



# CLIP

NUMÉRO 20 ■ NOVEMBRE 2010

## **Habitat Facteur 4**

ÉTUDE D'UNE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS  
DE CO<sub>2</sub> LIÉES AU CONFORT THERMIQUE  
DANS L'HABITAT À L'HORIZON 2050



# Habitat Facteur 4

ÉTUDE D'UNE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> LIÉES AU CONFORT  
THERMIQUE DANS L'HABITAT À L'HORIZON 2050

Liste des membres :

**ADEME :**  
Agence de l'Environnement et  
de la Maîtrise de l'Énergie  
**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'Études  
de la Pollution Atmosphérique  
**CEA :**  
Commissariat à l'Énergie Atomique  
**EDF :**  
Électricité de France  
**GDF-SUEZ :**  
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'Électricité 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

Auteurs :

M. Jean-Pierre TRAISNEL, Laboratoire : LATTS, UMR CNRS 8134, jean-pierre.traisnel@wanadoo.fr  
M. Damien JOLITON, Énergies Demain, damien.joliton@energies-demain.com  
Mme Marie-Hélène LAURENT, EDF - R&D, Département ENERBAT, marie-helene.laurent@edf.fr  
Mme Sylvie CAFFIAUX & M. Anthony MAZZENGA, GDF SUEZ, Centre de Recherche et Innovation Gaz et  
Énergies Nouvelles, sylvie.caffiaux@gdfsuez.com - anthony.mazzenga@grdf.fr

<b>Éditorial</b>	<b>3</b>
<b>Synthèse</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>Le champ de l'étude : le parc de logements en métropole</b>	<b>12</b>
Les caractéristiques du parc de résidences principales	12
La construction neuve et les mouvements dans le parc	13
Les scénarios démographiques à 2050	16
Le modèle dynamique de parc	19
<b>Les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub></b>	<b>23</b>
Les grandes masses	23
Le parc de logements et les consommations d'énergie	27
<b>Prospective « Facteur 4 » de la demande énergétique à 2050</b>	<b>34</b>
Les mesures adoptées dans les politiques publiques	34
La demande d'énergie dans le neuf	36
La réduction de la demande de chauffage dans le parc existant	38
Les évolutions technologiques : dispositifs de chauffage et de production d'ECS	42
Le solaire thermique et la production d'eau chaude sanitaire	44
<b>Les quatre scénarios énergétiques</b>	<b>47</b>
Les principes adoptés : le choix de l'énergie de chauffage est déterminant	47
Les champs d'application des énergies	48
Synthèse des résultats à 2050	54
<b>L'analyse des résultats et les perspectives</b>	<b>67</b>
Le point de passage à 2020 et les décisions du Grenelle de l'environnement	67
Les problèmes posés par l'ensemble des scénarios : l'importance de la réhabilitation	68
Les scénarios bois : la question de la disponibilité de la ressource	72
Les contenus CO <sub>2</sub> des énergies dans les différents scénarios	75
Les ressources complémentaires à explorer : surfaces habitables, morphologies et technologies	81
<b>Conclusion</b>	<b>83</b>
<b>Annexes</b>	<b>86</b>
<b>Liste des abréviations et acronymes</b>	<b>98</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>99</b>
<b>Notes</b>	<b>100</b>
<b>Numéros précédents des Cahiers du CLIP</b>	<b>104</b>

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



Directeur de publication : Michel Colombier

Édition : Pierre Barthélemy

Maquette : Ivan Pharabod - philabs

Contact : Pierre Barthélemy - pierre.barthelemy@iddri.org - T/+33 (0)1 45 49 76 66

Cette étude a bénéficié du soutien financier de :

ADEME  
MEEDDM (DGALN/DHUP)

Et d'un autofinancement de :

Énergies Demain  
EdF, R&D, Département ENERBAT  
GDF SUEZ, Centre de Recherche et Innovation Gaz et Énergies Nouvelles

Un comité de pilotage en a assuré l'encadrement :

Carine Barbier (Iddri)  
Michel Gioria (Ademe)  
Olivier Servant (MEEDDM/DGALN)  
Régine Trottignon (Ademe)  
Éric Vidalenc (Ademe)

Les auteurs remercient pour leur collaboration :

Hervé Delas (GDF SUEZ)  
Prabodh Pourouchottamin (EdF)  
Ainsi que l'ensemble de l'équipe d'Énergies Demain pour le travail de simulation et de relecture.

# Éditorial

*L'objectif des lois du Grenelle de l'environnement de 2009 et 2010 est de réduire la consommation énergétique de la France de 17% par rapport à la tendance en 2020. Le secteur du bâtiment concentre une grande partie de ces efforts avec une réduction de la consommation énergétique du parc bâti existant de 38%, auxquels s'ajoute le renforcement de la réglementation thermique dans le neuf vers le standard Bâtiment à Basse Consommation (BBC). Alors que les décrets d'application seront adoptés dans les mois prochains, le chemin pour parvenir à un tel objectif reste aujourd'hui en débat. Il est probable que les mesures prévues dans le Grenelle 2, restant basées sur des incitations fiscales et l'approfondissement du Diagnostic de Performance Énergétique, ne seront pas suffisantes pour relever ce défi. L'étude publiée dans ce Cahier du CLIP se veut être une contribution à ce débat.*

*Ce travail d'élaboration de scénarios de réduction par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur de l'habitat en France à l'horizon 2050 fait suite aux précédentes études menées par le CLIP dans ce secteur. La première, publiée en 2001, soulignait l'importance de la rénovation des bâtiments existants pour parvenir à des réductions significatives dans un parc qui évolue peu. Trois autres études ont suivi, sur le solaire thermique, la cogénération et les pompes à chaleur dans l'habitat. Au moment où l'initiative du Grenelle de l'Environnement était lancée, le CLIP a souhaité engager cette étude plus globale, évaluant de manière approfondie les gains d'efficacité énergétique pouvant être obtenus par la rénovation du parc en fonction de ses caractéristiques, de la nature des gestes de réhabilitation envisageables, du rythme nécessaire, et enfin du choix des énergies mobilisées pour atteindre le facteur 4.*

*Le choix a été fait d'une évolution tendancielle du parc en ce qui concerne le nombre de logements, la part des maisons individuelles et des logements en immeubles collectifs dans les constructions neuves, ou encore les surfaces habitables par personne atteignant 45m<sup>2</sup> par personne en 2050. Il n'y a donc pas à ce stade d'inflexion prise en compte dans les modes de vie. En revanche, l'étude fait le pari d'un urbanisme maîtrisé, en référence aux objectifs du Grenelle, se traduisant par un tissu urbain continu en périphérie des villes qui rend possible, dans certains scénarios, un développement important des réseaux de chaleur.*

*L'étude présente un scénario unique concernant l'évolution de la performance énergétique du parc, tant dans la rénovation que dans la généralisation des normes BBC et BEPOS (Bâtiment à énergie positive) dans le neuf. Ce scénario, qui vise à exploiter en très large partie des potentiels de maîtrise de l'énergie dans l'existant, comporte des mesures de réhabilitation dans l'ensemble des logements construits avant 2001. Des bouquets de mesures ont été définis en fonction d'une typologie du parc et nos scénarios ne conduisent donc pas à une performance énergétique uniforme après réhabilitation. Les caractéristiques propres du bâti, tant de l'enveloppe que du type d'implantation urbaine, déterminent ainsi la portée des gestes techniques réalisables.*

*Des scénarios alternatifs sur le mix de d'approvisionnement énergétique des logements sont en revanche proposés, introduisant pour chacun une hiérarchie différente entre les énergies renouvelables, le gaz naturel et l'électricité. Enfin, un bilan est tiré de chaque scénario en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, accompagné d'une étude de sensibilité selon le contenu en CO<sub>2</sub> du kWh électrique. L'atteinte du facteur 4 fait ainsi largement appel aux énergies renouvelables sous forme de bois énergie (souvent couplé à un développement important des réseaux de chaleur), du solaire thermique pour l'ECS, et de la chaleur puisée à l'environnement par les pompes à chaleur.*

*Quelque soit le scénario, l'étude souligne l'ampleur de la mutation nécessaire du parc pour parvenir à une réduction par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> et l'importance du recours à des politiques publiques fortes pour assurer un rythme de réhabilitation soutenu. Certes, l'objectif du Grenelle (réduction des consommations d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de 38% en 2020) est atteint dans tous les scénarios, et l'amélioration du bâti permet une réduction des besoins de chauffage de 50% à 60% à l'horizon 2050. Mais ce résultat est atteint au prix d'un rythme soutenu de réhabilitation de 400 000 logements par an (dont 20% de logements sociaux), et d'une mise en œuvre systématique des bouquets de mesures techniquement envisageables dans les différents sous-secteurs du parc. Les conclusions mettent ainsi en avant l'importance d'opérations de réhabilitation programmées à large échelle, allant bien au-delà des instruments incitatifs disponibles actuellement.*

*De nombreux facteurs, non pris en compte dans cette étude, pourraient conduire à nuancer les résultats de manière positive ou négative : la prise en compte des comportements et de l'effet rebond en particulier, l'évolution des logements et de leur usage sous l'effet de l'évolution des revenus et des prix, les avancées technologiques pour les matériaux ou les systèmes de gestion de l'énergie, etc. Cet exercice de quantification est forcément réducteur, mais permet d'évaluer en ordre de grandeur l'impact de certains choix. Soudhaitons qu'il induise un débat au sein de l'ensemble des acteurs, permettant de l'enrichir par de nouveaux prolongements.*

Michel Colombier, Directeur du CLIP  
Carine Barbier, Iddri

# SYNTHÈSE

La consommation énergétique du parc de logements qui compte, en 2006 pour la métropole, 31 millions de logements dont plus de 26 millions de résidences principales, s'élève annuellement à 560 TWh, soit 30% de la consommation totale d'énergie finale en France. Le chauffage occupe la première place dans les consommations des résidences principales, à 70%, alors que la production d'eau chaude sanitaire (ECS) compte pour 10% du total du secteur. En moyenne pour le parc de construction antérieure à 2001, les niveaux de consommation unitaire (en surface habitable<sup>1</sup>) en chauffage et en ECS sont respectivement de 160 kWh/m<sup>2</sup> et de 23 kWh/m<sup>2</sup> en énergie finale.

Le poids du parc résidentiel dans les émissions de CO<sub>2</sub> relatives aux consommations énergétiques est moins élevé, en raison d'une dépendance moindre aux énergies fossiles en comparaison d'autres secteurs comme les transports. Dans les émissions totales de CO<sub>2</sub> de près de 400 millions de tonnes, le résidentiel représente 21%, à 85 millions de tonnes. Dans ce contexte, l'exercice consiste à identifier différentes trajectoires d'une division par 4 des émissions de dioxyde de carbone dues à la consommation énergétique des résidences principales, pour les deux postes du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire, en s'appuyant sur les meilleures technologies disponibles ou susceptibles de se généraliser avant 2050. L'objectif est d'atteindre 19 ou 20 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pour ces deux postes au terme des quatre prochaines décennies, dans un parc de logements en croissance et à très faible renouvellement. Trois leviers principaux sont identifiés : la réduction des besoins de chauffage (demande), le recours à des équipements énergétiques plus performants (efficacité), le choix d'énergies moins carbonées (substitution).

## L'évolution du parc de logements à 2050

Le parc de logements se caractérise par un renouvellement quasi nul, en raison d'un très faible taux de destructions, de l'ordre de 20 000 à 30 000 unités chaque année. La construction neuve contribue essentiellement à la croissance du parc, qui est demeurée assez stable dans les dernières décennies, au taux annuel de 1 à 1,5% du stock. Ce taux de croissance faiblit à long terme car la dynamique de la construction neuve, activée par l'augmentation du nombre de ménages, devient plus faible dans les décennies à venir. Dans une perspective de moindre croissance de la population, le parc continuera à augmenter sous l'effet de la diminution de la taille des ménages, qui pourrait être réduite à 2 personnes en moyenne en 2050. Ainsi, le secteur comporterait un peu plus de 35 millions de résidences principales en 2050, dont 25 millions sont déjà construites : la ville de 2050 est en moyenne, pour la métropole, déjà construite à 70% en 2005. Cela met en évidence l'importance du stock et de son évolution énergétique.

Bien que certaines tendances semblent contrarier l'objectif recherché, telle la croissance des surfaces habitables de 38 m<sup>2</sup> par personne en 2006 à près de 45 m<sup>2</sup> en 2050, des ruptures plus favorables peuvent être introduites, en particulier dans l'évolution des formes urbaines. Les conditions d'urbanisation adoptées dans nos hypothèses en référence au Grenelle pour la construction neuve sont censées permettre la mise en œuvre massive de réseaux de chaleur urbains, en privilégiant les formes urbaines continues en opposition à la poursuite de l'étalement urbain. Les performances énergétiques visées, au-delà du bâti, s'appliquent également aux ensembles urbains dans leur capacité à réduire les déperditions thermiques des logements, à mettre en place des réseaux de cha-

leur et à capter le rayonnement solaire nécessaire à la production d'ECS (eau chaude sanitaire) et d'électricité photovoltaïque, notamment pour les bâtiments à énergie positive.

## **La construction neuve et la réhabilitation du parc existant**

Les objectifs du Grenelle sont adoptés pour la construction neuve, en référence commune à tous les scénarios : dès 2012 avec la généralisation des logements à basse consommation (BBC), puis à l'horizon 2020 avec une consommation d'énergie primaire devant être inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions (BEPOS, bâtiments à énergie positive) et comptabilisée également en énergie primaire. Parallèlement, des objectifs ambitieux sont affichés pour la réhabilitation du parc existant. La répartition des effectifs et des consommations de chauffage selon la période de construction permet de repérer les principaux gisements de la réhabilitation : les maisons individuelles de construction antérieure à 1949 qui comptent pour le tiers des effectifs, mais pour 45% des consommations de chauffage, ainsi que les logements en immeubles collectifs de la période 1949-1974, qui représentent la part prépondérante des effectifs (44%) pour plus de la moitié des consommations de chauffage.

L'approche retenue pour la partie rénovation consiste à favoriser les gestes de rénovation (bâties et systèmes) les plus efficaces, au rythme des travaux d'entretien classiques : tous les gestes sur l'enveloppe (toitures, planchers bas, ouvertures, façades) sont appliqués une fois, les systèmes énergétiques supportant deux cycles de rénovation avant 2050. La généralisation à l'ensemble du parc de construction antérieure à 2001 de l'isolation thermique par l'extérieur en priorité sur l'isolation intérieure, lorsque les caractéristiques architecturales l'autorisent, d'équipements de ventilation contrôlée (avec récupérateur de chaleur sur l'air extrait le cas échéant), des vitrages à isolation renforcée, permet de réduire en moyenne de 60% les besoins en maison individuelle comme en immeuble collectif.

Des solutions technologiques performantes sont introduites en construction neuve ou en rénovation des équipements de chauffage : pompes à chaleur électriques (les pompes à chaleur gaz étant introduites seulement dans les logements neufs après 2010-2015) en substitution aux chaudières existantes et aux convecteurs électriques,

cogénération à gaz, mini-réseaux de chaleur valorisant la biomasse. Pour le parc de construction antérieure à 2000, le coût moyen par logement se situerait entre 12 700 € HT et 24 200 € HT, hors rénovation des équipements énergétiques et de ventilation.

## **Les hypothèses principales de scénarisation**

Tandis que les performances du bâti neuf sont calées sur les normes de la réglementation thermique (BBC puis BEPOS), un seul chemin linéaire de réhabilitation du bâti est proposé pour le parc existant, produisant un facteur moyen de 2 à 2,5 sur les besoins de chauffage au terme des quatre décennies d'application totale des gestes de rénovation. L'objectif est en effet d'évaluer le potentiel maximal des différentes solutions énergétiques retenues, les équipements au bois, au gaz ou à l'électricité pouvant se différencier par leurs rendements de génération, ainsi que par des contenus carbone plus ou moins favorables. Le solaire thermique, qui peut contribuer à 50% de la production d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un logement, est appliqué à 30% du parc existant en moyenne et à 100% dans le neuf, hors parc équipé au bois, avec appoint gaz, effet Joule ou PAC selon les solutions énergétiques retenues. La compensation photovoltaïque en bâtiment neuf à énergie positive est généralisée dès 2020, avec une comptabilisation en énergie primaire.

Des différents combustibles fossiles, seul le gaz naturel se maintient à terme dans les flux de chauffage existants, en complément du bois et de l'électricité. Les scénarios se distinguent par les priorités données aux trois énergies de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire subsistant dans l'ensemble du parc en 2050 (bois, gaz, électricité), selon quatre scénarios énergétiques contrastés, le choix de l'énergie de chauffage étant déterminant. Pour ce poste, le bois est favorisé, soit en premier choix d'énergie – les compléments étant alors apportés en deux variantes, selon l'énergie (gaz ou l'électricité) qui occupe le rang deux, puis le cas échéant le rang trois –, soit en deuxième choix, après le gaz ou l'électricité. Les combinaisons forment ainsi quatre scénarios pour le choix de l'énergie de chauffage :

- BOIS/GAZ/ÉLEC
- BOIS/ÉLEC/GAZ
- GAZ/BOIS/ÉLEC
- ÉLEC/BOIS/GAZ

Pour l'électricité, la préférence est donnée à la solution PAC, qui est toujours applicable à terme en neuf ou en rénovation sauf quand l'appareil indépendant de chauffage (AIC) est maintenu, éventuellement reconverti, l'effet Joule assurant le complément du bois si nécessaire dans ce cas. L'objectif visé est de rechercher, à partir de ces scénarios tranchés, quelles sont les conditions technologiques les plus favorables à l'obtention du facteur 4. Les trois énergies considérées (bois, gaz naturel et électricité) sont successivement généralisées dans leur champ d'application, selon des règles d'affectation dépendant de la localisation (rural/urbain), de la présence ou non de réseau de chaleur et de la desserte en gaz. Les répartitions en effectifs apparaissent très contrastées selon les quatre scénarios, le bois comprenant la conversion des réseaux de chaleur à la biomasse ainsi que les appareils indépendants de chauffage (AIC) :

- BOIS/GAZ/ÉLEC, à 43%, 26%, 31% ;
- BOIS/ÉLEC/GAZ, à 43%, 57%, 0% ;
- GAZ/BOIS/ÉLEC, à 43%, 25%, 32% ;
- ÉLEC/BOIS/GAZ, à 94%, 6%, 0%.

