterie. Cette dernière se charge pendant les heures creuses du réseau ou via une installation de production d'électricité photovoltaïque déployée sur le bâtiment et restitue l'électricité en heure de pointe pour alimenter le radiateur. A l'avantage apporté au réseau électrique s'ajoutent les économies supplémentaires générées sur la facture par une baisse de la puissance souscrite et la possibilité d'offrir un débouché nouveau à certains types de batteries comme celles des vélos à assistance électrique⁵⁸. Ces deux types de chauffage permettront dans les prochaines décennies, grâce à leur pilotage, d'offrir une solution de contrôle de la pointe journalière (cf. partie IV D). Ces systèmes permettent de soulager les contraintes qui pèsent sur le réseau, soit par un arrêt de l'appel de puissance au réseau sans baisse de chauffage pour les systèmes à stockage d'énergie, soit par un arrêt ou une baisse momentanée du chauffage pour les systèmes à inertie thermique. Cette dernière stratégie pouvant diminuer le confort, la notion d'acceptabilité par l'utilisateur est à prendre en compte.

RTE, dans une trajectoire en ligne avec les orientations de la SNBC⁵⁹, prévoit que le nombre de logements chauffés à l'électricité continue de progresser dans les prochaines années : **aux logements neufs chauffés à l'électricité viennent s'ajouter des logements existants qui basculent d'une solution utilisant des énergies fossiles vers des solutions décarbonées dont les solutions électriques performantes.** En effet, les radiateurs électriques, pourraient avoir toute leur place en rénovation lorsqu'aucune autre solution n'est disponible. Quant à la construction neuve peu énergivore car bénéficiant d'une enveloppe bien isolée, les radiateurs électriques ne nécessitant pas de mettre en place une boucle d'eau chaude, cela représente un avantage en termes de coûts de construction du logement⁶⁰, mais un désavantage en termes de performance énergétique en énergie primaire et un avantage en CO₂ et énergie finale. Selon les prévisions de RTE, deux tendances opposées se dégageront dans les années à venir selon les types de logement : **le nombre de maisons équipées de chauffage par effet Joule décroît, tandis que le nombre d'appartements équipés de chauffage par effet Joule augmente.** En effet l'installation de ce type de chauffage, combinée avec un bâti performant et un CET assurant les besoins d'eau chaude, est particulièrement adaptée pour les logements de petite surface. Cette technologie peut être utilement remplacée par des technologies encore plus performantes du type pompe à chaleur air/air.

D. LES SYSTÈMES DE VENTILATION ET DE TRAITEMENT DE L'AIR



La qualité d'air intérieur d'un bâtiment dépend de différents facteurs, tels que les sources d'émissions de polluants présentes, le comportement de l'occupant ainsi que les équipements utilisés pour le renouvellement de l'air. Pour répondre à ces enjeux, de nombreuses technologies et techniques sont disponibles, parfois novatrices et peu connues des occupants. En résidentiel comme en tertiaire, dans le neuf comme dans la rénovation, des technologies adaptées permettent d'améliorer la qualité de l'air intérieur.

Le renouvellement de l'air plusieurs fois par jour par une ventilation adaptée permet d'éviter humidité et excès de polluants dont le CO2 est un indicateur. Plusieurs solutions sont possibles :

- Dans certains cas, **la ventilation de l'air est par exemple couplée à des systèmes de mesures de la qualité de l'air** qui ajustent le fonctionnement des équipements selon les concentrations de polluants.
- Il est possible d'installer **des systèmes proposant des débits d'air adaptés** à chaque pièce en fonction de la concentration des différents polluants, connectés à des sondes et des détecteurs de présence.

Les systèmes de ventilation de l'air, combinés à des systèmes de filtration voire des systèmes de détection de la qualité de l'air voient le jour. **La filtration de l'air entrant** permet de réduire les concentrations de pollens, poussières et particules fines. L'utilisation de charbon actif, est par exemple, préconisée pour le traitement de certains polluants spécifiques.

Plus spécifiquement pour les combinaisons de filtration et de renouvellement de l'air, chaque type de polluant a une solution adaptée. Avant d'installer un système de ventilation / filtration, un diagnostic de la qualité de l'air intérieur est nécessaire afin d'y répondre par un dispositif adapté.

Bien que les débits d'air imposés par l'arrêté de 1982 soient supposés suffisant pour assurer la qualité de l'air intérieur, la ventilation naturelle par l'ouverture des fenêtres permet également d'aérer le bâtiment en complément de la ventilation mécanique. Plusieurs solutions électriques performantes assurant la ventilation et le traitement de l'air existent dont leurs caractéristiques sont détaillées ci-dessous⁶¹.

	Coût d'investissement	Coût de maintenance	Performance énergétique	Qualité de l'air intérieur	Confort thermique	Confort acoustique
Ventilation simple flux par extraction	€	€	✓	✓	✓	✓
Ventilation simple flux avec modulation de débit	€+	€	✓✓	✓✓	✓	✓
Ventilation double flux avec récupération de chaleur et filtration performante	€€	€€	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓
Ventilation double flux avec récupération de chaleur, filtration performante et modulation de débit	€€€	€€	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓
Ventilation double flux avec récupération de chaleur, filtration performante, modulation de débit et épuration / recyclage	€€€+	€€	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓

LÉGENDE

Le coût d'une installation fournie et posée varie de 1 à 3.5 selon les options retenues.

€ = coût initial €+ = coût initial x1.5 €€ = coût initial x2 €€€ = coût initial x3 €€€+ = coût initial x3.5

Les paramètres performances, QAI et confort sont calculés à partir des résultats du système de référence : la ventilation simple flux.

✓ = performance équivalente à simple flux ✓✓ = plus performant que la simple flux

✓✓✓ = beaucoup plus performant que la simple flux ✓✓✓✓ = performance ultime

Figure 9 : Les solutions de ventilation (Source : UNICLIMA)

E. LES ACTIONS D'OPTIMISATION ACTIVE



La gestion active de l'énergie recouvre l'ensemble des fonctions de gestion des systèmes énergétiques d'un bâtiment, sur la base d'informations échangées avec l'environnement de ces systèmes et potentiellement du bâtiment (température intérieure, température extérieure, présence, luminosité, qualité de l'air intérieur, contrainte réseau, disponibilité EnR locales, etc...).

Par exemple, un logement équipé d'une installation de chauffage bien réglée et programmée est une source d'économies d'énergie pour ses occupants. Mais au-delà des fonctions de régulation et de programmation, il existe aujourd'hui des fonctions de gestion active avancée pour économiser l'énergie applicable aux différentes technologies de chauffage telles que les fonctions de détection de présence par pièce, d'ouverture de fenêtre, d'auto-apprentissage, des indicateurs de consommation.... Ces fonctions peuvent équiper des systèmes décentralisés (fonction à l'échelle de la pièce) ou des systèmes à l'échelle du logement et parfois mener à une gestion globale multi-énergies d'un site de production.

Plusieurs technologies d'efficacité énergétique peuvent tout particulièrement être déployées à grande échelle⁶² :

- **La régulation programmable du chauffage central** : il s'agit d'un thermostat qui permet de piloter l'utilisation du chauffage par rapport notamment à une température de consigne donnée. Par exemple, pour les chauffages à grande inertie (chauffage hydraulique au sol) l'automatisme devrait pouvoir accéder aux données météorologiques afin d'anticiper au mieux les variations de la température journalière à deux jours. Une gestion intelligente peut contribuer à utiliser moins d'énergie de chauffage.
- **Le robinet thermostatique** : ce dispositif, qui concerne les logements équipés d'une boucle d'eau chaude, permet de régler la température dans chaque pièce où il est installé. Peu coûteux à installer, il contribue à une amélioration du confort du logement et réduit la consommation énergétique globale.
- **Le système de Gestion Technique du Bâtiment** : cette action concerne essentiellement le secteur tertiaire. En analysant les flux d'énergie qui sont consommés, les entreprises peuvent identifier des gisements importants d'économie d'énergie et faire diminuer la facture énergétique en évitant la surconsommation.

