



HAL
open science

Pompe à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur

Mindjid Maïzia

► **To cite this version:**

Mindjid Maïzia. Pompe à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur. Les Cahiers du CLIP, 2007, 18, pp.1-47. halshs-00133556

HAL Id: halshs-00133556

<https://shs.hal.science/halshs-00133556v1>

Submitted on 16 Mar 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



LES CAHIERS DU CLUB D'INGÉNIERIE PROSPECTIVE ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

CLIP

NUMÉRO 18 JANVIER 2007

Pompes à chaleur et habitat

PROSPECTIVE DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE
ET DES EMISSIONS DE CO2 DANS L'HABITAT :
LES GISEMENTS OFFERTS PAR LES POMPES A
CHALEUR

Edition



Institut du développement durable et des relations internationales

Les pompes à chaleur

Liste des membres :

ADEME :
Agence de l'Environnement et
de la Maîtrise de l'Energie

BRGM :
Bureau de Recherches
Géologiques et Minières

CIRAD :
Centre de Coopération Internationale
en Recherche Agronomique pour le
Développement

CNRS :
Centre National de la
Recherche Scientifique

CSTB :
Centre Scientifique et
Technique du Bâtiment

CITEPA :
Centre Interprofessionnel
Technique d'Etudes
de la Pollution Atmosphérique

CEA :
Commissariat à l'Energie Atomique

EDF :
Electricité de France

GDF :
Gaz de France

GIE R.E. PSA RENAULT

IFP :
Institut Français du Pétrole

INERIS :
Institut National de l'Environnement
Industriel et des Risques

INRA :
Institut National de la
Recherche Agronomique

INRETS :
Institut National de la Recherche sur
les Transports et leur Sécurité

ONF :
Office National des Forêts

SNCF :
Société Nationale des Chemins
de Fer Français

SNET :
Société Nationale d'Electricité et de
Thermique

Des responsables des ministères
chargés de l'Environnement, de
l'Industrie, de la Recherche, du Plan
et du Logement font partie du Comité
de Coordination et d'Orientation
Scientifique

PROSPECTIVE DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET DES EMISSIONS DE CO2 DANS L'HABITAT : LES GISEMENTS OFFERTS PAR LES POMPES A CHALEUR

Auteur : Mincjid MAIZIA

Université de Technologie de Compiègne, Département Génie des Systèmes Urbains
Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines, AUS UMR 7136, Champs sur Marne

Avec la participation de :

Stève Macraigne et Jean-Pierre Trainel (Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines, AUS UMR 7136),
Marie-Hélène Laurent et Bernard Horber (EDF R&D)

Partenaires de l'étude : ADEME, DGUHC, EDF R&D

Synthèse

Introduction

La technologie des pompes à chaleur

Le principe de fonctionnement des pompes à chaleur
Les diverses technologies de PAC
Les parts de marché des PAC en Europe et en France

Les pompes à chaleur dans les bâtiments du tertiaire

Le parc résidentiel à l'horizon 2050

L'état du parc résidentiel en 1999
La surface moyenne des logements
La demande de logements neufs et la dynamique du parc
La demande de logement aux horizons 2030 et 2050

Les consommations énergétiques dans le logement

L'état des consommations en 2000
Le modèle prospectif portant sur la réduction des consommations du parc de logements
Les consommations énergétiques à l'horizon 2050 selon trois scénarios de référence

Les scénarios avec pénétration des pompes à chaleur

Les gisements d'économie d'énergie de chauffage induits par les PAC pour chaque
type de logement dans le parc existant
La prise en compte de la configuration du bâti dans les scénarios technologiques
La détermination d'une typologie de logements intégrant la morphologie des tissus urbains
Les scénarios dynamiques
La contribution des PAC dans les scénarios facteur 4

Conclusion

Bibliographie

Notes

4
7
9
9
11
15
17
19
20
20
21
22
24
24
25
27
31
31
32
36
39
41
43
45
46

Numéros précédents des Cahiers du CLIP

48

L'iddri assure l'animation du CLIP
et l'édition des Cahiers du CLIP



Directeur de publication : Michel COLOMBIER
Rédaction : Carine BARBIER
Maquette : Ivan PHARABOD

Editorial

A ce jour, l'enjeu d'économiser rigoureusement l'énergie consommée par le secteur du bâtiment (responsable de 43 % des consommations en énergie finale en 2004) n'est plus discuté. Ce secteur, notamment le logement, a fait preuve depuis la première crise pétrolière d'une certaine exemplarité à ce sujet. Depuis le début des années 1970, la réglementation thermique a favorisé la réalisation de logements neufs de plus en plus performants en s'appuyant sur une filière capable, en développant une industrie viable, d'absorber les innovations qui devenaient alors indispensables (en particulier par l'isolation de l'enveloppe des bâtiments). Elle a notamment démontré que la maîtrise des consommations de chauffage pouvait être le moteur d'une activité économique nouvelle.

Mais on sait aujourd'hui que cela ne suffira pas. La croissance démographique, l'héritage du bâti ancien, la démocratisation et la progression du confort, pèsent encore lourd et continuent à aggraver la facture énergétique qui est et qui sera acquittée à tous les niveaux, du ménage à l'ensemble de la collectivité. Sur la base des technologies actuelles ou disponibles dans un proche avenir, les gisements mobilisables, dont certains ont déjà été étudiés par le CLIP, sont nombreux : ils concernent principalement l'intensification des niveaux d'isolation de l'enveloppe du bâti ancien afin de réduire les besoins de chauffage de ce dernier, l'amélioration des équipements de génération, de distribution et d'émission de la chaleur, et la substitution des appareils de chauffage actuels par des technologies nouvelles dont les parts de marché sont à ce jour faibles mais dont l'efficacité énergétique est bien meilleure.

La multiplicité de ces leviers doit permettre d'atteindre des cibles ambitieuses d'économie d'énergie pour le poste du logement et, par conséquent, de ses émissions de gaz à effet de serre (GES). A travers l'étude de l'installation et de la substitution des équipements du parc de logements par les pompes à chaleur (PAC), on cherchera ici, à l'image de l'exercice déjà réalisé dans les cahiers du CLIP pour le solaire thermique ou la cogénération, à mesurer l'ampleur de l'économie d'énergie offerte par une technologie émergente. On explorera pour cela quelques évolutions possibles des consommations finales d'énergie et des émissions de GES en fonction de la pénétration des PAC sur le marché des équipements de chauffage. En d'autres termes, il s'agit de repérer les grandes masses d'économie rendues disponibles par cette technologie à l'horizon 2050, en tenant compte des contraintes que les formes de bâti peuvent imposer à la diffusion de cette filière.

La pénétration des PAC ne sera pas mise en concurrence avec d'autres leviers technologiques (solaires, etc.), hormis ceux relevant de l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments, qui constitue une action incontournable. L'objet de l'étude est bien de mesurer l'impact d'une pénétration massive des pompes à chaleur dans l'habitat, choix volontairement caricatural. A l'image de ce qui a été fait dans les cahiers précédents pour d'autres options technologiques, les scénarios qui seront présentés seront de ce fait des possibles « aux limites » encadrant d'autres possibles prenant en compte le mix technologique et énergétique qui se développera inéluctablement dans le futur et que le lecteur ne manquera d'intégrer par lui-même à ce qui sera dit ici.

Mindjid Maizia, UTC/LTMU

Michel Colombier, Directeur du CLIP

1 DGEMP - Observatoire de l'Energie 2005, p.16

2 Cahier du CLIP N° 13, mai 2001

3 Cahier du CLIP, N° 16, septembre 2004.

Synthèse

Le logement ancien représente le principal poste de consommation d'énergie, notamment de chauffage, dans le secteur de l'habitat. Face aux enjeux de réduction par quatre des émissions de gaz à effet de serre (GES), la contribution des logements neufs pourtant de plus en plus performants reste faible du fait du renouvellement lent du parc ancien. On considère généralement la réhabilitation de l'habitat ancien comme le principal levier qui permettrait de réduire la facture énergétique du secteur résidentiel et son impact en termes d'émissions. Mais cette option n'est pas toujours possible, tout au moins, pas toujours suffisante. L'amélioration des équipements de chauffage, ou leur substitution, peut participer substantiellement à cette économie : les technologies de pompe à chaleur (PAC) font partie de ces leviers supplémentaires.

Les PAC constituent une alternative en matière d'équipement encore marginale au regard des parts de marché des autres types de systèmes de chauffage, notamment du gaz de réseau, de l'électricité et du fioul. Mais la croissance de ce secteur est spectaculaire, surtout en France, où l'on est passé de quelques centaines de PAC vendues annuellement il y a dix ans à plus de 37 000 en 2005, principalement dans la maison individuelle neuve. Mais ce dernier segment n'est pas le seul à pouvoir profiter de ce nouvel intérêt. L'étude présentée ici cherche à mettre en évidence les divers gisements de maîtrise des consommations d'énergie et d'émissions de CO₂ que les PAC pourraient exploiter. Cette quantification tente de tenir compte le mieux possible des spécificités du parc de logement français dans sa constitution comme dans sa dynamique.

La structure du parc de logements français

À l'horizon de l'étude, la taille du parc s'accroîtra en nombre de logements (de 23,8 millions en 2000 à environ 32 millions en 2050) et en surface (de 2,1 à 2,8 milliards de m²) par la conjonction d'au moins deux facteurs : la dimi-

nution de la taille des ménages (de 2,4 à 2,1 en 2030) et l'augmentation de la surface habitable (la surface moyenne d'un logement passant de 90 à 100 m² en 2050). Malgré les sorties d'un nombre non négligeable de logements anciens à l'horizon 2050, l'héritage de la période actuelle pèse lourd avec près des deux tiers des logements non ou peu isolés. Les besoins de chauffage du parc actuel sont compris entre 270 et 240 kWh/m²/an dans les maisons individuelles et 110 et 170 kWh/m²/an dans les immeubles collectifs (pour un parc consommant en moyenne 185 kWh/m²/an). Les contraintes de la morphologie urbaine existante doivent être également prises en compte : une modélisation réalisée pour l'étude estime qu'une partie des logements anciens (les logements construits avant 1950) se caractérise par une contiguïté (une mitoyenneté) très forte (plus de 70% d'entre eux appartiennent à un tissu urbain de forme dense), en particulier dans les logements collectifs.

Les tendances lourdes des consommations de chauffage dans le logement

Selon les scénarios envisagés dans cette étude, si aucune action n'est mise en oeuvre sur le parc existant en 2000, les consommations dues au chauffage de l'habitat passeront de 385 à 443 TWh en 2050 et ce malgré l'amélioration des performances de l'enveloppe du bâti neuf dans la période. Les émissions de CO₂ se stabiliseront à environ 70 Mt CO₂ si l'on considère que les parts de marché dans le neuf, en termes d'équipements, resteront inchangées par rapport à aujourd'hui. Ce dernier, en moyenne, atteindra une consommation unitaire de 85 kWh/m²/an et contribuera à réduire la moyenne du parc de 185 à 150 kWh/m²/an. Si l'on tient compte de l'amélioration des rendements des équipements (rendement de génération, de distribution et d'émissions), la consommation totale du chauffage de l'habitat passera à 328 TWh en 2050 et les émissions à 50 Mt de CO₂.

Les gains potentiels de la réhabilitation

Il est tout à fait probable que des efforts importants de réhabilitation soient déjà entrepris d'ici là. Si l'on maintient le scénario sur le neuf sans amélioration des rendements des systèmes évoqués plus haut, tout en réhabilitant 100 000 à 300 000 logements datant d'avant 1975 par an (selon des efforts d'isolation plus ou moins élevés), alors la consommation unitaire moyenne du parc passera à environ 110 kWh/m²/an. Le total atteindra quant à lui 325 TWh soit une réduction d'un facteur de 1,18. Le facteur de réduction des émissions sera alors de l'ordre de 1,6 bien loin du facteur 4.

Les solutions PAC par type de logements et de tissus urbains

L'exploitation des gisements offerts par la substitution des équipements est donc indispensable. Les gisements physiques, en ce qui concerne les PAC, dépendent fortement d'au moins deux éléments : d'une part, le type d'équipement qu'il convient de remplacer, d'autre part le type de tissu urbain auquel appartient le bâti. Les hypothèses retenues dans l'étude permettent d'identifier des gisements d'installation de PAC non négligeables : 8,2 millions de maisons individuelles pourraient être équipées de PAC à capteurs horizontaux, les 5,4 millions restantes pouvant potentiellement être équipées d'un système à capteur vertical ou d'un mini-réseau, 2 millions de logements collectifs peuvent disposer d'un système vertical et 2,4 millions d'un dispositif horizontal.

Le gain potentiel des PAC

L'étude démontre qu'un équipement en PAC de la totalité des logements neufs ne serait pas suffisant. En 2050, les gains en consommation s'annuleraient alors que les émissions ne gagneraient que 20% par rapport à 2000. Une couverture supplémentaire du logement ancien datant d'avant 1975 permettrait d'atteindre un facteur 1,9 pour les consommations et 2,3 pour les émissions. Une couverture totale du parc permettrait quant à elle de réduire d'un facteur de 3 les consommations (afin d'atteindre 130 TWh) et de 3,6 les émissions.

Couplée à une réhabilitation totale du parc, le facteur 4 serait bien évidemment atteint et même largement dépassé.

Néanmoins, il faut noter que ces scénarios, qui exagèrent volontairement la pénétration des PAC à l'horizon 2050, négligent, en exprimant ses résultats en énergie finale, le problème inhérent au risque d'augmentation du contenu CO₂ du kWh électrique. Par une augmentation de la part de marché de l'électrique, et d'autant plus par sa généralisation, l'appel de charge pourrait contribuer à dépasser substantiellement les 180 g/kWh adoptés dans cette étude. Ce risque pourrait, dans une certaine mesure, être amoindri par l'accroissement prévisible des COP (rendement des PAC), par le développement de technologie usant d'autres combustibles (notamment le gaz) et par une politique de production de l'électricité favorable aux ENR.

Introduction

Le taux de croissance depuis dix ans du marché des pompes à chaleur en Europe est spectaculaire : les ventes de pompes à chaleur (hors split) ont été multipliées par six sur cette période, atteignant près de 140000 unités vendues en 2004. Le marché le plus important se trouve en Suède avec environ 50000 unités vendues cette même année et l'équipement de près de 95% des constructions neuves par cette technologie. En Suisse, près de 50% des maisons individuelles neuves sont équipées de pompes à chaleur. La vente de ces équipements en France serait de l'ordre de 24000 unités en 2005, dont 60% de systèmes air/air ou air/eau ayant des performances plutôt médiocres. L'introduction du crédit d'impôt pour l'installation de PAC et la hausse du prix des énergies ont conduit à une extension du marché des PAC aux logements existants.

Au regard de ce dynamisme du marché des pompes à chaleur, que penser d'un développement significatif à long terme de cette technologie et de ses effets sur la consommation finale du secteur résidentiel en France, sur sa structure en terme de mix énergétique et sur ses émissions de CO₂ ?

Selon une méthodologie similaire aux précédentes études réalisées dans le cadre du CLIP sur le solaire thermique ou la cogénération de faible puissance notamment, cette étude se propose d'évaluer l'impact sur les consommations d'énergie et les émissions de gaz carbonique d'une pénétration massive des différentes technologies de pompes à chaleur (PAC) dans le parc français de logements neufs et existants à un horizon 2050.

A l'instar des études précédentes sur l'habitat, la première étape est de décrire le plus finement possible au regard des besoins de l'étude l'état du parc actuel et d'établir des scénarios de référence auxquels seront comparés des scénarios de pénétration de pompes à chaleur. Les scénarios de référence décrivent l'évolution du parc existant et les caractéristiques du parc nouvellement construit à l'horizon 2050, en terme notamment de surface (troisième partie) et de consommation énergétique selon différentes hypothèses de réhabilitation du parc existant et d'évolution des rendements des équipements (quatrième partie). Les facteurs principaux de l'augmentation du parc de logements (en nombre et en surface totale) sont la diminution régulière du nombre de personnes par ménage et l'augmentation de la surface moyenne habitable par logement, selon les tendances enregistrées dans les décennies précédentes.

L'installation des technologies PAC impliquant la mise en place de différents systèmes de capteurs, nous avons été amenés à intégrer trois dimensions dans l'analyse du parc de logement : le type de logement (individuel ou collectif) comme nous l'avons fait dans les études précédentes, mais aussi la morphologie urbaine (logements contigus ou non, indiquant la possibilité d'avoir recours à des capteurs horizontaux ou verticaux) et la présence d'aquifères permettant d'installer des systèmes eau/eau. Cela nous a permis d'évaluer l'importance du parc pouvant faire l'objet d'installations de pompes à chaleur et d'écarter les segments de parc pour lesquelles les contraintes techniques sont trop importantes, mais également choisir selon les segments du parc les technologies PAC les mieux adaptées en retenant à chaque fois la performance énergétique la meilleure.

Les scénarios de pénétration des pompes à chaleur permettent d'évaluer ensuite l'impact sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ de l'équipement par ces technologies du parc neuf (2000-2050), d'une couverture supplémentaire du parc construit avant 1975, et enfin de l'équipement de la totalité du parc de logements. Ces scénarios se placent dans un contexte de réhabilitation limitée du parc ancien, au fil de l'eau. Enfin, un scénario, dit « Facteur 4 », combine pénétration de pompes à chaleur et réhabilitation du bâti de façon renforcée, dans la perspective de réduire les émissions de CO₂ du secteur résidentiel de 80% en 2050.

L'étude a donc pour but de renseigner les lecteurs sur la propension qu'ont ces différents leviers à réduire les consommations finales de chauffage. Précisons que dans tout le document, nous entendons par consommations les consommations finales sans traiter du problème des consommations primaires, celles-ci relevant en amont des politiques des modes de production de l'énergie, notam-

ment en ce qui concerne l'électricité. Le facteur d'émission utilisé pour évaluer les émissions de CO₂ liées à la consommation d'électricité est celui retenu pour le chauffage électrique d'après l'accord-cadre Ademe-EDF.

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre acteurs très divers : un travail de modélisation du parc de logement et de ses consommations réalisée par le LTMU (Jean-Pierre Traisnel, Siève Macraigne et Mindjid Maizia), puis une articulation aux travaux de Energies Demain (Nicolas Houdant et Damien Joliton) et d'EDF R&D (Marie-Hélène Laurent et Bernard Horber). Le comité de pilotage était composé de l'Agence de l'Environnement et de maîtrise de l'énergie (Philippe Laplaige), de la Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction du Ministère de l'équipement (Sylvie Caffiaux), tous deux financeurs directs de ce travail, de l'Institut du développement durable et des relations internationales (Carine Barbier), du BRGM (Alain Desplan). Ce travail doit beaucoup également à la participation du département Génie des systèmes urbains de l'Université de Technologie de Compiègne, notamment de Camille Aude, Emmanuel Fernandez, Jérémie Gaudin, Olivier Jung, Delphine Klerch, Maxime Oung et Anne Saunier.

La technologie des pompes à chaleur

Le principe de fonctionnement des pompes à chaleur

Il ne s'agit pas ici de décrire dans le détail les technologies convoquées dans les différents types de pompe à chaleur qui composent le marché, mais de rappeler uniquement leur principe de fonctionnement. Ce dernier est relativement simple : une pompe à chaleur est une machine thermodynamique qui parvient, lorsqu'on lui fournit un certain travail (en d'autres termes une énergie pour la faire fonctionner comme de l'électricité ou de la chaleur), à prélever de l'énergie à une source froide extérieure (comme celle contenue dans l'air, dans le sol ou dans l'eau) pour la céder à une source chaude (une pièce intérieure via ses émetteurs de chaleur comme un radiateur). A l'inverse, une pompe à chaleur peut puiser l'énergie contenue dans l'air d'un local qu'il faudrait refroidir pour le transmettre à la source extérieure : on parle, lorsque c'est la même machine qui assure le chauffage et le refroidissement, d'un groupe ou d'une pompe à chaleur réversible.

Une PAC est généralement composée de quatre organes techniques (Figure 1) :

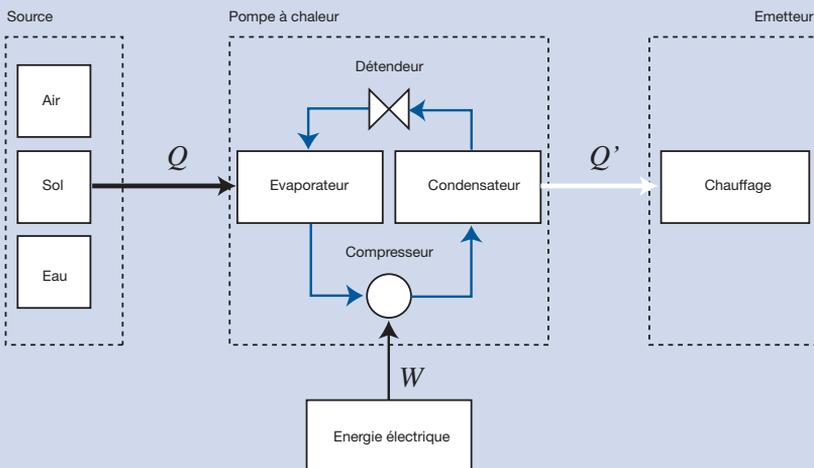
Un évaporateur : la source froide, en perdant une part de sa chaleur, cède une certaine quantité d'énergie à un fluide frigorigène (généralement des fluides de la famille des hydrofluorocarbones) lequel, par ce contact, s'évapore (car ce fluide a la propriété de s'évaporer à « basse » température dans certaines conditions de pression que le système arrive à réunir).