## L'atteinte des cibles en énergie et en émissions de CO<sub>2</sub>

Les scénarios retenus décrivent un faisceau de chemins extrêmes à l'intérieur duquel pourraient prendre place plusieurs trajectoires menant vers le « facteur 4 », en émissions de CO<sub>2</sub>, tout en privilégiant la réduction des consommations d'énergie.

Compte tenu de l'accroissement des surfaces habitables totales (+ 40% entre 2005 et 2050), les besoins totaux (énergie utile) de chauffage et d'ECS ne connaissent pas une réduction drastique de même ordre que le gain obtenu par la réhabilitation du bâti par unité de surface habitable : le facteur de réduction en énergie utile est de l'ordre de 1,5 entre 2005 et 2050.

L'amélioration des rendements moyens de génération de chaleur permet d'aller au-delà en énergie finale, encore modestement pour les scénarios BOIS/GAZ/ÉLEC (facteur 2) et GAZ/BOIS/ÉLEC (facteur 2,3 en déduisant la production électrique par cogénération gaz, de 61 TWh/an). Les coefficients de performance élevés des pompes à chaleur électriques conduisent à des résultats plus significatifs, d'obtention d'un facteur 3 (Scénario BOIS/ÉLEC/GAZ) et d'un facteur 8,8 pour le scénario ÉLEC/BOIS/GAZ. Dans tous les cas, la production d'électricité photovol-

taïque intervient en compensation des consommations électriques – cogénération déduite – des logements construits après 2020, pour des niveaux de 7 à 10 TWh/an selon les scénarios.

En énergie primaire, les écarts entre scénarios s'estompent en raison des coefficients de conversion adoptés conventionnellement, de 1 pour le bois et le gaz, et de 2,58 pour l'électricité consommée ou produite. Les facteurs s'étagent de 2,5 (scénario BOIS/GAZ/ÉLEC) à 5 (scénario ÉLEC/BOIS/GAZ), la forte contribution de la cogénération gaz à près de 160 TWh/an pour le scénario GAZ/BOIS/ÉLEC conduisant à un facteur 4,7.

En émissions de CO<sub>2</sub>, les gains obtenus sont extrêmement tributaires de la méthodologie adoptée, qui consiste d'une part à écarter les émissions indirectes du cycle de production des différentes énergies, au profit des seules émissions directes, et d'autre part à ne pas proposer – faute d'études de référence – de prospective à 2050 du contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique, qui peut varier dans des proportions importantes à cette échéance, en particulier dans les deux postes considérés, chauffage et production d'eau chaude sanitaire. Les corrections qui sont apportées pour intégrer le cycle de vie des différents vecteurs énergétiques (bois, gaz ou électricité) ne paraissent pas remettre en cause les comparaisons établies entre les différentes trajectoires énergétiques, compte tenu des hypothèses adoptées dans cette étude. En revanche, une vérification plus précise s'impose pour le contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique relatif aux deux usages considérés, le chauffage et la production d'ECS, et à la production d'électricité décentralisée, par équipements solaires photovoltaïques et par cogénération au gaz. Pour lever une partie de ces incertitudes, une étude de la sensibilité des résultats à une variation forte du contenu CO<sub>2</sub> du kWh « chauffage électrique » a été menée.

Faute de disposer d'autres conventions, les comparaisons entre scénarios sont établies sur la base des contenus moyens en CO<sub>2</sub> du kWh électrique consommé de 180 g pour le chauffage et de 40 g pour la production d'ECS, tels qu'ils ont été adoptés dans la note ADEME-EDF de 2005. Pour tenir compte de la production électrique décentralisée dans le bilan CO<sub>2</sub> total, le principe retenu consiste à retrancher 70 gCO<sub>2</sub> par kWh de production photovoltaïque et 180 gCO<sub>2</sub> par kWh de production par cogénération gaz, dont on suppose qu'elle efface des kWh électriques de production centralisée de même contenu CO<sub>2</sub> que les kWh de

chauffage électrique (hypothèse de concomitance de la consommation de chauffage électrique et de la production d'électricité par cogénération gaz). Dans ce cadre, les scénarios privilégiant le bois et l'électricité présentent de bons rendements de génération (grâce aux PAC) et/ou un niveau élevé de substitution sans carbone (grâce au bois) : les facteurs de réduction des émissions atteignent ainsi des niveaux supérieurs à 12 (scénario ÉLEC/BOIS/GAZ) et à 16 (scénario BOIS/ÉLEC/GAZ). Le facteur 4 serait atteint pour le scénario BOIS/GAZ/ÉLEC, le scénario GAZ/BOIS/ÉLEC ne dépassant pas un facteur 2,5.

Une étude de sensibilité des résultats à la valeur retenue pour le contenu CO<sub>2</sub> du kWh « chauffage électrique » (situation 2050 comparée à celle 2005) confirme que le facteur de réduction du scénario BOIS/GAZ/ÉLEC, en raison du faible recours à l'électricité, est faiblement affecté par une variation du contenu CO<sub>2</sub> du kWh de chauffage électrique ; les scénarios à fort recours à l'électricité (BOIS/ÉLEC/GAZ et ÉLEC/BOIS/GAZ) voient leurs gains en émissions décroître assez rapidement, tout en assurant un facteur supérieur à 4 pour des contenus CO<sub>2</sub> de 500g/kWh pour le chauffage électrique ; enfin, le scénario à forte production d'électricité décentralisée (GAZ/BOIS/ÉLEC) voit à l'inverse ses gains en émissions croître progressivement, jusqu'à assurer un facteur 4 pour des contenus CO<sub>2</sub> du chauffage électrique qui seraient supérieurs à 400 g/kWh.

En conséquence, et dans les limites de l'exercice liées à la méthode adoptée pour estimer le contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique notamment en chauffage, le Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> n'impose pas un facteur 4 sur l'énergie, ni en énergie finale, ni en énergie primaire, sous réserve de disposer d'énergies peu carbonées pour couvrir les besoins énergétiques. Cependant, face à une concurrence possible sur les ressources énergétiques issues de la biomasse entre usage résidentiel, tertiaire, industriel ou encore dans les transports, la réduction des consommations énergétiques reste prioritaire pour sécuriser l'atteinte du Facteur 4.

## **Le point de passage à 2020-2030 et les perspectives**

En supposant un rythme linéaire de réhabilitation des logements du stock entre 2005 et 2050, l'objectif de réduction de 38% des consommations du parc existant en chauffage et en ECS, en

énergie primaire et hors énergies renouvelables, tel qu'il apparaît et est défini dans le Grenelle, est nettement atteint en 2020 pour tous les scénarios, notamment ceux qui privilégient le bois, où la réduction avoisine 50%. Mais les deux scénarios BOIS/GAZ/ÉLEC et BOIS/ÉLEC/GAZ demeurent très dépendants de la ressource biomasse, avec un maximum de consommation de bois de 190 TWh/an vers 2030. Compte tenu de la consommation actuelle, il conviendrait de disposer d'environ 100 TWh/an supplémentaires en 2030, soit un doublement des prélèvements de biomasse, ce qui semble envisageable au plan national, mais avec des disparités régionales qu'il conviendrait d'estimer, notamment pour l'impact sur le poste transport de la ressource. D'autres voies doivent être explorées dans la perspective de la ville post-carbone : le recours à la géothermie, une meilleure gestion des surfaces habitables et une adaptation des rythmes de réhabilitation aux conversions énergétiques, notamment lors du passage au bois. Au-delà de l'importance donnée à la biomasse dans les réseaux de chaleur, favorisés dans les tissus urbains denses, l'élargissement des solutions technologiques passe également par l'intégration ambitieuse d'énergies renouvelables dans les réseaux de gaz (biogaz) et d'électricité (photovoltaïque, éolien, cogénération bois).

# INTRODUCTION

## L'objet de l'étude

L'étude s'inscrit dans l'objectif du Facteur 4 global sur les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050 par rapport à la référence de 1990, défini par Loi POPE du 13 juillet 2005. Cette cible nécessite de poursuivre les précédents exercices de prospective 2050 consacrés au parc résidentiel en France métropolitaine et publiés dans les Cahiers du CLIP, qui ont successivement mis en évidence :

- l'importance de la réhabilitation thermique des logements existants en complément d'une nécessaire accélération de la réglementation thermique dans le neuf<sup>2</sup> ;
- la contribution du solaire thermique à la réduction des consommations énergétiques pour la production d'eau chaude sanitaire<sup>3</sup> ;
- la contribution des cogérations décentralisées de faible puissance à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub><sup>4</sup> ;
- enfin le potentiel de développement des pompes à chaleur électrique dans le chauffage<sup>5</sup> et la production d'eau chaude sanitaire.

L'exercice consiste à identifier les trajectoires possibles d'une division par 4 des émissions de dioxyde de carbone dues à la consommation énergétique des résidences principales, en s'appuyant sur les meilleures technologies disponibles ou susceptibles de se généraliser avant 2050. L'exercice reste calibré sur l'échéance 2050, car l'intervalle considéré (2005-2050) permet d'envisager non seulement un double cycle de rénovation des équipements de chauffage, mais également un cycle complet d'interventions lourdes sur la totalité du parc existant compte tenu de la périodicité des nécessaires travaux d'entretien (ravalement thermique des façades, réfection des étanchéités de toiture, etc.). L'effort principal de réhabilitation étant réparti sur quatre ou cinq décennies, les gisements de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> apparaissent fortement exploités en 2050, ce qui se traduit par une stabilisation des courbes un peu avant cet horizon.

Pour le secteur de la construction neuve, les niveaux de performance sont fixés en référence à la réglementation thermique. Quant au parc de construction antérieure à 2005, la réhabilitation du bâti répond à un ensemble de gestes « sur mesure » sans viser une performance uniforme. Enfin, des solutions énergétiques contrastées sont élaborées en privilégiant successivement les énergies principales de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (bois, gaz, électricité) autant dans le cadre de la construction neuve que dans la rénovation du parc existant. Les scénarios retenus décrivent un faisceau de chemins extrêmes à l'intérieur duquel pourrait prendre place une ou plusieurs trajectoires possibles menant vers le « facteur 4 », en émissions de CO<sub>2</sub>, tout en privilégiant la réduction des consommations d'énergie.

Si l'ensemble des postes de la réglementation thermique est considéré, l'exercice concerne essentiellement le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, les postes complémentaires de la ventilation, des auxiliaires (circulateurs, pompes, etc.) et de l'éclairage étant pris en compte dans la définition des niveaux du bâtiment basse consommation (BBC), ainsi que dans les compensations annuelles introduites par le bâtiment à énergie positive (BEPOS) en excluant la climatisation, dont le poids, quoique croissant, reste encore peu important dans le parc résidentiel.

## Les hypothèses de travail

Des hypothèses d'évolution des températures estivales à 2050 selon les zones climatiques seraient nécessaires pour une prise en compte plus réaliste de ce poste du confort thermique, mais une telle analyse n'a pu être menée dans la présente étude, qui considère également les conditions hivernales (nécessaires à l'estimation des besoins de chauffage) identiques de 2005 à 2050<sup>6</sup>. T1

Ainsi, les simulations sont effectuées :

- à climat constant ;
- avec une application stricte de la réglementation dans la construction neuve, et sans malversations dans la mise en œuvre des technologies, que ce soit dans le neuf ou dans la réhabilitation de l'existant ;
- à comportement des ménages constant (sans prise en compte de l'effet rebond) ;
- avec une occupation des logements par des ménages dont la taille (nombre de personnes par logement) est décroissante, selon un des jeux d'hypothèses proposé par l'INSEE (scénario « bas » en nombre de ménages, mais haut en taille moyenne) ;
- à conditions de peuplement tendancielle (sans ajustement des surfaces habitables par cohabitation, par effet des prix, etc.) ;
- selon une dynamique de la construction neuve (nombre de constructions annuelles) qui maintient le faible niveau actuel de renouvellement du parc, basé sur le rythme de 30 000 logements sortis du parc annuellement.

En revanche, l'exercice comporte un point de rupture important dans l'aménagement urbain, les conditions d'urbanisation adoptées pour la construction neuve permettant la mise en œuvre massive des réseaux de chaleur urbain, en privilégiant les formes urbaines continues par opposition à la poursuite de l'étalement urbain. Les règles introduites dans les scénarios de construction neuve et de réhabilitation sont ainsi formulées :

- hors besoins propres à l'activité rurale, il n'y a pas de construction neuve sous forme de maison individuelle ou d'immeuble collectif en tissu discontinu, afin d'ouvrir les possibilités de mutualisation – ce qui serait favorable parallèlement aux *smart grids* –, ici sous forme de réseaux de chaleur ;
- en neuf et en réhabilitation, les scénarios énergétiques respectent la nécessaire limitation des émissions de particules en milieu urbain, en excluant l'énergie bois pour la maison individuelle en tissu urbain (avec cependant le maintien des AIC existants) et en l'acceptant en immeuble collectif sous forme mutualisée (chauffage central collectif) en supposant un meilleur contrôle des émissions pour les chaudières bois de forte puissance.

Enfin, l'hypothèse d'une rénovation massive du parc par démolition-reconstruction, sur le modèle des opérations urbaines des décennies 1960-1970, a été écartée. S'il est tentant d'accélérer la sortie du parc des « épaves thermiques » par démolition et remplacement par du neuf, il conviendrait d'intégrer dans le bilan énergétique – ou le bilan carbone – global la question de l'énergie grise incorporée dans le cycle de vie des matériaux et des composants de la construction, ce qui peut plaider pour le maintien dans le parc des constructions à longue durée de vie. Les critères de préservation ou de démolition devraient par ailleurs prendre en compte la localisation du logement, décisive vis-à-vis des déplacements générés (distances parcourues et modes requis).

## Les premières orientations

La cible du Facteur 4 est atteignable par deux leviers d'actions : la diminution des consommations d'énergie, supposant une action forte et volontariste de réhabilitation du bâti ancien, et le recours à des énergies plus faiblement carbonées, résultant de l'incorporation dans le mix énergétique d'une part conséquente d'énergies renouvelables faiblement émettrices de GES. En conséquence, le Facteur 4 sur les émissions de CO<sub>2</sub> n'impose pas un facteur 4 sur l'énergie, sous réserve de disponibilité

Tableau 1 – Conditions climatiques prises en compte pour l'estimation des besoins de chauffage pour les trois zones climatiques de référence

	H1	H2	H3
DH degrés-heures de chauffage en 10 <sup>3</sup> h.°C	63	52	37
E ensoleillement vertical sud pendant la durée de chauffage en kWh/m <sup>2</sup>	410	440	460

d'énergies peu carbonées pour couvrir les besoins énergétiques. Ainsi, le bois, à plus de 7,5 Mtep (87 TWh PCI), compte aujourd'hui pour 20% des consommations de chaleur (chauffage et production d'eau chaude sanitaire) du parc de logements et continue à jouer un rôle majeur dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, en particulier dans le parc ancien de bâtiments où les possibilités de réduction des consommations énergétiques peuvent être fortement contraintes. Cependant, face à une concurrence possible sur les ressources énergétiques peu carbonées entre usage résidentiel, tertiaire, industriel ou encore dans les transports, la réduction des consommations énergétiques reste prioritaire pour sécuriser l'atteinte du Facteur 4.

Les énergies renouvelables (EnR), solaire et bois en particulier mais aussi part renouvelable des pompes à chaleur, occupent une place privilégiée dans les solutions à promouvoir, permettant de contribuer, dans le secteur des résidences principales, aux engagements européens (3x20 en 2020 en moyenne) et de répondre aux décisions du Grenelle de l'environnement, au moins dans les scénarios où l'énergie bois est privilégiée (9 M de logements avec chauffage individuel bois en 2020). Les conditions de développement des autres formes de biomasse, biofuels – *biomass to liquid* – et gazéification, ne sont pas encore suffisamment connues à ce jour pour être intégrées pleinement à cette étude.