Les équipements de pilotage du chauffage électrique : les nouveaux émetteurs électriques à régulation électronique à fonctions avancées comportent des moyens de détections (ouverture de fenêtre et absence), d'information (indicateur de consommation) et de régulation. En complément, un système de programmation hebdomadaire de l'intermittence peut être installé pour permettre d'améliorer la performance du chauffage via une interface mobile (possibilité d'une programmation pièce par pièce ou d'une programmation des absences longues). Dans le résidentiel, la mise en place de robinets thermostatiques, tout comme celle d'une régulation programmable, entraîne une réduction de 5 % de la consommation de chauffage de l'habitation⁶³. Son coût est faible, ce qui lui permet d'être rentable sur un grand nombre de segments de parc immobilier. En 2015, le taux d'équipement des logements en robinets thermostatiques s'élevait à 40 %. Dans le tertiaire, la gestion thermique du bâtiment permet quant à elle de réduire de 5 % la consommation d'énergie pour un surcoût de 10 €/m². Au total, selon l'étude que UFE a réalisée en 2016⁶⁴, **les actions d'optimisation active dans le résidentiel et le tertiaire pourraient contribuer à elles seules à l'atteinte de plus de 3,5 % de l'objectif de réduction des émissions de CO2 inscrit dans la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte fixant un objectif de réduction de 30 % des émissions de GES en 2030 par rapport à celles de 1990**. Il est important de noter que ces gisements sont particulièrement rentables et facilement accessibles.

« Dans le tertiaire, la gestion thermique du bâtiment permet quant à elle de réduire de 5 % la consommation d'énergie pour un surcoût de 10 /m² »

On distingue les fonctions de gestion active permettant d'économiser l'énergie («consommer moins») et les fonctions de gestion active permettant de «consommer mieux». **Ces fonctions «consommer mieux» optimisent les puissances appelées aux moments critiques sur le réseau, la part d'EnR dans la consommation, les émissions de gaz à effet de serre ou encore décalent les appels de puissances dans le temps.** Elles offrent ainsi des capacités de flexibilité au système électrique ou de pilotage des EnR locales ou centralisées. Parmi les fonctions «consommer mieux» on peut citer : la déformation des appels de puissance avec stockage (par exemple le pilotage de l'autoconsommation photovoltaïque par des CET), la déformation des

appels de puissances sans stockage (par exemple via des PAC air/eau) et le changement instantané d'énergie (par exemple via des PAC hybrides).

Enfin, dans le cadre de la transposition en droit français de la directive européenne révisée (UE) 2018/844 portant sur la performance énergétique des bâtiments, le projet de décret BACS (systèmes d'automatisation et de contrôle des bâtiments) contribuera à atteindre les objectifs en termes de performance énergétique⁶⁵. En effet, il rend notamment obligatoire l'installation de BACS dans le secteur tertiaire pour tous les systèmes de puissance supérieure à 290 kW d'ici 2025, ainsi que l'installation à partir de juillet 2020 de dispositifs d'auto-régulation de la température pièce par pièce dans le neuf (ce qui était déjà le cas en France depuis la RT 2012) et en rénovation (lorsque le générateur est remplacé) dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

F. LES INNOVATIONS ATTENDUES DANS LES PROCHAINES ANNÉES



Les critères principaux conditionnant l'installation des différentes solutions électriques performantes présentées précédemment dans les bâtiments sont leur coût et les économies d'énergie qu'elles engendrent.

En ce sens, de nombreux progrès techniques continueront à améliorer l'efficacité des équipements électriques, en particulier en ce qui concerne les PAC. **Ainsi, le SCOP moyen de tous les types de PAC augmentera significativement d'ici 2035.** De plus, les PAC pourront encore améliorer leurs performances, grâce à la recherche d'autres sources de chaleur comme celle de l'air extrait par la ventilation ou de l'eau usée⁶⁶.

Les prévisions de déploiement des PAC font état d'un marché en forte croissance. **La volonté de faire de la PAC une pierre angulaire de la transition énergétique de la France est d'ailleurs confirmée dans la PPE** qui prévoit selon les scénarios une multiplication par deux ou trois du nombre de PAC installées d'ici 2028 avec 7,1 millions de PAC installées dans les maisons individuelles, 2,2 millions dans les logements collectifs et 114 millions de m² chauffées par une PAC aérothermique dans le tertiaire.

Portée par cette volonté politique forte, la part de la PAC dans le marché neuf sera croissante dans les prochaines années.

		2017	2035
Marché de la PAC dans le neuf	Maisons individuelles neuves chauffées à l'électricité	60 %	90 %
	Immeubles collectifs neufs chauffés à l'électricité	10 %	40 %

Figure 10 : Part de la PAC dans le marché neuf et perspective d'évolution (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité »)

Grâce à l'effort des fabricants et à un encadrement réglementaire de plus en plus contraint, les PAC continueront à être améliorées sous tous leurs aspects, performances et impact environnemental, liés à toutes les étapes d'existence de ces produits. Un règlement d'application de la directive européenne sur l'éco-conception des produits liés à l'énergie, adopté en 2015, a relevé les exigences de performance minimale et les exigences acoustiques des PAC mises sur le marché. Enfin, la fin de vie des PAC est gérée dans le cadre de la filière de gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques avec une priorité donnée au recyclage⁶⁷. Par ailleurs, l'utilisation des fluides frigorigènes encore majoritairement présents dans les PAC aujourd'hui est de plus en plus contrainte par le règlement européen F-Gas, qui pousse ainsi au développement de fluides frigorigènes moins impactant en cas de fuites.

La recherche et développement est ainsi essentiellement orientée vers la substitution des fluides frigorigènes et la diminution du bruit, en complément de l'amélioration des performances des équipements.

Les innovations attendues de la part des équipementiers pourront aussi concerner le développement de PAC de fortes puissances capables d'alimenter des logements collectifs, ou bien l'association systématique de cette technologie à une VMC double flux dans le neuf.



4 L'INTÉGRATION DE CES TECHNOLOGIES dans le système électrique français

A. UN RÉSEAU QUI ANTICIPE L'ACCUEIL DE CES TECHNOLOGIES EN TOUTE SÉRÉNITÉ

Comme le détaille RTE dans son Schéma Décennal de Développement du Réseau (SDDR)⁶⁸, la transformation du réseau électrique est une des conditions essentielles à la réussite de la transition énergétique. Parallèlement à l'évolution du mix de production français, le réseau doit aussi s'adapter à l'évolution des nouvelles habitudes de consommation et réussir à assurer à tout moment l'accès à une électricité de qualité pour tous.

Bien que la SNBC indique une perspective d'augmentation de la part de l'électricité dans le chauffage, le maillage territorial dense des lignes (en complément d'autres outils, *cf. infra*) permettra d'assurer un niveau de consommation potentiellement supérieur à ce qu'il est actuellement et ce, sur tout le territoire. Néanmoins, une des conditions nécessaires à la bonne gestion du réseau est prioritairement le renouvellement du réseau de transport, âgé d'environ 50 ans. Plus précisément, à partir de 2030, un nombre croissant de lignes, construites lors de la reconstruction du pays après la seconde guerre mondiale, va atteindre l'âge de 85 ans. **Ainsi, au cours des quinze prochaines années, le renouvellement du réseau existant va s'affirmer comme un enjeu crucial pour la qualité de l'approvisionnement en électricité.** Afin de ne pas diminuer le niveau de service offert par l'infrastructure, RTE prévoit en ce sens d'augmenter progressivement l'effort consacré au renouvellement de ses lignes. Il en va de même également pour les réseaux de distribution que les différents Gestionnaires de Réseaux de Distribution devront pouvoir continuer de renouveler pour assurer la qualité du service attendu, quelles que soient les évolutions de la production, de la consommation et des événements climatiques.

En complément de cet effort de renouvellement sur le territoire français, **RTE prévoit un programme de doublement des capacités d'échanges de flux d'électricité avec les pays voisins en 15 ans.** Le développement des interconnexions transfrontalières permet de tirer parti des complémentarités énergétiques des pays, et constitue un élément clé de la transition énergétique en ajoutant un élément de flexibilité notable pour la gestion de l'équilibre offre-demande.