Un compresseur : par l'intermédiaire d'une canalisation, le fluide caloporteur est transporté sous forme de vapeur afin d'être comprimé par un compresseur, ce dernier processus conduisant à remonter le niveau de pression du fluide de façon à le mettre en capacité de condenser à la température de la pièce (supposée élevée).

Un condenseur : un condenseur capte cette chaleur pour la transmettre à l'air ambiant (ou l'eau pour les PAC à émetteurs à eau ou pour la production d'eau chaude sanitaire).

Un détendeur : le fluide caloporteur condensé par cet échange et par conséquent liquéfié est détendu pour revenir à l'évaporateur. Le cycle se poursuit indéfiniment selon les besoins de chauffage.

Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur



Source : LTMU-UTC

Les sources froides usuellement exploitées à l'aide de « capteurs » sont de trois types :

- L'air : il est soit extérieur soit extrait de l'intérieur d'un bâtiment
- L'eau : elle peut être souterraine (provenir des nappes phréatiques) ou de surface (lac, rivière, eaux usées, etc.).
- Le sol : il représente plus précisément le sous-sol de surface (un peu plus d'un mètre) ou le sous-sol profond (jusqu'à 50 ou 150 m).

Les sources chaudes sont alimentées par des émetteurs qui déterminent le mode de transmission de la chaleur à l'intérieur du bâtiment. La transmission peut se faire directement par air grâce au soufflage d'un air chaud (convection), ou par le transport dans un circuit d'eau ou d'un fluide caloporteur, la transmission de chaleur se faisant par des émetteurs classiques (plancher chauffant à eau, radiateurs à eau, rayonnement et conduction sont alors majoritaires dans le mode de transmission de la chaleur) ou des émetteurs de type ventilo-convecteur pour lesquels la chaleur apportée par le circuit caloporteur est transmise à la pièce via un ventilateur par convection forcée.

Les diverses technologies de PAC résultent donc du mode de couplage de la source froide et de la source chaude. On parle alors de :

- PAC air/air, air/eau, eau/eau, sol/eau (les deux dernières étant souvent qualifiées de géothermales). Les dénominations les plus courantes sont :
 - pompe à chaleur air extérieur/air soufflé
 - pompe à chaleur air extérieur/eau de chauffage
 - pompe à chaleur air extrait/air soufflé (pour les PAC sur l'air sortant de la VMC)
 - pompe à chaleur air extrait/eau de chauffage (cas assez rare, sauf pour les bâtiments du tertiaire)
 - pompe à chaleur eau/air soufflé
 - pompe à chaleur eau/eau de chauffage
- Pour les pompes à chaleur sur sol, la classification est différente, on parle de :
 - pompe à chaleur sol/sol
 - pompe à chaleur eau glycolée/eau
 - pompe à chaleur sol/eau

L'avantage de tels systèmes est bien entendu qu'ils permettent d'exploiter une source froide « gratuite » en continu et, malgré la hauteur du coût d'investissement, de générer une diminution significative des coûts énergétiques de l'installation de chauffage (pour un même travail W fourni - consommation en kWh, la quantité de chaleur produite Q' - besoin de chauffage assuré - peut être 3 à 4 fois supérieure à celle obtenue pour un chauffage traditionnel).

Sous l'angle des performances en phase d'exploitation, on apprécie le plus souvent la résistance de la PAC aux agressions de la source froide, notamment en termes de corrosion. Cependant les principaux paramètres de performance sont ceux pesant sur l'efficacité calorifique de la pompe que l'on traduit quantitativement par le coefficient de performance théorique noté COP_{th} et que l'on définit par le différentiel de température entre les deux sources (soit $COP_{th} = T_{sc} / (T_{sc} - T_{sf})$, avec T_{sc} la température de la source chaude ou de consigne et T_{sf} la température de la source froide, toutes deux exprimées en °K). Cette relation indique que plus la différence de température entre la source chaude et la source froide sera faible, plus le coefficient de performance théorique sera élevé, et, forcément, plus la pompe à chaleur sera considérée comme efficace. La meilleure source froide sera donc celle qui atteindra la température la plus haute possible (bien que des limites puissent apparaître en fonction du fluide caloporteur employé).

Cependant, en se limitant à des caractéristiques de température, cette description des performances ne relève pas suffisamment de critères énergétiques, notamment en termes de besoins de chauffage. En effet, à l'image de l'exploitation de l'air extérieur, ce coefficient peut exprimer une efficacité satisfaisante en été (le différentiel entre la température de l'air extérieur et la température de consigne sera très faible) alors que les besoins de chauffage sont en cette saison nuls. Inversement, la valeur du COP théorique sera faible en

Tableau 1 : Exemples de COP machine pour quelques produits PAC disponibles sur le marché français

Constructeur	Pompe sur eau	Pompe sur sol	Pompe sur air (7°C)	Pompe sur air (-6°C)
Viessmann	5,52	4,4	3,63	2,64
France/géothermie	*	3,47	*	*
Delchi	3,84	*	2,99	2,28
Moyenne COP	4,68	3,935	3,31	2,46

COP : Coefficient de performance - * : pas de données disponibles.

Source : LTMU-UTC

hiver lorsque les besoins seront au plus haut. Une source froide dont la température épouse la température de consigne en toute saison peut donc être considérée comme la plus appropriée. Il est tout au moins souhaitable qu'elle soit la plus stable possible. Enfin, afin d'alimenter en continu la pompe à chaleur sans limiter ses capacités de production de chaleur, il est amplement recommandé que la source froide soit abondante. En somme, la meilleure source sera celle qui pourra être simultanément gratuite, accessible, peu corrosive, de température élevée, stable et abondante.

D'un point de vue énergétique, il est préférable de se focaliser sur les rendements effectifs des systèmes qui produisent la chaleur. On se base pour exprimer ces rendements sur le coefficient de performance de la machine (COP) en fonctionnement sur le terrain en rapportant la quantité de chaleur fournie à la source chaude à l'énergie absorbée par la machine et ses auxiliaires pendant leur fonctionnement ($COP = Q_{sc}/W$, avec Q_{sc} la quantité de chaleur fournie à la source chaude et W le travail fourni à la machine et au système).

Selon cette définition, le COP représente ce que l'on nomme usuellement le rendement de la machine ou le rendement de génération. Le COP complet du système inclut les modes de distribution (par les canalisations et selon le type de fluide utilisé) et d'émission de la chaleur dans le local. Ce dernier est forcément inférieur au COP machine puisqu'il induit une perte de chaleur par le système (distribution) et des consommations électriques des auxiliaires (notamment des ventilateurs des systèmes à air et des ventilo-convecteurs).

Les diverses technologies de PAC

La pompe sur eau

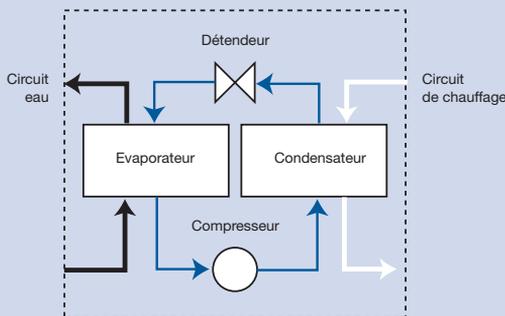
Pour ce type de pompe, ce sont les eaux des nappes phréatiques et de surfaces qui sont considérées comme la source dite froide si leur débit est suffisant et si la réglementation permet leur exploitation⁴ (ce qui est généralement le cas). Deux configurations sont alors possibles. Dans un premier cas, l'eau circule directement à travers l'évaporateur de la PAC où en cédant sa chaleur au fluide frigorigène, elle se refroidit. Elle est ensuite évacuée. Dans ce cas, l'eau conserve sa propreté (ses caractéristiques physico-chimiques). On parle alors de pompe sur eau à échange direct (Figure 2).

Dans la seconde configuration, lorsque l'acidité de l'eau induit un risque de dégradation de la PAC (problèmes de corrosion par exemple), le transfert de chaleur entre le fluide frigorigène et la source froide s'effectue par l'intermédiaire d'un échangeur. On dit que la PAC sur eau est à échange indirect (Figure 3).

La pompe sur sol

La pompe à chaleur géothermique, encore appelée géothermale ou géosolaire, est une pompe à chaleur sur capteurs enterrés. Ce chauffage thermodynamique consiste à prélever les calories du sous-sol pour les restituer dans le local que l'on cherche à chauffer (Figure 4). Aux profondeurs atteignables par les technologies de PAC géothermiques, l'énergie contenue dans le sous-sol provient essentiellement du rayonnement solaire et de la migration des eaux pluviales dans les couches géologiques.

Figure 2 : Pompe sur eau à échange direct



Source : LTMU-UTC

Pour puiser ces calories, plusieurs dispositifs sont disponibles sur le marché :

- les *capteurs horizontaux* : ce sont des tubes de polyéthylène (ou de cuivre gainés de polyéthylène) installés horizontalement en boucles enterrées à une faible profondeur (0,60 à 1,20 m). Dans ces boucles circule en circuit fermé de l'eau additionnée d'antigel (glycol) ou un fluide frigorigène utilisé par la pompe à chaleur. Deux types de PAC peuvent être couplés à ce type de dispositif : soit une pompe à chaleur sol/sol (procédé à détente directe où le fluide frigorigène circule dans les capteurs et dans un plancher chauffant), soit la pompe à chaleur sol/eau (le fluide frigorigène circule dans les capteurs et de l'eau dans les émetteurs de chauffage -Figure 5).

- les *capteurs verticaux* ou *sonde géothermique verticale* : deux tubes de polyéthylène formant un U installés dans un forage (jusqu'à 80 m) sont

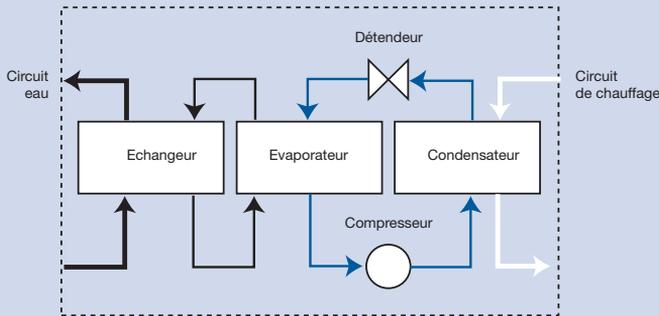
scellés dans ce dernier grâce à un mélange de bentonite et de ciment (afin d'assurer un bon contact thermique entre les tubes et la paroi du forage). Y circule en circuit fermé de l'eau additionnée de liquide antigel (Figure 6).

Les contraintes d'installation des PAC sol

Le sous-sol et l'exploitation des eaux souterraines sont soumis à une réglementation stricte. Tous les dispositifs doivent donc d'abord obéir à ces règles avant même d'examiner la possibilité proprement technique de les installer.

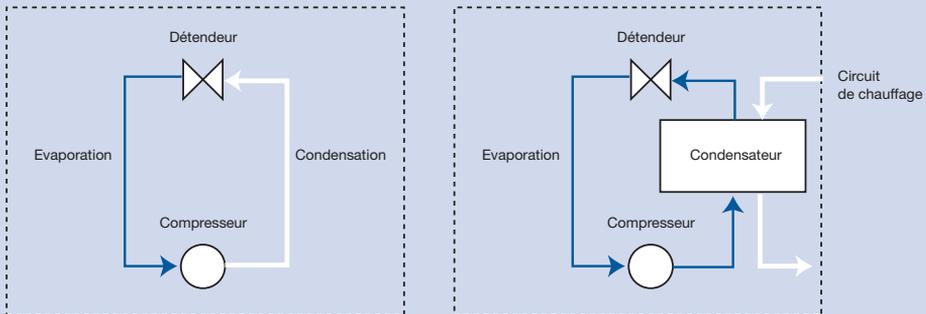
Disposer des capteurs horizontaux nécessite également et bien évidemment une certaine disponibilité foncière. D'un point de vue topographique, la dénivellée du terrain doit être la plus faible possible (sinon, des remblais sont envisageables même s'ils demeurent assez coûteux).

Figure 3 : Pompe sur eau à échange indirect



Source : LTMU-UTC

Figure 4 : Principe du fonctionnement d'une pompe à chaleur sol-sol (gauche) et sol-eau (droite)



Source : LTMU-UTC

Le bâtiment doit aussi posséder un terrain d'une superficie 1,5 à 2 fois (parfois plus selon certains produits commerciaux disponibles sur le marché) supérieure à la surface du plancher à chauffer (ce qui revient pour une maison pavillonnaire moyenne à plus de 200 m² de terrain).

En outre, la surface foncière supportant les serpentins doit de préférence être très ensoleillée, perméable (vu que l'énergie fournie à la pompe provient essentiellement du rayonnement solaire et de la migration des eaux pluviales dans le sous-sol) et composée de couches de sable et de gravier (le sable étant en effet favorable aux transferts d'énergie). Les serpentins doivent être distants d'au moins deux mètres d'un arbre, un mètre cinquante des réseaux hydrauliques et au moins de trois mètres des fondations, des puits, des fosses septiques ou des réseaux d'évacuation.

Ces contraintes présupposent donc que le sous-sol soit très peu encombré, que le terrain soit relativement vaste et que le bâtiment appartienne à un milieu assez ouvert (et donc potentiellement peu dense), et que l'on accepte de refaire sa pelouse, ou de ne planter que de la pelouse ! La solution de capteurs horizontaux est donc envisageable dans un tissu de type pavillonnaire et doit être considérée comme complètement exclue des milieux urbains, notamment anciens.

Dans le cas des capteurs verticaux, les principales contraintes sont liées à des caractéristiques géologiques bien plus complexes que celles vues pour les capteurs horizontaux. Elles présupposent donc une certaine expertise de la géologie en grande profondeur (jusqu'à une centaine de mètres) peu accessibles, dans leur coût, aux particuliers. En outre, les sondages à réaliser pour atteindre ces profondeurs demeurent actuellement plutôt coûteux, ce qui constitue un frein pour une pénétration de cette technique dans l'habitat individuel. Cette technologie est donc plus appropriée aux opérations mutualisées ou éventuellement pour des installations individuelles chez des particuliers disposant de revenus suffisants (des particuliers peuvent en installer toutefois dans des régions comme l'Alsace où le sol paraît connu et où des sociétés spécialisées proposent leur service). Allant chercher les sources dans des profondeurs lointaines, elle permet néanmoins de s'exonérer des contraintes de surface des tissus urbains (même si elle demeure très sensible au problème d'encombrement de leur sous-sol superficiel). Elle profite ainsi des propriétés des milieux denses qui facilitent la concentration de la production de la chaleur en minimisant la longueur des réseaux de distribution (ce que nous appelons la mutualisation). A ce titre, les dispositifs en capteurs

Figure 5 : Dispositif à capteurs horizontaux

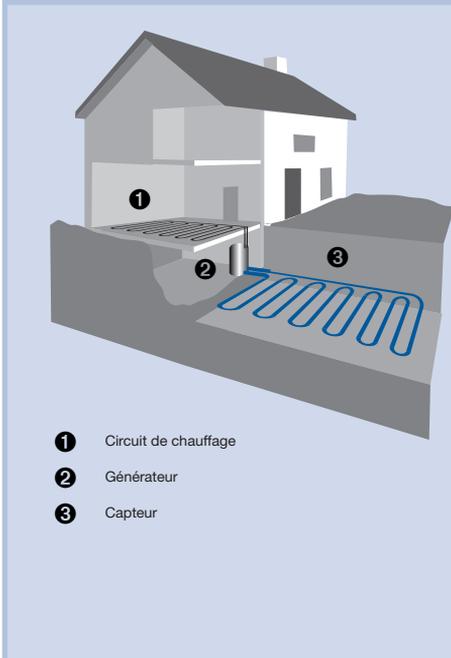
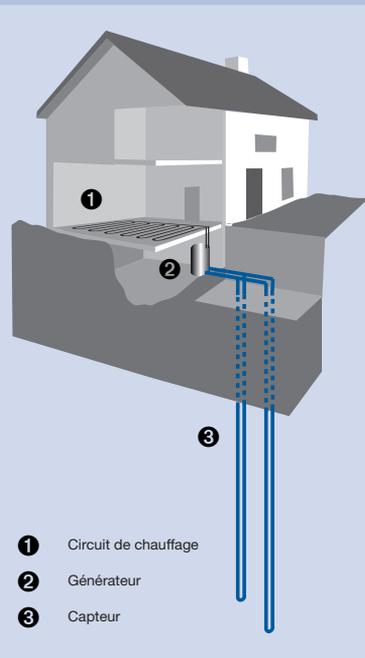


Figure 6 : Dispositif à capteurs verticaux



verticaux peuvent être protéiformes, s'adresser à des immeubles collectifs, à des mini-réseaux de distribution comme à des réseaux urbains plus vastes.

La pompe sur air

Hormis la source, les PAC air épousent le même principe de fonctionnement que celles vues plus haut. Les calories sont prélevées dans l'air -qui peut être extrait de l'intérieur du bâtiment (air extrait de la VMC) comme provenir de l'air extérieur-grâce à un évaporateur. L'air est acheminé vers ce dernier au moyen d'une gaine et d'un ventilateur puis évacué une fois sa chaleur captée (le cycle de la pompe demeure par la suite identique). Affranchie de contrainte réglementaire (mais pas des contraintes d'installation liées au bruit, et des

distances minimales à respecter par rapport aux voisins), la PAC air, même si elle paraît plus facile à mettre en œuvre, nécessite de répondre à plusieurs contraintes d'ordre technique. Cela est particulièrement le cas lorsque la source provient de l'air extrait à l'intérieur d'un bâtiment. En effet, la présence d'une ventilation mécanique contrôlée est nécessaire pour le fonctionnement d'une pompe à chaleur sur air extrait. Cette technologie n'est par conséquent applicable qu'aux bâtiments neufs disposant d'un tel équipement (plus particulièrement aux bureaux). Un autre inconvénient est le niveau sonore des systèmes qui peut être la source de nuisances sonores loin d'être négligeables. Cette anomalie est néanmoins de plus en plus reprise par des dispositifs de correction, notamment par des

Tableau 2 : Critères relevant des divers dispositifs disponibles pour les PAC

Pompe sur eau	Pompe sur sol		Pompe sur air
	capteurs horizontaux	capteurs verticaux	
Présence d'eau	dénivelé faible	sol rocheux	débit suffisant
Débit suffisant	importante surface disponible (1,5 à 4 fois la surface à chauffer)	coût du forage	nuisances sonores (puissance acoustique des pompes de l'ordre de 65-70 dB(A))
Non corrosive	perméabilité du sol	réalisation du forage	variation de température de la source froide
	exposition solaire		Rigueur du climat
	sol meuble		
	distance minimale au bâti (2m), pas de plantation		
Réglementation (autorisation)	réglementation (autorisation)	réglementation	

Source : LTMU-UTC

Tableau 3 : Synthèse comparative entre technologies PAC

	Eau ⁽¹⁾	Sol	Air
Abondance ou débit	**	***	**
Température constante	***	***	*
Accessibilité	**	*	***
Contrainte spatiale	***	*	***
Contrainte acoustique	***	***	*
COP	***	***	*
Contrainte réglementaire	*	*	***

* peu avantageux, ** moyennement avantageux, *** très avantageux

(1) Seulement si la ressource existe localement

Source : LTMU-UTC

Tableau 4 : Solutions PAC en fonction du type de logement et de tissu urbain

		Eau	Sol	Air
Tissu continu	résidentiel individuel	***	**	*
	résidentiel collectif	***	*	*
Tissu discontinu	résidentiel individuel	***	***	**
	résidentiel collectif	***	*	**

* peu avantageux, ** moyennement avantageux, *** très avantageux

Source : LTMU-UTC

amortisseurs de vibrations qui permettent d'atteindre des niveaux sonores très faibles. D'autres problèmes d'ordre technique peuvent limiter substantiellement l'usage des PAC sur l'air extérieur : les faibles rendements pour des températures d'air très faible, le givrage des capteurs lié à l'humidité de l'air extérieur, etc. L'ensemble de ces problèmes conduit à préconiser l'adoption de cette technologie en plaine (jusqu'à 600 ou 800 mètres d'altitude) dans des climats relativement tempérés et des saisons de chauffage de courte durée. Dans le cas contraire, il est à prévoir des systèmes de chauffage de compensation et/ou d'appoint.