### **Les hypothèses principales de scénarisation**

Compte tenu des objectifs ambitieux du Grenelle de l'Environnement dans le neuf (tous les logements à énergie positive après 2020) et dans l'existant (réduction de 38% des consommations d'énergie d'ici 2020), la construction des scénarios repose sur les principes suivants :

- les performances du bâti neuf sont calées sur la réglementation thermique projetée ;
- pour le parc existant, un seul chemin de réhabilitation du bâti est proposé, produisant un facteur 2 moyen sur les besoins de chauffage ;
- les évolutions technologiques des systèmes énergétiques seront basées sur les meilleures technologies disponibles (MTD) identifiées à ce jour, et susceptibles d'être généralisées dans une part significative du parc avant 2050, l'amélioration de leurs performances d'ici à 2050 étant prise en compte. Pour le parc existant, la réhabilitation systématique du bâti (dans chaque typologie, tous les gestes possibles sont appliqués à l'horizon 2050), couplée au remplacement des équipements énergétiques par les meilleures technologies disponibles, permet d'évaluer le potentiel maximal des différentes solutions énergétiques retenues. Pour les scénarios qui dépassent largement la cible visée, il serait possible de relâcher la contrainte sur le bâti selon une optimisation économique (par exemple sous forme d'une comparaison du coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée) qui n'est pas entreprise dans l'étude.

Les technologies privilégiées à terme concernent principalement :

- les chaudières bois et les réseaux de chaleur alimentés en biomasse ou en énergie fatale ;
- les pompes à chaleur électriques et gaz ;
- la cogénération ;
- le solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire et la compensation photovoltaïque en bâtiment neuf à énergie positive, généralisé dès 2020.

Les scénarios se distinguent par les priorités données aux trois énergies de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire subsistant en 2050 (bois, gaz, électricité), selon quatre scénarios énergétiques contrastés, construits par généralisation d'une énergie donnée dans son champ d'application.

Dans tous les cas, il s'agit de consommations conventionnelles, estimées pour un comportement de chauffage normé (température de consigne à 19°C uniforme pendant la période de chauffage), sur la base d'une application explicite de technologies, sans modulation due aux malfaçons éventuelles ou à un effet rebond.

Un tel exercice de prospective ne produit pas une prévision, mais des résultats susceptibles d'être comparés entre eux, et non strictement en valeurs absolues.

# Le champ de l'étude : le parc de logements en métropole

## Les caractéristiques du parc de résidences principales

### Les effectifs

Le parc résidentiel métropolitain comporte 31,3 millions de logements en 2006, dont 26,3 millions de résidences principales, 3,1 millions de résidences secondaires et 1,9 millions de logements vacants. Le nombre de résidences principales a crû de 387.000 unités en un an (2005-2006), grâce à une activité de la construction neuve encore vigoureuse, tandis que le parc de résidences secondaires a faiblement progressé. Le nombre de logements vacants a également diminué progressivement depuis 2000. **T2**

Les maisons individuelles au nombre de 14,8 millions d'unités, forment la majorité des résidences principales (56,3%). Leur part est grandissante depuis 1995 mais ralentit légèrement depuis 2004. 11,5 millions de logements sont en immeubles collectifs. **F1**

En 2006, 57,1% des ménages sont propriétaires, dont près des deux tiers ont terminé de rembourser le crédit contracté pour l'achat de leur logement. 6,6 millions de ménages sont logés dans le parc locatif privé, niveau sans progression notable depuis 1984, et 5 millions sont locataires dans le parc social et celui des collectivités locales, soit 1,6 millions de ménages de plus en 20 ans<sup>7</sup>.

## Les conditions de confort et la surface moyenne des logements

Le nombre de personnes par logement, s'établit à 2,3 en 2006, contre 2,8 en 1978. Cette diminution continue de la taille moyenne des ménages résulte de plusieurs facteurs, dont le vieillissement de la population associé au maintien à domicile des personnes âgées, et des changements des modes de cohabitation. Les enquêtes logement indiquent que les conditions de logement, en surface habitable, se sont améliorées :

- la surface moyenne par personne est passée de 27,4 m<sup>2</sup> à près de 40 m<sup>2</sup> entre 1978 et 2006,

**Figure 1.**  
Évolution de la part de la maison individuelle dans le parc de résidences principales



**Tableau 2 – Effectifs de logements en métropole (2000-2006) (en milliers de logements)**

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Résidences principales	24 241	24 555	24 866	25 184	25 519	25 876	26 263
Résidences secondaires	2 934	2 959	2 985	3 010	3 038	3 070	3 106
Logements vacants	1 969	1 957	1 944	1 931	1 919	1 908	1 899
Nombre total de logements	29 144	29 471	29 795	30 126	30 477	30 854	31 267

Effectifs en juillet de chaque année

Sources : Comptes du logement 2006.

**Tableau 3. Quelques caractéristiques du parc de résidences principales**

	1978	1984	1988	1992	1996	2002	2006
Part des logements sans confort sanitaire (en %)	26,9	15,0	9,6	6,2	4,1	2,6	1,5
Surface moyenne des logements (en m <sup>2</sup> )	77	82	85	86	88	90	91
Nombre moyen de personnes par logement	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3
Surface habitable moyenne par personne	27,5	30,7	32,4	33,9	35,5	37,5	39,6

Source : Insee, enquêtes Logement.

sous le double effet de la croissance de la surface moyenne des résidences principales et de la diminution de la taille des ménages ; l'augmentation de la surface habitable par personne apparaît plus rapide dans l'individuel que dans le collectif ;

- parallèlement, le confort a progressé : seulement 1,5% des logements en 2006 sont dépourvus d'eau chaude ou de sanitaires contre 27% en 1978.

La surface moyenne des maisons individuelles est passée de 100 à 110 m<sup>2</sup> en 20 ans, mais sa progression ralentit ; à l'inverse, la surface moyenne des logements en immeuble collectif est stable à 65 m<sup>2</sup> environ. **T3 F2 F3**

## La construction neuve et les mouvements dans le parc

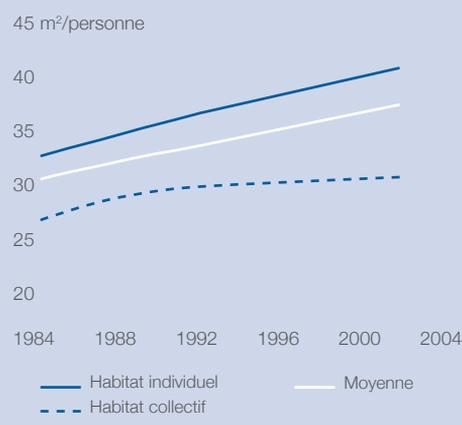
### La dynamique de la construction neuve

Les logements construits annuellement, de l'ordre de 380.000 unités dans la période 2005-2007, représentent 1,5% du parc de résidences principales en année moyenne : ce taux illustre la vitesse d'accroissement du parc, le rythme de sortie du parc (il s'agit du solde des mouvements, donc essentiellement de destruction) restant faible, de l'ordre de 0,1 à 0,2% par an. Le renouvellement du parc est en conséquence très lent.

L'augmentation de la construction neuve depuis 2004 a principalement pour origine le dynamisme de la construction de logements collectifs, qui a crû trois fois plus rapidement que la construction de maisons individuelles : la part du collectif a en effet augmenté de 10 points depuis 2000, passant à 44% en 2007 dans les mises en chantier de résidences principales en métropole. Le nombre total de logements terminés au cours de l'année 2007 augmente de plus de 15% par rapport à l'année précédente, mais ce pic de construction s'est nettement atténué en 2008-2009.

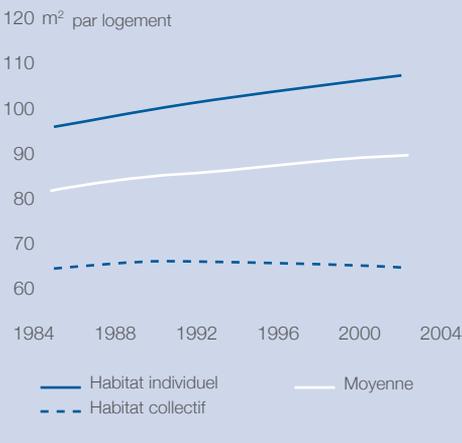
**Figure 2. Évolution des surfaces habitables par personne**

Source : D'après enquête Logement 2002, Insee (« De plus en plus de maisons individuelles », Alain Jacquot, Insee N° 885 - FÉVRIER 2003)



**Figure 3. Évolution des surfaces habitables des logements**

D'après : Enquête Logement 2002, Insee (« De plus en plus de maisons individuelles », Alain Jacquot, Insee N° 885, février 2003).



La construction apparaît la plus dynamique sur la façade atlantique (en Aquitaine, en Bretagne) et en Corse. L'Île-de-France, la région Nord-Pas-de-Calais ainsi que la région Champagne-Ardenne apparaissent les moins dynamiques. T4 F4

Les 385.000 résidences principales construites en 2007 correspondent à 41,4 Millions de m<sup>2</sup>, soit une surface moyenne (SHON) de 107 m<sup>2</sup> par logement (140 m<sup>2</sup> en individuel pur, 105 m<sup>2</sup> en individuel groupé et 75 m<sup>2</sup> en immeuble collectif).

### La localisation de la construction neuve

La construction de logements collectifs n'est plus cantonnée aux grandes unités urbaines et se développe également dans les communes rurales. Mais l'étalement urbain sous forme de logements individuels diffus se poursuit dans les régions où la construction est la plus dynamique. Un tiers des logements sont construits dans des communes rurales en raison du faible coût du foncier, en grande partie sous forme de maisons individuelles. F5

Le poids du parc situé dans les communes rurales, se renforce : 23,8% des résidences principales y sont désormais implantées contre 23,0% en 1998. T5

### Les mouvements dans le parc : accroissement et rythme des sorties

L'accroissement du parc de logements est dû essentiellement à la construction neuve, puisque le solde des échanges avec le parc tertiaire est assez faible, de l'ordre de quelques milliers d'unités. Les mouvements à l'intérieur du parc résidentiel, entre les trois composantes des résidences principales, logements vacants et résidences secondaires, apparaissent élevés, bien que les soldes demeurent modestes. Ces mouvements ont été évalués au cours des années 1985-1992, dans les Comptes du logement de 1994. Les sorties du parc (il s'agit du solde des mouvements divers d'échanges entre les différents parcs) étaient encore importantes, de l'ordre de 140.000 par an, dont 50.000 par démolition et 90.000 par réaffectation. Il convient de

Tableau 4. Logements ordinaires commencés ventilés selon le type de construction

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Individuel pur	115 397	127 699	144 522	158 625	149 096	148 900	149 132	163 583	169 448	171 016	170 313
Individuel groupé	25 700	28 294	32 811	29 779	31 696	31 727	33 415	40 070	46 691	46 458	45 736
Collectif	99 703	106 544	115 398	96 834	95 516	95 748	105 297	124 564	154 958	161 653	169 725
Total	240 800	262 537	292 731	285 238	276 308	276 375	287 844	328 217	371 097	379 127	385 774

Champ : Résidences principales, France métropolitaine, hors logements en résidences

Source : SOeS / SITADEL

Figure 4. Évolution des mises en chantier (résidences principales) par type de logement - Champ : Résidences principales, France métropolitaine, hors logements en résidences. Source : SOeS / SITADEL

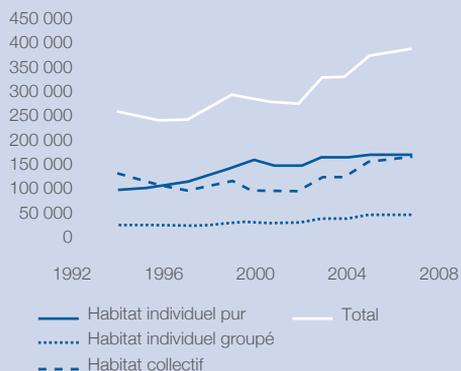
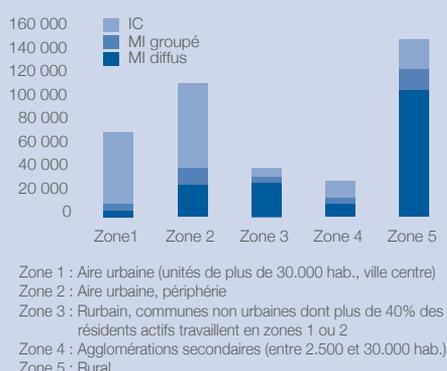


Figure 5. Répartition de la construction neuve selon le type de zone urbaine (2005)

D'après : UNCM, Bilan et perspectives du marché et questions d'actualité à début 2006



**Tableau 5. Évolution de la localisation du parc de logements, en %**

Localisation en métropole	1985	1990	1995	2000	2005	2006
Communes rurales	22,9	22,9	22,9	23,1	23,6	23,8
Unités urbaines de moins de 100 000 habitants	29,8	30,0	30,1	30,2	30,1	30,1
Unités urbaines de 100 000 habitants et plus	29,3	29,4	29,7	29,8	29,7	29,6
Agglomération parisienne	18,0	17,7	17,3	16,9	16,6	16,5
Ensemble	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Source : *Compte du logement 2006*

Champ : Ensemble des résidences principales, France métropolitaine

revoir ces sorties à la baisse dans la dynamique du parc à venir.

Il apparaît en effet que les taux de sorties ont depuis sensiblement faibli, notamment par démolition **F6**. Pour les niveaux des années 1990-2000, on peut considérer que les sorties étaient à un niveau de 30.000 à 35.000 logements par an, soit un taux de sortie :

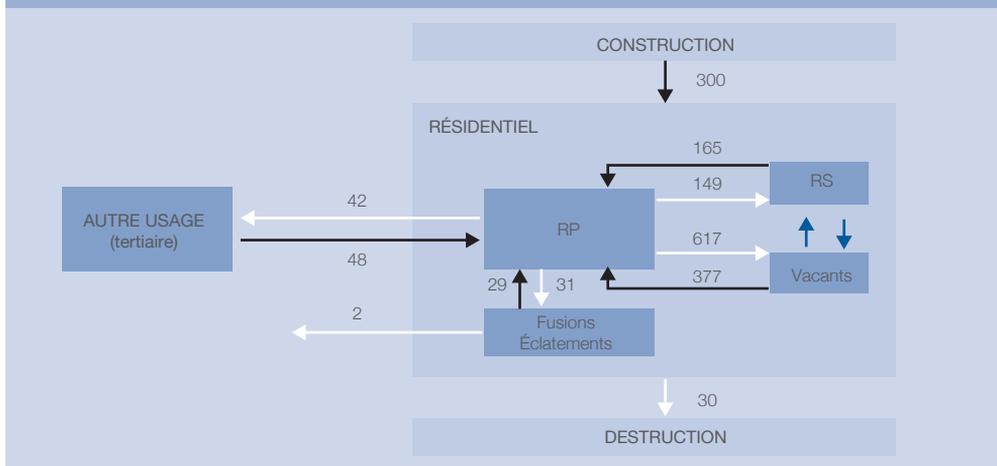
$$(\text{Sorties}) / (\text{RP} + \text{vacants}) = 0,12\%$$

Les années 1999-2002 se caractérisent par l'apparition d'environ 280.000 nouveaux ménages par an, pour 305.000 nouvelles unités créées. Le niveau de sorties du parc serait d'environ 22.000 logements par an, pour un parc (résidences principales + logements vacants) d'environ 26 millions de logements, soit un taux voisin de 0,1%, légèrement inférieur à celui de la décennie précédente. **T6**

**Figure 6.**

**Mouvements annuels moyens dans le parc de logements (années 1990-2000)**

D'après : Comptes du logement. Flux en milliers



**Tableau 6. Répartition des logements selon leur catégorie, en juillet de chaque année**

Métropole (en milliers de logements)	1999	2000	2001	2002
Résidences principales	23 865	24 133	24 385	24 665
Résidences secondaires	2 904	2 923	2 948	2 976
Logements vacants	1 991	1 997	2 006	2 011
Nombre de logements	28 760	29 053	29 339	29 652
Construction de logements neufs	296	308	299	306
Destructions, fusions, éclatements, désaffectations et réaffectations	-22	-22	-22	-21

Sources : *Comptes du logement ; Insee Première N° 1060 - Janvier 2006.*

## Les scénarios démographiques à 2050

### Population et ménages en France métropolitaine

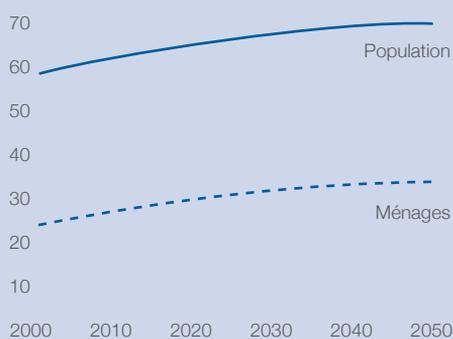
Au 1<sup>er</sup> janvier 2009, la population de la France métropolitaine s'élève à 62,45 millions d'habitants, en progression moyenne de 400 000 habitants par an depuis le début de la décennie, soit à un taux de croissance annuel de 0,6 à 0,7%. Ces chiffres montrent que la population croît plus rapidement que dans la projection centrale de l'INSEE, que nous retenons néanmoins. Le nombre de ménages, à 25,69 millions en 2005, représentait une population de 59,67 millions de personnes en ménages. La taille moyenne du ménage s'établit ainsi à 2,32 personnes en 2005. Dans cette étude, dans la mesure où le tertiaire d'hébergement n'est pas comptabilisé dans le parc, nous avons pris l'hypothèse de réintégrer les personnes hors ménages<sup>8</sup> dans le parc de résidences principales : le nombre de ménages sera calculé à partir de la population totale, et de l'évolution du nombre de personnes par ménage extrapolé à 2050. Ainsi, en 2005, le nombre de logements considéré sera de 26,27 millions (population totale divisée par la taille moyenne du ménage). **T7**

Les projections récentes de l'INSEE montrent, dans le scénario central, que la France métropolitaine compterait 70,0 millions d'habitants en janvier 2050, soit 9,1 millions de plus qu'en 2005<sup>9</sup>. Le nombre de ménages tend cependant à croître plus vite que la population (+ 1,24% par an en moyenne pour le nombre de ménages entre 1975

et 2005, + 0,48% pour la population), en raison de la baisse continue du nombre moyen de personnes par ménage<sup>10</sup>. Cette baisse est due à deux facteurs principaux : la structure par âge de la population – le nombre de ménages de personnes âgées croît, avec une taille de ménage plus petite que la moyenne – et les comportements de cohabitation, la vie en couple cédant du terrain au profit de familles monoparentales. **F7**

En maintenant la tendance observée dans l'intervalle 1990-1999 pour les comportements de cohabitation, qui semble toutefois s'être accélérée au cours des années récentes, l'INSEE a établi deux scénarios d'évolution de la taille moyenne de ménages. Nous adoptons le scénario B (scénario « bas » en nombre de ménages, mais haut

**Figure 7.**  
Projections de population à 2050  
(millions d'habitants et de ménages)



Scénario central pour la population, scénario B pour la taille des ménages.  
Sources : Insee Première N° 1089 - Juillet 2006 et N° 1106 - Octobre 2006.