B. DE NOUVEAUX SERVICES RENDUS AU RÉSEAU GRÂCE AU DÉVELOPPEMENT DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

Face aux enjeux de vieillissement du réseau, à l'ajout de moyens de production renouvelables supplémentaires et à l'apparition de nouveaux usages de consommation de l'électricité, le déploiement d'outils numériques permet d'adapter dès maintenant les infrastructures du système électrique. **Afin de répondre à ces transformations, tout en préservant la sécurité des biens et des personnes et en maintenant la performance électrique, il est nécessaire de renforcer « l'ossature numérique » du réseau via le déploiement de plusieurs solutions.**

Sur son réseau haute tension, RTE prévoit ainsi de renouveler massivement les systèmes de contrôle-commande existants, installés dans les postes électriques depuis les années 1970⁶⁹. En parallèle, l'extension de l'infrastructure de télécommunication est programmée afin de garantir



l'observabilité et la conduite du réseau en cas de blackout électrique, et assurer *in fine* la sûreté et la sécurité des biens et des personnes.

De plus, en complément des stratégies structurelles, de nouveaux acteurs fournissent des services pour le réseau. Ainsi, **le développement de solutions de flexibilité (smart grids) se pose désormais comme une alternative aux infrastructures classiques de production et de réseau.** Ces différentes solutions présentent des degrés de maturité différents s'agissant de leur utilisation pour résoudre les contraintes du réseau (écrêtement de production renouvelable par automates, effacement de consommation, stockage par batterie ou power-to-gas).

Enfin, les opérateurs de distribution procèdent au déploiement sur tout le territoire de compteurs communicants, pouvant recevoir et envoyer des données et des ordres à distance. A ce titre, ils sont des supports de communication pour gérer efficacement les différents équipements énergétiques. Ils permettent donc à des fournisseurs d'énergie et de services de développer des solutions d'optimisation active afin de mieux piloter les consommations d'énergie via des études de profils de consommation (par exemple une proposition de fourniture d'électricité basée sur des tarifs dynamiques). En effet, **la demande est appelée à jouer un rôle croissant en s'adaptant aux productions variables et à la multiplicité des services de pilotage associée au développement de la connectivité des technologies** (par exemple la programmation et le déclenchement à distance du chauffage).

C. DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE QUI FONT PLUS QUE COMPENSER L'AUGMENTATION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE LIÉE AU DÉPLOIEMENT DES SOLUTIONS PERFORMANTES

Depuis le début des années 2010, la consommation française d'électricité est entrée dans une phase de relative stabilité. Ce ralentissement structurel de la consommation, constaté également dans la plupart des pays européens, s'explique essentiellement par l'effet des actions d'efficacité énergétique et la « tertiarisation » de l'économie (le secteur tertiaire étant moins énergivore que l'industrie à niveau de valeur ajoutée équivalent). **Pour les prochaines années RTE envisage principalement au niveau national une hypothèse de stabilité de la consommation électrique en France à l'horizon 2025⁷⁰.** Plus spécifiquement, concernant le secteur résidentiel la consommation d'électricité devrait se stabiliser voire décroître, tandis que pour le tertiaire la consommation d'électricité tend à se contracter. Enfin, à l'horizon 2050, bien que la part relative de l'électricité par rapport aux autres énergies augmente dans le bâtiment, la consommation totale d'électricité du secteur devrait fortement diminuer et ce, aussi bien dans le scénario prévu par la SNBC que dans le « scénario optimisé » de l'UFE réalisé avec la filière électrique⁷¹.

1. Les prévisions d'évolution de la consommation électrique dans le résidentiel

Le chauffage, l'ECS, la climatisation et la ventilation représentent 42 % de la consommation d'électricité du secteur résidentiel en 2017 :

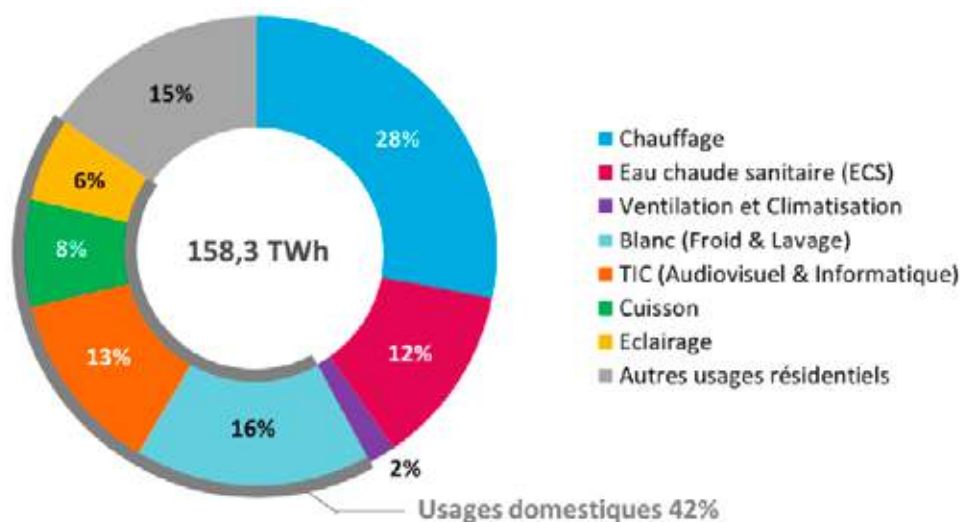


Figure 11 : Répartition par usages de la consommation du secteur résidentiel en 2017 (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité »)

D'ici à 2035, RTE prévoit dans le résidentiel une consommation d'électricité pour le chauffage relativement stable dans l'ensemble des trajectoires. Globalement, l'effet baissier de l'amélioration de l'efficacité énergétique (notamment grâce aux rénovations) est contrebalancé par les effets haussiers de la croissance du nombre de ménages et de l'électrification du parc de logements, d'où une relative stabilité de l'ensemble des trajectoires.

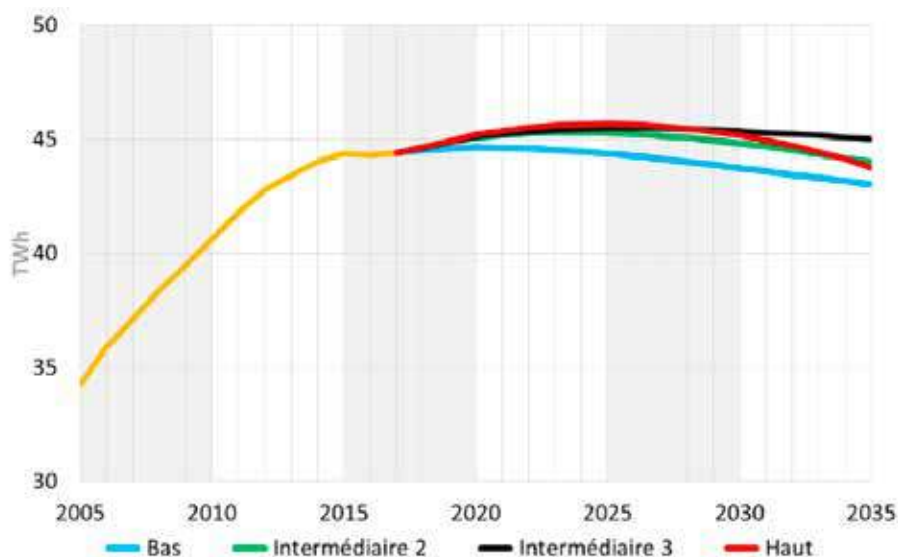


Figure 12 : Estimations de consommation d'électricité pour le chauffage historique et projetées selon les trajectoires (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité», mars 2019)

De plus, la consommation électrique pour l'ECS devrait décroître d'ici à 2035, malgré l'électrification de l'usage. De façon générale, l'effet baissier de l'amélioration de l'efficacité énergétique (notamment liée à l'essor des modes de production thermodynamiques) est prégnant et oriente l'ensemble des trajectoires à la baisse.