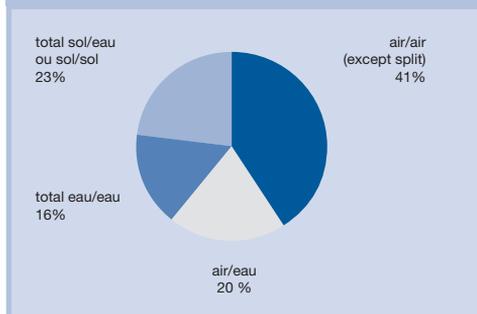
Les parts de marché des PAC en Europe et en France

Sur les dix dernières années, les taux de croissance de la filière sont spectaculaires même si cette pénétration dans le marché français, en part, demeure encore peu significative. En effet, on décrit généralement la progression des opérations employant la géothermie par le décuplement du nombre des installations en 5 ans, soit environ 800 logements par an chauffés principalement par des PAC à capteurs horizontaux en 1997 à 8000 en 2002⁵ et 9000 en 2003⁶ (contre seulement 1000 installations à capteurs verticaux sur l'ensemble de la période). D'après le Syndicat des énergies renouvelables⁷, le total des PAC installées hors système air/air représentait en 2002, 12400 unités. D'après le cabinet BATIM, les PAC air vendues en 2005 seraient de l'ordre de 24 000. Au total, l'ensemble des PAC représenterait près de 37 200 unités vendues en 2005.

Selon les sources, la géothermie représenterait à ce jour entre 5 et 10% du parc de logements neufs⁸. Après un certain relâchement des efforts en matière d'économie d'énergie induit par une relative faiblesse des prix des énergies fossiles dans les années 1980, les PAC (en particulier les PAC géothermiques) regagnent une nouvelle vigueur depuis la fin des années 1990, notamment grâce aux divers dispositifs fiscaux relatifs aux ENR (en particulier le crédit d'impôt pour les PAC de 40% en 2005 porté à 50 % dans la loi des Finances 2006). Malgré la diversité des sources, on peut dire qu'en France les PAC sont le plus souvent associées, dans l'image profane, au système air avec plus de 60 % des parts de marché (Figure 7).

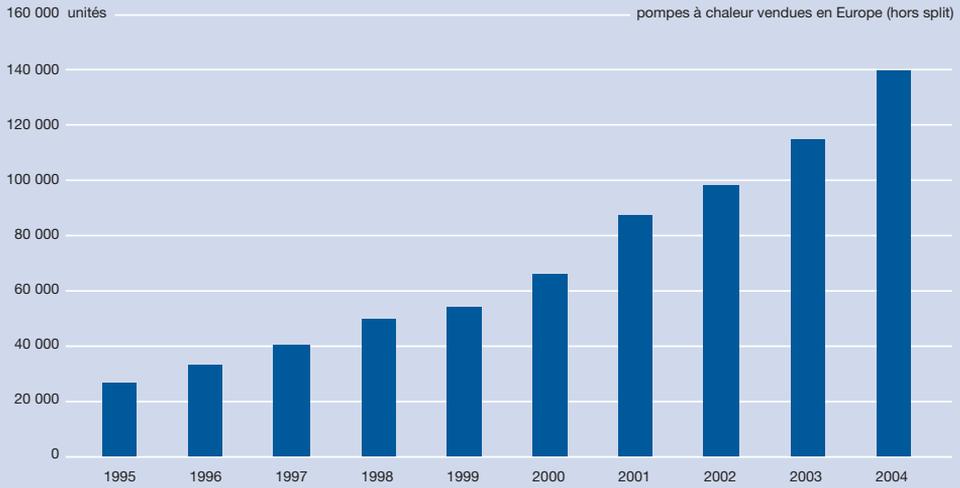
A l'échelle européenne (Figure 8), le marché s'est accru de 155 % en 25 ans (depuis 1980). La France se classe parmi les installateurs de PAC les plus médiocres en part relative dans le logement neuf même si en unités le nombre de PAC peut paraître assez élevé. La Suède, considérée comme le meilleur élève, disposerait des PAC dans près de 95% de ses constructions neuves¹⁰. Cette part représente près de 29 000 unités en capteurs verticaux par an. En Suisse, ce sont près de 50% des maisons individuelles neuves qui sont construites avec un équipement PAC (dont 40% sont des PAC sur capteurs verticaux et 60% des PAC sur air de type air/eau). Dans ce pays, près de 80 000 unités sont actuellement en service¹¹.

Figure 7 : Part de marché par type de PAC en 2003 pour la France



Sources : AFPAC, C.Ducruet/EHPA, European Heat Pump Network (via la note EDF HN-96/01/002), étude BATIM⁹

Figure 8 : Progression des ventes de PAC à l'échelle européenne



Sources : AFPAC, C.Ducruet/EHPA, European Heat Pump Network (via la note EDF HN-96/01/002), étude BATIM

Figure 9 : Evolution des ventes de PAC pour quatre pays



Sources : AFPAC, C.Ducruet/EHPA, European Heat Pump Network (via la note EDF HN-96/01/002), étude BATIM

Le parc résidentiel à l'horizon 2050

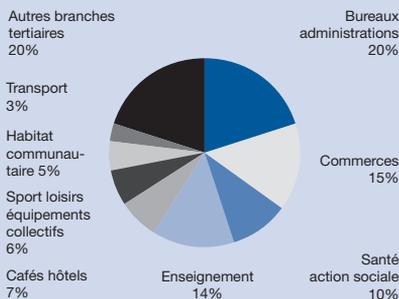
Quantifier les parts de marché des PAC dans les bâtiments du tertiaire constitue un exercice manifestement plus difficile (les données à ce sujet sont effectivement rares et extrêmement hétérogènes). Or, les gisements d'économie d'énergie de chauffage et de réduction des émissions de CO₂ y sont considérables (même s'ils ne sont pas comparables à ceux du parc résidentiel). En effet, en 2000¹², le tertiaire représentait à lui seul près de 14 % des consommations énergétiques finales et près du tiers de celles du bâtiment. Le chauffage et l'ECS de ce secteur occupaient près de 63 % de ces consommations (contre 21 % pour l'électricité spécifique)¹³. La répartition par branche d'activité montre en particulier une prédominance des bureaux (20 %), des commerces (15 %) et des établissements d'enseignement (14 %) (Figure 10). Les ordres de grandeurs les plus récents donnent une consommation totale des bureaux de 51 TWh/an pour un parc de 180 millions de mètres carré. Des 283 kWh/m²/an déduits des deux chiffres précédents, 162 sont consacrés au chauffage (ces masses se retrouvent pour l'ensemble du secteur tertiaire dont les consommations sont proches de 221 TWh pour plus de 800 millions de m² de surface).

Malgré une amélioration des performances du bâti tertiaire réduisant très sensiblement les consommations unitaires, l'augmentation de la surface du parc provoque une croissance des consommations de ce secteur de l'ordre de 13 % de 1986 à 2000.

Une réponse à cette croissance peut bien entendu être trouvée dans l'adoption des PAC pour le chauffage. L'installation systématique de cette technologie pourrait sans grande difficulté stabiliser les consommations et même les réduire substantiellement. Mais la quantification de cette réduction demeure un exercice extrêmement difficile étant donné la méconnaissance du parc physique du secteur tertiaire. C'est la raison pour laquelle, nous avons plutôt préféré présenter dans cette étude un exemple d'opération plutôt qu'une généralisation sur l'ensemble du secteur tertiaire.

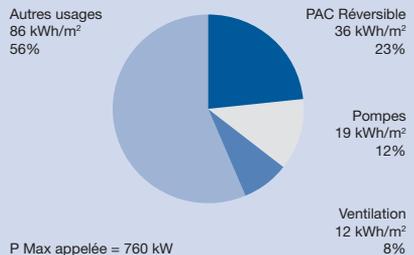
Cet exemple, mis en service en 1997 et suivi depuis, est issu d'une expérimentation menée par EDF R&D à Lyon pour la Caisse d'Allocations Familiales. Le bâtiment sélectionné, de 16 600 m², est assez représentatif en termes de performance de l'enveloppe, des bureaux du parc français (avec des coefficients $GI = 0,42 \text{ W/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ et

Figure 10 : Répartition des consommations d'énergie par branche d'activité dans le tertiaire



Source : Turki et al. (2002)

Figure 11 : Répartition des consommations de la Caisse d'allocations familiales de Lyon

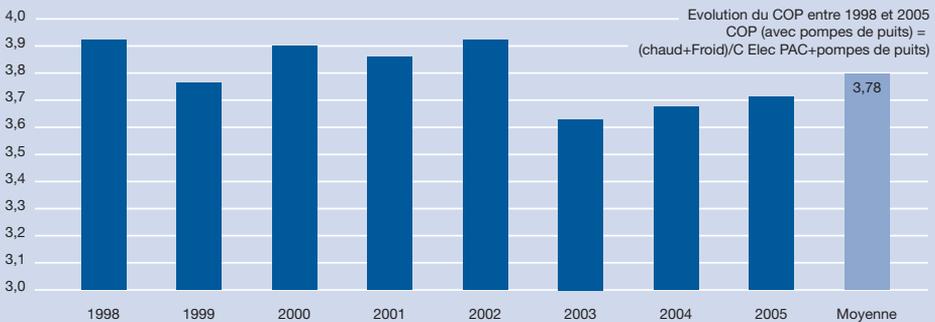


Source : J. Naveteur, EDF R&D, Résultats CAF de Lyon moyenne 1998-2005, 03/2006

$G1_{ref} = 0.54 \text{ W/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$). Y ont été installées des PAC réversibles (thermofrigopompes) répondant aux besoins de chaleur et de froid selon la saison (il faut noter que près de 35 % des surfaces du parc de bureaux sont aujourd'hui climatisées). Leur puissance atteint 600 kW (froid et chaud) ; combiné à tous les systèmes annexes favorisant leur fonctionnement, leur COP complet permet d'atteindre sur la période 1998-2005 des consommations unitaires moyennes de chauffage et de climatisation de 55 kWh/m²/an, soit bien moins de la moitié de la moyenne nationale vue plus haut (surtout si l'on tient compte de la climatisation). La répartition en usage permet de constater que le chauffage n'est plus le poste le plus consommateur et qu'il est rattrapé par les autres usages (ou usages spécifiques qui représentent alors près de 56 % des 2 500 MWh consommés annuellement) (Figure 11). Notons à ce propos, que ce sont les usages spécifiques qui sont aujourd'hui considérés comme les postes de consommation subissant les plus fortes croissances à l'échelle du parc avec une croissance voisine de 76 % entre 1986 et 2000. Les performances de cet exemple démontrent qu'il est assez aisé d'atteindre des rendements particulièrement élevés et d'approcher des COP complet en moyenne annuelle de l'ordre de 4

(dans ce cas le COP moyen est de 3,78 avec les auxiliaires et de 4,04 sans ces derniers). Le COP moyen varie peu d'une année à l'autre et se place dans tous les cas au delà des 3,5 (Figure 12). Comparé à des bâtiments existants non équipés de PAC mais contraints aux mêmes conditions climatiques et fonctionnelles (bâtiments annexes, servant d'étalonnage de l'exemple et dont la consommation totale est très légèrement inférieure à la moyenne nationale, soit 211 kWh/m²/an), le gain obtenu grâce au dispositif est, tous usages confondus, de l'ordre de 27 %, les usages « d'électricité spécifique » comptant comme poste incompressible, tout de moins du point de vue des PAC.

Figure 12 : Evolution du COP de la Caisse d'Allocations Familiales de Lyon



Source : J. Naveteur, EDF R&D, Résultats CAF de Lyon moyenne 1998-2005, 03/2006

Tableau 5 : Consommations de la CAF de Lyon

	Nouveau Bâtiment	Anciens Bâtiments	Ecart
Consommation pour le chauffage (Dju=2166)		98 kWh/m ²	-63%
Consommation pour le chauffage + climatisation (Dju=2166)	36 kWh/m ²		
Autres usages (y compris pompes et ventilation)	117 kWh/m ²	113 kWh/m ²	4%
Consommation totale	153 kWh/m ²	211 kWh/m ²	-27%

Source : J. Naveteur, EDF R&D, Résultats CAF de Lyon moyenne 1998-2005, 03/2006

Les PAC dans le logement

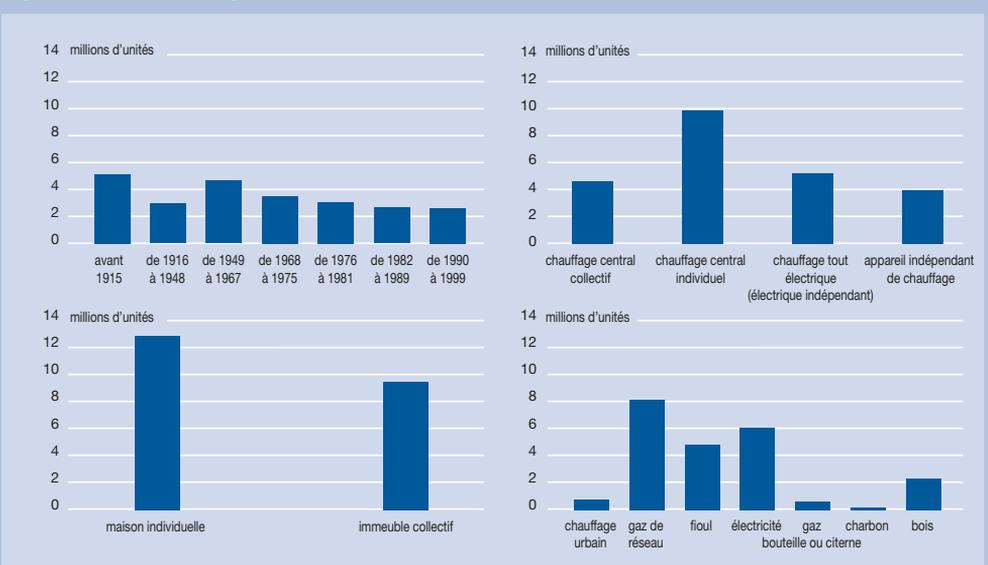
Pour le logement, quelles seraient les économies d'énergies engendrées par l'adoption d'une PAC dédiée au chauffage ? A combien sont estimés les gisements physiques et énergétiques si l'on généralisait la question à l'ensemble du parc du logement ?

En présentant les principes de fonctionnement des PAC, nous avons indirectement démontré que la réponse à ces questions dépendait avant tout de la typologie des bâtiments et des tissus urbains auxquels ces derniers appartiennent, l'économie effective à l'échelle d'un bâtiment étant quantifiée par la combinaison des besoins de chauffage et du COP complet de la pompe sélectionnée. Nous avons donc choisi, dans cette étude, de ne quantifier les gisements d'économies d'énergie (et de leur corollaire en matière d'émission de CO₂) qu'après avoir décrit le plus précisément possible le parc de logement en termes d'effectifs, en termes de consommation et d'émissions et, enfin, du point de vue des tissus urbains.

L'état du parc résidentiel en 1999

L'état du parc de logement en 1999¹⁴ est donné par la Figure 13. Abondamment décrit, nous invitons le lecteur à se référer aux études précédentes réalisées dans le cadre du CLIP et évoquées plus haut. Notons, pour rappel, qu'une première analyse du recensement général de la population en 1999 (RGP99) montre que le parc national et ses 24 millions de logements se composent de trois contingents approximativement égaux : un tiers de logements date d'avant-guerre, un tiers a été construit pendant la Reconstruction et un dernier tiers est postérieur à 1974 date de mise en place de la première réglementation thermique (RT). D'un point de vue macroscopique, on constate que le parc est dominé en 1999 par la maison individuelle (57% du parc). L'élan induit par la construction industrialisée des logements d'après-guerre inverse néanmoins cette proportion jusqu'à l'instauration de la première RT.

Figure 13 : Effectif des logements en 1999



Source : Traitement d'après INSEE - Recensement Général de la Population en 1999

En termes d'équipement, le parc se divise également en trois grandes parts. Un tiers des logements sont équipés de chauffage au gaz en réseau, un quart sont chauffés électriquement, le reste étant disputé par une grande diversité de type d'installation avec, toutefois, une prédominance du fioul. Le chauffage est principalement produit par un appareillage individuel, plus rarement par un chauffage collectif et à la marge par un réseau urbain. Ce constat s'explique notamment par la prédominance des maisons individuelles qui admettent, pour le moment, difficilement une production centralisée de l'énergie destinée au chauffage.

La surface moyenne des logements

L'évolution de ces surfaces a été appréhendée à partir des principaux déterminants repérés rétrospectivement. La croissance des surfaces habitables est en effet très sensible à au moins deux facteurs exogènes : à la typologie des logements (individuel ou collectif - Figure 14) et à l'âge des occupants.

La typologie des logements

L'augmentation rapide de la surface moyenne des logements constatée entre 1973 (72 m²) et 1999 (89 m²) est corrélée à celle de la surface habitable par personne (de 25 à 36 m²), augmentation due notamment à la part grandissante de la maison individuelle (Figure 15 et Figure 16). Si cette augmentation se poursuivait, la surface pourrait atteindre à l'horizon 2050 près de

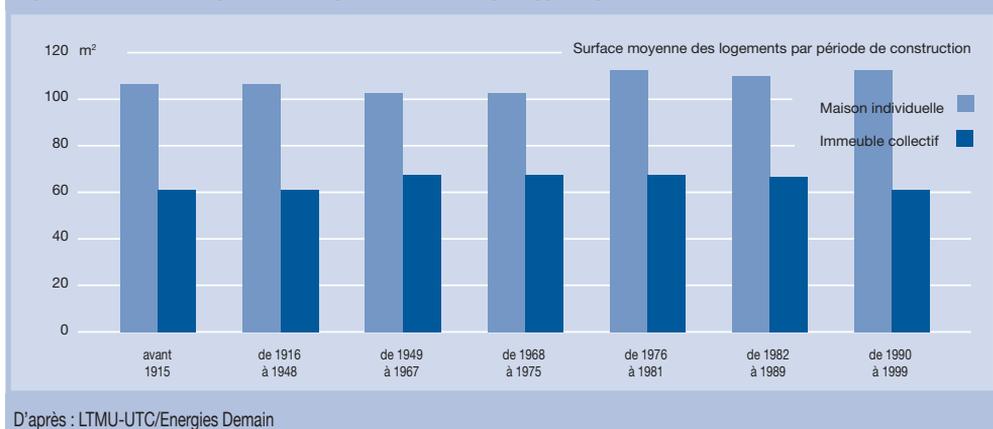
100 m². Elle serait alors renforcée par la conjonction de divers paramètres relatifs aux évolutions démographiques, notamment par la diminution de la taille du ménage (de 2,90 en 1973 à 2,45 en 1999, pour atteindre 2,1 à 2030 et peut-être beaucoup moins à 2050), par le vieillissement de la population et par la multiplication des déshabitations.

L'âge des occupants

Le vieillissement de la population, dans un parc relativement stable, peut se traduire par une augmentation de la surface habitable par personne. On constate en effet que le nombre de pièces dont dispose chaque ménage, et dont la surface proche de 22 m² est relativement constante dans le temps (Figure 17) dépend fortement de la classe d'âge à laquelle appartient les résidents. Ceci revient à dire que la surface habitable dont disposent les personnes âgées est près de deux fois plus importante que celle occupée par des personnes en début de cycle de vie. Il est donc permis d'envisager à l'horizon de l'étude, alors que la pyramide des âges s'étoffera vers les catégories supérieures, une augmentation substantielle de la surface habitable (Figure 18).

Déclinée selon la typologie MI/IC, la relation entre la structure de la pyramide des âges et la surface moyenne des logements est représentée par la Figure 19. La surface habitable par personne est quasi le double entre les tranches d'âge extrêmes soit 55 m² contre 28 m² en maison individuelle et 43 et 22 m² en immeuble collectif. Ce rapport s'explique en partie par l'appartenance quasi inéluctable à un ménage de plus grande taille en début de vie.

Figure 14 : Surface moyenne des logements en 1999 par type et période de construction



La demande de logements neufs et la dynamique du parc

Dans cette étude, l'estimation de la demande de logements neufs est réalisée à partir d'un jeu d'entrée et de sortie à l'intérieur du parc national. Ce jeu qui relève de la dynamique du parc se produit à partir de la combinaison de deux variables principales : d'une part, le parc de logements existant au début

de l'étude (en 1999) s'érode progressivement pour une raison ou une autre à travers la « sortie » de certains logements, d'autre part, l'augmentation de la population induit une demande de logement affectée aux nouveaux ménages. La demande de logements neufs est représentée par l'addition de ces deux composantes.

Cette représentation de la dynamique du parc appelle néanmoins quelques précisions au sujet

Figure 15 : Projection tendancielle à 2050 de la surface moyenne d'un logement

Figure 16 : Evolution des surfaces habitables de la maison individuelle (MI) et en immeuble collectif (IC)

Figure 17 : Surface moyenne d'une pièce en maison individuelle et en immeuble collectif.