**Tableau 7. Évolution générale de la situation démographique (2000-2009)**

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007 (p)	2008 (p)	2009 (p)
Population au 1 <sup>er</sup> janvier (en milliers)	58 858	59 267	59 686	60 102	60 506	60 963	61 400	61 771	62 106	62 449

(p) Populations 2007, 2008 et 2009, état civil 2008 : résultats provisoires arrêtés fin 2008.  
Champ : France métropolitaine.  
Sources : Insee, estimations de population

**Tableau 8. Projection de la taille des ménages selon deux hypothèses**

	1990	1999	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2040	2050
Taille ménages (B)	2,57	2,4	2,31	2,25	2,2	2,16	2,12	2,08	2,04	2,01
Taille ménages (H)	2,57	2,4	2,31	2,24	2,19	2,14	2,09	2,04	1,99	1,96

Source valeurs 1990-2030 : INSEE Première N°1106, d'après : recensements de la population 1982 à 1999, enquête annuelle de recensement 2005 et projection, Insee.  
Projections 2040-2050 : étude CLIP (extrapolation par approximation polynomiale de la dynamique 2005-2030)

en taille moyenne), qui indique un accroissement annuel moyen de 236.000 ménages dans la période 2005-2030. De 2,37 personnes par ménage pour 24,7 millions de ménages en 2000, la taille moyenne décroîtrait à 2,08 personnes par ménage en 2030. La structure des ménages s'en trouvera modifiée, ce qui pourrait être une cause d'évolution vers une demande plus forte en petits logements : alors qu'un tiers des résidences principales sont occupées à présent par une personne seule, la proportion pourrait atteindre 43 à 46% en 2030. **T8**

**Taille de ménage et nombre de ménages : régionalisation des données**

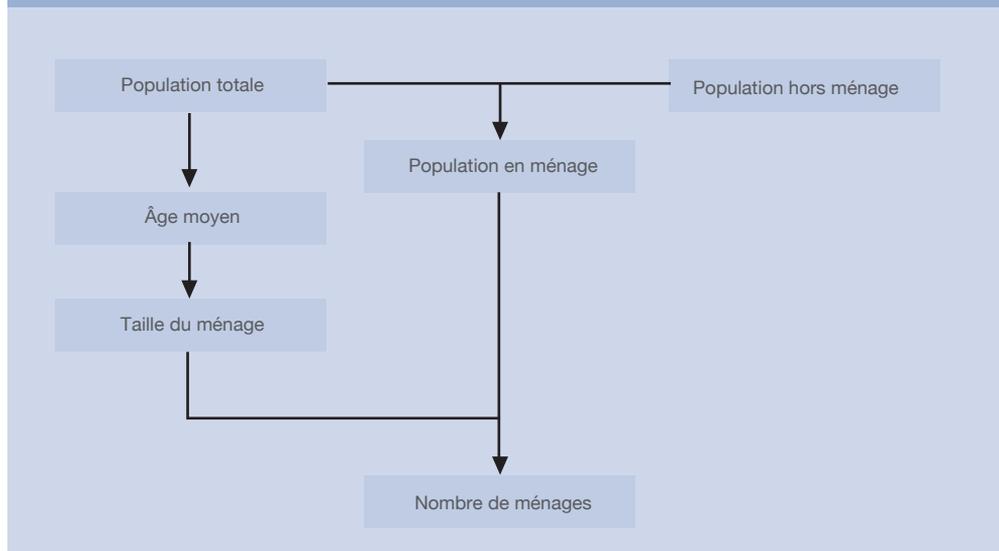
Le nombre de ménages est une donnée essentielle pour établir les perspectives du parc de

résidences principales (un ménage = un logement). Ne disposant pas de données régionalisées en nombre de ménages en prospective, nous déduisons cette donnée de l'estimation de la taille des ménages, quelle que soit l'échelle considérée. **F8**

Les projections établies par l'INSEE donnent une répartition de la population par tranche d'âge et par région<sup>11</sup> à l'échéance 2030. Il est ainsi possible de dessiner les perspectives d'évolution de l'âge moyen de la population aux deux échelons, national et régional. **T9**

Ces données peuvent être complétées jusqu'en 2050 au niveau national, puis différenciées par région, en s'appuyant sur la corrélation entre la taille du ménage et l'âge moyen de la population. **T10** **F9**

**Figure 8.**  
Procédure d'estimation du nombre de résidences principales RP  
(Un ménage = une RP)



**Tableau 9. Population de France métropolitaine de 2005 à 2030**

Année	Population au 1 <sup>er</sup> janvier (en milliers)	Proportion (%) des				Age moyen
		0-19 ans	20-59 ans	60 et +	80 et +	
2005	60 702	24,9	54,3	20,8	4,5	39,0
2010	62 302	24,3	53,0	22,7	5,2	39,7
2015	63 728	24,0	51,4	24,6	5,8	40,5
2020	64 984	23,7	50,1	26,2	5,9	41,2
2025	66 122	23,1	49,1	27,9	5,9	42,0
2030	67 204	22,6	48,1	29,3	7,2	42,7

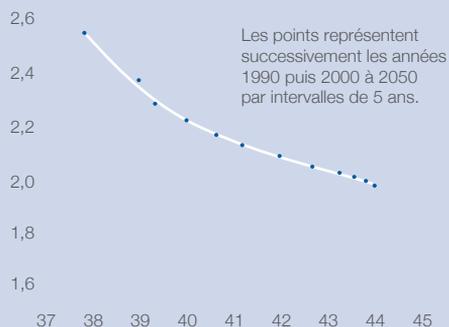
Scénario central, INSEE

**Tableau 10. Population et répartition en classes d'âge (1950-2050)**

Année	Population au 1 <sup>er</sup> janvier (en milliers)	Proportion (%) des				
		0-19 ans	20-59 ans	60-64 ans	65 ans ou +	75 ans ou +
1950	41 647	30,1	53,7	4,8	11,4	3,8
1990	56 577	27,8	53,2	5,1	13,9	6,8
2000	58 796	25,6	53,8	4,6	16	7,2
2005	60 702	24,9	54,3	4,4	16,4	8
2010	62 302	24,3	53	6	16,7	8,8
2015	63 728	24	51,4	6,2	18,4	9,1
2020	64 984	23,7	50,1	6,1	20,1	9,1
2025	66 123	23,1	49	6,2	21,7	10,5
2030	67 204	22,6	48,1	6,1	23,2	12
2035	68 214	22,2	47,2	6,1	24,5	13,3
2040	69 019	22,1	46,9	5,4	25,6	14,3
2045	69 563	22	46,4	5,8	25,8	15
2050	69 961	21,9	46,2	5,7	26,2	15,6

Source : INSEE

**Figure 9. Taille moyenne du ménage en fonction de l'âge moyen de la population**

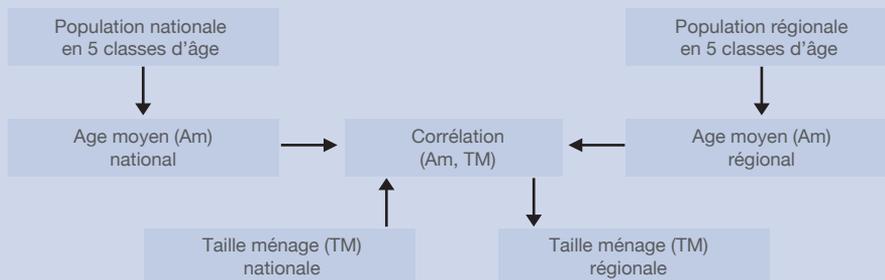


La courbe de tendance obtenue, avec une forte corrélation, permet de produire pour l'intervalle 2000-2050, une taille de ménage régionale. Afin d'éviter la « remontée » de la taille des ménages dans les zones où l'âge moyen augmente fortement, une stabilisation à la valeur minimum est mise en œuvre. **F10**

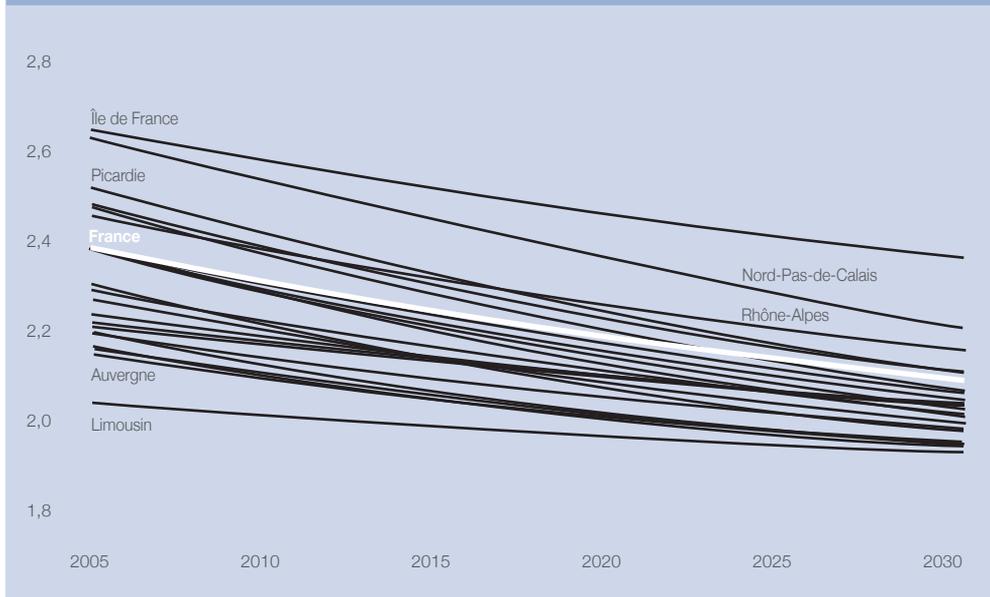
En appliquant aux différentes régions la corrélation observée à l'échelle nationale, il est ainsi possible d'en déduire les tailles moyennes des ménages par région à l'horizon 2030 : les évolutions apparaissent très contrastées selon les régions, la taille du ménage demeurant bien au-dessus de la moyenne nationale en Ile de France, avec près de 2,37 personnes par ménage, alors qu'elle chuterait à près de 1,95 personnes par ménage dans le Limousin. **F11**

**Figure 10. Procédure de régionalisation des données nationales**

(Taille moyenne du ménage déduite de la répartition de la population en 5 classes d'âge)



**Figure 11.**  
Perspectives d'évolution de la taille des ménages en Régions (2005-2030)



## Le modèle dynamique de parc

### *L'estimation des taux de sortie, de vacants et de construction neuve*

Le modèle prospectif de parc de résidences principales résulte de l'hypothèse que l'accroissement du nombre de logements entre deux années consécutives est actionné par l'évolution du nombre de ménages. La construction neuve (CN) est supposée répondre à cet accroissement du nombre de ménages (A) augmenté des sorties totales (S), par destruction et solde des échanges entre le parc de résidences principales et les autres stocks, résidences secondaires et logements vacants.

En conséquence, à chaque pas de temps (une année) :

$$CN = A + S$$

Le modèle de dynamique du parc doit permettre de décrire l'évolution des différents segments, non seulement en fonction de la région, mais aussi selon la typologie (maisons individuelles et logements collectifs), la date de construction et la localisation dans les différentes zones des aires urbaines.

Le taux de sortie est basé sur le rapport (sorties) / (stock RP), soit 0,12% en moyenne métropolitaine dans la période antérieure à 2000. Cette hypothèse reste faible en comparaison des pé-

riodes antérieures<sup>12</sup>. Pour les logements neufs, le nombre de logements déclarés et commencés de 1994 à 2004 est donné par commune dans la base SITADEL. Les variables connues sont la typologie de logement (maisons individuelles et logements collectifs) ainsi que la surface des logements construits (SHON).

### *Les projections de construction neuve, par région*

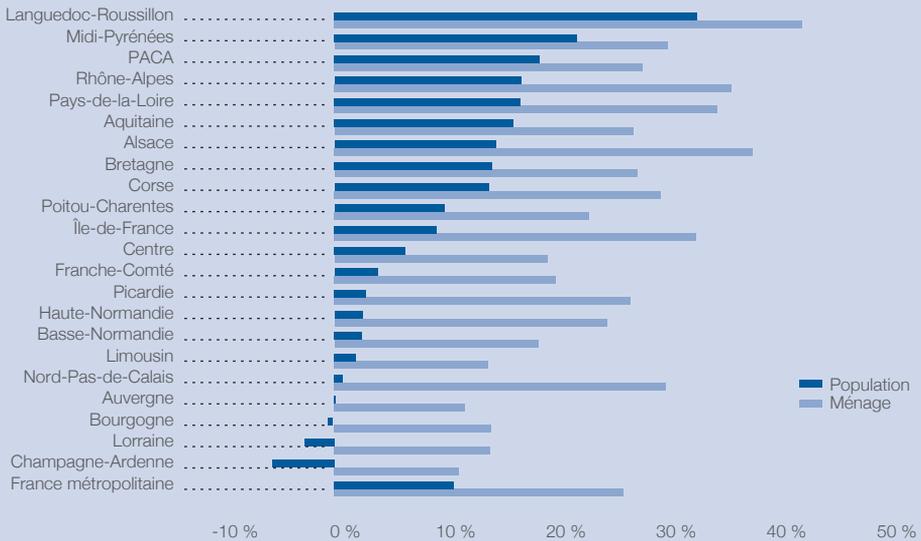
À partir des données de démographie et des hypothèses retenues, il est possible de déterminer la demande en logements année par année jusqu'en 2030. Les discontinuités observées dans l'évolution des constructions annuelles sont directement dues à l'approximation linéaire dans les intervalles de cinq ans concernant les évolutions de population par région ainsi que cette même linéarisation concernant les dynamiques de taille de ménages. **F12 F13**

### *Les hypothèses retenues en tendanciel*

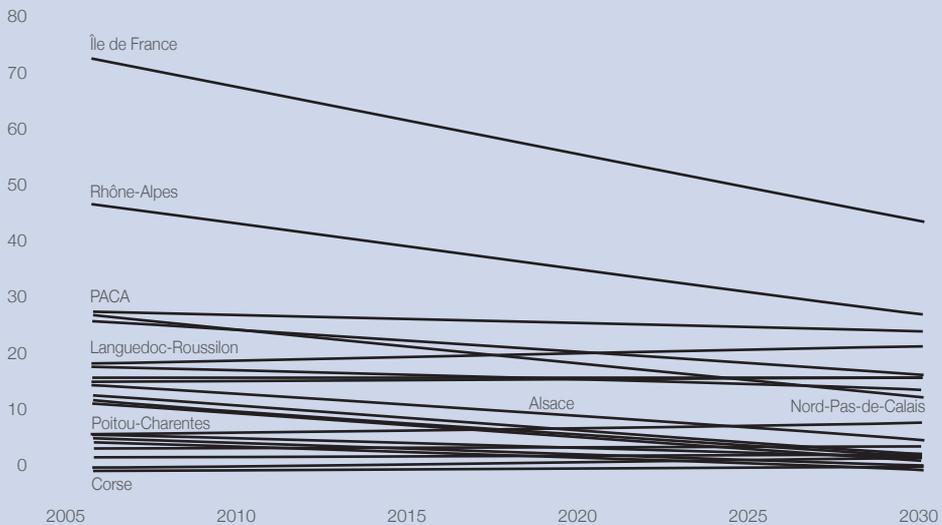
En tendanciel, nous adoptons les valeurs constatées en rétrospective 1990-2004 :

- Le taux de destruction est maintenu à 0,12% du parc de RP existant ;
- La répartition dans le neuf (MI / IC) est maintenue dans chaque commune, par prolongement des tendances 1990-2004.