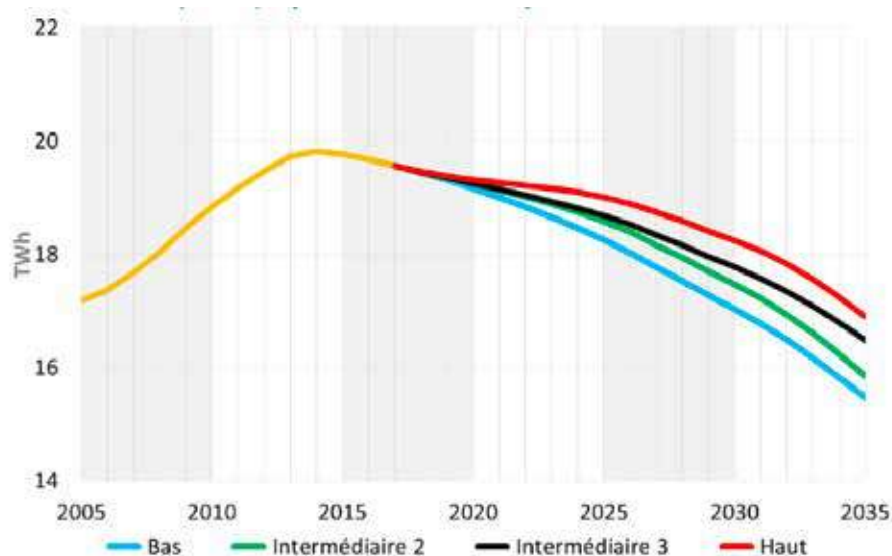


Figure 13 : Estimations de consommation d'électricité pour l'eau chaude sanitaire historique et projetées selon les trajectoires (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité», mars 2019)

Enfin, la consommation d'électricité liée à la climatisation, limitée aujourd'hui du fait du faible taux d'équipements et d'une période d'utilisation réduite, est appelée à croître. Quant à la ventilation, un usage croissant de celle-ci est prévu, tiré par les logements neufs et l'isolation thermique performante dans l'existant (augmentation du taux d'installation de VMC lors d'une rénovation thermique).

2. Les prévisions d'évolution de la consommation électrique dans le tertiaire

Le chauffage, l'ECS, la climatisation et la ventilation représentent 27 % de la consommation d'électricité du secteur tertiaire en 2017 :

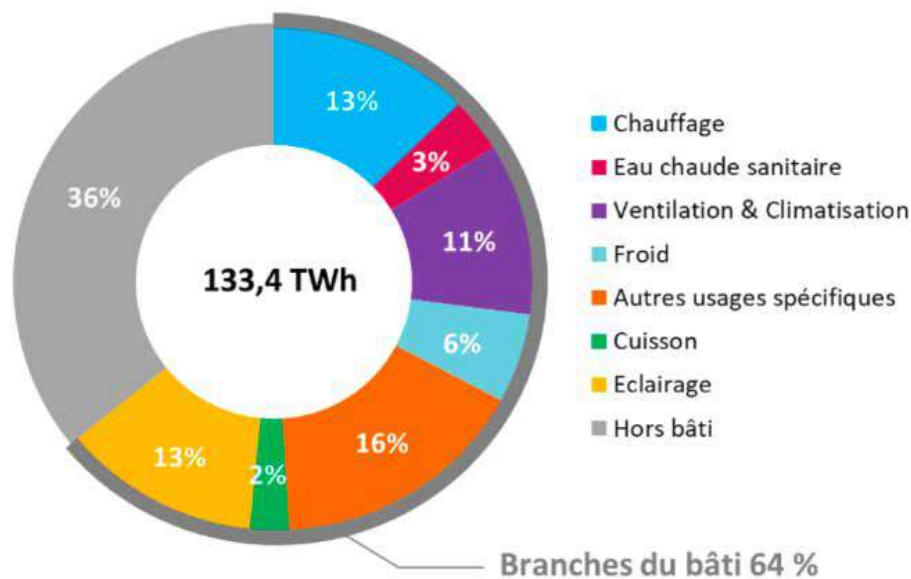


Figure 14 : Répartition par branches⁷² et par usages de la consommation du secteur tertiaire en 2017 (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité »)

De façon comparable au secteur résidentiel, RTE prévoit dans le tertiaire une consommation d'électricité pour le chauffage relativement stable dans l'ensemble des trajectoires, voire en légère baisse. L'effet baissier de l'efficacité énergétique, par les rénovations dans l'existant et l'amélioration des performances dans le neuf, est contrebalancé par les effets haussiers de l'électrification et de l'augmentation des surfaces du secteur.

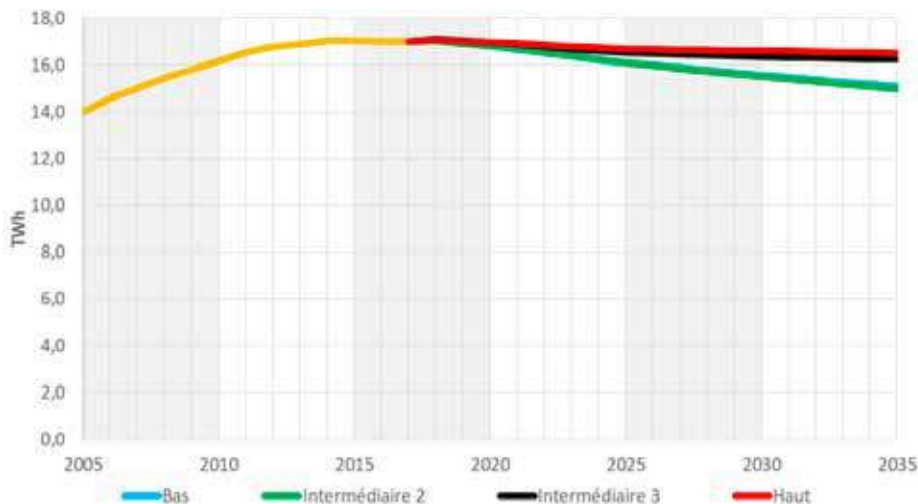


Figure 15 : Estimations de consommation d'électricité pour le chauffage tertiaire historique et projetées selon les trajectoires (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », septembre 2019)

Produite dans plus de 31 % du parc tertiaire par une solution électrique, la production d'ECS d'ici 2035 est estimée en légère hausse. Les économies d'énergie attendues par le déploiement des CET et des PAC devraient être compensées par l'augmentation des surfaces du parc équipées par ces solutions.

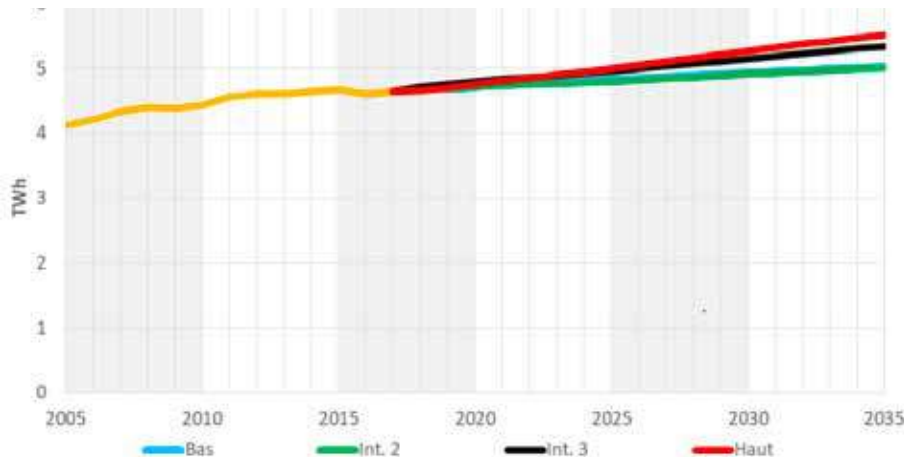


Figure 16 : Estimations de consommation d'électricité pour l'eau chaude sanitaire tertiaire historique et projetées selon les trajectoires (Source : RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », septembre 2019)

Enfin, l'augmentation des surfaces climatisées dans le secteur tertiaire n'est qu'en partie atténué par l'effet baissier de l'efficacité énergétique. Cela conduit à des consommations de climatisation en hausse en 2035 par rapport à 2017, l'augmentation allant de 3 TWh à plus de 4,5 TWh selon les trajectoires.