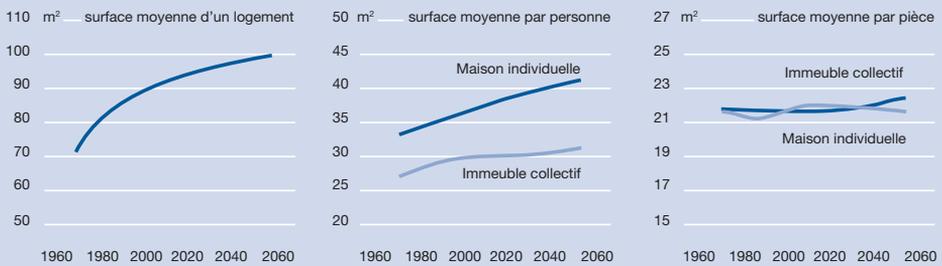


Figure 15 et 16 : D'après : LTMU-UTC,

Figure 17 D'après : A. Jacquot, « De plus en plus de maisons individuelles », Insee Première, N° 885 – fév. 2003.

Tableau 6: Nombre de pièces par personne en 1999, selon l'âge et le type de logement

Age	0-14 ans	15-19 ans	20-24 ans	25-59 ans	60-64 ans	65 ans ou plus
NP/pers Maison individuelle	1,27	1,38	1,50	1,84	2,41	2,52
NP/pers Immeuble collectif	0,99	1,08	1,17	1,44	1,89	1,97

D'après : INSEE

Figure 18 : Surface moyenne par personne selon l'âge

Figure 19 a et b : Estimation de la surface du logement selon l'âge et le type de logement

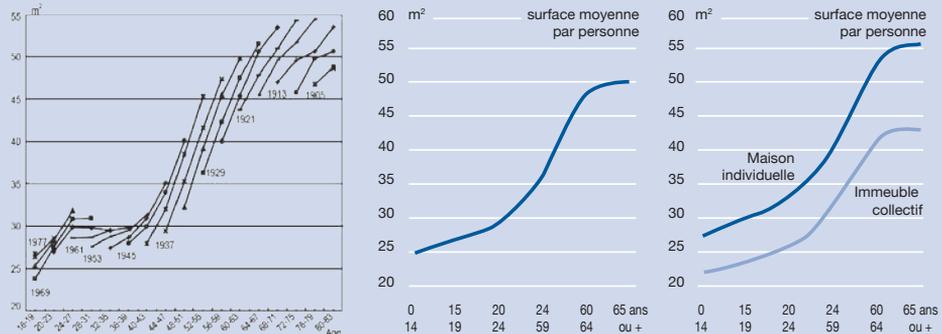


Figure 18 : D'après : L. Omalek, M. Neiss, D. le Blanc « Confort de l'habitat et cycle de vie », Insee Première, n°727, Juillet 2000. Données des enquêtes logement (1984, 1988, 1992, 1996) - Figure 19 a : Source : LTMU-UTC - Valeurs obtenues à partir du nombre de pièces selon l'âge établi pour 1999 (Surface d'une pièce : 22 m²) - Figure 19 b : Source : LTMU - UTC

des hypothèses sur lesquelles elle repose. En effet, dans cette étude, le taux de sortie représente la part de logements du parc 1999 sortant chaque année pour de multiples raisons - démolition, changement d'affectation, fusion avec un autre logement, vacance, etc. Ce taux exprime un jeu de soldes sans décrire (et encore moins expliquer) les mouvements endogènes des ménages à l'intérieur du parc. Le modèle adopté dans cette étude n'élucide donc pas les problèmes posés par les diverses migrations résidentielles, qui, pour lui, se limite à un solde de population déterminé par un modèle démographique exogène (réalisé par l'INSEE) qu'il ne discute pas. D'autre part, il a été décidé de considérer, à partir d'une hypothèse forte, que ce taux demeurerait toujours positif dans le temps. Or, l'expérience montre que, localement, le parc ancien peut voir augmenter ses effectifs par des processus inverses, à savoir l'entrée de logements anciens ayant joui, par exemple, d'une nouvelle valorisation immobilière, d'une reconversion partant de l'activité tertiaire, etc. Pour toutes ces raisons, ce taux reste assez difficile à définir à partir des données disponibles. Néanmoins, on peut admettre, à partir des études traitant du sujet, qu'environ 60 000 logements sortent, d'une manière ou d'une autre, du parc résidentiel chaque année.

En ce qui concerne la demande générée par les nouveaux ménages (provoquée par la croissance naturelle de la population et/ou par les migrations résidentielles sur le territoire métropolitain), on peut estimer qu'elle impliquera une demande supplémentaire de logements neufs. Dans ce cas encore, cette hypothèse ne signifie pas que les nouveaux ménages s'orienteront réellement vers

le parc neuf, mais plutôt que le solde qu'ils provoqueront renforcera le jeu de l'offre et de la demande à l'intérieur d'un parc théoriquement déficitaire.

La ventilation de la population dans le parc total s'effectuera à partir d'un déterminant relativement stable dans le temps, à savoir une part approximativement constante de 70 % de la population vers la maison individuelle (ce qui revient en 1999 à 57 % des logements).

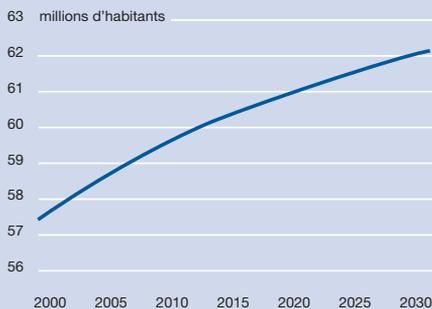
Dans le cadre de scénarios plus fins, notamment des scénarios liés aux politiques de démolition ou de valorisation de l'ancien, le modèle pourrait néanmoins permettre de choisir un type particulier de logements que l'on espérerait voir sortir ou entrer dans le parc.

La demande de logement aux horizons 2030 et 2050

Ces hypothèses se traduisent dans cette étude par un seul modèle d'évolution du parc de logement. Ce dernier se fonde sur une hypothèse centrale d'augmentation de la population émise par l'INSEE à l'échelle départementale à l'horizon 2030 (estimations Omphale) puis à l'échelle nationale à l'horizon 2050.

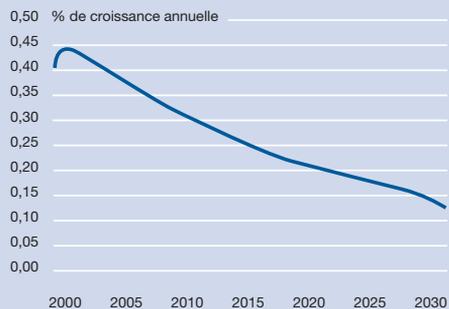
D'après ces sources, la population était estimée en 1999 à 57,2 millions de personnes. Sa projection à l'horizon 2030 est établie à 62,1 millions de personnes avec une croissance annuelle moyenne de 0,27 % (croissance débutant à partir de 2000 de 0,41% pour se stabiliser aux alentours de 0,15 % lorsqu'on s'approche de l'horizon 2030) (Figure 20 et Figure 21).

Figure 20 :
Evolution de la population à l'horizon 2030



D'après : INSEE - OMPHALE

Figure 21 : Evolution du taux de croissance annuelle de la population à l'horizon 2030



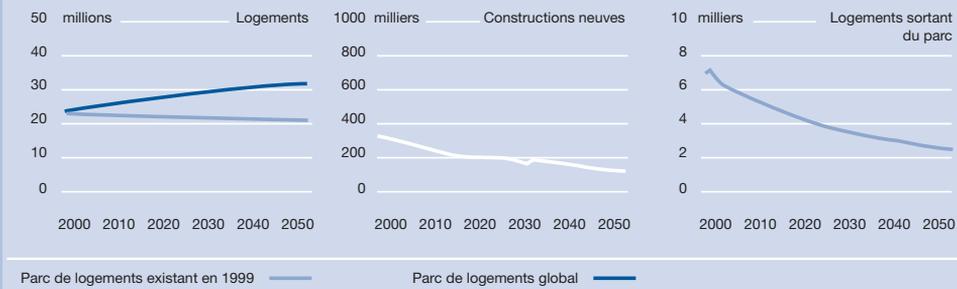
Source : Traitement d'après INSEE - OMPHALE

Le nombre de ménages, et donc de résidences principales, est estimé en 1999 à 23,8 millions et devrait atteindre 29,5 millions en 2030 (avec une croissance annuelle moyenne de 0,69 %), le différentiel de croissance avec celle de la population s'expliquant principalement par la diminution de la taille des ménages (d'environ 2,4 pers/ménage en 2000 à 2,1 en 2030). Le prolongement de ces tendances donne à l'horizon 2050, une population de 64 millions d'habitants¹⁵ pour environ 32 millions de ménages (Figure 22). Avec, en moyenne sur la période 2000-2050, près

de 200 000 logements neufs pour environ 60 000 logements sortant du parc tous les ans¹⁶, la surface totale du parc passerait ainsi de 2,1 milliards de m² à 2,8 milliards en 2050.

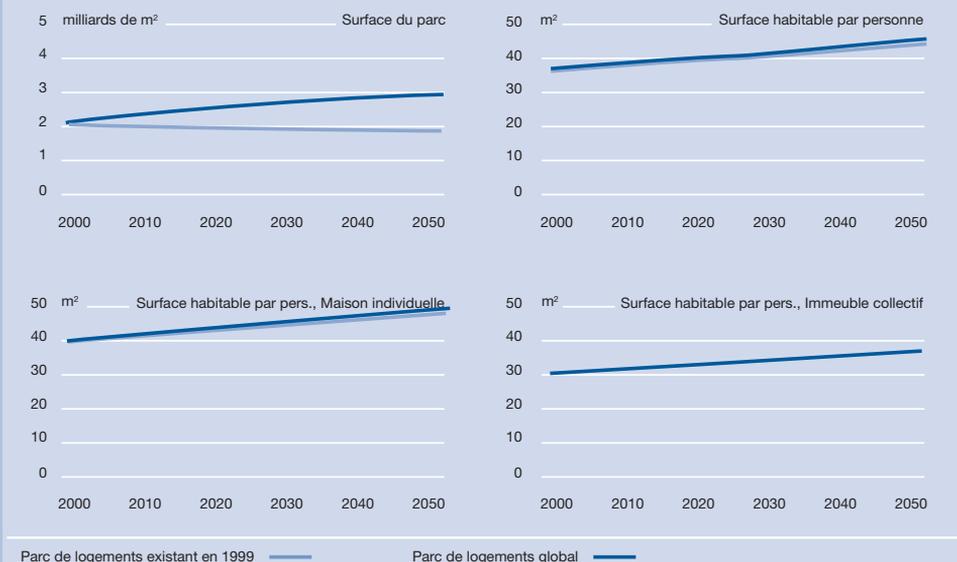
Cette progression de la surface du parc résulterait de l'accroissement de la surface habitable disponible : aujourd'hui de près de 36 m²/personne, elle progresserait vers un peu moins de 45 m²/personne en 2050. Déclinée pour les maisons individuelles et les immeubles collectifs, cette surface passerait respectivement de 40 m²/personne à moins de 50 m² et de 33 m² à 37 m² (Figure 23).

Figure 22 : Estimation du nombre de logements à l'horizon 2050



Source : LTMU-UTC

Figure 23 : Estimation de la surface du parc de logements et de la surface habitable à l'horizon 2050



Source : LTMU-UTC

Les consommations énergétiques dans le logement

L'état des consommations en 2000

Cette phase de l'étude particulièrement délicate ne fait l'objet d'aucune statistique permettant d'attribuer avec précision des niveaux de consommation énergétique à toutes les catégories de logements.

L'estimation des besoins thermiques et des consommations d'énergie de chauffage résulte d'un calcul complexe, qui dépend de nombreuses variables extrêmement difficiles à appréhender. Cette difficulté est principalement liée à la très forte variabilité des paramètres pris en compte dans le bilan thermique de chauffage, notamment des trois principales composantes du calcul thermique : le confort des habitants et le climat, les performances en termes d'isolation du bâti, et l'usage et les caractéristiques de rendement des équipements. La méthode généralement employée dans le calcul des consommations à des échelles macroscopiques, à l'image de l'exercice réalisé dans cette étude, est un calcul statique qui cherche à réduire les variations de ces composantes dans le temps. Cette méthode s'inspire fortement de la méthode des « besoins » instaurée pour la réglementation thermique de 1989 (RT 89). Elle consiste à estimer les consommations d'énergie de chauffage à travers la conjonction de deux entités de calcul : d'une part, il s'agit d'exprimer quantitativement les besoins de chauffage ressentis par les usagers compte tenu des conditions climatiques (écarts entre les températures de confort – ou température de consigne – et les températures extérieures), des caractéristiques constructives de l'habitat, des apports énergétiques gratuits (dus à l'ensoleillement, à l'occupation du logement, etc.) ; et d'autre part de quantifier les rendements des divers équipements de chauffage que l'on a

installés pour répondre à ces besoins. Le recours à un calcul théorique a donc été indispensable pour estimer les consommations de chacun des types des logements identifiés à l'échelle départementale¹⁷. Il a consisté à estimer les besoins théoriques de chacun des types considérés auxquels ont été affectés des facteurs de correction relatif aux équipements (rendement) et à l'occupation des logements (effet « rebond » après une opération sur le logement, intermittence, etc.). Rapportées à la surface des logements, cette phase a permis de produire les consommations unitaires moyennes à l'échelle des départements.

Cette consommation à l'échelle de l'ensemble du parc avoisine les 180 kWh/m²/an. La maison individuelle est, d'après ce mode d'estimation, la plus énergivore en chauffage notamment à cause de sa surface d'enveloppe largement déperditive si on la compare à celle des logements collectifs. Aux deux extrêmes, on trouve ainsi la maison ancienne, non isolée, supportant des charges de chauffage très élevées (comprises entre 230 et 280 kWh/m²/an) et le logement en immeuble collectif récent, plus compact et soumis à une RT plus ou moins récente (entre 140 et 75 kWh/m²/an) (Figure 24).

Il faut néanmoins noter que ces écarts entre maison individuelle et logement collectif sont amplifiés par la non prise en compte, par la méthode des besoins, des faibles rendements de distribution dans les immeubles collectifs (les pertes calorifiques étant assez élevées à cause de la longueur des canalisations) et des surconsommations de chauffage observées empiriquement et résultant de ce mode de distribution. La méthode transcrit assez médiocrement l'influence sur les consommations finales des comportements en situation de distribution centralisée de l'énergie de chauffage (chauffage central collectif - CCC) qui se traduit généralement par une surcharge de

chauffage pouvant dépasser de plus de 10 % les besoins théoriques (on parle parfois de dépassement de 30 %), surtout dans le logement ancien. A ce titre, d'après l'Observatoire de l'énergie¹⁸, un logement ancien équipé d'une distribution de type CCC double sa consommation par rapport à un logement non équipé (15% contre 8 de la consommation totale du parc).

Le modèle prospectif portant sur la réduction des consommations du parc de logements

La sensibilité des consommations à la part des maisons individuelles dans le parc neuf

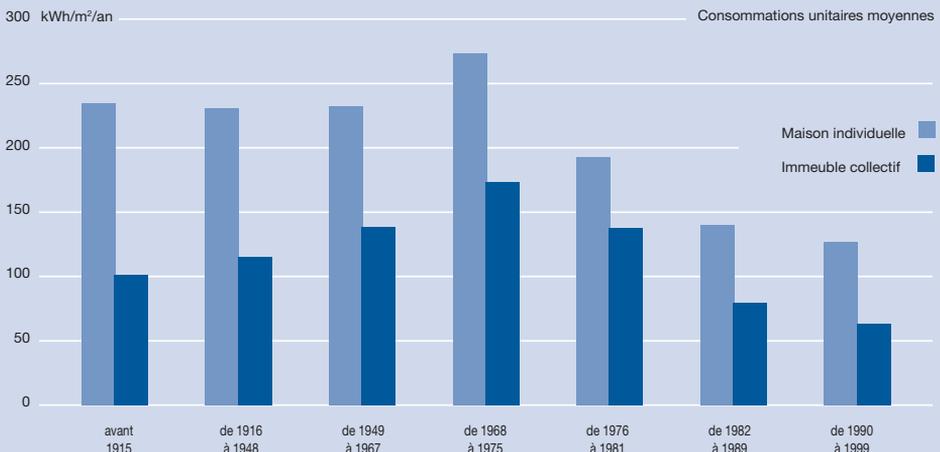
Les études précédentes présentées dans les *Cahiers du CLIP* ont largement mis en évidence la faiblesse relative des impacts de la construction neuve sur les consommations et les émissions du parc national de logement. Cette part réduite est principalement due à la faiblesse des effectifs de la construction neuve relativement à celle du parc ancien (à peine plus de 1 % d'apport de logements neufs par an). Il est donc prévisible de considérer comme extrêmement limités, à une échelle macroscopique, les effets d'une politique de développement exclusif de la maison individuelle ou du logement collectif performant dans le neuf.

Bien entendu, cette remarque n'est valable qu'à l'échelle d'analyse adoptée dans cette étude et ne peut être envisagée comme un argument en faveur ou en défaveur de l'un ou l'autre type de logement. En effet, on s'aperçoit, en ce qui concerne les consommations unitaires dans le neuf, qu'un scénario consacrant à la maison individuelle la totalité de la construction neuve induit une consommation moyenne au mètre carré deux fois plus importante que celle résultant d'un scénario fondé sur un parc neuf totalement collectif (et au delà en consommation totale). Partant d'une consommation unitaire de près de 125 kWh/m²/an dans un scénario entièrement consacré à la maison individuelle neuve vers une centaine de kWh en 2050, un scénario équivalent pour l'immeuble collectif passerait de 60 kWh/m²/an à une cinquantaine (Figure 25).

Le modèle prospectif relatif à l'amélioration des performances du bâti

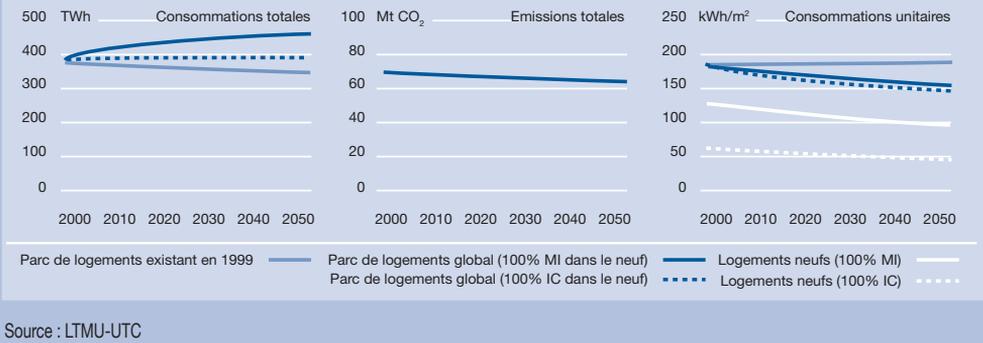
L'amélioration des performances thermiques des logements, à travers l'augmentation de l'isolation de l'enveloppe, est appréhendée dans cette étude à partir de deux points d'entrée. D'une part, il s'agit d'intégrer la diminution des consommations -tout usage- dans le logement neuf à partir du durcissement des RT (ambition d'un gain de 15% tous les 5 ans à partir de 2005), d'autre part de mesurer l'économie d'énergie découlant d'opérations de réhabilitation dans le parc de logements anciens. On entend alors par réhabilitation les gestes ex-

Figure 24 : Reconstitution des consommations moyennes finales du parc de logement en 1999



Source : LTMU-UTC/Energies Demain

Figure 25 : Sensibilité à la typologie de la construction neuve (maison individuelle ou immeuble collectif) de la consommation d'énergie du parc de logements et des émissions de CO2 à l'horizon 2050 selon le scénario « laisser-faire »



plicités d'amélioration qui ont un impact direct sur la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment.

Chaque diminution est identifiée dans le modèle par un couple de facteur de pondération correspondant à un gain (une économie) obtenu sur la consommation unitaire moyenne. Ce gain se traduit d'un point de vue dynamique par le remplacement d'un logement qui surconsommerait de l'énergie de chauffage à cause d'une certaine vétusté de son enveloppe (surconsommation par rapport à la moyenne) par un logement qui sous-consommerait après avoir été réhabilité (sous-consommation par rapport à la moyenne).

Le modèle est également enrichi de la possibilité de sortir du parc des logements considérés comme plus vétustes que la moyenne. A la manière des logements réhabilités, leur consommation unitaire est pondérée d'un facteur de surconsommation. Bien entendu, cette discrétisation supplémentaire du parc en logements réhabilités et sortants plus ou moins énergivores par rapport à la moyenne est totalement intégrée au calcul dynamique, notamment à travers son action directe dans la valeur des consommations unitaires moyennes résultantes.