**Figure 12.**  
Population et ménages, par région : taux de croissance 2005-2030



**Figure 13.**  
Milliers de logements neufs construits annuellement par région (2005-2030)



Le modèle de parc nécessite également que soient adoptées des hypothèses de surface habitable (SHAB), par personne ou par logement. Les surfaces des logements neufs, en moyenne, apparaissent assez stables dans la période 1998-2007 pour chacune des trois typologies principa-

les, l'individuel pur, l'individuel groupé et le collectif, à respectivement 140 m<sup>2</sup>, 102 m<sup>2</sup> et 75 m<sup>2</sup>. Ces valeurs - libellées en SHAB, elles pourraient l'être en SHON - sont supérieures à celles du stock et contribuent à l'augmentation des surfaces habitables par personne. **F14**

Les tendances observables en surfaces habitables (SHAB) peuvent être prolongées sur la base des hypothèses suivantes :

- Une surface moyenne des logements du stock constante (sans subdivision ou fusion notable des logements existants) ;
- Une surface des maisons individuelles neuves stabilisée à 120 m<sup>2</sup> ;
- Une surface moyenne des logements collectifs stable à 65 m<sup>2</sup> ;
- Une part de maisons individuelles (neuf ou stock) stable à 56,6% ;
- Une taille moyenne des ménages correspondant au scénario « B », soit 2,08 en 2030, prolongée à 2,01 en 2050.

Dans ces conditions, on peut projeter les tailles de ménages selon le type de logement en 2050, ainsi que les surfaces habitables qui atteindraient, en 2050, 50 m<sup>2</sup> par personne dans l'individuel et plus de 35 m<sup>2</sup> en collectif, ce qui augmente proportionnellement la demande de chauffage, dans nos hypothèses. **F15 F16**

### **L'aménagement urbain durable et les segments privilégiés de la construction neuve : des hypothèses de rupture**

Les textes du Grenelle qui concernent l'urbanisme confirment les objectifs de lutte contre l'étalement urbain et incitent les collectivités à s'engager dans la réalisation d'éco-quartiers. Le projet de loi Grenelle 2, dans son article 8, encourage les différents acteurs à développer les énergies renouvelables dans les zones d'aménagement, par la création ou le raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération.

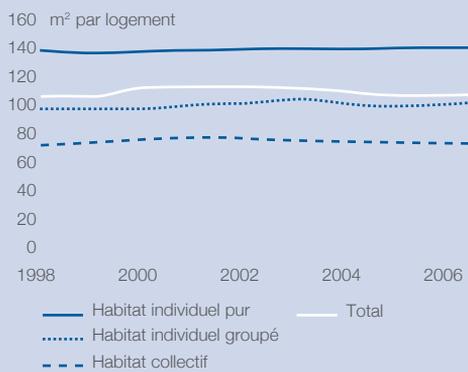
Pour cette raison, nous privilégions les formes urbaines continues en ce qu'elles répondent aux critères de faisabilité des réseaux de chaleur. Il importe également de satisfaire aux conditions de réversibilité entre énergies (gaz, bois, électricité), donc de faciliter la conversion au bois énergie soit sous forme de réseau, soit dans les équipements collectifs de chauffage, le bois étant exclu des équipements individuels en immeubles.

En conséquence, pour les scénarios étudiés, nous adoptons le principe que la construction neuve ne concerne pas les segments suivants :

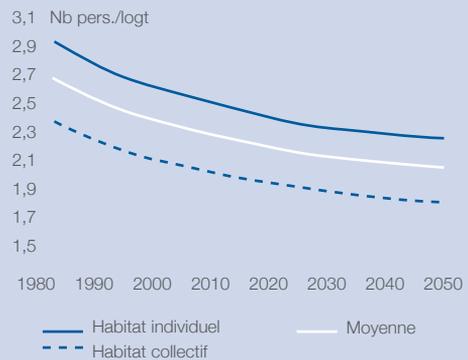
- Maisons individuelles (hors rural) et immeubles collectifs en tissus discontinus ;
- Immeubles collectifs équipés en CCI (chauffage central individuel).

**Figure 14.**  
**Surface des logements commencés**

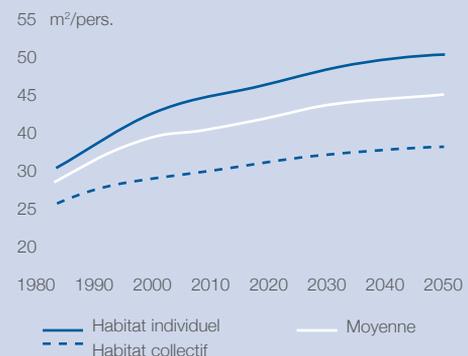
D'après : Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement - DAEI-SES : SITADEL



**Figure 15.**  
**Projection des tailles moyennes de ménage selon le type de logement**



**Figure 16.**  
**Projection des surfaces habitables (en mètres carrés par personne)**

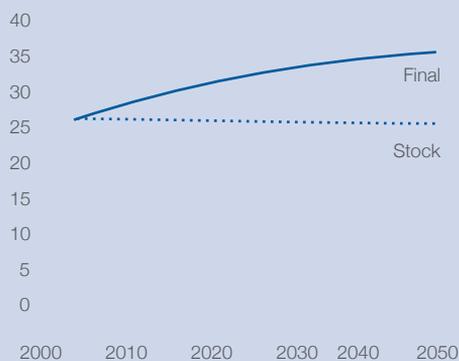


Concrètement, cela signifie que, dans les tissus urbains, toutes les constructions neuves sont considérées comme étant le fruit d'opérations planifiées et que la mise en œuvre de moyens de chauffage mutualisés y est possible. Les hypothèses posées concourent notamment à l'élimination des maisons individuelles en diffus hors rural pour les constructions neuves, changement non négligeable par rapport à la situation actuelle qui semble s'imposer pour appliquer les hypothèses retenues dans les scénarios énergétiques.

### Le parc construit dans l'intervalle 2005-2050 et le parc final

Le parc serait composé de 35,5 millions de logements en 2050. La part de logements construits dans l'intervalle 2006-2050 atteindrait 30% : la majeure partie du parc de 2050 est donc déjà construite, en raison du faible taux de renouvellement du parc. En particulier, le nombre de logements en BEPOS construits dans l'intervalle 2020-2050 s'élèverait à 5,8 millions de logements, soit plus de 16% du parc en 2050. **T11**  
La surface habitable totale atteindrait 3 340 Mm<sup>2</sup> en 2050, soit une augmentation de 32% par rapport à la situation prévue en 2010 (2 530 Mm<sup>2</sup>). **F17 T12 T13**

**Figure 17.**  
Évolution du nombre de logements  
(stock et total en millions de logements)



**Tableau 11. Prospective du nombre de logements à 2050 (en milliers)**

Parc de RP	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Stock 2005	25 847	25 693	25 658	25 512	25 344	25 326	25 083	24 962	24 841	24 847
Final	25 847	27 577	29 066	30 350	31 512	32 736	33 620	34 429	34 999	35 506

**Tableau 12. Évolution du nombre de résidences principales (2005-2050)**

Logements (en milliers)	2005	2010	2050
Zone H1	15 503	16 570	21 115
Zone H2	7 467	8 000	10 745
Zone H3	2 877	3 005	3 645
Total	25 847	27 575	35 505

**Tableau 13. Évolution des surfaces habitables totales (2005-2050)**

Surfaces habitables (en millions de m <sup>2</sup> )	2005	2010	2050
Zone H1	1 379	1 487	1 944
Zone H2	722	780	1 070
Zone H3	252	265	332
Total	2 353	2 532	3 346

# Les consommations d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>

## Les grandes masses

### Les consommations d'énergie du secteur du bâtiment

Le bâtiment représentait 43,6% de la consommation d'énergie finale en France en 2007, avec 70,6 Mtep soit près de 820 TWh répartis entre 560 TWh (environ 70%) pour le résidentiel et 260 TWh pour le tertiaire. Depuis 1973, la progression des consommations du secteur est

de 25%, mais le niveau tend à se stabiliser. Le secteur des transports est en progression plus rapide, avec un quasi doublement des consommations finales sur la même période. **T14 F18**

Le secteur du bâtiment est encore très dépendant des énergies fossiles, du gaz en particulier, qui, avec une croissance de 1,8% par an entre 2000 et 2007, représente 32% des consommations finales, ce qui le situe en première place. Cette croissance est en grande partie facilitée par le

Tableau 14. Consommation finale énergétique (1), en millions de tep

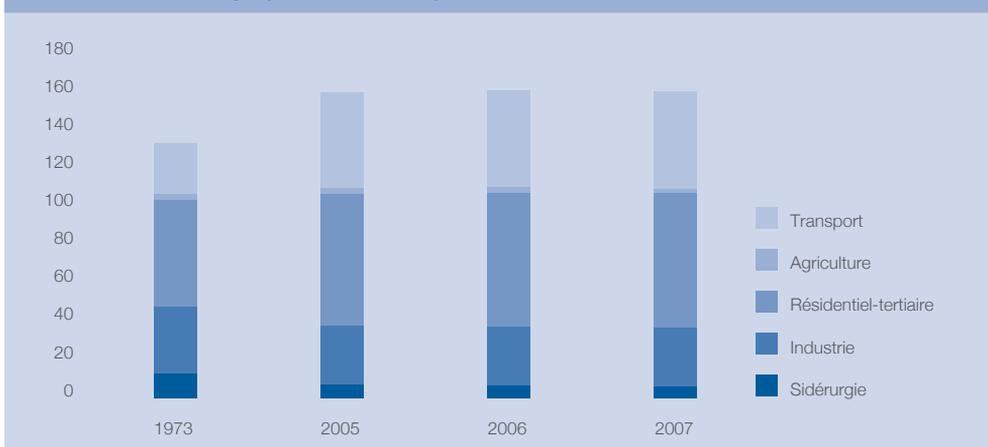
	1973	2005	2006	2007
SIDÉRURGIE	12,5	5,8	6,2	5,8
INDUSTRIE	35,4	31,9	31,6	31,3
RÉSIDENTIEL-TERTIAIRE	56,4	69,7	70,7	70,6
AGRICULTURE	3	2,9	2,8	2,8
TRANSPORTS (2)	26,3	50,4	50,8	51,6
TOTAL ÉNERGIE FINALE	133,6	160,7	162,1	162,1

(1) Corrigée du climat (+ 5,41 Mtep en 2007).

(2) Hors routes maritimes internationales

Source : DGEMP/OE, données France métropolitaine, corrigées du climat.

Figure 18.  
Consommation finale énergétique, en millions de tep



déclin des produits pétroliers (fioul domestique et GPL), de -5,2% sur un an, conduisant à une part inférieure à 20%. En 2007 et en nombre de logements, la première place revient à l'électricité, en progression constante (+ 2,4% par an depuis 2000) à près de 35% du parc de logements. Les combustibles minéraux solides (le charbon principalement dans le parc de logements) sont en voie d'extinction dans ce secteur, et maintiennent une position significative dans le seul secteur de l'industrie, essentiellement pour la sidérurgie. La part des ENR thermiques est en progression, pour atteindre 13%, incluant le solaire thermique et la part de renouvelable des pompes à chaleur, et le bois-énergie consommé dans le parc résidentiel, qui en représente la part essentielle. **T15 F19**

Pour le seul secteur résidentiel, en climat normal, les consommations totales atteignent 547 TWh en énergie finale en 2004. Le charbon a quasiment disparu, la part du fioul a chuté de 44% en 1975 à 19% en 2004, le bois se maintient entre 16 et 20% de part de marché, la croissance la plus forte revenant au gaz (de 12,5% à 32,5% dans l'intervalle) et à l'électricité,

qui a triplé sa part en 30 ans, pour atteindre 25% des consommations finales du parc de logements en 2004. **F20 T16**

### Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergie

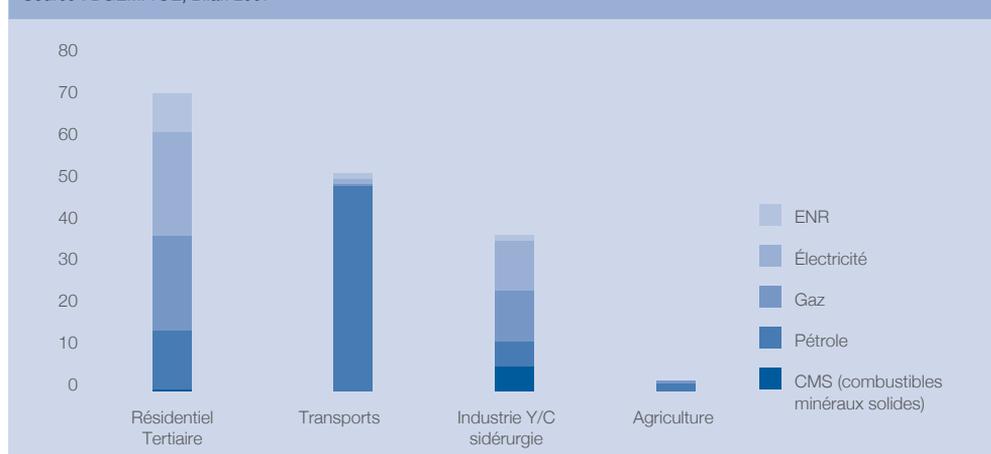
Les émissions totales de CO<sub>2</sub><sup>13</sup> pour la France métropolitaine, liées à la combustion d'énergie s'élèvent en 2007 à 397 millions de tonnes<sup>14</sup>, la forte hausse du secteur des transports (+15,3% depuis 1990) effaçant les réductions obtenues dans d'autres secteurs comme l'industrie et l'agriculture. Ces émissions se répartissent de façon très contrastées selon les secteurs d'activité, les transports occupant la première place avec 136 MtCO<sub>2</sub> (34%), devant le secteur résidentiel et tertiaire (hors électricité et chaleur sur le réseau qui sont comptabilisés dans la branche énergie) avec 84 MtCO<sub>2</sub>, selon une évolution relativement stable depuis 1990. La combustion dans l'industrie provoque l'émission de 96 MtCO<sub>2</sub>, la transformation de l'énergie représentant 70 MtCO<sub>2</sub>. L'agriculture et le traitement des déchets comptent seulement pour 10 MtCO<sub>2</sub>, soit 2% du total. **F21**

**Tableau 15. Consommation finale énergétique (corrigée du climat)**

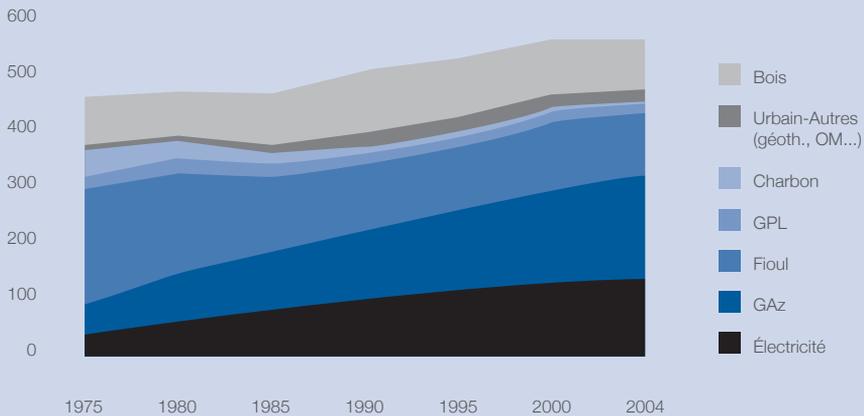
Année 2007, en millions de tep	Charbon	Pétrole	Gaz	Électricité	ENR	Total
RÉSIDENTIEL TERTIAIRE	0,38	13,94	22,75	24,38	9,19	70,64
TRANSPORTS		48,96	0,07	1,05	1,5	51,58
INDUSTRIE Y/C SIDÉRURGIE	6,18	5,94	11,92	11,62	1,42	37,08
AGRICULTURE		2,15	0,29	0,27	0,05	2,76
TOTAL ÉNERGIE FINALE	6,56	70,99	35,03	37,32	12,16	162,06

Source : Bilan énergétique de la France pour 2007, (France métropolitaine), DGEMP/OE.