D. L'APPORT DES SOLUTIONS PERFORMANTES EN PÉRIODE DE TENSION SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

1. Pointes journalière et saisonnière : comprendre leurs origines pour mieux cibler les moyens d'actions

En complément des cycles journaliers, hebdomadaires ou saisonniers la consommation d'électricité est également influencée par d'autres facteurs nettement moins répétitifs et prévisibles : il s'agit essentiellement de facteurs météorologiques, tels que la nébulosité (jouant sur l'éclairage), les températures extérieures en été (via la climatisation) et, surtout, les températures extérieures en hiver (via le chauffage électrique). **Ainsi, la thermosensibilité du système électrique français induite par le chauffage électrique se traduit par une augmentation de la consommation d'électricité lorsque la température diminue en hiver : lors d'une vague de froid intense, les besoins de chauffage peuvent être beaucoup plus importants et contribuer à une augmentation significative de la puissance moyenne appelée.**

Le gradient thermique, exprimé en MW/°C, reflète l'appel de puissance complémentaire pour un degré de température en moins pendant plusieurs jours de suite (pour une température inférieure à 15 °C). Lorsque la température extérieure baisse durablement de 1 °C, environ 7 000 MW de puissance supplémentaire sont appelés, dont 2 300 MW sur les réseaux électriques et 5 400 MW sur les réseaux gaziers. Afin de faire face à ce gradient thermique, la gestion des équilibres offre-demande se fait différemment selon les deux réseaux, le réseau de gaz disposant de moyens de stockage spécifiques.

La pointe d'appel de puissance est la superposition de phénomènes journaliers et saisonniers. Les variations saisonnières de puissance sont dues au chauffage (29 % de la puissance moyenne appelée entre décembre et février, soit une bande d'environ 20 GW sur l'ensemble de l'hiver) et les variations journalières sont essentiellement dues à l'activité des Français, en particulier à 19 h à la préparation des repas (la cuisson représente jusqu'à 5 % de la puissance appelée et l'éclairage 7 %) ⁷³. Les effets saisonniers participent à la pointe à hauteur de plusieurs dizaines de gigawatts (jusqu'à 40 GW lors des vagues de froid exceptionnelles sur une période de plusieurs jours). A l'inverse les effets journaliers ne sont responsables que de quelques gigawatts.

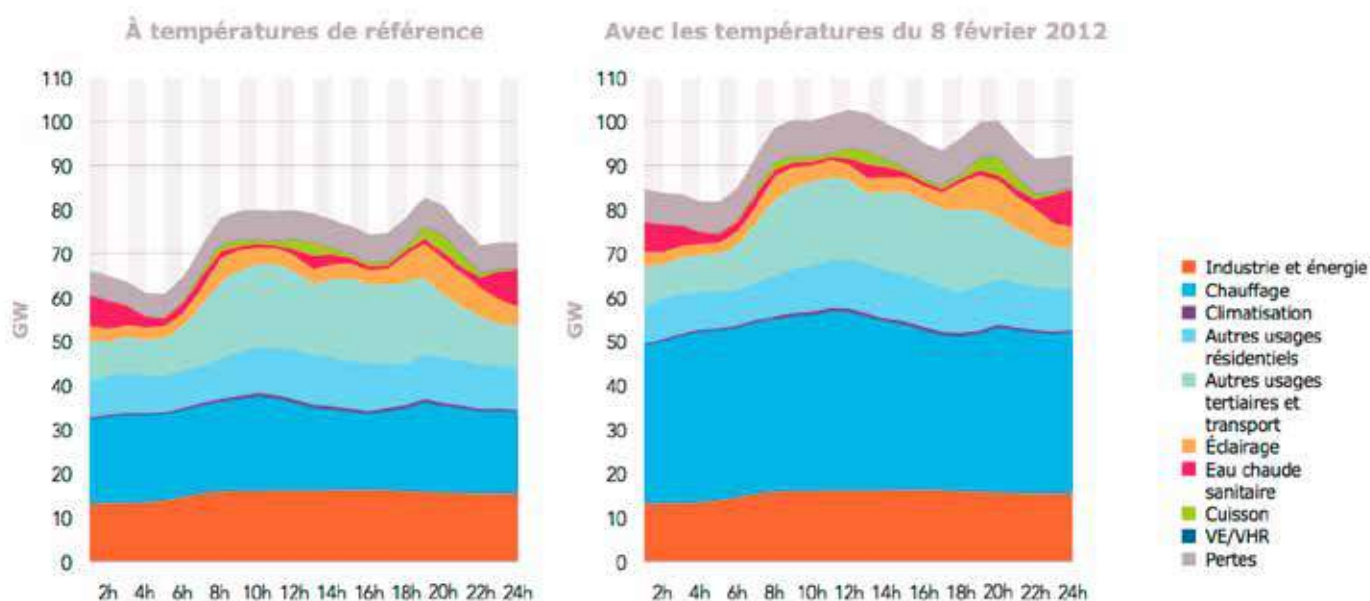


Figure 17 : Profil journalier hivernal de la consommation par usages/secteurs à températures de référence et avec les températures du 8 février 2012 (Source : RTE, BP 2019)

L'augmentation de l'appel de puissance électrique lors de l'effet journalier sur la pointe en hiver n'est pas liée à une augmentation soudaine de l'utilisation des chauffages électriques. En effet, comme cela ressort du graphe ci-dessous, une analyse de l'évolution d'une journée-typique hivernale à températures de référence permet

d'appréhender les évolutions en niveau et en structure de la courbe de charge. De plus, le 8 février 2012 à 19 h, lors du pic de consommation le plus important connu à ce jour (102 GW) la part du chauffage électrique n'était que de 37 %, soit 38 GW contre 64 GW pour les autres usages (éclairage, cuisson, procédés industriels...)⁷⁴. En hiver, l'utilisation simultanée d'une multitude de lieux (bureaux, commerces, différentes pièces dans un logement...) et d'une grande diversité d'activités (journée de travail et activités domestiques) est observée. La pointe du soir résulte donc de la réalisation simultanée d'activités consommatrices d'énergie dont l'éclairage et la cuisson.

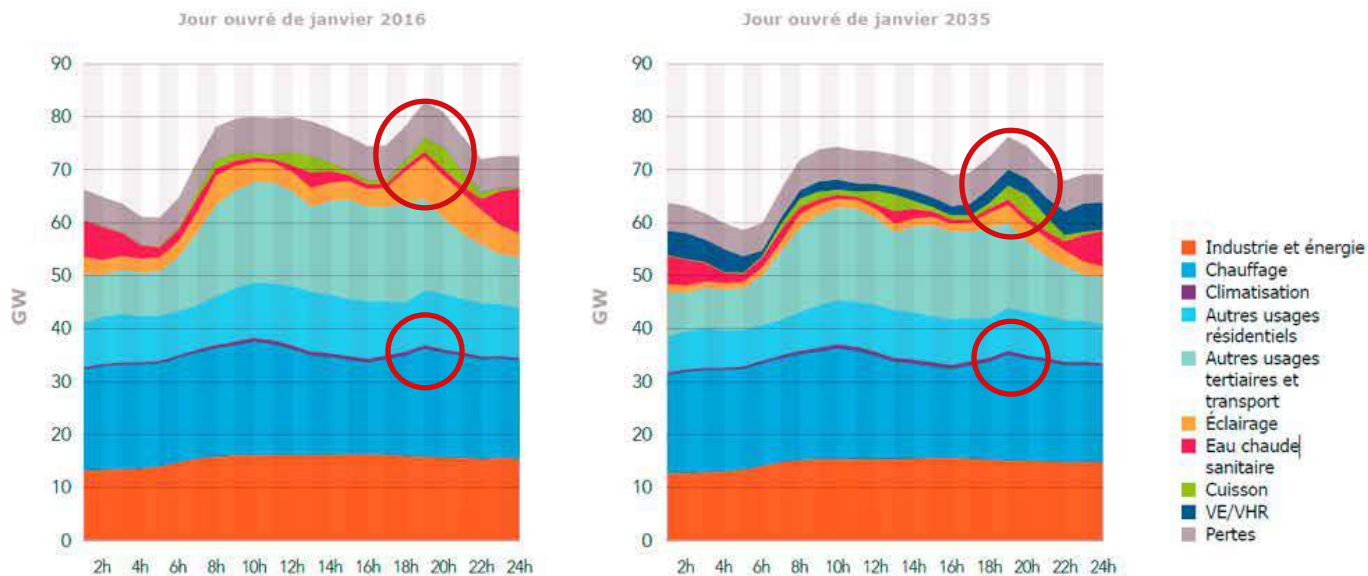


Figure 18 : Profil journalier hivernal de la consommation par usages/secteurs à températures de référence pour un jour de janvier 2016 et un jour de janvier 2035 (Source : RTE, BP 2017)

La pointe journalière a pour origine principale une utilisation accrue de l'éclairage et de la cuisson, elle n'est que peu causée par le déploiement d'équipements de chauffage électriques et n'est donc que faiblement thermosensible.