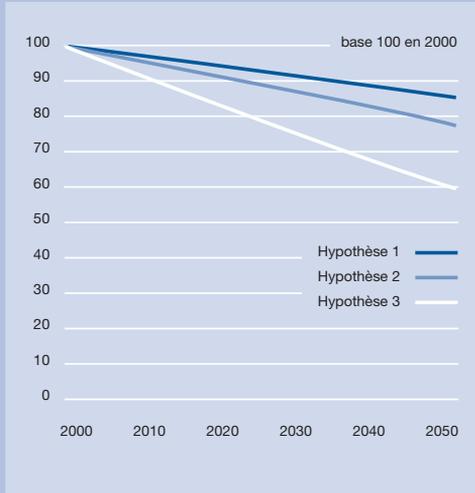
Les gains induits par la réhabilitation du bâti ancien

Cette dynamique propre à la réhabilitation est appréhendée dans cette étude à partir de deux autres éléments d'entrée : d'une part par le rythme de l'amélioration de l'enveloppe du bâti (part de logements réhabilités dans le parc chaque année), d'autre part par son intensité en termes d'économie d'énergie (part de l'écart par rapport à la consommation moyenne de la vétusté et du

gain énergétique selon que le logement est ou n'est pas réhabilité).

Cette double donnée est extrêmement difficile à déterminer pour la situation actuelle du logement français. En effet, maintes sources chiffrent les nombreux actes de réhabilitation du bâti¹⁹ (près de 15 millions en 2004²⁰ !), mais leur impact sur l'économie effective à l'échelle du logement (et

Figure 26 : Besoins énergétiques unitaires pour trois hypothèses d'action sur le parc existant



Les hypothèses sont définies selon le taux de vétusté des logements réhabilités, le gain unitaire en réduction des besoins de chauffage, et le taux de réhabilitation, en % d'unités par an.

Hypothèse 1 : +20% ; -20% ; 0,833% soit 100 000 par an.

Hypothèse 2 : +10% ; -10% ; 2,5% soit 300 000 par an.

Hypothèse 3 : +20% ; -20% ; 2,5% soit 300 000 par an.

Source : LTMU-UTC.

d'autant plus à l'échelle du parc) demeure flou, sinon inconnu. Il faut dans ce cadre plutôt évoquer des suppositions d'impact de la réhabilitation que de mesures matérielles. Deux hypothèses ont ainsi été retenues dans cette étude. La première, haute, estime qu'un gain induit par la réhabilitation thermique s'approche en moyenne de 20% par rapport à la consommation unitaire moyenne pour un logement vétuste surconsommateur de 20%. La version basse de cette hypothèse estime, pour le même nombre de logements, que ce gain n'est plus que de 10% pour une vétusté de l'enveloppe engendrant une surconsommation de 10% (figure 26).

Le gain apporté par le renouvellement des équipements

Pour les logements restants qui ne sont pas réhabilités, nous avons supposé qu'ils feront simplement l'objet d'un renouvellement d'équipement de chauffage (même type d'équipement mais plus performant) ; le taux de renouvellement annuel pour remplacer en 20 ans l'ensemble de logements concernés (durée de vie moyenne des chaudières) étant voisin de 5%. La prise en compte du renouvellement des équipements de chauffage permet de mettre en évidence la diminution des consommations induite par l'amélioration des rendements entre deux générations du même type (ces calculs reposent en partie sur une méthode fondée sur l'affichage des consommations).

Le gain apporté par l'amélioration des rendements des équipements est loin d'être négligea-

ble. En effet, hormis pour l'effet Joule, pour lequel aucun changement substantiel n'est attendu (puisque son rendement est déjà estimé à 0,95), tous les équipements devraient progresser pour atteindre des valeurs supérieures à 0,8 en maison individuelle et 0,7 en immeuble collectif, la différence entre les deux types de logement provenant des pertes de chaleur imputables au système de distribution, bien plus déperditif dans le second cas. Le gain résultant de l'amélioration des équipements pèse, pour l'ensemble du parc (si ce dernier ne modifie pas ses parts de marché), près de 25 % du total des consommations et des émissions.

Les consommations énergétiques à l'horizon 2050 selon trois scénarios de référence

Nous définissons ici trois scénarios de référence de l'évolution du parc de logements selon différentes hypothèses d'amélioration du bâti et sans pénétration à ce stade des technologies pompes à chaleur. Mesurer en prospective les effets des diverses actions possibles sur le bâti et de ses équipements revient d'abord à définir une première situation de référence relative à l'évolution du parc de logement à l'horizon de 2050. Une sorte de point zéro considéré non pas comme plausible du point de vue de sa réalisation mais tout simplement inévitable lorsqu'on « laisse » le parc d'aujourd'hui s'emporter par un élan pris

Figure 27 : Rendements moyens des équipements de chauffage en 2000

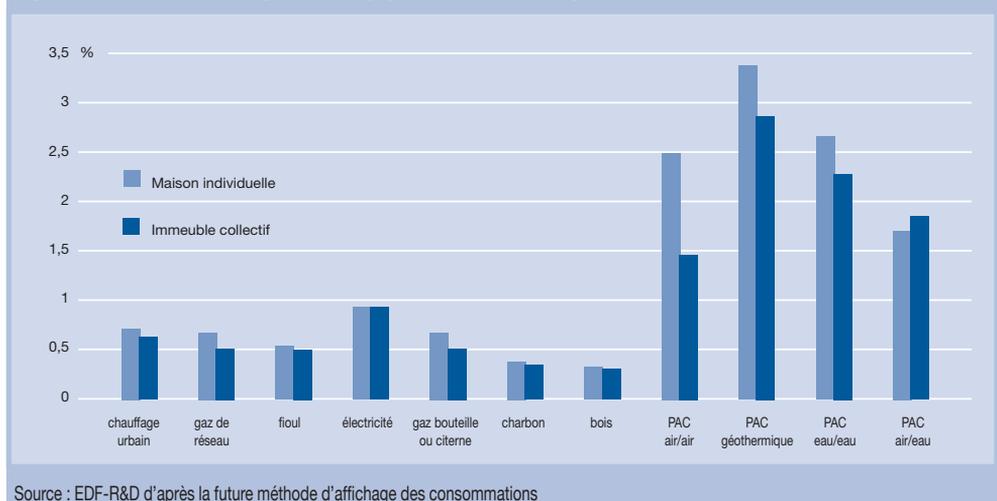
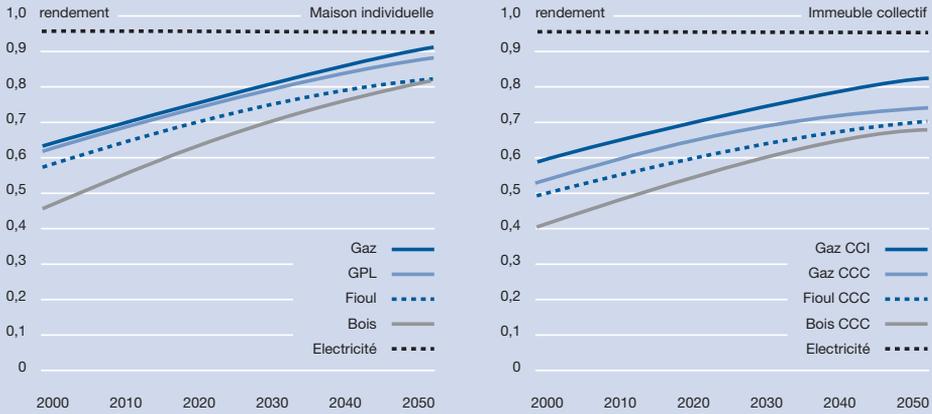
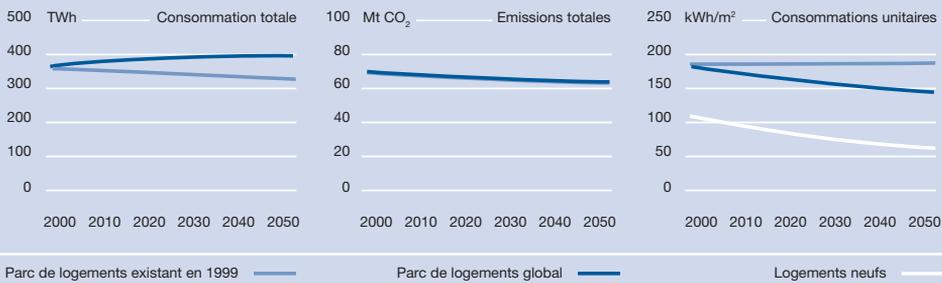


Figure 28 : Hypothèses d'évolution des rendements moyens des équipements de chauffage à l'horizon 2050



Source : Marie-Hélène Laurent EDF R&D et al. Les systèmes énergétiques des bâtiments résidentiels de demain, rapport final pour le PUCA.

Figure 29 : Scénario 0 - Résultats pour un scénario de référence sans amélioration des rendements



Source : LTMU-UTC

en 2000. Dans le cadre du modèle de cette étude, la détermination de ce scénario de référence « zéro » revient à répondre à la question suivante : quelles seraient les consommations et les émissions du parc de logements si aucune action sur le bâti n'étaient effectuées, si les parts de marchés des équipements du logement neuf restaient inchangées par rapport à la situation de 2000 et si la dynamique du parc demeurerait tributaire des tendances lourdes en termes démographiques et de sorties du parc ?

La réponse à cette question équivaudrait à deux constats : dans un premier temps, on noterait une diminution de la contribution du parc ancien dans les consommations et les émissions globales uniquement à cause de la baisse de ses effectifs (on passerait, à partir de cette érosion, d'une consommation de 385 TWh à près de 360 et d'une baisse des émissions d'une demi douzaine de MtCO₂ à

peine). D'autre part, on remarquerait que l'amélioration des performances de l'enveloppe des logements neufs à partir d'une réglementation thermique plus exigeante n'arriverait pas à retourner la tendance haussière des consommations globales impulsées par une augmentation de la population, du nombre de ménages et de la surface habitable. En passant d'une consommation unitaire de 110 kWh/m²/an à près de 60 kWh/m²/an en 50 ans et en conservant les mêmes parts de marché de chauffage que celles de 2000, le logement neuf, tout en entraînant les consommations unitaires globales de 180 kWh/m²/an à 150, ne pouvant à lui seul inverser la tendance, stabiliserait tout au moins –ou réduirait à la marge tout au plus– les émissions de CO₂ (au mieux, une réduction quasi négligeable de 4 ou 5 Mt) (Figure 29).

Ce scénario de référence néglige l'inévitable prise en compte des impératifs de réhabilitation

du logement ancien que l'on constate depuis plusieurs années et qui pourraient être amplifiés par la lourdeur des factures issues de la montée prévisible du prix de l'énergie. On peut émettre de ce point de vue, les deux hypothèses dont nous évoquons plus haut la teneur, à savoir l'amélioration du bâti ancien à des rythmes et selon des intensités variables.

Si l'on suppose que la priorité sera donnée à un bâti ancien (antérieur à la réglementation thermique) qui surconsomme de 10% par rapport à la moyenne de cette catégorie grâce à une réhabilitation provoquant un gain d'une même ampleur, et ce à un rythme de 3,3 % de ses effectifs (soit trois centaines de milliers par an de logements datant d'avant 1975), alors on arrivera au moins, tout en conservant les efforts de la RT sur le neuf, à stabiliser les consommations globales et à provoquer une baisse sensible des émissions (un gain d'une dizaine de mégatonnes à l'horizon 2050). Cette stabilisation pourrait également être obtenue par un durcissement des exigences de la réhabilitation (un gain de 20% sur un bâti surconsommateur de 20%) au rythme moins soutenu de 100 000 logements par an. Des effets baissiers commenceraient à être observables

de manière significative avec une augmentation du rythme de réhabilitation respectant de tels gains à partir de 300 000 logements par an. On verrait alors, selon cette dernière hypothèse, les consommations globales s'approcher de la barre des 300 TWh par an et les émissions atteindre la cinquantaine de mégatonnes de CO2 en 2050 (Figure 30). L'ensemble du parc atteindrait ainsi une consommation unitaire moyenne proche de celle du logement neuf d'aujourd'hui (environ 120 kWh/m²/an).

On s'aperçoit rapidement que de tels efforts sur l'enveloppe du bâti, qu'il soit neuf ou ancien, ne seraient néanmoins pas suffisants, sans être moins nécessaires, dans l'atteinte du facteur 4. Un complément d'efforts serait donc obligatoire à fournir, notamment à travers l'amélioration des rendements des équipements de chauffage et la réhabilitation du parc de logement postérieur à la première réglementation thermique et, c'est ce qui nous intéresse le plus ici, par leur substitution par des techniques plus performantes.

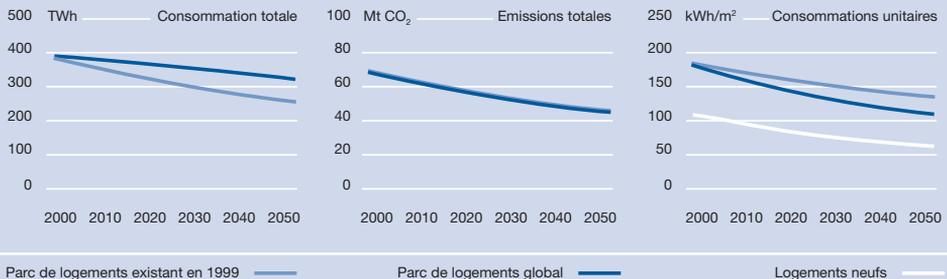
Tableau 7 : Emissions en gCO2 par kWh d'énergie finale

Equipement	Facteur d'émission par kWh d'énergie finale pour le chauffage
Chauffage urbain	300
Gaz de réseau	202
Fioul	276
Electricité	180*
Gaz bouteille ou citerne	227
Charbon	360
Bois	7
PAC	180

(*) D'après l'accord cadre Ademe-EDF sur le contenu CO2 par usages du kWh électrique.

Source (hors électrique) : Jean-Pierre Traisnel, (part. Mindjid Maïzia) Cahier du CLIP n°16.

Figure 30 : Scénario 2 – Résultats pour un scénario de réhabilitation de 100 à 300 000 logements par an sans amélioration des rendements.



Source : LTMU-UTC

Tableau 8 : Récapitulatif des scénarios de référence relatifs à l'amélioration du bâti ou équipements

Scénarios	0	1	2
Réhabilitation (en nombre de logts/an)	aucune	aucune	100 000* ou 300 000** (datant d'avant 1975)
Equipements de chauffage du parc existant en 2000	parts de marché constantes	parts de marché constantes avec amélioration des équipements	parts de marché constantes
Equipements de chauffage du parc neuf après 2000	parts de marché identiques à 2000	parts de marché identiques à 2000 avec amélioration des équipements	parts de marché identiques à 2000
Consommation totale du parc en 2050 (en TWh)	443	328	325
<i>Facteur de réduction des consommations</i>	0,87	1,17	1,18
Emissions totales du parc en 2050 (en Mt)	64,5	49	45
<i>Facteur de réduction des émissions</i>	1,12	1,47	1,6
Consommation moyenne du parc en 2050 (en kWh/m ² /an)	150	111	110
Consommation moyenne en 2050 des logements existants dans le parc 2000 (en kWh/m ² /an)	185	140	135
Consommation moyenne en 2050 des logements construits après 2000 (en kWh/m ² /an)	83	63	63

* : gain de 20 % par rapport à la consommation moyenne pour une surconsommation de 20 % par rapport à la moyenne.

** : gain de 10 % par rapport à la consommation moyenne pour une surconsommation de 10 % par rapport à la moyenne.

Source : LTMU/UTC.

Les scénarios avec pénétration des pompes à chaleur

Ce complément d'économie d'énergie et de réduction des émissions des GES indispensable pour atteindre un facteur proche de 4 peut être fourni par l'adoption de dispositifs ENR. Nous allons examiner dans un premier temps, les gisements, en termes statiques, des réductions éventuelles que pourrait procurer les technologies PAC.

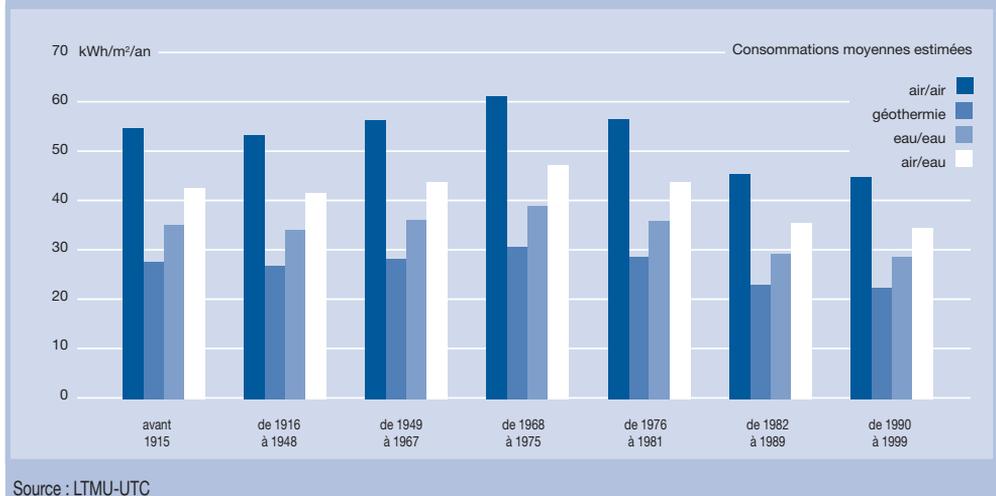
Les gisements d'économie d'énergie de chauffage induits par les PAC pour chaque type de logement dans le parc existant

Cet exercice revient à déterminer combien consommerait chaque logement du parc existant (sans rénovation de l'enveloppe) s'il était équipé d'une PAC. La méthode de l'affichage des consommations a permis d'établir l'ensemble des

rendements globaux par type d'équipement (en combinant les rendements de génération, de distribution et d'émission) et de reconstituer le gain induit par l'adoption de PAC. L'écart entre les valeurs pour tous les types d'équipement et celles des COP est largement accentué par les effets du vieillissement des chaudières. En effet, les rendements déduits de l'affichage des consommations tient compte de l'âge des équipements et de la diversité des technologies disponibles pour chaque type de combustible, les équipements anciens tirant vers le bas les technologies les plus performantes dans la constitution des moyennes.

Les différences de rendements par type de logement, toutes choses égales par ailleurs, résultent quant à elles des effets de la distribution du fluide calorifique dans les canalisations, les pertes de chaleur étant plus importantes en immeubles collectifs qu'en maisons individuelles.

Figure 31 : Reconstitution, par période de construction, des consommations moyennes finales des logements dont on a substitué l'équipement de chauffage par une PAC



Ces pertes sont bien entendues nulles pour l'effet Joule électrique dont les rendements de production sont extrêmement élevés (proche de 0,95). Pour les autres, les pertes sont de l'ordre d'une dizaine de %, avec des rendements globaux variant autour de 0,5. Les PAC neuves actuelles ont bien entendu des rendements supérieurs à 1 et peuvent s'élever à 3 même lorsque l'on tient compte des pertes par le réseau (Figure 27).

Traduit en consommation effective, le différentiel entre ces divers rendements permet d'évaluer les consommations unitaires par type de logement²¹, notamment pour les différents types de PAC.

Un logement équipé d'une PAC consomme en moyenne 43 kWh/m²/an pour une maison individuelle contre 36 kWh/m²/an pour un immeuble collectif, toute période de construction et tout type de PAC confondus (sans aucune pondération d'effectifs). Des différences substantielles sont bien entendu observables entre les différentes périodes de construction (Figure 31), elles sont notamment dues aux écarts résultant d'un différentiel relativement important dans les besoins de chauffage. Ces différences sont bien plus grandes lorsqu'on compare les types de PAC entre elles. On obtient en moyenne 54 kWh/m²/an pour les PAC air/air, 42 pour les systèmes air/eau, 34 pour les systèmes eau/eau et 27 pour la géothermie. Ces écarts sont quant à eux corrélés aux différences de COP.

Tous ces chiffres peuvent paraître très bas au regard des consommations moyennes établies pour l'ensemble du parc de logements français. En plus de négliger les effets « rebond », il faut noter qu'il s'agit en réalité d'un artefact dû à l'absence de pondération dans le calcul des consommations moyennes. En effet, ici, on ne considère aucun scénario de pénétration des PAC selon les périodes de construction, chaque catégorie de logement bénéficiant du même poids en termes d'effectif. L'impact de cet artefact, qui a tendance à réduire nettement l'influence du parc ancien dans l'estimation des consommations moyennes, est bien entendu écarté dans tous les scénarios que nous établirons ultérieurement dans cette étude.