**Figure 19.**  
Répartition de la consommation finale en 2007  
Source : DGEMP/OE, Bilan 2007



**Figure 20.**  
**Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel (TWh)**  
 Source : CEREN. Conventions pour les combustibles : TWh PCI



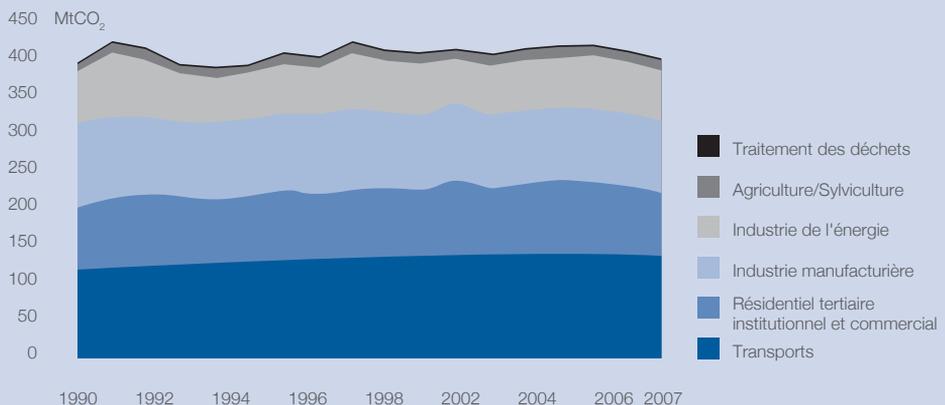
**Tableau 16. Évolution des consommations finales des résidences principales 1973-2006**

	1973		2006	
	En Mtep	En %	En Mtep	En %
Chaleur *	0,7	1,8%	1,5	3,5%
Bois	6,8	17,2%	6,5	15,2%
Électricité	2,5	6,3%	11,6	27,2%
Gaz	4	10,1%	14	32,8%
Pétrole (yc GPL)	20,2	51,1%	8,9	20,8%
Charbon	5,3	13,4%	0,2	0,5%
Total	39,5	100%	42,7	100%

Source : ADEME/CEREN, données corrigées du climat

\* Chaleur produite par les réseaux de chaleur urbains

**Figure 21.**  
**Émissions de CO<sub>2</sub> depuis 1990 (référence du protocole de Kyoto)**  
 Source : CITEPA/ inventaire CCNUCC décembre 2008



En considérant l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre directes du secteur du bâtiment, DOM compris, près des deux tiers sont directement imputables au sous-secteur résidentiel, et proviennent essentiellement des installations de chauffage, de production d'eau chaude et de froid alimentaire. Elles ont augmenté de plus de 15 % entre 1990 et 2007. Ici, nous prenons en compte les seules émissions de CO<sub>2</sub>, pour la seule métropole, qui ont été relativement stables dans le secteur résidentiel et tertiaire. **T17**

En incluant l'électricité et les réseaux de chaleur, comptabilisés dans le secteur de l'industrie de l'énergie, nous estimons que la consommation d'énergie du secteur entraîne l'émission d'environ 120 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> (85 Mt pour le résidentiel et 35 Mt pour le tertiaire). **F22**

### Les postes de consommation d'énergie dans le parc résidentiel

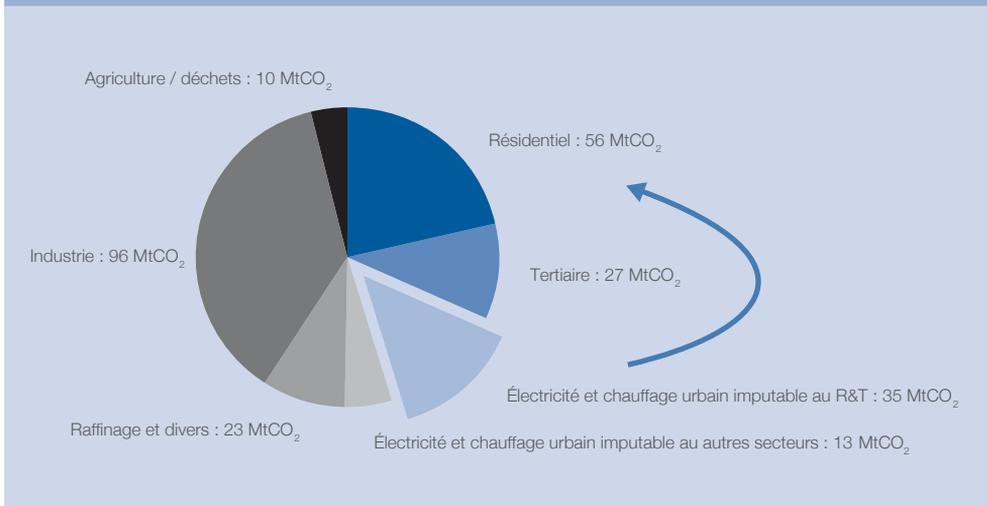
Malgré l'augmentation importante du nombre de logements entre 1973 et 2006 (de 17 millions à plus de 26 millions pour les seules résidences principales), la consommation totale d'énergie a peu augmenté. Le chauffage se distingue par une légère décroissance des consommations totales, tandis que les deux postes de l'eau chaude sanitaire (ECS) et de l'électricité spécifique<sup>15</sup> ont connu une croissance continue, avec un triplement pour l'ECS et près d'un quadruplement pour l'électricité spécifique dans l'intervalle. Le chauffage demeure une priorité d'action dans le parc existant, puisqu'il représente, malgré la baisse des consommations, 70% de la consommation énergétique finale totale du logement. **T18**

Tableau 17. Émissions de GES directes au format "Plan Climat" en France-Kyoto (Métropole + DOM)

	Émissions en kt éq CO <sub>2</sub>					
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC	PFC	SF <sub>6</sub>
Résidentiel	56 456	1 779	973			
Tertiaire	27 413	39	363			
Consommation de gaz fluorés	0	0	0	6 720	0	11
Solvants et produits divers	438	0	0			
Total Résidentiel Tertiaire Institutionnel et commercial	84 307	1 818	1 336	6 720	0	11

Source CITEPA/ inventaire CCNUCC décembre 2008

Figure 22. Émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production et à la consommation d'énergie en France. Source : CITEPA/ inventaire CCNUCC décembre 2008 / estimation étude CLIP



**Tableau 18. Consommation finale des résidences principales par usage**

	1973		2006	
	En Mtep	En %	En Mtep (*)	En %
Électricité spécifique	1,5	3,8%	5,9	13,8%
Cuisson	2,7	6,9%	2,4	5,6%
Eau chaude	1,5	3,8%	4,4	10,3%
Chauffage	33,7	85,5%	30	70,3%
Total	39,4	100%	42,7	100%

(\*) EnR incluses (8,3 Mtep pour le bois)  
Source : ADEME / CEREN / Observatoire de l'énergie

**Tableau 19. Répartition des consommations énergétiques dans le parc de résidences principales en 2005 (en TWh, énergie finale)**

Postes \ Énergies	Charbon	Fioul	GPL	Gaz	Élec.	Bois	EnR	Total	(en %)
Chauffage	3,00	93,20	9,10	151,8	34,8	87,90	3,90	383,70	70,4%
ECS (eau chaude)	0,4	11,40	2,30	19,8	19,5		0,2	53,60	9,8%
Cuisson			9,80	12,8	11,1			33,70	6,2%
Élec. spécifique					73,7			73,70	13,5%
Total	3,40	104,60	21,20	184,40	139,10	87,90	4,10	544,70	100%

Sources : DGEMP 2003 et calage EDF / GDF SUEZ à partir des données CEREN

Le croisement de plusieurs bases de données permet de reconstituer la situation 2005 par énergie et par poste de consommation. **T19**

## Le parc de logements et les consommations d'énergie

### Les dépenses d'énergie dans les différentes catégories de logement

Depuis 2000 dans la construction neuve, la part du gaz décroît au profit de l'électricité : 26% des maisons neuves et 39% des appartements neufs sont chauffés au gaz, pour 66% des logements neufs chauffés à l'électricité (effet Joule principalement à plus des deux tiers et pompes à

chaleur). Le chauffage électrique équipe en 2006 7,3 millions de logements, mais le gaz, encore majoritaire compte tenu de l'importance du parc antérieur à 2000, demeure l'énergie de chauffage de 41% des résidences principales (33% pour les maisons individuelles, 53% pour les appartements). Les appareils de chauffage indépendants n'équipent plus que 5% des logements, le chauffage au fioul a fortement diminué et le charbon a quasiment disparu. **T20**

La part du bois-énergie en consommation de chauffage (6,5 sur 30 Mtep soit 21,7% en 2006), est bien plus importante qu'en effectifs attribués selon l'énergie principale (moins de 8%), car le bois est largement utilisé en chauffage d'appoint, par exemple dans un logement à biénergie bois-

**Tableau 20. Énergie principale de chauffage dans le parc de logements en 2006 (en milliers)**

	Locataires	Propriétaires	Ensemble	Répartition (%)
AIC	440	920	1 360	5,2
Fioul	980	3 620	4 600	17,6
Gaz	5 580	5 200	10 780	41,3
Électricité	3 260	4 050	7 310	28,0
Autres	1 030	1 040	2 070	7,9
Ensemble	11 290	14 830	26 120	100

Source : CEREN  
Champ : France métropolitaine

électricité. Cet effectif représenterait un million de logements, maisons individuelles pour l'essentiel. Une autre raison de l'écart entre ces deux parts est relative à l'âge de la construction et au faible rendement de l'équipement : la consommation unitaire de chauffage est en moyenne de 340 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les logements chauffés au bois, soit le double de la moyenne nationale. Un tel déséquilibre entre effectifs et consommations est en cours de correction, grâce au label « Flamme verte » (label caractérisant les équipements performants) en forte progression dans les ventes d'équipements. Le crédit d'impôts favorise les meilleurs rendements, en s'appliquant dès 2009 aux rendements supérieurs à 70% (65% auparavant).

### Les consommations unitaires d'énergie de chauffage selon la zone climatique

Les consommations unitaires de chauffage (en kWh/m<sup>2</sup>/an) sont dépendantes de la typologie (maison individuelle, immeuble collectif), et de la région climatique. La différence entre les deux typologies est d'importance variable selon la zone climatique : la surconsommation de la

maison individuelle est d'environ 60% pour les zones H1 et H2, et de 75% pour la zone H3, par rapport au logement en immeuble collectif. **T21 F23**

Le bois occupe une place importante dans les énergies de chauffage, de 20% en zone H1, à 28% en zone H2. Pour le gaz, la plus forte densité urbaine conjointe à des besoins de chauffage plus élevés en zone H1 ont permis d'étendre les réseaux de gaz dans nombre de communes de cette zone, ce qui confère une place importante au gaz dans cette zone, à près de 35%, contre 25% en zone H2. L'électricité domine en région H3, où les besoins sont plus faibles. **F24**

### L'eau chaude sanitaire : évolution des consommations énergétiques depuis 1985

Les consommations totales d'eau chaude sanitaire ont augmenté plus rapidement que la population au cours des décennies précédentes : de 40,7 TWh en 1985, pour 55 millions d'habitants, elles ont atteint 47,6 TWh pour 58,8 millions d'habitants en 2000. Selon les données de la DGEMP, un pic de consommation apparaît en 2000, suivi d'une légère décroissance des consommations

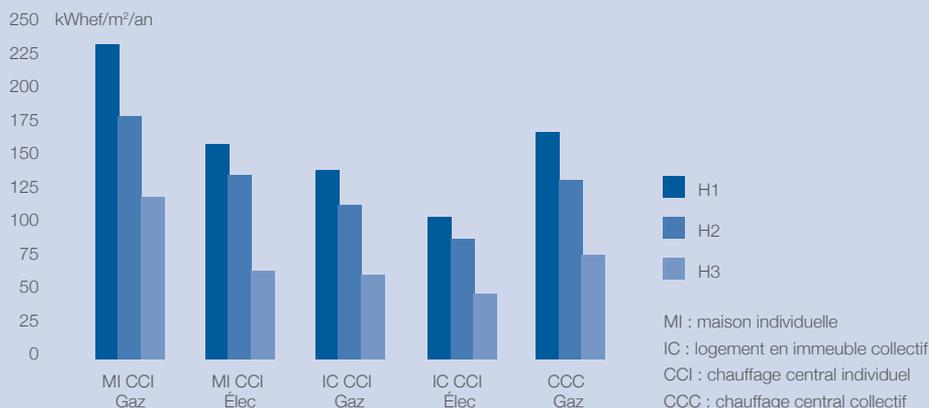
Tableau 21. Valeurs moyennes de consommations de chauffage en 2005

En kWh/m <sup>2</sup> SHAB/an	Zone H1	Zone H2	Zone H3	Moyenne
Maison individuelle	212	169	112	187
Logement en immeuble collectif	126	102	64	113
Moyenne	180	156	91	163

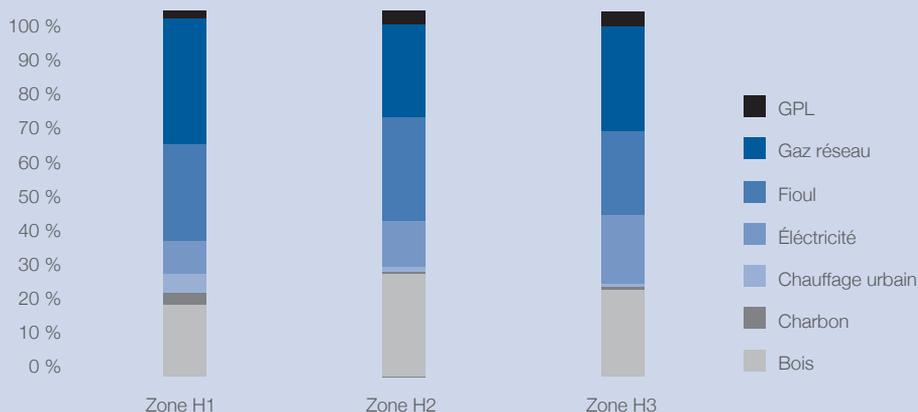
Source Énergies Demain. SHAB : surface habitable.

Figure 23.

Consommations unitaires (par m<sup>2</sup> SHAB) moyennes de chauffage en 2005 selon la zone climatique, la typologie, et l'équipement de chauffage. Source : Énergies Demain



**Figure 24.**  
Répartition des consommations énergétiques de chauffage en fonction de la zone climatique

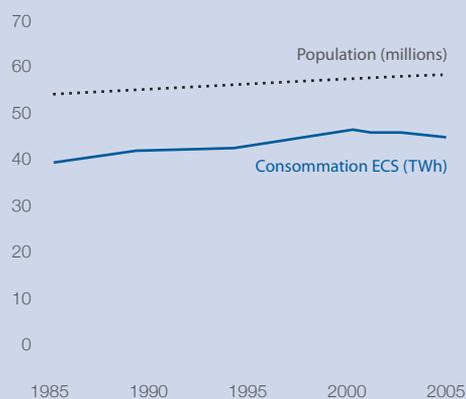


totales, bien que le CEREN indique une consommation de 50,6 TWh en 2005, qui apparaît plus en continuité des consommations antérieures à 2000. **F25**

Quatre énergies dominent les consommations d'énergie destinées à la production d'eau chaude sanitaire en 2003 : l'électricité (44%), le gaz de réseau (31%), le fioul (18%), et le GPL (6%). **T22** Le fioul décline lentement, bien que les données récentes de la DGEMP indiquent une chute plus rapide depuis 2000 : en conséquence, les émissions totales de CO<sub>2</sub> sont en légère décroissance. Ce déclin est peut être lié à l'augmentation des prix du fioul qui a favorisé les conversions vers des combustibles moins carbonés, dont le gaz naturel ou vers l'électricité, dont la part grandissante, à faible contenu CO<sub>2</sub> pour la production d'ECS (à 40 g CO<sub>2</sub>/kWh pour les chauffe eau à accumulation en heures creuses), est un facteur favorable à cette diminution des émissions de CO<sub>2</sub>. **F26**

**Figure 25.**  
Évolutions de la population et des consommations énergétiques de production de l'eau chaude sanitaire

Consommations ECS 1985-2005 : données DGEMP-Observatoire de l'énergie.

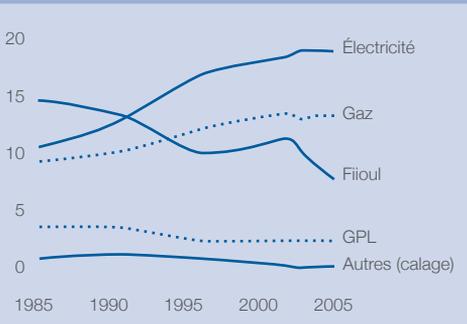


**Tableau 22. Consommations énergétiques d'ECS par énergie**

Énergie (TWh)	1985	1990	2003
Gaz	9,81	10,62	13,77
Fioul	15,12	13,95	8,14
GPL	3,82	3,82	2,55
Électricité	10,9	13,3	19,4
Autres (*)	1	1,4	0,3
TOTAL	40,64	43,09	44,16
CO <sub>2</sub> Mt	7,58	7,59	6,44

(\*) Calage sur les différentes données DGEMP-Observatoire de l'énergie (05/12/2005).

**Figure 26.**  
**Consommations finales par type d'énergie pour la production d'ECS**  
 Consommations ECS 1985-2003 : données DGEMP-Observatoire de l'énergie, 05/12/2005.



**Les consommations unitaires de production d'eau chaude sanitaire**

**Méthode d'estimation des besoins par personne**

Les besoins d'eau chaude sanitaire (que l'on peut exprimer en énergie utile) sont supposés être affectés à la personne. Deux types de besoins doivent être distingués :

- les besoins théoriques basés sur une consommation conventionnelle d'eau chaude par personne et par jour, dépendant de la température de l'eau, donc de la saison et de la localisation ;
- les besoins réels, ou effectifs, qui représentent en réalité une consommation d'eau chaude que l'on constate inférieure à la norme, bien que la part de population équipée pour satisfaire les besoins théoriques approche 98%.

La méthode utilisée comporte trois étapes :

- l'estimation par le calcul conventionnel des besoins théoriques en énergie utile (kWh<sub>eu</sub>/an/pers.) selon la température de l'eau, dépendant de la zone climatique, estimation qui sera consi-

dérée comme une borne supérieure à l'évolution tendancielle des besoins par personne ;

- la définition d'un taux dit de satisfaction (besoins constatés/besoins théoriques) ;
- l'application progressive de mesures d'économie de consommation d'eau sur la norme conventionnelle, permettant d'atteindre une réduction de la consommation de 30% à l'horizon 2050.

Aujourd'hui, la comparaison du calcul normatif et des consommations constatées révèle un déficit de 30%, donc un taux de satisfaction de 0,7 seulement. A 2050, nous faisons l'hypothèse que le taux de satisfaction sera de 1, mais que, dans le même temps, l'installation de réducteurs de pression et de douchettes économes aura permis de baisser le besoin d'un facteur équivalent (- 30%). Le besoin par personne à 2050 devrait donc être du même ordre que celui constaté aujourd'hui.