Les périodes de forte demande pouvant durer sur plusieurs jours en période de grand froid, les écarts entre l'offre et la demande liés à la pointe saisonnière (différence entre la consommation d'hiver et d'été) ne peuvent pas être résolus par des solutions de flexibilité infra-journalière (effacements ou stockage de quelques heures).

A l'horizon 2035, il convient de noter que la contraction de la consommation, notamment sur les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, informatique, audiovisuel, électroménager, cuisson...) se traduit par une baisse globale des puissances appelées. La consommation de certains usages se réduit alors que de nouveaux usages apparaissent, avec en corollaire un profil journalier qui évolue. **Ainsi, l'amélioration de l'efficacité de l'éclairage, usage très présent à la pointe journalière en hiver, tend à réduire l'écart entre le plateau du matin et la pointe du soir à horizon 2035⁷⁵.** La maîtrise de la pointe journalière n'est donc *a priori* pas un problème fondamental pour le réseau électrique.

S'agissant de la pointe saisonnière, isoler les bâtiments contribue à la réduire, tandis qu'électrifier les systèmes de chauffage contribue à l'augmenter. La résultante des deux étant ce qui impacte la pointe saisonnière, les systèmes les moins efficaces doivent être installés sur les bâtiments ayant une enveloppe performante. En outre, afin de maîtriser l'effet du chauffage électrique sur la pointe saisonnière, des systèmes de stockage pouvant contribuer à la régulation de l'équilibre offre-demande à l'échelle saisonnière pourront être envisagés.

Enfin, s'agissant de la superposition de ces deux phénomènes, appelée « l'extrême pointe », les efforts d'efficacité énergétique (dans les bâtiments neufs avec la RT2012 et dans les bâtiments existants) et de maîtrise de la consommation ainsi que l'amélioration des performances des usages et appareils électriques mis en œuvre depuis les années 2010 (dans notre cas, l'augmentation notamment des COP) ont permis de maîtriser la croissance des appels de puissances et de les contenir sous la barre des 100 GW⁷⁶.

Un suivi régulier de l'évolution prospective de la pointe est porté par RTE afin de prendre en compte les évolutions d'hypothèses de consommation et de production d'électricité. Dans ce contexte, RTE et l'ADEME ont entrepris en 2019 une étude sur les politiques de rénovation du bâti et d'électrification des systèmes de chauffage et leurs conséquences pour le système électrique. Selon RTE, si elle s'accompagne de mesures d'efficacité énergétique

sur le bâti et les systèmes de chauffage, l'augmentation de la part du chauffage électrique ne pose pas de difficulté pour le respect du critère de sécurité d'approvisionnement. La pointe se situerait dans des ordres de grandeur similaires à ceux connus aujourd'hui. **Ses conclusions ont été annoncées pour la fin de l'année 2020 ou au premier trimestre 2021.**

Les déséquilibres entre l'offre et la demande d'électricité provoqués par les variations journalières de la consommation sont aujourd'hui majoritairement maîtrisés par un ajustement rapide de la production décarbonée des barrages hydrauliques. Par ailleurs, afin de satisfaire les hausses de consommation liées à la saisonnalité, l'ensemble des moyens de production adaptent leurs programmes de production afin de garantir une disponibilité optimale et un taux d'utilisation plus élevé durant l'hiver.

L'utilisation durant les périodes de froid de moyens de production utilisant des combustibles fossiles (gaz, charbon, fioul) conduit à une augmentation du contenu carbone moyen de l'électricité consommée en France lors de ces périodes⁷⁷. Cependant, malgré ces hausses, il convient de noter qu'en France le contenu carbone de l'électricité consommée tel qu'issu de la Base Carbone de l'ADEME est quel que soit l'usage inférieur à celui des énergies fossiles.

2. Les bâtiments électrifiés offrent des moyens supplémentaires d'actions sur la demande

Grâce au déploiement de certains équipements électriques, les bâtiments sont un important potentiel de flexibilité⁷⁸ nécessaire pour gérer à la fois les pointes de puissances (jusqu'à l'échelle journalière) et l'intégration massive des EnR. Ce thème de la flexibilité fait d'ailleurs l'objet de nombreux travaux en Europe et en France, comme par exemple la mise en place d'un indicateur d'intelligence (« Smart Readiness Indicator » issu de la directive européenne portant sur la performance énergétique des bâtiments) qui doit refléter la capacité des bâtiments à s'adapter aux besoins de l'utilisateur et du système énergétique.

Plusieurs leviers d'action sur la maîtrise et le pilotage de la consommation d'électricité permettent de dégager des marges à l'horizon 2022-2023⁷⁹, parmi lesquels :

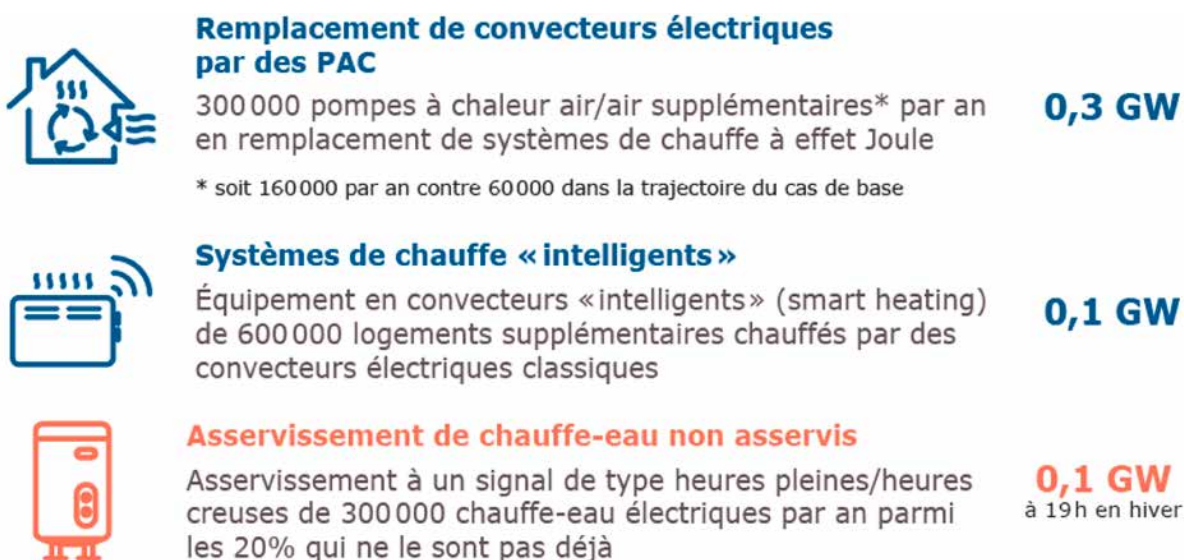


Figure 20 : Leviers d'action sur la demande et estimation de la puissance évitée en 2022-2023 (Source : RTE, BP 2019)

Le déploiement des PAC, spécifiquement en remplacement de vieux convecteurs électriques, constitue un important levier d'efficacité énergétique permettant de réduire la consommation et contribue à diminuer les appels de puissance lors de la pointe hivernale.

De plus, afin de limiter la sollicitation de moyens de production plus coûteux aux moments des pointes journalières de consommation, de nombreux dispositifs ont été mis en place. Ainsi, la tarification heures pleines/heures creuses permet de lisser la courbe de charge journalière en reportant une partie de la charge, notamment celle liée à la chauffe des ballons d'eau chaude sanitaire, durant les heures les moins chargées de la nuit. Ces derniers représentent un levier important de flexibilité pour le système électrique, en lui apportant aujourd'hui plus de 8 GW de puissance asservie au pilotage tarifaire⁸⁰, ce qui permet d'assurer une réduction de la consommation naturelle à la pointe de 3 GW⁸¹.