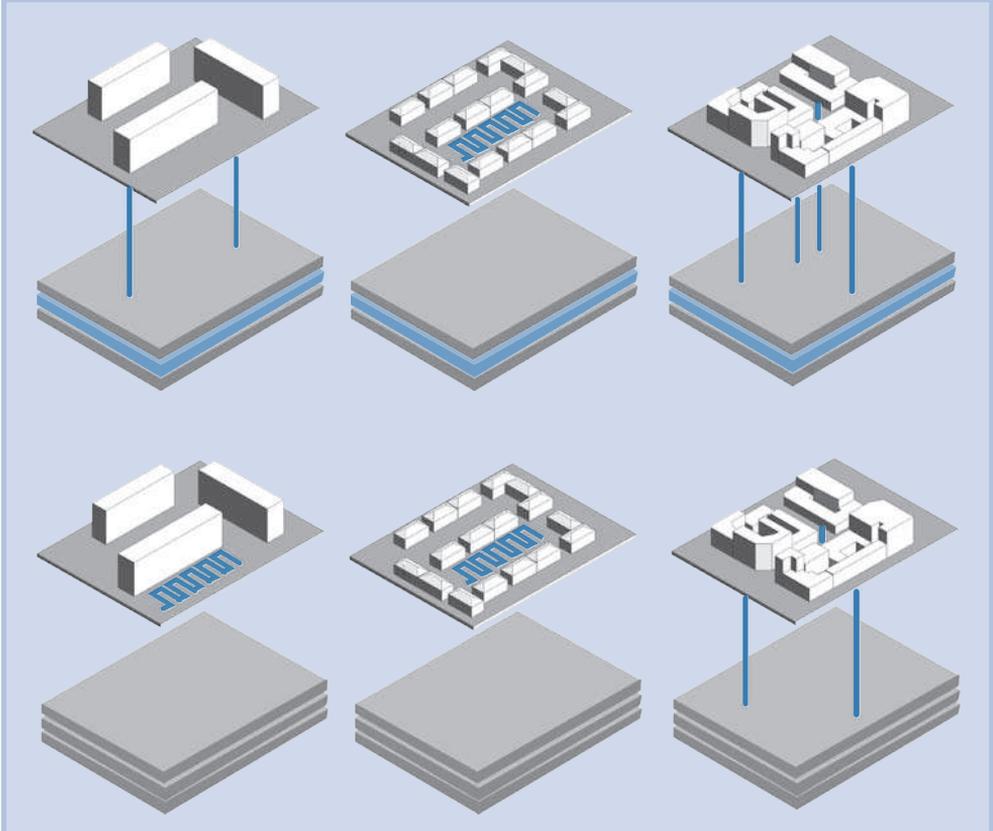
Néanmoins, si l'on appliquait aux 24 millions de logements une seule et même solution PAC (ce qui n'est pas forcément possible, cf. *infra*), on réduirait d'un facteur de 2,8 la consommation totale nationale avec une technologie air/air (on passerait à 136 TWh), de 5,8 avec la géothermie (70 TWh), de 4,7 avec une technologie eau/eau

et enfin de 3,7 avec une PAC de type air/eau. Les émissions seraient quant à elles respectivement divisées par 3,2 (soit 24 Mt CO₂), 6,3 (soit 12,5 Mt CO₂), 5,4 (14,6 Mt), 4,1 (19 MtCO₂) avec les techniques air/air, géothermiques, eau/eau et air/eau. Bien entendu, ces hypothèses qui peuvent paraître irréalistes mettent en évidence la conjonction de plusieurs composantes favorables aux PAC dans le calcul des gisements ; d'une part ces derniers s'expliquent par les parts importantes qu'occupent les équipements au gaz et au fioul dans le parc existant, leur rendement très faible vis à vis de celui des PAC et, d'autre part, le faible contenu en CO₂ de l'électricité (par rapport aux autres énergies hormis le bois). Néanmoins, il faut noter que la généralisation des PAC sur le parc de logements augmenterait significativement l'appel de charge en électricité et accroîtrait de ce fait le contenu CO₂ de cette énergie (en effet, une augmentation des pointes dans les courbes de charges inviterait les producteurs d'électricité à mobiliser de plus en plus la production thermique classique). Quantifier cette augmentation demeure un exercice extrêmement difficile puisqu'il suppose de connaître les modalités de réponse aux appels de charges en termes de production d'énergie primaire (ce que nous avons décidé d'écarter dans l'introduction de cette étude), la part de la production d'électricité thermique par type de combustible étant difficile à prévoir.

La prise en compte de la configuration du bâti dans les scénarios technologiques

Nous l'avons vu lorsque nous présentions leur principe de fonctionnement, l'équipement en PAC des logements est conditionné par au moins trois dimensions : le type de logement (dans le sens « individuel » ou « collectif »), la morphologie urbaine (logement contigu ou non) et la présence d'aquifère dans leur implantation. Le scénario technologique que nous proposons à présent est basé sur des choix de solutions PAC « réalistes » au regard des conditions actuelles d'installation. Ce scénario peut être résumé par la priorité donnée à l'exploitation des aquifères notamment en milieu urbain dense ou pour tout type de logement collectif (cette solution n'est en effet pas adoptée pour les maisons individuelles en tissu peu dense, les installations avec des capteurs horizontaux étant de loin, pour un particulier, les

Figure 32 : Exemple de scénarios technologiques selon les sources aquifères



Source : LTMU-UTC

plus adaptées) –Figure 32. Il faut néanmoins noter la difficulté d'estimer les gisements réels dans l'exploitation des nappes souterraines.

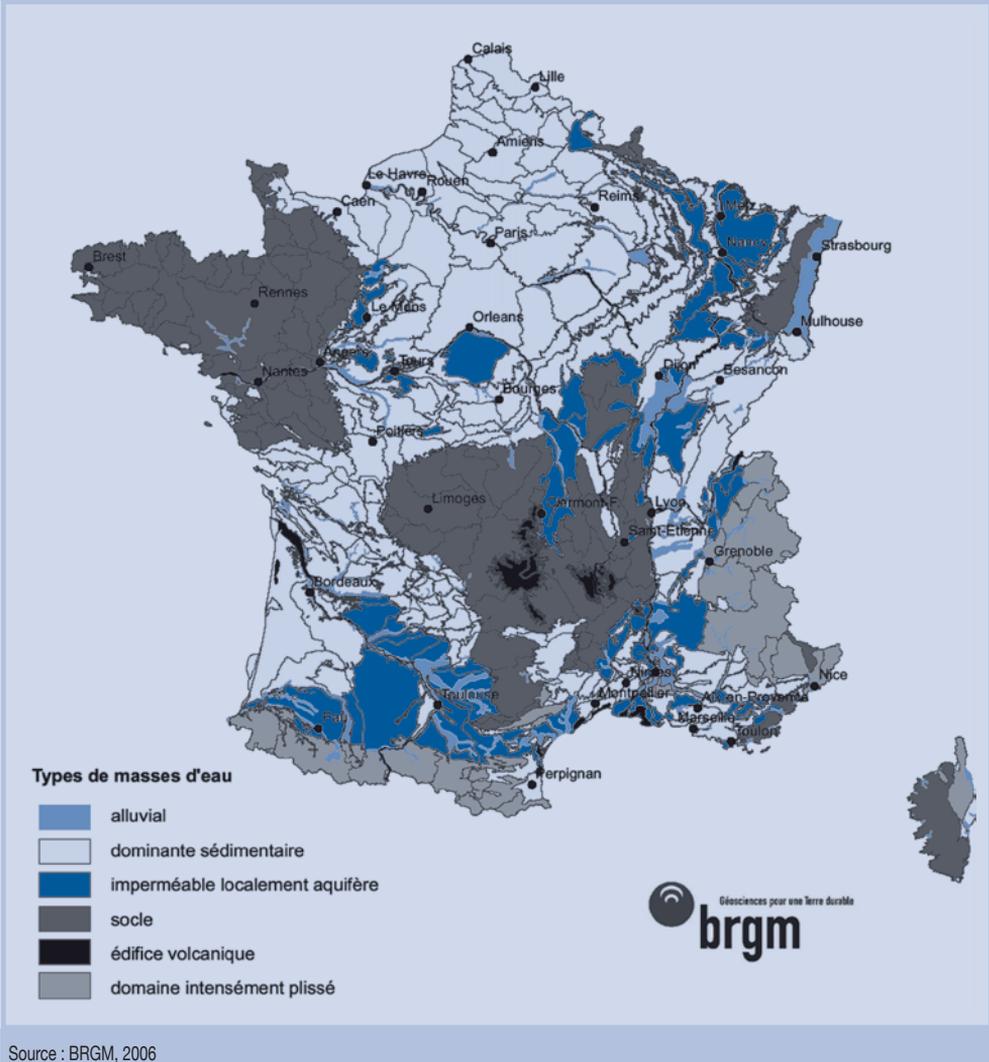
Même s'il est admis que l'installation de PAC peut être bénéfique pour le contrôle des températures des eaux du sous-sol, notamment pour le chauffage si elles viennent compenser des prélèvements liés à la climatisation du tertiaire et/ou dans le cas des équipements réversibles²², l'impact de la multiplication des sondages dans un secteur de surface restreinte demeure très mal connu. L'influence des installations sur les températures de l'eau et sur les rendements globaux des PAC peut rapidement devenir un facteur limitant fortement le nombre de sondages. Cette restriction sur ces types de solution, en particulier en milieu urbain, pourrait faire l'objet d'un traitement plus approfondi lors d'une étude ultérieure (notamment, à la suite de la finalisation de base de données sur le référentiel hydrogéologique français –BD RFH- que développe à ce

jour le BRGM -Figure 33). Elle trouve néanmoins une réponse certaine dans les solutions en mini-réseau ou dans la mutualisation de la production (une pompe à chaleur dédiée à un usage partagé avec des logements mitoyens par exemple).

Afin de tenir compte de ces simplifications incontournables, il a été convenu que la présente étude se contenterait de scénarios technologiques reposant sur une relation strictement bijective entre les solutions PAC et les cas de figure identifiés dans l'analyse du parc. Autrement dit, un seul scénario technologique correspond à l'affectation d'une et d'une seule technologie PAC à chaque cas de figure de logement. Ces cas sont résumés dans le Tableau 9.

On considère ainsi qu'il est toujours possible d'installer une PAC dans une maison individuelle. En tissu serré (on entend ici un tissu urbain dont la plupart des bâtiments sont mitoyens, très souvent alignés, à l'image de ce qu'évoque pour chacun un centre urbain ancien), on peut répondre à la faible dispo-

Figure 33 : Localisation des aquifères souterrains à l'échelle du territoire français



nibilité de l'espace foncier grâce à des dispositifs en capteurs verticaux, la pompe individuelle pouvant être installée en soubassement. Cette réponse n'est néanmoins pas systématique, les sous-sols de ces tissus urbains pouvant être encombrés par des réseaux souterrains (information, électricité, assainissement, etc.), de galeries diverses (naturelles ou vestiges de l'activité humaine²³) ou des sédiments archéologiques (les villes se construisant souvent par superpositions successives²⁴). Dans ces cas, il est toujours – ou très souvent – envisageable d'adopter des solutions semi-collectives en mini-réseaux, un sondage unique encore plus profond permettant de mutualiser la production et le coût d'investissement

(avec économie d'échelle) pour un petit groupement de maisons. Lorsque des réseaux de chaleur existent ou peuvent être projetés (cas toutefois assez insolites puisqu'ils ne concernent en 2000 que 6 000 logements individuels pour l'ensemble du parc), une production centralisée de la chaleur par géothermie très profonde peut être choisie pour desservir des ensembles de logements plus vastes. En tissu diffus (les maisons sont alors arrangées sans mitoyenneté aucune et disposent généralement de grands espaces de jardins), plus généreux en terrain mais pas forcément moins dense en termes de population rapportée à la surface urbanisée, ce sont les capteurs horizontaux qui sont favorisés. Même si

cette dernière solution ne permet pas d'atteindre des COP comparables à ceux des sondages verticaux, elle est aujourd'hui sans conteste d'un coût bien plus abordable pour les particuliers qui désirent installer une PAC sol. Le coût d'une installation en capteurs verticaux demeure en effet tributaire du marché local des sondages (plus ces derniers sont localement nombreux, plus faible sera leur coût économique), en particulier en ce qui concerne les grandes profondeurs pour lesquelles les appareillages et les travaux exigent des compétences spécifiques –et par conséquent relativement onéreuses- rarement disponibles dans l'activité traditionnelle du BTP. Dans les conditions actuelles de la filière PAC et du coût de l'énergie, le coût d'installation de ce dispositif peut s'avérer relativement élevé pour un particulier (soit, d'après l'Ademe, autour des 145 à 185 € le mètre carré de surface à chauffer pour un fonctionnement coûtant entre 2,3 à 3,5 €/m²). Les installations en capteurs horizontaux sont pour toutes ces raisons, tout au moins dans l'état actuel de la filière PAC, plus accessibles tant pour l'usager que pour les métiers de la construction individuelle. En effet, dans le cas de la construction neuve, les opérations d'installation des serpentins peuvent très facilement correspondre aux travaux de terrassement et peuvent profiter tout aussi aisément des remblais du chantier. Hormis le respect de certaines règles, les travaux ne nécessitent pas de qualification particulière et n'entraînent pas de surcoûts entièrement insurmontables pour un particulier. Leur coût est voisin de celui d'une PAC air et est estimé à 85 €/m² de surface à chauffer.

Au regard des équipements de cette partie du parc, on a choisi de distinguer deux types de solution : d'une part, les logements équipés d'un système supposant le transport d'un fluide, d'autre part, ceux qui en sont totalement dépourvus, en d'autres termes les logements chauffés par un système totalement électrique (effet Joule). Dans

le second cas (soit près de 3,3 millions de logements individuels en 2000), celui des systèmes électriques, le poids économique de l'installation du système de distribution (des canalisations mais aussi des émetteurs) peut éventuellement décourager l'investissement dans des PAC sol, la lourdeur des travaux sur le sous-sol (qu'il soit superficiel ou profond) étant le facteur le plus dissuasif. On a supposé ainsi que l'investisseur s'orienterait plus volontiers vers les PAC air. Pour les autres logements individuels (10,3 millions de logements dont une centaine de milliers équipés en chauffage central collectif), la substitution vers les PAC ne nécessite pas forcément de travaux sur la distribution et les émetteurs (en tout cas dans une majorité de cas), l'investissement s'applique alors au changement de la chaudière et à l'arrangement des capteurs. On a par conséquent supposé que ces logements adopteraient avec plus de facilité les solutions proposées par les PAC sol (respectivement horizontales et verticales en tissus diffus et contigus).

En ce qui concerne les immeubles collectifs, il a été décidé, dans cette étude, que seuls les immeubles disposant d'un chauffage central collectif pouvaient potentiellement être équipés d'une PAC. En effet, dans les autres cas, la diversité des systèmes de chauffage complique considérablement les installations en multipliant les problèmes de canalisation (dans quelle partie commune ? selon quelle modalité ? etc.). Même s'il existe des solutions individuelles en immeuble collectif (de type *split-system*), l'installation d'une PAC présuppose une certaine unité du système de chauffage dans le bâtiment et une approche collective de sa prise en charge. Or, il apparaît généralement que pour des raisons diverses et multiples, l'adoption de chauffages centraux individuels dans les immeubles collectifs répond à une volonté d'individualisation des charges de chauffage.

Tableau 9 : Scénario technologique pour les maisons individuelles (MI) et immeubles collectifs (IC) en tissu continu et discontinu

Type de logement	Type de Tissu	Type de PAC	Disposition des capteurs	COP complet adopté
MI (électrique)	Continu	Air	-	2
MI (autres)	Continu	Sol ou nappe	verticale	2,7
MI (électrique)	Discontinu	Air	-	2
MI (autres)	Discontinu	Sol	horizontale	2,7
IC (électrique)	Continu	Air	-	2
IC (CCC)*	Continu	Sol ou nappe	verticale	2,7
IC (électrique)	Discontinu	Air	-	1,5
IC (CCC)*	Discontinu	Sol	horizontale	2,2 ⁽¹⁾
IC (autres)	Discontinu ou discontinu	-	-	-

(*) CCC : chauffage central collectif

Source : LTMU-UTC et EDF R&D

On retrouve également ce type de préoccupations dans le cas des systèmes indépendants ou du tout électrique (sûrement pour des raisons légèrement différentes). Dans tous ces cas, la réponse PAC la plus appropriée imposerait des travaux importants qui correspondraient au remplacement intégral du système de chauffage, distribution comprise. Lorsque la conduite des charges de chauffage s'oriente vers une gestion collective, ces travaux peuvent être engagés à l'intérieur des quelques 2,6 millions d'opérations lourdes que dénombre l'Observatoire de l'habitat existant. Dans tous les cas restants, à savoir les quelques 4,4 millions de logements collectifs disposant d'un chauffage central collectif, seul des capteurs verticaux sont raisonnablement envisageables, ces derniers permettant de mobiliser des puissances suffisantes pour alimenter plusieurs logements simultanément (Tableau 9).

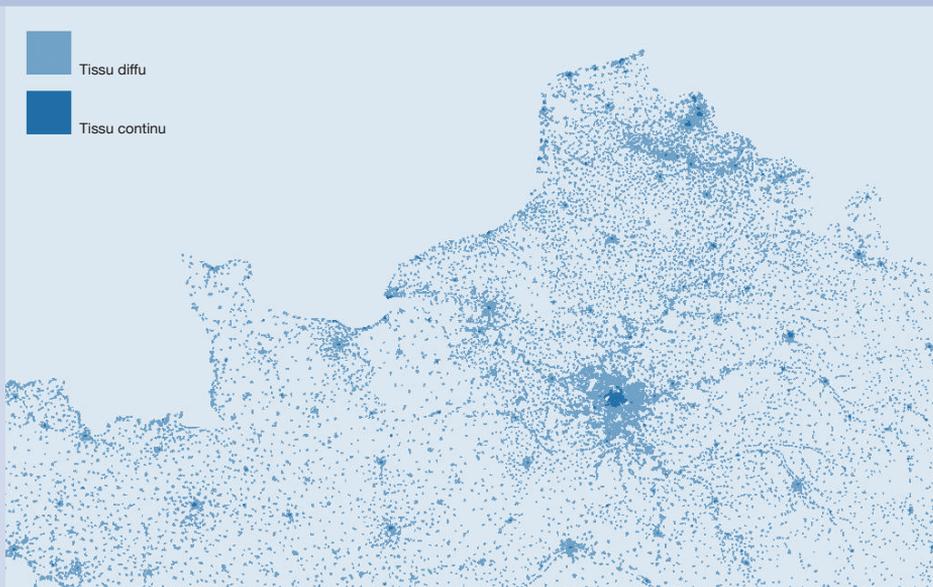
La détermination d'une typologie de logements intégrant la morphologie des tissus urbains

La compacité du bâtiment joue un rôle primordial dans le bilan thermique puisqu'elle permet, lorsqu'elle est assez élevée, de réduire substantiellement les déperditions de chaleur par l'enve-

loppe. Elle contraint en outre les solutions PAC envisageables dans les scénarios technologiques (cf. *supra*). La compacité est liée essentiellement au degré de contiguïté avec les logements mitoyens : elle relève donc de propriétés de forme urbaine notamment dans le cas de la maison individuelle (en effet, pour le logement collectif, la compacité est de fait élevée à cause de la disposition en étage des logements, ce qui réduit, dans les mêmes proportions, les impacts directs de la mitoyenneté). Cette propriété est relativement significative pour les tissus urbains denses surtout lorsque ceux-ci possèdent une forte proportion de maisons individuelles. Approcher cette dimension du bâti est plutôt difficile en termes quantitatifs. Les données sont quasi inexistantes dans ce domaine et ne peuvent être construites qu'à partir d'un croisement obtenu à partir de données spatialisées. C'est cette option qui a été adoptée dans le cadre de l'étude. Le croisement a été effectué à partir de la base de données RGP99, de la base spatialisée Corine Land Cover (CLC) de l'IFEN et de BD Communes de l'IGN.

Un traitement sur ces deux dernières bases a permis d'estimer la surface occupée dans une unité d'analyse (la commune, le département, etc.) par les trois types de tissu considérés comme déterminants dans la définition de la contiguïté : les

Figure 34 : Extrait du traitement des bases de données CLC pour le nord de la France (en 2000)



Source : IFEN – traitement de LTMU-UTC

tissus continus, les tissus discontinus et la surface communale artificialisée (Figure 34). D'après ces estimations ramenées à l'échelle nationale, le tissu urbain continu ne représente qu'environ 2% de la surface artificialisée contre près de 75% pour le tissu discontinu (il faut préciser toutefois que le protocole de mesure institué par l'IFEN néglige de fait une bonne part de l'artificialisation du sol, notamment par l'élimination des surfaces urbanisées inférieures à 25 ha).

La littérature relative à l'analyse de la forme urbaine (les analyses typtomorphologiques) démontre de manière quasi unanime qu'un bâtiment a une forte propension à être compact d'autant qu'il est ancien et que la part de tissu continu est élevée. Cette propension est, toutes choses égales par ailleurs, plus élevée pour un immeuble collectif que pour une maison individuelle. Elle peut ainsi être traduite, d'un point de vue formel, par la relation qu'elle entretient avec le taux de continuité du tissu, le taux de discontinuité (tous deux estimés à l'échelle de l'unité d'analyse) et la période de construction. Cette relation a pu être exprimée par deux types de règles expertes : d'une part, à travers une règle pour les bâtiments à forte propension de compacité selon la date de construction, d'autre part, à travers une règle pour les bâtiments à faible propension.

La combinaison de ces règles expertes avec les données IFEN établies à l'échelle communale ont permis de déterminer les probabilités qu'un logement appartienne à un tissu compact ou non. Pour simplifier, cette probabilité est d'autant plus forte que le logement est ancien, collectif et que pour la commune à laquelle il appartient, la part de tissu continu est élevée (Figure 35).