L'évolution des besoins unitaires par personne sera dressée sur cette base, selon la double loi d'un passage à 100% de taux de satisfaction dès que celui-ci est atteint par extrapolation tendancielle, en introduisant simultanément un taux de réduction (d'économie d'eau) de 1 en 2010 à 0,7 en 2050. **F27**

Les besoins théoriques Be<sub>cs</sub> (en kWh d'énergie utile par an et par logement) sont calculés par la méthode 3CL, à partir de la température moyenne de l'eau froide T<sub>ef</sub> et de la surface habitable SHAB :

$$Be_{cs} = 1,163 * Q_{ecs} * (40 - T_{ef}) * 48 / 1000$$

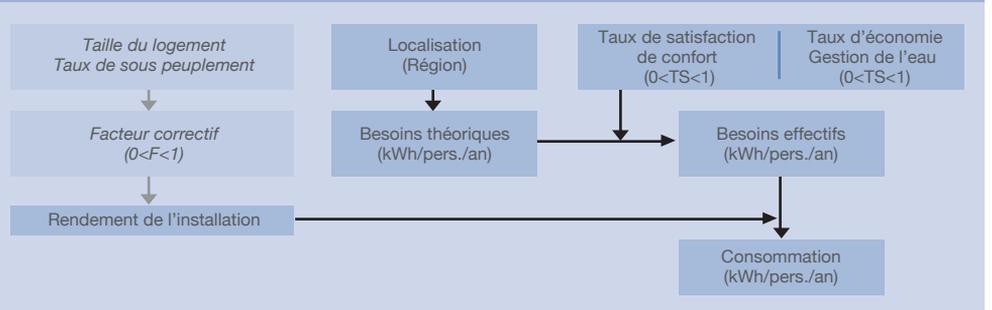
Avec:

$$Q_{ecs} = 470,9 * LN(SHAB) - 1075$$

Pour des valeurs moyennes de T<sub>ef</sub> = 11,5°C, de SHAB = 90 m<sup>2</sup> et de 37 mètres carrés par personne, les besoins théoriques peuvent être estimés à 680 kWh<sub>eu</sub>/personne.

Cette valeur moyenne peut-être différenciée selon les zones climatiques, la température de l'eau froide étant différente pour les trois zones. **T23**

**Figure 27.**  
**Procédure d'estimation des consommations unitaires d'énergie pour la production d'ECS**  
 (Dans cette étude, la correction selon le taux de sous peuplement n'est pas prise en compte.)



En réalité, les quantités d'eau et d'énergie consommées par personne dépendent de la taille du logement, mais la correction tenant compte de cette caractéristique, comme celle du taux de peuplement, n'est pas prise en compte dans l'étude.

### Estimation des rendements de production de l'ECS par analyse rétrospective

La procédure d'estimation des besoins réels actuellement satisfaits suppose de connaître les rendements de production d'ECS :

$$R_{\text{tot}} = R_g \times R_d \times R_s$$

Avec

$R_{\text{tot}}$  : rendement total de production d'eau chaude sanitaire,

$R_g$  : rendement de génération, dépendant de la performance du générateur et de l'énergie utilisée (ballon électrique, chaudière gaz, fioul, etc.).

$R_d$  : rendement de distribution

$R_s$  : rendement de stockage

Sur la base de la méthode 3CL, on peut estimer les rendements moyens annuels de l'installation

d'eau chaude sanitaire, sur la base des parts de marché et des effectifs MI / IC. **T24**

À partir des valeurs des rendements  $R_{\text{tot}}$ , on en déduit les besoins totaux  $B_{\text{tot}}$  :

$$B_{\text{tot}} = \sum (C_i \times R_{\text{tot}i})$$

Avec

$C_i$  : consommation de l'énergie  $i$

$R_{\text{tot}i}$  : rendement moyen pour l'énergie  $i$

Le rendement moyen varie ainsi de 0,50 en 1985, à 0,55 en 2000. Les besoins constatés apparaissent ainsi assez éloignés des besoins théoriques de 680 kWh/pers. **T25**

### Taux de satisfaction des besoins en ECS et estimation projective des besoins à 2050

À partir de la double estimation des besoins théoriques moyens, et des besoins effectifs, on définit un taux de satisfaction moyen  $T_{\text{sm}}$  des besoins en ECS :

$$T_{\text{sm}} = \text{Besoins constatés} / \text{Besoins théoriques}$$

Ce taux progresse sensiblement entre 1985 et 2000. **T26**

**Tableau 23. Estimation des besoins annuels (en énergie utile par personne) pour la production d'ECS pour les trois zones climatiques**

Zone climatique	Te ref	l/pers/jour	T ECS	Besoins /an (kWh)
H1	10,5	45	50	693
H2	12	45	50	666
H3	14,5	45	50	622

**Tableau 24. Estimation des rendements moyens de production d'ECS selon l'énergie utilisée basée sur la méthode 3CL**

Type d'énergie ECS	1985	1990	2000
Fioul	0,43	0,44	0,45
GPL	0,49	0,49	0,5
Gaz réseau	0,44	0,44	0,48
Chauffage urbain	0,5	0,5	0,5
Bois	0,25	-	-
Électricité	0,67	0,67	0,68

**Tableau 25. Estimation des rendements moyens de production d'ECS**

	1985	1990	2000
Consommations totales (TWh)	40,64	43,09	47,61
Somme des besoins réels (TWh)	20,49	22,43	26,37
Population (en millions)	55,30	56,62	58,82
Besoins réels (kWh/pers)	370	396	448
Rendement moyen (besoins/consommations)	0,50	0,52	0,55

**Tableau 26. Estimation du taux de satisfaction moyen (production d'ECS, analyse rétrospective)**

Année	1985	1990	2000
Taux de satisfaction	0,55	0,58	0,66

L'introduction du taux de satisfaction permet d'exprimer que le calcul théorique des besoins en représente la borne supérieure, théoriquement jamais dépassée (ce qui serait pourtant possible par « effet rebond »). La poursuite du taux de croissance actuel du rapport (besoins constatés/besoins théoriques) jusqu'en 2050 montre que la valeur 1 serait atteinte en 2050 (cf. figure). **F28**

Parallèlement à l'évolution de ce taux (constaté/théorique), il est également possible d'introduire un taux de réduction de la consommation d'eau, dû à des équipements plus économes. Les dispositifs actuellement sur le marché sont susceptibles d'entraîner une baisse de consommation d'eau chaude de 30% qui peut être retenue dans un scénario volontariste tant vis-à-vis des ressources énergétiques que des ressources en eau. Ainsi leur généralisation à l'horizon 2050 peut se traduire par l'application d'un taux progressif de réduction des besoins, de 1 pour la période 1985-2005, à 0,7 en 2050. Il en résulte un taux final que nous pourrions appliquer aux besoins de références (obtenus par le calcul théorique) afin d'obtenir les besoins énergétiques pour la production d'ECS, servant de base au calcul des consommations.

Ce taux obtenu à l'échelle nationale pourrait en réalité être régionalisé : compte tenu des températures de l'eau plus élevées au départ en zone H3, il est probable que le taux de satisfaction serait également supérieur à la moyenne nationale. **T27 F29**

Pour chaque année t, on calcule les besoins unitaires réels par personne Bu en fonction de la zone climatique i :

$$Bu(t,i) = BeCs(i) * Ts(t) * Te(t)$$

BeCs(i) : besoins théoriques (ou borne supérieure) de la zone climatique i (i : 1 à 3) en kWhEU/pers/an

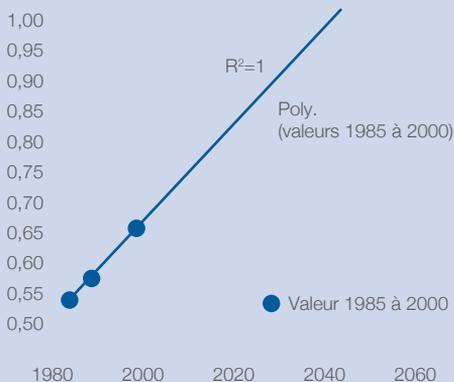
Ts(t)\*Te(t) : taux final de réduction des besoins théoriques pour l'année t, calculé à l'échelle nationale.

Sur la base des besoins unitaires utiles, l'évolution des besoins totaux pour l'ensemble de la population peut être estimée : en énergie utile, ces besoins totaux croissent modérément en raison du taux de réduction de 0,7 appliqué en 2050. **F30**

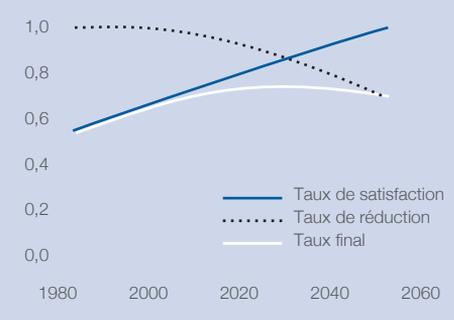
### Estimation des consommations (hors solaire thermique) : par logement et par unité de surface

En écartant les corrections qui seraient liées au taux de sous peuplement<sup>16</sup>, on peut estimer pour une année t donnée, les consommations totales par logement Cecs à partir des besoins unitaires Bu (exprimés par personne), selon la zone climatique i, par l'expression :  
 $Cecs(t,i) = [Bu(t,i) - As(i)] * [1/Rtot(t)] * TM(t)$   
 Cecs(t,i) en kWhEF/logt/an  
 Bu(t,i) en kWhEU/pers/an  
 As(i) : apports solaires thermiques de la zone climatique i rapportés à la personne en kWh/pers/an,

**Figure 28.**  
Projection du taux de satisfaction des besoins en ECS



**Figure 29.**  
Taux appliqués aux besoins énergétiques de production d'ECS : taux de satisfaction, taux de réduction, taux final



**Tableau 27. Projection des taux de satisfaction et de réduction des besoins en ECS**

	1985	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Taux de satisfaction (Ts)	0,55	0,58	0,66	0,73	0,80	0,87	0,94	1
Taux d'économie ou de réduction (Te)	1	1	1	0,98	0,93	0,85	0,78	0,7
Taux final (Te*Ts)	0,55	0,58	0,66	0,71	0,74	0,74	0,73	0,7

en cas d'utilisation de panneaux solaires pour la production d'ECS.

TM (t) : taille du ménage, en nombre de personnes par logement pour l'année t<sup>17</sup>.

Rtot (t) : rendement total de l'installation, pour l'année t (fixe pour la période de non renouvellement de l'installation).

Les besoins unitaires sont calculés à partir de la valeur théorique (dite borne supérieure) selon la zone climatique, affectée du coefficient (Ts\*Te) défini plus haut. La taille du ménage a été estimée annuellement par région jusqu'en 2030, à partir de l'âge moyen de la population des ménages déduit des scénarios INSEE.

Le rendement total sera estimé à partir de deux rendements :

$$R_{total} = R_g * R_{ds}$$

Rg : rendement de génération selon le système et l'énergie

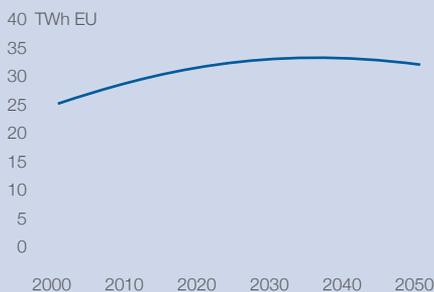
Rds : rendement de distribution et de stockage

Sans correction du taux de sous peuplement, les

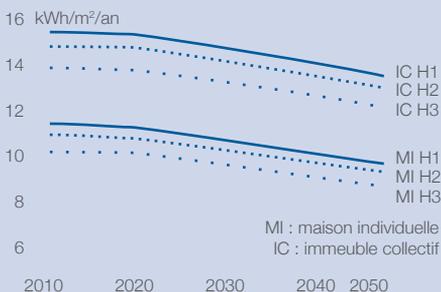
besoins par mètre carré de surface habitable décroissent dès 2020 sous le double effet du taux de réduction introduit, et de l'augmentation des surfaces habitables par personne. **F31**

La nécessité de respecter la réglementation thermique appliquée aux consommations unitaires se traduit par des évolutions technologiques tranchées. Pour une production d'eau chaude sanitaire par ballon électrique (Rtotal = 0,7) en zone H3, un niveau en énergie utile de 10 kWhEU/m<sup>2</sup> SHAB entraîne une consommation en énergie finale de 14,3 kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup> SHAB soit 37 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB : cette consommation apparaît impossible au niveau BBC qui sera généralisé dès 2012. Cela rend obligatoire le recours à des technologies plus avancées telles que l'ECS thermodynamique ou le solaire thermique (à un minimum de 50% de couverture des besoins) associé à la recherche d'optimum technologique sur l'appoint.

**Figure 30.**  
Estimation des besoins énergétiques totaux de production d'ECS (2000-2050)



**Figure 31.**  
Estimation des besoins énergétiques unitaires d'ECS en kWhEU par unité de surface habitable selon la typologie du logement et la zone climatique.



# Prospective « Facteur 4 » de la demande énergétique à 2050

## Les mesures adoptées dans les politiques publiques

### Les performances énergétiques de la construction neuve

Depuis 1974 des réglementations thermiques ont été établies pour réduire progressivement la consommation d'énergie de la construction neuve, en particulier celle qui est destinée au chauffage, car ce poste représente en moyenne les deux tiers de la consommation d'énergie et la majeure partie des émissions de CO<sub>2</sub>. Depuis 2000, la réglementation a affiché une sévèrification progressive des exigences de performances énergétiques des bâtiments en construction neuve<sup>18</sup>, au taux de 10% tous les cinq ans par rapport à la référence précédente, qui s'est aussitôt renforcée à 15% (Cref<sup>19</sup> de -15% tous les 5 ans) à l'étape 2005, dite RT 2005, applicable depuis septembre 2006, et prévoyant un saut de -40% en 2020. Des premiers seuils de consommation unitaire maximale en mètre carré de SHON<sup>20</sup> et en énergie primaire<sup>21</sup> ont été imposés dans le résidentiel (dits Cmax), pour les postes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le rafraîchissement qui est cependant assez peu répandu dans le résidentiel. **T27**

Le niveau de la réglementation thermique RT 2005, en Cepmax (chauffage et ECS seuls, par mètre carré de SHON), qui s'étend de 80 à

250 kWh-ep/m<sup>2</sup>/an, selon la zone climatique et l'énergie de chauffage, est accompagné de plusieurs niveaux de labels. **E1**

Les travaux du Grenelle de l'environnement ont bouleversé le calendrier, en mettant l'accent sur le secteur du bâtiment, pour lequel les actions sont le mieux identifiées. En particulier, la loi relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement dite Loi Grenelle 1 fixe deux dates pour les logements neufs<sup>22</sup> dans un véritable programme de rupture technologique :

- 2012 : généralisation des logements neufs à basse consommation (BBC, à 50 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHON, niveau précisé au sein des groupes de travail réglementaire de la DHUP) ;

#### Encadré 1.

##### Labels réglementaires en cours sur la base de la RT2005

HPE (haute performance énergétique) : Cref - 10%  
 HPE ENR ((haute performance énergétique avec contribution des énergies renouvelables) : Cref - 10% et recours aux énergies renouvelables  
 THPE (très haute performance énergétique) : Cref - 20%  
 THPE ENR (très haute performance énergétique avec contribution des énergies renouvelables) : Cref - 30% et recours massif aux énergies renouvelables  
 BBC (bâtiment basse consommation) : 50 x (a+b), en kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>SHON/an  
 (a et b coefficients climatiques sur les usages chauffage, ECS, climatisation, auxiliaires et éclairage).

Tableau 27. Consommations maximales prévues dans la RT2005

Type de chauffage	Zone climatique	Consommation conventionnelle pour le chauffage, le refroidissement et la production d'ECS en kWh primaire /m <sup>2</sup> SHON/an
Combustibles fossiles	H1	130
	H2	110
	H3	80
Chauffage électrique (y compris les pompes à chaleur)	H1	250
	H2	190
	H3	130

- 2020 : pour toutes les constructions neuves, la consommation d'énergie primaire doit être inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions et notamment le bois-énergie (100% des logements neufs en BEPOS, bâtiments à énergie positive).

Deux labels BBC vont voir le jour :

- un BBC à  $50 \times (a+b)$  kWh-ep/m<sup>2</sup> SHON pour les bâtiments sans compensation photovoltaïque (PV),
- un BBC avec compensation PV, fixant une limite avant compensation de  $60$  à  $65 \times (a+b)$  kWh-ep/m<sup>2</sup> SHON,

les coefficients a et b étant fonction des zones climatiques, corrigés des altitudes<sup>23</sup>. La compensation PV s'exprime en énergie primaire. **F32**

Le BEPOS obéira à différents scénarios, selon les hypothèses de production d'électricité par PV et cogénération gaz naturel ou bois. Le principe est d'adopter le niveau BBC minimum avec compensation par production électrique<sup>24</sup>.

L'évolution future de la réglementation thermique allant vers des logements de plus en plus performants n'est pas encore figée à ce jour.