En complément de la flexibilité offerte par les systèmes d'ECS, plusieurs systèmes de chauffe intelligents peuvent être déployés sur les nouveaux radiateurs électriques⁸². Ceux-ci peuvent répondre à une consigne permettant d'anticiper la chauffe d'une pièce et soulager le réseau en période de pointe. Sous réserve d'un bâtiment suffisamment bien isolé et préalablement légèrement surchauffé, l'inertie du bâti est mise à profit pour baisser la consigne de chauffage d'un degré pendant la pointe avec une perte de confort minime. La multiplicité de ce type de pilotage pouvant amener à un effet d'échelle non négligeable.

Deuxième facette de la flexibilité en complément du pilotage de la demande, les effacements de consommation constituent aussi un moyen technique particulièrement adapté au traitement de la pointe journalière⁸³. Ainsi, début 2020 et pour la première fois en France, RTE a certifié un agrégateur d'effacement de consommation d'électricité chez les particuliers pour participer à l'équilibrage du système électrique en temps réel via le réglage primaire de la fréquence⁸⁴. En pilotant le chauffage électrique de plus de 10 000 logements l'opérateur peut moduler leur consommation d'électricité pour assurer l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité en quelques secondes, contribuer au réglage primaire de la fréquence et ainsi réduire le recours aux moyens de production carbonés. Ces effacements sont cependant limités à 20 minutes, voire 2 heures au grand maximum sur la base d'hypothèses optimistes quant à l'acceptation sociale, pour maintenir le confort de chauffage pour les occupants.

Combinées à toutes ces solutions, l'électricité photovoltaïque (PV) est une option intéressante pour modifier la demande d'énergie via la production locale d'électricité au sein du bâtiment, que ce soit pour combler les besoins domestiques ou dans une optique de revente au réseau.

Sans occulter **l'objectif prioritaire de réduction de la consommation d'électricité**, déployer des installations photovoltaïques sur tous les segments du bâtiment permet de faire face à plusieurs enjeux parmi lesquels :

- **Permettre aux acteurs de contribuer significativement à la transition énergétique** en facilitant le déploiement de solutions d'énergies renouvelables ;
- **Renforcer la sécurité énergétique de chaque poche de consommation**, qui est un enjeu de premier ordre pour les zones non interconnectées au réseau d'électricité continental comme par exemple les régions d'outre-mer ;
- **Optimiser les investissements dans le réseau grâce à une réduction des congestions locales** par une prise en compte de la flexibilité du bâtiment si des investissements sont réalisés dans des solutions de stockage ad-hoc.

De plus, les coûts de génération de l'énergie à partir d'électricité photovoltaïque ont chuté de 73 % depuis 2010⁸⁵. Cette baisse devrait continuer dans les années à venir avec une phase de maturité attendue à l'horizon 2030⁸⁶ liée à l'amélioration des rendements via l'émergence de cellules de troisième génération actuellement en phase de recherche de développement. Considérant les baisses de coûts de ces dernières années et la tendance sur les prochaines années, il devient de plus en plus rentable de déployer cette technologie. Le secteur tertiaire en particulier, comme les hôpitaux, bureaux et supermarchés, est particulièrement adapté à l'usage des panneaux PV du fait de la synchronisation des profils de consommation avec la production solaire, elle-même assez importante du fait de la surface en toiture ou en parking généralement disponible.

«le déploiement massif à venir de véhicules électriques équipés d'une batterie pourra offrir une solution de stockage intraday voire hebdomadaire supplémentaire au réseau via le pilotage de la recharge. »

Par ailleurs, lorsque des investissements ont également été réalisés dans des systèmes de stockage comme des batteries, l'utilisation intelligente de ces dernières facilite l'intégration des énergies renouvelables variables comme le photovoltaïque au mix énergétique français par le stockage de surplus d'énergie pour le restituer lors de périodes de plus faible production. Une application concrète apparaît dans le cadre de l'autoconsommation qui est optimisée par la diversification des usages dont l'usage de la batterie des véhicules électriques et la mutualisation à plusieurs bâtiments dans les opérations pilotes d'autoconsommation collective, la production étant générée par des panneaux photovoltaïques produisant uniquement en journée. **La diversification des usages ainsi que les dispositifs de stockage dont les batteries des véhicules**

électriques et les batteries associées aux panneaux photovoltaïques ou aux infrastructures de réseaux, peuvent donc contribuer à l'optimisation de l'utilisation de l'électricité photovoltaïque au niveau local.

En effet, **le déploiement massif à venir de véhicules électriques équipés d'une batterie pourra offrir une solution de stockage intraday voire hebdomadaire supplémentaire au réseau via le pilotage de la recharge.** RTE, dans son étude sur l'électromobilité publiée en mai 2019, considère que « dans le scénario Crescendo (variante médiane), l'écart entre un pilotage tarifaire simple de la recharge de la totalité des véhicules et une absence de pilotage est estimé à 6 GW à la pointe en 2035. Dans l'hypothèse théorique où le développement du véhicule-to-grid serait généralisé, ceci apporterait des marges supplémentaires très importantes (de l'ordre de 7 GW supplémentaires par rapport à un pilotage tarifaire simple) en 2035 »⁸⁷.

LES RECOMMANDATIONS

de la Commission Prospective et Innovation de l'UFE

La Commission Prospective et Innovation (CPI) de l'UFE propose 11 recommandations permettant d'accélérer le déploiement des solutions électriques performantes dans le bâtiment.

1

Favoriser l'installation de PAC ou PAC hybrides en rénovation, notamment en substitution des énergies fossiles. Pour cela, privilégier les PAC sur vecteur eau pour les bâtiments disposant d'une boucle d'eau chaude et les PAC sur vecteur air pour ceux qui n'en disposent pas.

2

Développer les solutions de PAC et PAC hybrides dans les logements collectifs neufs.

3

Favoriser les équipements de chauffage et d'eau-chaude sanitaire pilotables.

4

Développer les solutions de VMC double-flux thermodynamiques.

5

Favoriser les dispositifs permettant de garantir un confort d'été et d'hiver.

6

Favoriser le développement des solutions de gestion active de la consommation d'énergie, notamment des équipements de chauffage et d'ECS.

7

Encourager davantage les solutions thermodynamiques existantes dans le cadre des rénovations de logements collectifs.

8

Remplacer les convecteurs électriques par des PAC Air/Air, uniquement en rénovation là où il n'y a pas de solution raisonnable avec des systèmes thermodynamiques sur eau ou solaires.

9

Adapter l'ensemble des dispositifs financiers et réglementaires aux recommandations faites aux points ci-dessus.

10

Sensibiliser la population par une communication grand public sur les technologies performantes (par exemple point d'information énergie de l'ADEME, campagne FAIRE)

11

Valoriser les filières industrielles françaises et européennes existantes pour développer les recommandations figurant ci-dessus, en s'assurant de leur compétitivité dans la durée.

Lexique

CESI : Chauffe-Eau Solaire Individuel

CET : Chauffe-Eau Thermodynamique

COP : Coefficient de Performance

ECS : Eau-chaude sanitaire

Energie primaire : énergie contenue dans les ressources tirées de la nature (par exemple du pétrole, de l'uranium, du bois, du soleil, etc..) avant leur exploitation et leur acheminement

Energie finale : énergie livrée au consommateur avant son utilisation (par exemple, l'électricité livrée au point de livraison d'un consommateur), en ayant déduit les pertes liées à l'acheminement de l'énergie. Du point de vue du consommateur, c'est cette énergie qui fait l'objet d'un comptage et d'une facturation.

EnR&R : Énergies Renouvelables et de Récupération

GES : Gaz à effet de serre

kWh PCI : le bilan énergétique de la France distingue « le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS), qui désigne le dégagement maximal théorique de chaleur lors d'une combustion, y compris la chaleur de condensation de la vapeur d'eau, au Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), qui exclut cette chaleur de condensation ». Le PCI d'une combustion donnée sera en conséquence toujours inférieur au PCS (pour le fioul, le facteur de conversion entre le PCI et le PCS est de 1,07 tandis qu'il est de 1,11 pour le bois et le gaz).