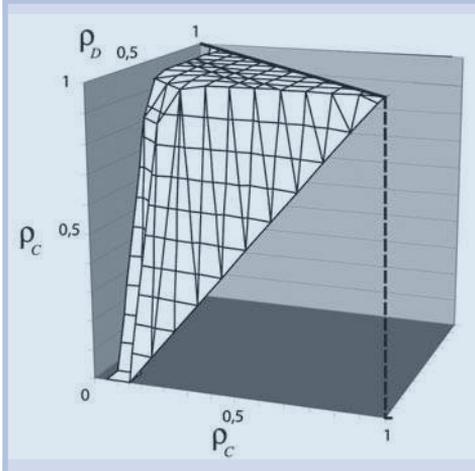
La probabilité moyenne par période de construction appliquée sur le parc de logement national est exprimée dans le tableau 10. Traduite en effectifs, elle donne la distribution présentée Figure 36.

Application d'une simulation statique appliquée au parc existant en 2000 tenant compte de la morphologie du tissu urbain

Ces estimations couplées aux scénarios technologiques vus plus haut permettent d'évaluer grossièrement les gisements physiques des PAC.

Compte tenu des hypothèses sur lesquelles reposent les scénarios, les logements prêts à être équipés de dispositif à capteurs horizontaux constitueraient un total de 8,16 millions de logements individuels dont près de la moitié serait des maisons construites après 1975. Les 5,4 millions de maisons individuelles restantes, implantées dans des tissus urbains plus compacts, pourraient alors être équipés de PAC eau/eau avec des capteurs verticaux, des mini-réseaux ou des réseaux de chaleur plus vastes. Les gains seraient alors pour ce segment légèrement plus importants vu la prédominance des maisons anciennes qui n'ont pas fait l'objet d'une isolation réglementaire (78 %). L'ensemble des maisons individuelles tendrait alors vers une consommation unitaire moyenne d'un peu plus 50 kWh/m²/an. En l'équipant entièrement de systèmes disposant

Figure 35 : Relation entre le taux de discontinuité, de continuité et la probabilité de contiguïté pour une époque de construction



τ_c : représentant le taux de continuité du tissu urbain dans l'unité d'analyse (ce taux est égal au rapport entre la surface de tissu continu et la surface artificialisée)

τ_D : représentant le taux de discontinuité du tissu urbain (il représente le rapport entre la surface de tissu discontinu et la surface artificialisée).

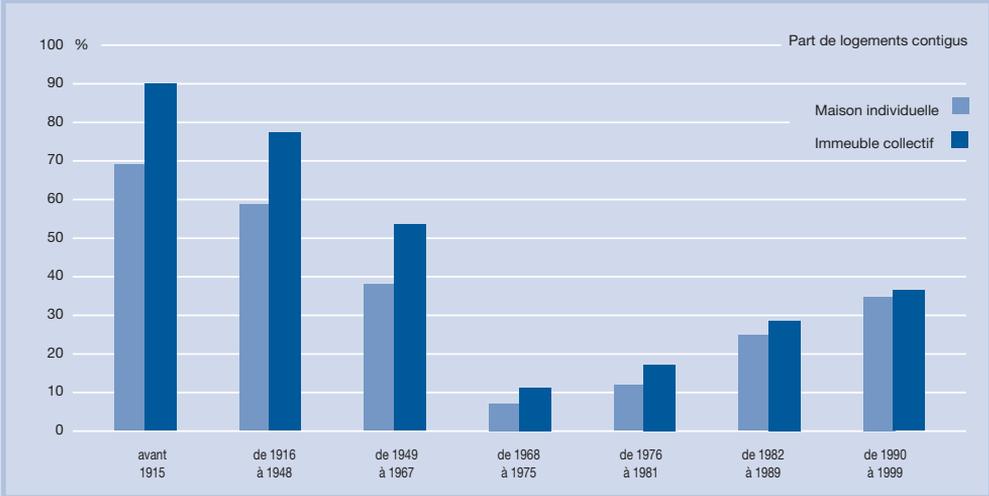
Source : LTMU - UTC

Tableau 10 : Probabilité de contiguïté par époque de construction

Période	avant 1915	1915-48	1949-67	1968-74	1975-81	1982-89	après 1989
ρ	0,51	0,37	0,23	0,06	0,09	0,19	0,27

Source : LTMU-UTC

Figure 36 : Effectifs de logements contigus estimés en pourcentage selon la typologie maison individuelle (MI) et logements en immeuble collectif (IC)

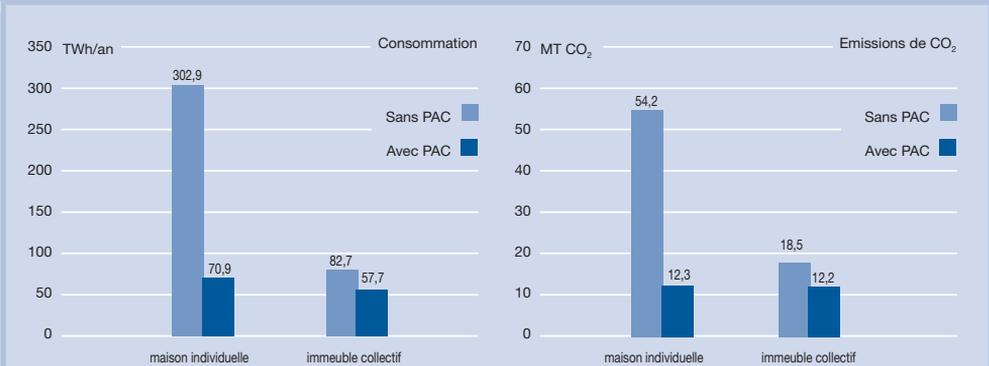


Source : LTMU - UTC

de COP compris entre 2 et 2,7, on réduirait par plus de 4 les consommations (71 TWh) et les émissions globales du segment (13 Mt de CO₂). Sachant que le parc de logements collectifs ne peut être facilement équipé de PAC, notamment les logements qui ne disposent pas d'un chauffage central collectif, soit plus de 5,8 millions de logements sur 10,2 millions, les gains attendus dans ce segment, selon nos hypothèses, sont évidemment bien moindres que pour la maison individuelle. Les PAC eau/eau, air/eau ou dans une moindre mesure air/air, installées sur capteurs verticaux en grande profondeur pourraient doter

près de 2 millions de logements collectifs parmi les 4,4 millions de logements collectifs disposant d'un chauffage central collectif. Les 2,4 millions de logements collectifs restants pourraient être pourvus d'un dispositif géothermique horizontal, de système air/air, air/eau et eau/eau. Ces systèmes, légèrement moins performants que les premiers adoptés pour la maison individuelle, avec des COP compris entre 1,5 et 2,7, permettraient de réduire tout de même de 30 % les consommations totales du segment, logements non équipés de PAC compris. Cette consommation serait alors de l'ordre de 58 TWh avec des émissions de CO₂

Figure 37 : Consommations et émissions de CO₂ globales selon une simulation statique établie sur le parc de logements existant en 2000



Source : LTMU - UTC

de 12 Mt, ce qui ramènerait, à peu de chose près, les dépenses de chauffage et les émissions résultantes de la maison individuelle à celles des immeubles collectifs (Figure 37).

Les scénarios dynamiques

Toutes les hypothèses relatives aux PAC évoquées plus haut ont été énoncées sans tenir compte de la dynamique du parc. Or, nous savons que cette dernière agit significativement sur les consommations et les émissions globales attendues à 2050, notamment à travers l'accroissement du nombre de logements et l'augmentation substantielle des surfaces habitables. D'un point de vue dynamique, le modèle développé ici prévoit deux types de pénétration des PAC dans le parc résidentiel : d'une part, à partir de l'équipement de chauffage des logements neufs tous susceptibles d'être dotés d'une PAC ; d'autre part, à travers le remplacement des équipements dans le parc existant en 2000. Ce dernier moyen revient alors à fixer un taux de substitution qui représente la part annuelle de logements d'une certaine catégorie (cf. *supra* Tableau 9) que l'on équipe d'un type de PAC selon les modalités fixées par un scénario technologique qui n'exclut alors aucun logement (contrairement aux simulations statiques, nous avons considéré qu'il devenait possible de remplacer tous les systèmes de chauffage existant par une PAC même pour les logements collectifs équipés d'un chauffage central individuel –pour ce dernier cas, on a jugé que lors des opérations de substitution, le système pouvait être remplacé par un chauffage central collectif couplé à une PAC sol dotée de capteurs verticaux). Le nombre de scénarios envisageables devient de ce fait considérable vu la multitude de leviers disponibles pour enrayer l'alourdissement des charges de

chauffage dans l'habitat. Mais dans cette multitude, nombreux sont les scénarios qui conduisent à des effets identiques sur les bilans globaux. Cette inflation continue également à s'amplifier lorsqu'on cherche, comme dans cette étude, à mettre en concurrence les deux leviers les plus significatifs, à savoir l'amélioration des performances de l'enveloppe du bâti et l'impact de la pénétration des pompes à chaleur. Pour réduire d'une certaine manière ce foisonnement, nous avons, dans un premier temps, préféré nous référer au scénario du « laisser-faire » évoqué plus haut (à savoir aucune action d'amélioration des performances du bâti ancien, cf. scénario «zéro» page 28) afin d'isoler les effets des PAC sur la progression des consommations et des émissions à l'horizon 2050.

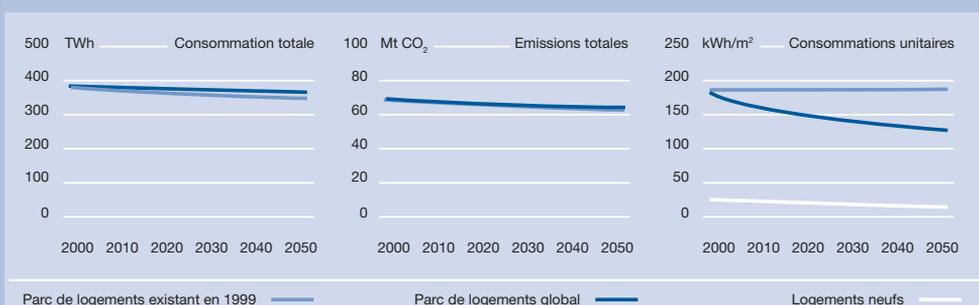
Le couplage des scénarios technologiques à la dynamique du parc résidentiel

Dans une première simulation, sans nuance aucune, nous avons choisi de mesurer l'effet qu'aurait la pénétration des PAC dans la totalité des logements construits après 2000. Il s'agirait alors d'équiper d'une PAC dont le COP avoisine 2 (moyenne pondérée tenant compte de la diversité des technologies PAC) les 200 000 logements par an construits entre 2000 et 2050.

Les consommations unitaires de ces logements seraient alors, en moyenne, proche de 25 kWh/m². Leur impact serait, comme il est à prévoir, bien faible puisqu'il ne concernerait pas plus de 1% du parc du logement chaque année. Le logement neuf réussirait, tout au moins, à stabiliser les consommations et les émissions à leur niveau actuel.

Il est intéressant de noter qu'en ramenant les consommations unitaires de l'ensemble du parc sous la barre des 150 kWh/m²/an (Figure 38), l'équipement en PAC de la totalité du logement neuf

Figure 38 : Scénario 3 - Résultats pour un scénario d'équipement en PAC des logements neufs postérieurs à l'année 2000



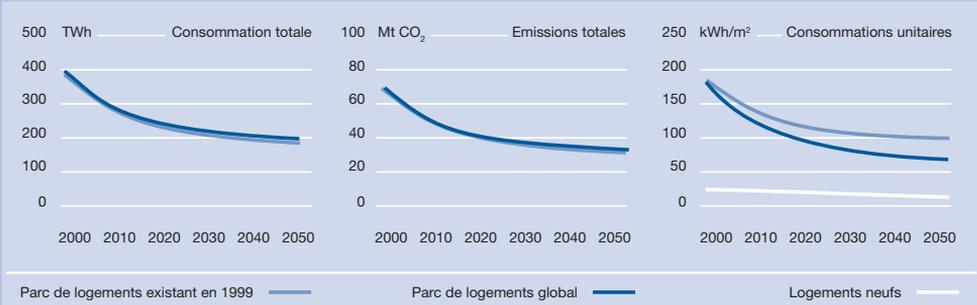
Source : LTMU-UTC

équivalait, à peu de chose près, à une réhabilitation lourde de la totalité du parc existant en 1999 (gain de 20% sur un bâti surconsommant 20%) sur 100 000 logements par an ou une réhabilitation plus légère (10% de gain pour 10% de surconsommation) pour 300 000 logements par an. Dans tous les cas, cette simulation confirme encore une fois le faible poids

du neuf dans le bilan global des consommations et des émissions à l'échelle nationale.

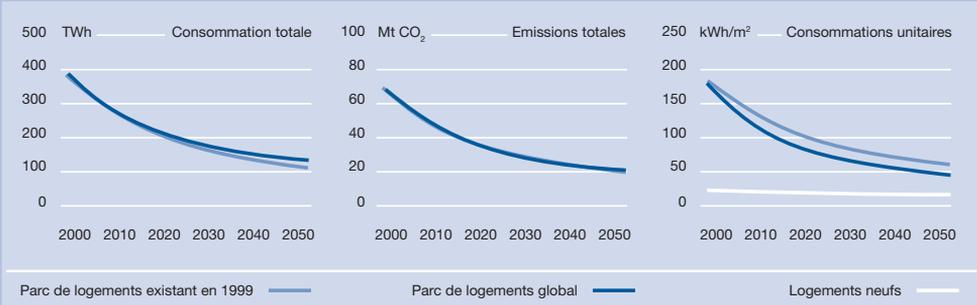
Une autre hypothèse, presque aussi excessive que la précédente, a été de cumuler les effets de la pénétration du même type de PAC dans le logement ancien (le parc d'avant 1975 qui correspond aux deux tiers du parc actuel de loge-

Figure 39 : Scénario 4 - Résultats pour un scénario d'équipement en PAC des logements neufs postérieurs à l'année 2000 et de 2 % par an des logements anciens (ant. à 1975)



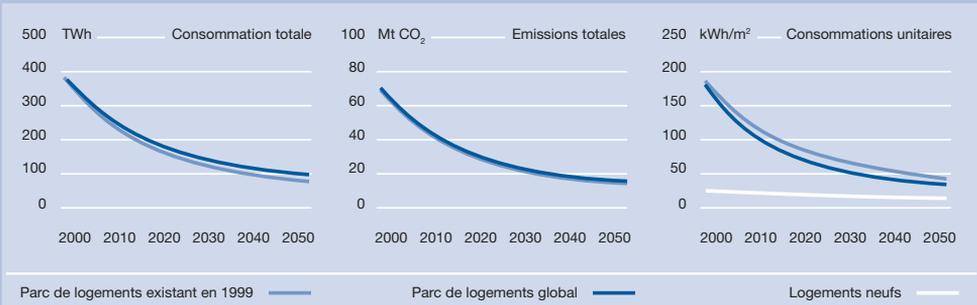
Source : LTMU-UTC

Figure 40 : Scénario 5 - Résultats pour un scénario d'équipement en PAC du parc total à l'horizon 2050



Source : LTMU-UTC

Figure 41 : Scénario F4 - Résultats pour un scénario d'équipement en PAC et de réhabilitation du parc total permettant d'atteindre le facteur 4 à l'horizon 2050



Source : LTMU-UTC

ments, segment le moins performant donc sur lequel les gains sont assurément les plus élevés) et ce, à un rythme supérieur à 2 % par an (de telle manière à couvrir, sans restriction aucune, l'ensemble de ce segment en 50 ans).

Les effets de ces mesures sont bien entendu considérables. Ces dernières procurent au parc existant en 2000 un niveau de consommation unitaire moyen (atteint en 2050) équivalent à celui du parc neuf correspondant à la RT2000, soit 110 kWh/m²/an (Figure 39). Avec la participation du neuf (équipé de PAC de performance comparable et, rappelons-le, soumis à une réglementation thermique), la consommation unitaire moyenne de l'ensemble du parc s'approche des 75 kWh/m²/an, en 2050, soit une valeur proche des besoins théoriques de chauffage pour le neuf d'aujourd'hui. Autrement dit, l'introduction massive des PAC sur deux segments du parc de logement permet, à l'horizon 2050, d'atteindre un rendement global, à l'échelle nationale, légèrement supérieur à 1. En découle une réduction d'un facteur de 1,75 des consommations et d'un facteur 2 des émissions (si l'on ne tient pas compte de l'effet sur la courbe de charge de la multiplication des PAC et sur le contenu CO₂ du kilowattheure électrique).

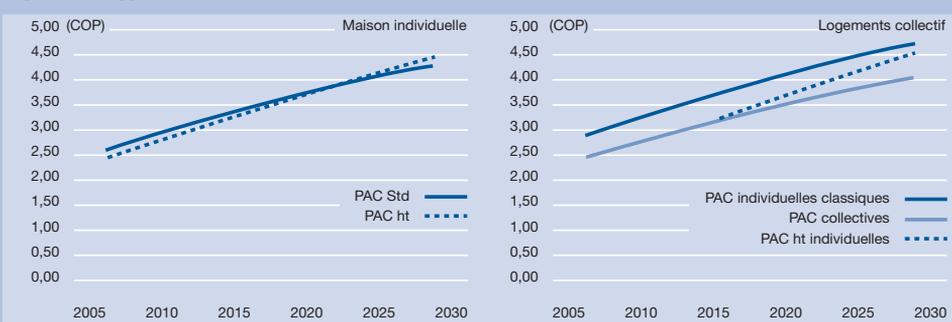
Enfin, si l'on considère que l'ensemble du parc (inclus les logements soumis à une réglementation thermique depuis 1974) est équipé d'une PAC à l'horizon 2050 (soit 620 000 logements par an) alors la consommation moyenne des logements atteindra 50 kWh/m²/an pour réduire d'un facteur 3,5 les GES et d'un facteur proche de 2,6 la consommation du parc (qui sera finalement tout électrique) (Figure 40).

La contribution des PAC dans les scénarios facteur 4

Atteindre le facteur 4 est par conséquent théoriquement réalisable dans un scénario pour lequel on généralise l'emploi des PAC. Un certain complément est néanmoins nécessaire et peut être fourni par l'amélioration de l'enveloppe du bâti. Dans le dernier scénario étudié, on a donc cumulé les effets des PAC avec des opérations de réhabilitation thermique du bâti. Les logements sont alors équipés d'une PAC et réhabilités au moins une fois dans la période. Le facteur 4 est alors atteint sans conteste notamment lorsque le gain sur les consommations sont de l'ordre de 20% par rapport à la moyenne (et affecte des logements dont la vétusté augmente leur consommation de 20% par rapport à la moyenne) (Figure 41).

Bien entendu, là encore, il est nécessaire de considérer l'hypothèse selon laquelle le contenu CO₂ du kWh électrique pour le chauffage n'augmentera pas dans le temps. En effet, la part de la consommation d'électricité pour le chauffage passerait de 40 TWh en 2000 à plus de 100 TWh en 2050. Cette critique peut néanmoins être atténuée par deux éléments majeurs. D'une part, contrairement aux simulations ci-dessus, il est prévisible que les COP s'améliorent de manière significative dans les cinquante années à venir. Le doublement de leur valeur est tout à fait envisageable à l'horizon de l'étude et pourrait largement compenser les effets pervers observés sur le facteur d'émission de l'électricité (qui sont, rappelons-le, probables mais pas inéluctables lorsqu'on renforce la part des ENR dans la production électrique). Dans ce cadre, la part de la consommation électrique pour le chauffage ne changerait pas dans le temps, la

Figure 42 : Hypothèses d'évolution des COP à l'horizon 2030



MI : maison individuelle, LC : logement collectif, MTD : meilleure technique disponible.

Source : Marie-Hélène Laurent EDF R&D et al. Les systèmes énergétiques des bâtiments résidentiels de demain, rapport final pour le PUCA.

Tableau 11 : Scénarios dynamiques à l'horizon 2050 incluant la pénétration des PAC

Scénarios	3	4	5	Facteur 4
Réhabilitation (en nombre de logts/an)	aucune	aucune	aucune	100 000** (datant d'avant 1999)
Equipements de chauffage du parc existant en 2000	parts de marché constantes	Equipement de PAC de 2%/an du parc datant d'avant 1975 avec un COP=2,5	Equipement de PAC de 2%/an de tout le parc avec un COP=2,5	Equipement de PAC de 2%/an de tout le parc avec un COP=2,5
Equipements de chauffage du parc neuf après 2000	totalément équipé de PAC COP=2,5	totalément équipé de PAC COP =2,5	totalément équipé de PAC COP =2,5	totalément équipé de PAC COP =2,5
Consommation totale du parc en 2050 (en TWh)	378	200	130	100
<i>Facteur de réduction des consommations</i>	1	1,9	3	3,9
Emissions totales du parc en 2050 (en Mt)	62	32	20	15
<i>Facteur de réduction des émissions</i>	1,2	2,3	3,6	4,8
Consommation moyenne du parc en 2050 (en kWh/m ² /an)	125	70	57	48
Consommation moyenne en 2050 des logements existants dans le parc 2000 (en kWh/m ² /an)	180	100	48	27
Consommation moyenne en 2050 des logements construits après 2000 (en kWh/m ² /an)	20	20	20	20

* : gain de 20 % par rapport à la consommation moyenne pour une surconsommation de 20 % par rapport à la moyenne.

** : gain de 10 % par rapport à la consommation moyenne pour une surconsommation de 10 % par rapport à la moyenne.

*** : avec amélioration des équipements.

Source : LTMU/UTC.

progression des COP compensant l'augmentation des utilisations (en nombre) de l'électricité dans le chauffage du parc.

D'autre part, la réhabilitation doit être vue comme une opération dont le rôle dépasse l'ajustement au facteur 4. En effet, les puissances des PAC sont plus basses lorsqu'on les applique à un bâti performant pour lequel on appelle une tem-

pérature maximale du système de chauffage inférieure à 50°C. Les PAC utilisables sont alors des PAC de technologies classiques, et l'utilisation en « basse température » améliore leur rendement. La réhabilitation devient dans ce cas une action nécessaire si l'on tient à employer dans les meilleures conditions, et de la façon la plus large possible, ces technologies.

Conclusion

Les grandes masses d'économies d'énergie offertes par les PAC sont, dans le cadre d'hypothèses maximalistes appliquées à l'ensemble du parc de logement, considérables. A l'échelle d'un bâtiment, les gains sont bien supérieurs au COP lorsqu'on procède à une substitution des équipements dans les logements du parc existant aujourd'hui.

Les PAC sont sans aucun doute un moyen de rendre plus performants les logements et peuvent accompagner sans conteste les politiques d'amélioration de l'habitat existant (et des réglementations pressenties pour l'inciter). En effet, quelle que soit l'option adoptée pour réduire les consommations, les PAC peuvent répondre techniquement –et hors de toute considération économique- aux diverses contraintes qui se posent dans les opérations d'amélioration.

Nous l'annonçons en introduction de cette étude, les leviers dont dispose le secteur du bâtiment pour réduire les consommations de chauffage sont très nombreux. Ils concernent autant les performances de l'enveloppe (son isolation) que les équipements qui répondent aux besoins énergétiques. C'est notamment par une action sur ces deux leviers que la réglementation thermique cherche, depuis 2000, à contrôler les consommations et non plus les besoins : il est ainsi aujourd'hui admis que les économies substantielles de chauffage ne peuvent être vues qu'à partir de l'intégration du couple formé par l'isolation du bâtiment et l'amélioration du système de chauffage. C'est ce que démontre aussi cette étude en mettant en évidence les gains engendrés par la réhabilitation du bâti et la substitution des équipements par des PAC.

Mais ce couple ne peut être toujours mis en œuvre, en particulier dans le cadre du bâti très ancien (près de 5 millions de logements occupés en 2000 ont été construits avant 1915). Parmi ces logements dont nombre font partie du patrimoine historique, le respect de la qualité architecturale peut interdire des solutions simplistes et univoques qui chercheraient coûte que coûte à isoler l'enveloppe du bâti (que ce soit par l'intérieur ou l'extérieur). Il n'est par conséquent pas sûr de pouvoir exploiter la totalité des gisements théoriques. Dans ces cas, les PAC peuvent sans conteste représenter une solution alternative (ou complémentaire à une réhabilitation légère, vitrage et toiture). De 240 kWh/m²/an en maison individuelle à un peu plus de 100 kWh/m²/an en immeuble collectif (pour le segment datant d'avant 1915), la géothermie pourrait, par exemple, amener ces consommations à environ 30 kWh/m²/an. Mais là encore, les gisements ne pourront pas être tous exploités car, comme nous l'évoquions, ces logements appartiennent le plus souvent à des tissus urbains denses et contigus (d'après notre estimation pour plus de 80 % d'entre eux), ces tissus excluant les solutions fondées sur les PAC sol en capteurs horizontaux et les PAC air. Les difficultés d'installer des PAC sol avec capteurs verticaux peuvent également être accentuées par l'encombrement de la sub-surface qui interdit la multiplication des forages. Dans ces cas, seules des solutions collectives à des échelles plus larges sont envisageables : à l'échelle urbaine grâce à des réseaux de chaleur urbains à partir de la géothermie en grande profondeur, à des échelles intra-urbaines plus réduites à partir de mini-réseaux alimentant un îlot ou un groupement de logements, ou enfin, à des échelles d'association très réduites, à travers des micro-réseaux desservant deux ou trois bâtiments mitoyens ou très proches. Ces installations mutualisées ont l'avantage de réduire le nombre de forages et éventuellement de profiter des réseaux déjà existants. Néanmoins, ces avantages peuvent être dépréciés par les inconvénients liés à la forme collective de la gestion des charges de chauffage, forme qui engendre généralement des surconsommations importantes (jusqu'à 30 % par rapport aux besoins).

Les gisements où, a priori, le couple de leviers que nous évoquions plus haut (PAC et réhabilitation) peut fonctionner le plus aisément, concernent le bâti intermédiaire construit pendant le XX^e siècle, notamment celui des années 1970. Il paraît assez aisé de poursuivre l'amélioration des performances

par l'isolation (lorsque la qualité architecturale l'autorise bien sûr) et de profiter des faibles contiguités et de la disponibilité d'espace foncier pour épuiser les solutions PAC. Dans le cadre d'opérations de renouvellement urbain et de densification des tissus, ces solutions peuvent être adoptées dans une démarche globale intégrant des logements neufs très performants du point de vue de l'enveloppe. L'ensemble formerait alors une unité de logements avec des besoins relativement bas et pour lesquels la puissance des installations PAC ne serait pas forcément très élevée.

Qu'en est-il des autres besoins dans le logement ? On sait que sur les 241 kWh/m²/an consommé en moyenne par un logement, 75 % sont consacrés au chauffage, 10 % à l'eau chaude sanitaire (ECS), 10 % aux usages spécifiques (US) et 5 % à la cuisson. Or, les PAC peuvent participer à la réduction des consommations liées à l'ECS avec des rendements proches de ceux du chauffage. Avec un COP supérieur à 3, la part du chauffage et de l'ECS, aujourd'hui proche de 85 % des consommations, passerait à 64 % des 100 kWh/m²/an qu'absorberait alors un logement. D'un point de vue prospectif, même si les consommations liées à l'ECS sont moins tributaires de l'augmentation de la surface habitable, le total sur l'ensemble du parc, aujourd'hui de 50,4 TWh/an passerait à 12 TWh/an avec une PAC de COP de 3 selon un scénario établissant les besoins d'ECS à 600 kWh/personne/an en 2050 (ce qui reviendrait, compte tenu de l'évolution démographique et des rendements moyens des équipements ECS, à une économie totale de 34,5 TWh en 2050²⁵ par rapport à un parc qui ne ferait aucun recours aux PAC).

Du point de vue de la production de froid dans les logements (rafraîchissement ou climatisation en été), les PAC permettent de réduire substantiellement les consommations à l'échelle d'un logement qui aurait adopté, en ce qui concerne sa climatisation, des équipements mobiles. Dans cette option, la production de froid pourrait contribuer à la régulation de la température de la source, notamment des nappes phréatiques, grâce au principe de réversibilité (même si les effets de la réversibilité ne sont pas parfaitement connus et qu'il demeure préférable, sachant que la climatisation active n'est pas une fatalité inévitable, de favoriser les solutions passives –surtout dans le neuf).

Quels efforts doit poursuivre la technologie PAC pour répondre aux enjeux mis en évidence dans cette étude ?

Outre l'amélioration des COP machine (vers lequel la filière s'oriente assez naturellement), il s'agit bien entendu d'améliorer les rendements de l'ensemble des auxiliaires qui compose le système. Cette amélioration concerne autant la distribution et l'émission que le développement de technologie pouvant s'articuler aisément aux systèmes existants. Le frein à l'installation de PAC est en effet souvent causé par l'ampleur des travaux de rénovation des systèmes de distribution et d'émission.

Les efforts de la filière, en particulier en France, doivent également s'orienter vers l'amélioration des techniques de forage. Si la part des PAC air est actuellement si importante (plus de 60 %), c'est en partie dû aux coûts élevés et la faible flexibilité des opérations sur le sous ou le sub-sol. Afin d'opérer sur le logement ancien, il devient indispensable d'augmenter la portabilité des matériels et de développer des solutions de chantiers sur des espaces exigus et encombrés.

En outre, les conséquences de ces forages et de l'exploitation du sous-sol, notamment des nappes phréatiques, doit être particulièrement analysé. Aujourd'hui, les effets de la réversibilité (considérée comme un bon régulateur des températures des sources) ne sont pas connus avec finesse lorsqu'ils sont effectués à grande échelle. Que deviendraient ces sources si l'exploitation du sous-sol s'intensifiait ? Comment évolueraient alors les températures lors d'appels fortement concentrés dans le temps ? Outre les problèmes sur les équilibres du sous-sol, comment et de combien seraient réduits les rendements des systèmes ?

Bibliographie

- Barles S., sous la direction de, Espace et urbanisme souterrains, actes, Paris La Villette, sept. 1995.
- BRGM, *Géothermie très basse et basse énergie : Une énergie du développement durable*, Les enjeux des géosciences, Fiche de synthèse scientifique N°10, avril 2005.
- Cahier du CLIP N° 12, avril 2001
- Cahier du CLIP N° 13, mai 2001
- Cahier du CLIP, N° 16, septembre 2004.
- DGEMP - Observatoire de l'énergie (2004a), *Bilan énergétique de la France en 2003*, 25 p.
- DGEMP - Observatoire de l'énergie (2004b), *L'énergie en France*, collection chiffres clés,
- DGEMP - Observatoire de l'énergie (2004c), *L'énergie*, collection chiffres clés, repères,
- DGEMP - Observatoire de l'énergie (2005), *Bilan énergétique de la France en 2003*, 25 p. édition 2004, 33 p.
- Freymond A., *La pompe à chaleur en Suisse romande, Vue d'ensemble du Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur*, Bulletin SEV/VSE 23/03.
- Girault, M., (2000), *Les économies d'énergie de chauffage depuis 25 ans dans le résidentiel*, Notes de synthèse du SES
- Laporthe S., *Petit guide des pompes à chaleur géothermales*, CSTB, Document de travail n° DDD/ESE-04.010 OS, mars 2004.
- Lincot, L et Rieg, C (2003) *Les conditions de logement des ménages en 2002*. Enquête logement 2002, INSEE Résultats°20, octobre 2003.
- MIES - Ministère de l'Ecologie et du Développement (2004), *Plan Climat 2004*, 88p.
- Mouillart M., L'Observatoire de l'habitat existant 1996-2004, Tome VII, Fédération Française du Bâtiment, ANAH, 2005.
- Observatoire de l'énergie, *20 ans de chauffage dans les résidences principales en France de 1982 à 2002*. Octobre 2004. repères, édition 2004, 205 p.
- SER, La lettre du SER, N°9, février 2006.
- SES, *La consommation d'énergie du tertiaire : une croissance partiellement maîtrisée*, Notes de Synthèses du SES, mai-juin 2002.
- Traisnel J.P., Maizia M., in Charles Raux et. al, ETHEL, Energie Transport Habitat Environnement Localisations, rapport N° 3, CNRS, 2006.

Notes

- 1 Enfin, outre les questions technologiques et les conséquences sur l'écosystème, la filière devra se poser la question de la réduction des coûts et des modalités de financement pour que cette technologie devienne véritablement attractive aux yeux des usagers. Dans une estimation globale, elle devra tenir compte des coûts énergétiques globaux (analyse du cycle de vie des systèmes), pour concilier économie énergétique et économie d'énergie.
- 2 Cahier du CLIP N° 13, mai 2001
- 3 Cahier du CLIP, N° 16, septembre 2004.
- 4 Notamment l'arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration (en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement) ; et l'article 131 du code minier.
- 5 Stéphanie Laporte, Petit guide des pompes à chaleur géothermales, CSTB, Document de travail n° DDD/ESE-04.010 OS, mars 2004.
- 6 D'après AFPAC.
- 7 La lettre du SER, N°9, février 2006.
- 8 BRGM, « Géothermie très basse et basse énergie : Une énergie du développement durable », Les enjeux des géosciences, Fiche de synthèse scientifique N°10, avril 2005.
- 9 La proportion des PAC air/air peut sembler ici surévaluée. Les discussions qui ont eu lieu avec la profession au sein de l'AFPAC pour essayer d'évaluer ce marché ont montré que même les fabricants étaient dans l'incapacité de donner des chiffres précis. On évalue toutefois à quelques milliers (3 à 4 000) le nombre d'installations réalisées par an – mais sans aucune certitude. Notons par ailleurs qu'avec les PAC air/air se pose le problème de la frontière entre climatiseurs réversibles (qui sont des PAC air/air mais dimensionnés avant tout pour produire du froid et qui peuvent être utilisés en hiver comme chauffage d'appoint, ces systèmes se vendant par centaines de milliers) et des PAC air/air centralisées qui sont conçues comme un vrai système de chauffage (système RIBO par exemple). Certaines sources donnent un marché en France – dans la maison individuelle - se répartissant jusqu'en 2004 comme suit : dans le neuf, on aurait une part de 60% de PAC dites géothermiques (dont 60% de PAC à détente directe - sol/sol ou sol/eau - et 40% de PAC eau) et 40% de PAC sur air (essentiellement des PAC air/eau). Dans l'existant, on installerait essentiellement des PAC sur air. Alors que jusqu'en 2004, le marché se faisait essentiellement dans le neuf, en 2005, avec l'augmentation du coût des énergies et l'instauration d'un crédit d'impôt de 40% pour les PAC on a vu une très forte augmentation du nombre de PAC installées dans l'existant – des PAC air/eau en relève de chaudière existante.
- 10 Il faut noter toutefois que ces chiffres sont difficilement comparables entre eux. En effet, il apparaît que la Suède adopte volontiers des PAC/VMC-double flux, dont les performances énergétiques sont très différentes de celles généralement installées en France.
- 11 A. Freymond, *La pompe à chaleur en Suisse romande, Vue d'ensemble du Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur*, Bulletin SEV/VSE 23/03.
- 12 Données de 2000 (Turki, 2002) à partir de l'enquête du CEREN.
- 13 Girault (2001) pour l'année 1997 indique que le chauffage représente la moitié de la consommation d'énergie du tertiaire, la cuisine et l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) représentent environ 11% et l'électricité spécifique 38% (sur la base des consommations exprimées en Mtep). Les données diffusées par l'Observatoire de l'énergie pour l'année 2000 (Observatoire de l'énergie, 2004c, p.177) indiquent 34% pour le chauffage, 37% pour l'ECS et la cuisson, 29% pour l'ES. Ces différentes données sont issues de sources différentes (CEREN, producteurs d'énergie, SES).
- 14 Cette étude se limite à l'analyse du parc des résidences principales. N'apparaissent donc pas les variations de consommations et d'émissions résultant de l'occupation des logements secondaires.

- 15 Cette estimation ne tient pas compte des dernières révisions de l'INSEE qui prévoit une population à l'horizon 2050 de 70 millions d'habitants. Isabelle Robert-Bobée, « *Projection de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050* » INSEE première N° 1089, juillet 2006.
- 16 Bien sûr, ces simulations proposent des évolutions du parc très lissées. On est loin, notamment pour 2005, des 450 000 ou 500 000 logements construits. Il est toutefois utile de préciser que notre modèle tient compte du logement neuf effectivement occupé par un ménage à l'année considérée. Il ne quantifie donc pas l'activité de la construction neuve mais bien l'occupation par les ménages des logements neufs construits dans l'année.
- 17 Ce calcul a été réalisé grâce à une collaboration étroite avec le bureau d'étude *Energies Demain*.
- 18 20 ans de chauffage dans les résidences principales en France de 1982 à 2002. Observatoire de l'énergie. Octobre 2004.
- 19 Notamment l'ANAH par l'intermédiaire de l'Observatoire de l'habitat existant. Malheureusement cette source, qui distingue le gros entretien (dont le montant par ménage est de l'ordre de 14 900 € pour 9,5 % des résidences principales) et le petit entretien (30,3 %) n'approche cette question qu'en termes économiques. La diversité des gestes sur le bâti relevant des coûts analysés par l'ANAH nécessite par conséquent des hypothèses supplémentaires dont l'emboîtement risquait de rendre peu lisible cette étude. Cf. Michel Mouillart, L'Observatoire de l'habitat existant 1996-2004, Tome VII, Fédération Française du Bâtiment, ANAH, 2005.
- 20 Dont environ 3 millions de gestes pouvant avoir un impact positif sur l'efficacité énergétique des logements (changement de chaudière, de vitrage, etc.).
- 21 On estime ces consommations grâce au calcul intermédiaire des besoins de chauffage.
- 22 Au vu des usages actuels des PAC, on considère généralement que c'est la climatisation du tertiaire qui dégrade l'état thermique des nappes et que c'est le chauffage qui joue le rôle de compensateur.
- 23 Galeries consacrées aux réseaux de transport ou à l'assainissement ou reliquats d'une exploitation minière.
- 24 Sabine Barles, sous la direction de, Espace et urbanisme souterrains, actes, Paris La Villette, sept. 1995.
- 25 Ce scénario se fonde sur l'hypothèse d'une couverture totale des besoins en ECS de la population avec, en 2050, une réduction des volumes d'eau consommés de 30 %. Le rendement complet moyen (distribution, stockage, équipement) est pris proche de 0,8. Cf. Jean-Pierre Traisnel, Mindjid Maïzia, in Charles Raux et. al, ETHEL, Energie Transport Habitat Environnement Localisations, rapport N° 3, CNRS, 2006.

N°1 - Octobre 1993 - ☒

- ▶ Le moteur à explosion : exercice de prospective mondiale des transports routiers
- ▶ L'autocondamnation : un exercice de prospective mondiale à long terme pour l'automobile
- ▶ Capture et stockage du gaz carbonique produit par les activités industrielles

N°2 - Mai 1994 - ☒

- ▶ Les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe
- ▶ Etude comparative des émissions de polluants associées à l'utilisation de carburants de substitution
- ▶ Emissions de gaz à effet de serre : de la production d'hydrogène à son utilisation en tant que carburant automobile

N°3 - Octobre 1994 - ☒

- ▶ Le bois-énergie en France : évaluation prospective du potentiel mobilisable à l'horizon 2015 et ses conséquences sur l'environnement

N°4 - Juin 1995 - ☒

- ▶ Etude de faisabilité d'une centrale solaire en Tunisie
- ▶ Impact environnemental d'une désulfuration poussée des gazoles

N°5 - Juillet 1996 - ☐

- ▶ Déchets-Energie-Environnement : étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020

N°6 - Septembre 1996 - ☐

- ▶ Le bois-électricité : Perspectives de développement de la production d'électricité à base de bois en France à l'horizon 2015
- ▶ Pollution des sols : Contamination des sols par les rejets d'hydrocarbures : analyse du marché de la réhabilitation

N°7 - Janvier 1997 - ☐

- ▶ MDE-L'éclairage en France : diffusion des technologies efficaces de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'éclairage en France

N°8 - Janvier 1998 - anglais/français - ☒ ☐

- ▶ Le bois-énergie en Europe : évaluation du potentiel mobilisable à l'horizon 2020, impacts sur l'environnement global et conditions socioéconomiques de sa mobilisation.

N°9 - Décembre 1998 - ☒ ☐

- ▶ Automobile et développement durable : bilan environnement-matières premières 1975-2050
- ▶ Automobile et gaz naturel : scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

N°10 - Septembre 1999 ☐

- ▶ Biomasse et électricité
- ▶ Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 - ☒ ☐

- ▶ Le froid domestique : étiquetage et efficacité énergétique

N°12 - Mars 2001 - ☒ ☐

- ▶ Parc automobile et effet de serre : agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre

N°13 - Avril 2001 - ☒ ☐

- ▶ Habitat et développement durable : bilan retrospectif et prospectif
- ▶ Le véhicule électrique à l'horizon 2050 : introduction du véhicule électrique dans le parc français des véhicules particuliers à l'horizon 2050

N°14 - Octobre 2001 - ☒ ☐

- ▶ Transports à l'horizon 2030 : Le secteur des transports en France à l'horizon 2030 selon le scénario «Etat protecteur de l'environnement» du Commissariat Général du Plan

N°15 - Janvier 2004 - ☒ ☐

- ▶ Cogénération et émissions de CO₂ : Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur les émissions de CO₂ en France

N°16 - Septembre 2004 - ☒ ☐

- ▶ Habitat et développement durable : les perspectives offertes par le solaire thermique
- ▶ Emissions de particules : étude prospective sur les émissions de particules primaires en France à l'horizon 2030

N°17 - Septembre 2005 - ☒ ☐

- ▶ Évaluation du potentiel de capture et de stockage géologique du CO₂ dans le monde
- ▶ Les réductions potentielles d'émissions de CO₂ par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050

☒ Version imprimée disponible - ☐ Format électronique (Acrobat pdf) disponible sur le site www.iddri.org - ☒ Epuisé
 Pour toute demande d'exemplaire ou renseignement, veuillez contacter :Carine Barbier - IDDRI : carine.barbier@iddri.org