LTECV : Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte

PAC : Pompe à chaleur

PPE : Programmation Pluriannuelle de l'Énergie

RE2020 : Réglementation Environnementale 2020

RT2012 : Réglementation Thermique 2012

SCOP : Coefficient de Performance Saisonnier

SDDR : Schéma Décennal de Développement du Réseau

SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone

SSC : Système Solaire Combiné

Références

1. ONPE, 2019
2. Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, modifiant notamment l'article L100-4 du code de l'énergie
3. MTES, CGDD, Bilan énergétique de la France pour 2018. Émissions de GES corrigées des variations climatiques.
4. MTES, Projet de Stratégie nationale bas-carbone, Projet pour consultation du public, Janvier 2020
5. MTES, Stratégie nationale bas-carbone (p 39), Mars 2020
6. Dans l'étude réalisée avec la filière électrique, l'UFE modélise une trajectoire optimisée de réductions des GES dans le bâtiment s'appuyant sur un ciblage performant des rénovations. Pour plus de détail : <https://ufe-electricite.fr/publications/etudes/>
7. MTES, Projet de Stratégie nationale bas-carbone, Projet pour consultation du public, Janvier 2020
8. Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d'actions de réduction de la consommation d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire (s'appliquant uniquement aux bâtiments de surface supérieure à 1 000 m²)
9. Vision d'Engie sur la décarbonation du secteur des bâtiments, Commission Prospective et Innovation de l'UFE, Septembre 2019
10. RTE, Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, Document de référence, 2017 (p 41)
11. ADEME, Chiffres-clés Climat Air et Énergie, 2018
12. Expérimentation E+C- en Ile-de-France et Centre-Val de Loire, « De la réglementation environnementale 2020 à une démarche de neutralité carbone 2050 », ADEME & CSTB, Mars 2019
13. Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, Synthèse, Avril 2020
14. « Il y aura bien un seuil carbone maximal dans la RE2020 », Batiactu, Janvier 2020
15. « RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique », communiqué de presse, MTES, Janvier 2020
16. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat, DGEC, Mars 2019
17. Eurelectric, « Decarbonisation Pathways », Mai 2018
18. IEA, World Energy Outlook 2019, Sustainable Development Scenario, Novembre 2019
19. Etude de la filière électrique « L'électricité au cœur du bâtiment performant, au service de l'utilisateur : une réponse aux enjeux énergétique, climatique et numérique », Décembre 2019
20. ADEME, « Se chauffer mieux et moins cher », Juin 2019
21. CEREN 2018
22. Extrait du « Livret QAI », UNICLIMA, Avril 2019
23. MTES, CGDD, Datalab, Bilan Énergétique de la France 2018, Janvier 2020
24. Stratégie Française pour l'énergie et le climat, PPE, Projet pour consultation, Janvier 2020
25. www.eurelectric.org
26. Eurelectric, « Decarbonisation Pathways », Mai 2018
27. European Heat Pump Association
28. European Commission, Heating and Cooling, Facts and figures
29. European Heat Pump Association
30. ADEME, « Guide pratique : installer une pompe à chaleur », Mai 2016
31. Promotelec Services
32. EDF
33. Le premier terme désigne l'origine du prélèvement, le second le mode de distribution de la chaleur dans le logement
34. Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, Version projet, Janvier 2020
35. Rapport Stratégie de Rénovation, Programme PACTE, Octobre 2017
36. En inversant le cycle du fluide frigorigène, la pompe à chaleur puise des calories dans le logement et les rejette à l'extérieur. Les PAC munies de ce dispositif sont dites « réversibles ». Elles assurent une baisse modérée de la température, de l'ordre de 3 à 4 °C de moins qu'à l'extérieur. Il s'agit donc d'une fonction de rafraîchissement et non de climatisation. ADEME, « Guide pratique : installer une pompe à chaleur », Mai 2016
37. EA21, CNRS, Météo France, CLIMSPACE, « Projet CLIM Climat urbain et climatisation », Novembre 2010
38. Calculs EDF
39. Eurovent Certita Certification
40. Promesse de l'Etat sur les énergies renouvelables, le Fonds Chaleur, géré par l'ADEME depuis 2009, participe au développement de la production renouvelable de chaleur. Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et aux entreprises.
41. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », Novembre 2016

42. EDF, « Pompe à chaleur hybride : un choix d'avenir pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire », Mai 2016
43. ADEME, « Guide pratique : installer une pompe à chaleur », Mai 2016
44. ADEME, « Guide pratique : installer une pompe à chaleur », Mai 2016
45. QuelleEnergie.fr by Effy
46. The Shift Project, « Livre Blanc : Rendre plus flexibles les consommations d'électricité dans le résidentiel », Mars 2015
47. ENEDIS, « Les flexibilités au service de la transition énergétique et de la performance du réseau de distribution », Octobre 2019
48. Le journal des énergies renouvelables N°243, 2018
49. Le journal des énergies renouvelables N°243, 2018
50. RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », Mars 2019
51. Trajectoire correspondant à une électrification soutenue et à d'importants efforts d'efficacité énergétique, en supposant une nouvelle réglementation thermique avantageant la solution électrique et un marché favorable. RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », Mars 2019
52. Le reste de la production d'ECS se partage entre le gaz de réseau (46 %), fuel (13 %) et d'autres combustibles (10 %).
53. RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité : La consommation du secteur tertiaire », Septembre 2019
54. ADEME, « Le chauffage et l'eau chaude solaires », Juin 2019
55. ADEME, « Se chauffer mieux et moins cher », Juin 2019
56. Label NF électricité performance 3 étoiles-œil
57. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », Novembre 2016
58. Pour plus d'informations, voir Lancey Energy Storage (www.lancey.fr)
59. RTE, Groupe de travail « Consommation d'électricité », Mars 2019
60. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », Novembre 2016
61. Extrait du « Livret QAI », UNICLIMA, Avril 2019
62. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », novembre 2016
63. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », novembre 2016
64. UFE, « Transition énergétique : les clés pour financer l'évolution de la demande en France », novembre 2016
65. FFIE, « Projet de décret BACS et SRC : de quoi parle-t-on ? », Janvier 2020
66. ADEME, « Se chauffer mieux et moins cher », Juin 2019
67. Programmation Pluriannuelle de l'Énergie, Version projet, Janvier 2020
68. RTE, SDDR Document de référence, 2019
69. RTE, SDDR Document de référence, 2019
70. RTE, Bilan Prévisionnel 2019, Rapport technique
71. Dans l'étude réalisée avec la filière électrique, l'UFE modélise une trajectoire optimisée de réductions des GES dans le bâtiment s'appuyant sur un ciblage performant des rénovations. Pour plus de détail : <https://ufe-electricite.fr/publications/etudes/>
72. Les branches du bâti font référence à la nomenclature du CEREN. Les branches hors bâti comprennent entre autres : data centers, éclairage public, télécommunications...
73. RTE, Bilan Prévisionnel 2016, page 45
74. RTE, Bilan Prévisionnel 2012, p38
75. RTE, Bilan prévisionnel 2019, Principaux résultats
76. RTE, Bila Prévisionnel 2017, Document de référence
77. RTE, Bilan prévisionnel 2019, Principaux résultats
78. The Shift Project, « Livre Blanc : Rendre plus flexibles les consommations d'électricité dans le résidentiel », Mars 2015
79. RTE, Bilan Prévisionnel 2019, Principaux résultats
80. RTE, Bilan Prévisionnel 2016
81. « Le stockage de l'électricité : un défi pour la transition énergétique » (p51), EDF R&D, Lavoisier 2017
82. Groupe Atlantic, Mars 2019
83. RTE, Bilan Prévisionnel 2019, Principaux résultats
84. Communiqué de presse de RTE du 3 mars 2020
85. Statistiques de l'IRENA, 2018
86. Energie photovoltaïque en France, Sia Partners, Novembre 2017
87. RTE, Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, Mai 2019

Le présent rapport a été rédigé grâce à l'expertise des membres de la Commission Prospective et Innovation de l'UFE ainsi que sur la base des auditions des entreprises suivantes :