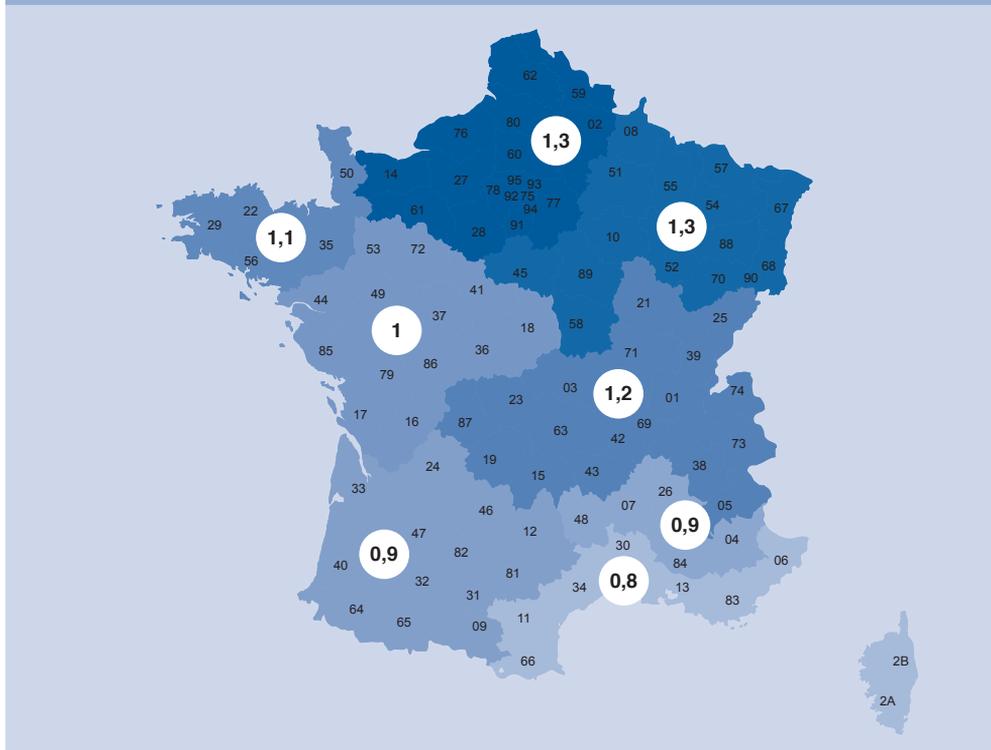
Pour l'étude, nous faisons le choix de cadrer la future RT sur les premiers travaux de Grenelle, à savoir :

- 2010 : généralisation du label THPE (très haute performance énergétique, soit le niveau RT 2005 - 20%) ;
- 2012 : généralisation du niveau BBC ;
- 2020 : généralisation du BEPOS, le bâti et les équipements de chauffage étant déterminés par le niveau BBC, avec compensation des consommations résiduelles par une production locale d'énergie d'origine renouvelable.

### La réhabilitation du parc existant

Pour le secteur du bâtiment existant, les objectifs retenus par le Groupe 1 du Grenelle progressent selon plusieurs étapes successives<sup>25</sup>, en fixant différents niveaux de consommation énergétique moyenne<sup>26</sup>, à 210 kWhep/m<sup>2</sup>.an (soit -12%) dès 2012, puis à 150 kWhep/m<sup>2</sup>.an (soit -38%) d'ici à 2020, grâce à la rénovation complète de 400.000 logements chaque année à compter de 2013. En particulier, les 800.000 logements sociaux dont la consommation annuelle d'éner-

**Figure 32.**  
Coefficients de rigueur climatique (d'après Effinergie)



gie est supérieure à 230 kWhep/m<sup>2</sup>.an<sup>27</sup> doivent ramener leur consommation annuelle d'énergie à des valeurs inférieures à 150 kWhep/m<sup>2</sup>.an, avant 2020.

Enfin, l'objectif est en 2050 d'atteindre une réduction de -70 à -80% par rapport au niveau actuel, soit 50 à 80 kWhep/m<sup>2</sup>.an. Cela revient à appliquer le Facteur 4 sur l'énergie primaire par unité de surface, et à viser la généralisation du label BBC rénovation avant 2050. Parmi les moyens proposés, figure un ensemble d'offres globales sur la base de « bouquets de travaux » qui seraient fondés sur l'assemblage raisonné de techniques comprenant des gestes sur le bâti préalables au traitement des équipements et installations techniques. Dans tous les cas, pour les logements construits avant 1948 en particulier, la nécessité de ne pas perturber le fonctionnement hygrométrique des bâtiments et de valoriser leur contribution au confort d'été pourra conduire à privilégier des stratégies d'amélioration énergétique spécifiques.

L'approche retenue dans l'étude pour la rénovation, commune à tous les scénarios, consiste à favoriser les gestes de rénovation (bâti et systèmes) les plus efficaces, s'appliquant le plus largement, et à chiffrer le potentiel d'économies associées, en écartant toute solution universelle de rénovation. Cette approche est compatible avec les mécanismes incitatifs actuels tels que le crédit d'impôt ou l'éco-prêt à taux zéro pour les bouquets de travaux. Elle conduit à obtenir un facteur 2 environ sur les besoins de chauffage (en énergie utile), le niveau obtenu en énergie primaire dépendant fortement des équipements énergétiques retenus dans les quatre scénarios (voir infra).

### **L'urbanisme**

Pour l'urbanisme, le projet de loi Grenelle 2 de transition environnementale dit PLG2 vise à mettre en cohérence les différents documents réglementaires existants et d'inclure des objectifs de réduction de la consommation de territoire, de répartition équilibrée des commerces et des services, de diminution des déplacements, de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'article 7 du PLG2 précise que la mise en œuvre de travaux d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est permise, notamment par l'isolation extérieure, en adaptant les règles relatives à la protection du domaine public. En référence au projet de loi, nous proposons de

développer massivement l'isolation thermique extérieure (ITE) dans le parc existant lorsque les caractéristiques constructives et architecturales le permettent, sans appliquer de contrainte réglementaire d'urbanisme. Dans le parc neuf, en réponse aux objectifs concernant la consommation de territoire et les déplacements, nous privilégions les formes urbaines continues.

## **La demande d'énergie dans le neuf**

### **Les performances énergétiques de la construction neuve**

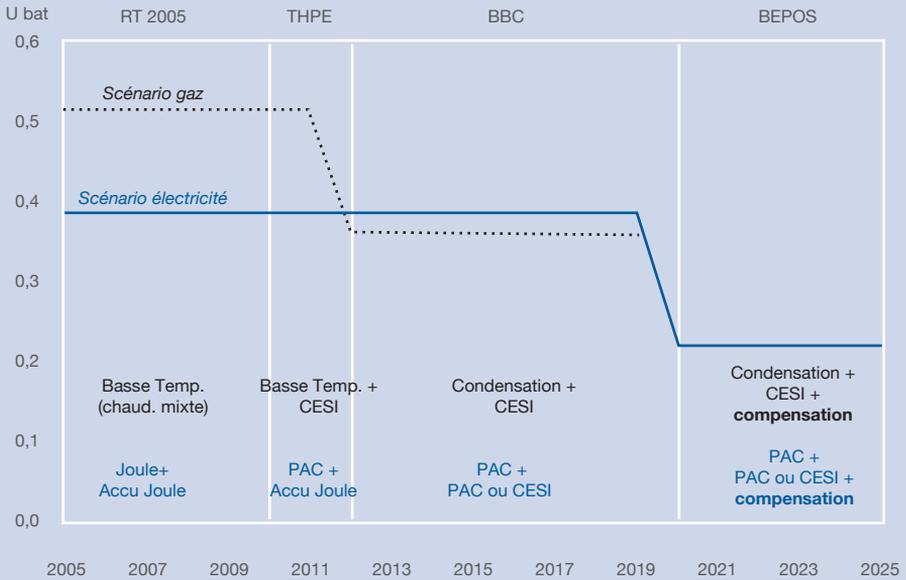
La réglementation thermique impose une performance globale du bâtiment qui ne préjuge pas des moyens à mettre en place pour atteindre le niveau réglementaire de consommation conventionnelle globale. Il est donc envisageable, suivant les projets, de privilégier la performance du bâti (isolation thermique, approche bioclimatique), la performance de la ventilation (VMC hygro), celle du système de chauffage ou celle du système de production d'ECS, ou bien encore le recours aux énergies renouvelables (solaire thermique ou photovoltaïque). Ainsi, pour respecter un label, plusieurs solutions ayant recours à la même énergie sont possibles. Les deux figures suivantes illustrent différentes combinaisons de solutions en fonction des performances des équipements de chauffage (uniquement en gaz et électricité) et de production d'ECS choisis. **F33 F34**

Il convient de relever que les caractéristiques thermiques des bâtiments respectant la RT 2020 ne sont encore que très partiellement appréhendées<sup>28</sup>. En effet, la définition de cette évolution réglementaire n'est pas suffisamment précise pour que nous puissions la traduire explicitement en termes de résistance thermique des parois. Il semble probable que l'évolution de la RT en 2020 provoquera principalement une augmentation rapide de l'installation de systèmes de production d'électricité afin de « jouer » sur les possibilités de compensation. La qualité thermique du bâti pourrait finalement être assez peu affectée par cette réglementation future, au-delà des niveaux BBC.

### **Les hypothèses communes aux différents scénarios énergétiques pour le chauffage dans le neuf**

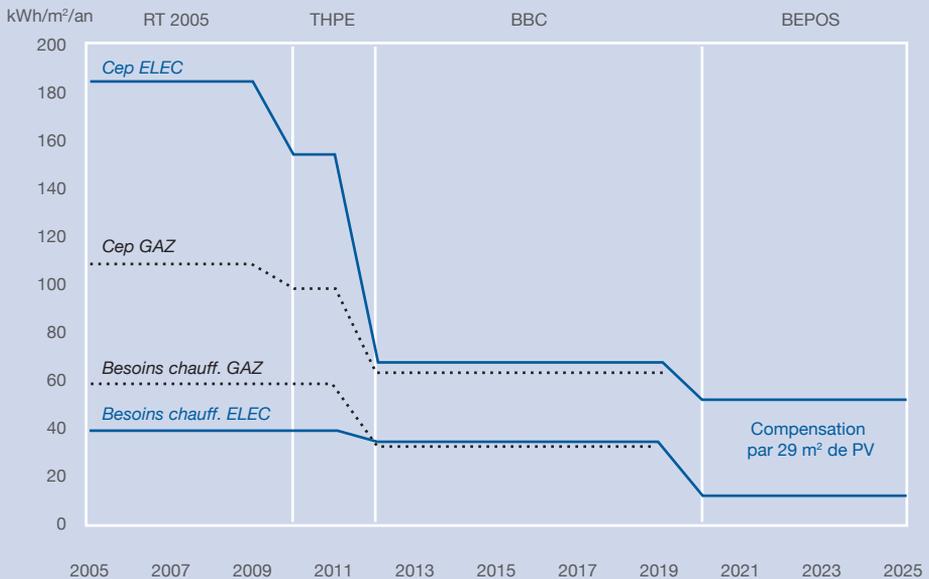
Dans l'application des différentes étapes de la RT (2010 à 2050), l'effort sur la performance du bâti, que traduit le coefficient Ubat, sera privilégié, afin de ne pas dégrader les performances

**Figure 33.**  
Exemples de valeurs de U<sub>bat</sub>\* pour les maisons individuelles neuves en zone H1 selon les niveaux futurs de la RT.



\* Le coefficient U<sub>bat</sub> (exprimé en W/m<sup>2</sup>.K) représente le niveau de déperditions moyen du bâtiment par les parois (murs, planchers, toitures, baies) et par les liaisons (ponts thermiques des planchers, refends ...).

**Figure 34.**  
Exemples de besoins de chauffage (énergie utile) et Cep (énergie primaire) des maisons individuelles en zone H1 selon les niveaux futurs de la RT.



Les kWh sont en énergie utile et primaire et les m<sup>2</sup> en SHON

énergétiques par changement ultérieur d'énergie. Dans un souci de simplification et afin de ne pas multiplier les solutions dans le neuf, nous choisissons de faire converger la performance du bâti vers le même niveau pour toutes les solutions à partir de 2012, dans le respect des exigences BBC.

Pour les solutions de VMC au niveau BBC, il sera possible de se limiter à la VMC hygro B. L'évolution vers la VMC double flux, intéressante au plan de la santé, du fait de taux de renouvellement d'air plus élevés, sera considérée :

- Avec PAC sur l'air extrait pour la production d'ECS
- Ou avec relais en ventilation naturelle hors saison de chauffage, afin de limiter le poste de consommation électrique, qui pénalise la VMC double flux.

Grâce à la généralisation des labels, on suppose que le respect de l'application de la réglementation thermique est effectif à 100%, dès 2012 ce que vise également le projet de loi « Grenelle 2 ». Le recours aux labels, attribués après contrôle par un organisme agréé des engagements de la maîtrise d'ouvrage, devient en effet de plus en plus fréquent, au moins pour le collectif et les opérations de maisons individuelles groupées, soit 56% du marché du neuf en 2005. En excluant les maisons individuelles en diffus hors rural dans l'évolution du neuf, la part du diffus, réduit au rural, se limiterait à 26%, ce qui apparaîtrait encore élevé face aux besoins de l'économie du secteur rural dans son ensemble : c'est essentiellement sur ce segment que l'application des labels, donc le respect de la réglementation thermique, pourrait s'avérer partielle.

La réglementation thermique dans le neuf imposant un niveau maximal en énergie primaire pour les différents postes (chauffage et climatisation, ECS -eau chaude sanitaire-, ventilation, éclairage et auxiliaires de chauffage et d'ECS), il convient d'évaluer les consommations des postes complémentaires au chauffage, afin de maintenir le total dans les limites réglementaires. La réglementation permet des compensations entre postes, à condition que les garde-fous (par exemple en performance du bâti que représente le Ubat) soient respectés.

Dans la mesure où nous ordonnons les différents gains de performance, depuis le bâti jusqu'aux systèmes énergétiques, sans optimisation économique globale, les gains de performance obtenus sur chacun des postes de consommation seront

ici cumulés, dans le but d'obtenir in fine des résultats qui pourront s'avérer meilleurs que les niveaux réglementaires. Les calculs sont effectués selon les trois zones climatiques, qui recouvrent partiellement les zones de la RT 2005.

Par l'expression en énergie primaire, qui accentue la part des consommations électriques de l'ensemble des postes, la réglementation thermique dissuade le recours à la VMC double flux, mais on peut prétendre à deux évolutions :

- les améliorations de la motorisation (exemple, avec Microwatt de Aldès, on passe à une consommation de référence de 2 ou 3 kWh/m<sup>2</sup> SHON/an en Hygro B) ;
- le recours à la domotique, qui permettrait de couper la VMC et de passer en ventilation naturelle en confort d'été, si le logement est traversant. Il reste cependant à estimer la réduction de la consommation électrique obtenue et à la valider au plan réglementaire.

## **La réduction de la demande de chauffage dans le parc existant**

### ***L'estimation des besoins en 2005***

L'identification des gestes de réhabilitation (bâti et systèmes) concerne le parc construit avant 2001, soit avant la mise en application effective des étapes réglementaires RT 2000 et RT 2005. Le segment construit dans l'intervalle 2001-2010 correspondant à ces deux tranches réglementaires, devrait être réhabilité également, mais pour des effectifs de 3 millions de logements, les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire sont de l'ordre de 30 TWh en 2009, soit une part de 6 à 7% des consommations du parc total de résidences principales. Nous considérons qu'il ferait l'objet d'une réhabilitation profonde après 2050, lors de la rénovation nécessaire du bâti (murs extérieurs, toiture, menuiseries, etc.), en raison de l'intégration déjà poussée des isolants dans les composants de gros œuvre, le plus souvent de type isolation par l'intérieur.

Pour la grande partie du parc existant en 2005, on peut estimer les besoins (ou l'énergie utile) conventionnels unitaires de chauffage, caractérisant l'état du bâti et le renouvellement d'air<sup>29</sup>, à une valeur moyenne de 255 kWh/m<sup>2</sup> SHAB/an pour les maisons individuelles, et de 128 kWh/m<sup>2</sup> SHAB/an pour les logements en immeubles collectifs, qui se répartissent de façon assez contrastée selon la période de construction. **T29** En réalité, une partie des logements a déjà été réhabilitée en tout ou partie, et les logements

peu isolés sont sans doute chauffés à une température moyenne inférieure à la température conventionnelle (base 18°C). Un calage de la situation 2005 donne des valeurs de besoins « réels » moins élevés.

La répartition des effectifs et des consommations de chauffage selon la période de construction permet de repérer les principaux gisements. Les maisons individuelles de construction antérieure à 1949 représentent près du tiers des effectifs, pour 45% des consommations de chauffage. Pour les logements en immeubles collectifs, c'est au contraire la période 1949-1974, de reconstruction où dominent les grands ensembles, qui représente la part prépondérante des effectifs (44%) pour plus de la moitié des consommations de chauffage, la réglementation thermique dans le neuf ayant été introduite en 1975. **T30**

### Les gestes de réhabilitation (bâti et systèmes de ventilation)

Pour réduire de façon notable les besoins de chauffage, il convient de distinguer les modes d'intervention selon la typologie du parc. Il est par exemple indispensable de distinguer le parc qui supporterait une réhabilitation lourde, avec isolation thermique par l'extérieur (ITE), notamment pour le parc social 1949-1975, au contraire du parc pour lequel des gestes plus légers seraient basés sur des techniques actuelles largement fondées sur l'isolation thermique par l'inté-

rieur (ITI). Cette seconde solution, qui demanderait toutefois à être appliquée en dernier ressort, en raison de l'introduction possible de désordres (par exemple en réduisant la respiration des maçonneries anciennes, en dégradant l'inertie thermique utile au confort d'été<sup>30</sup>), s'imposerait lorsque les critères architecturaux interdisent le recours à l'ITE (maçonneries appareillées, modénature architecturale particulière, etc.).

Les paramètres techniques discriminants entre les deux approches de réhabilitation (ITE / ITI) sont essentiellement liés :

- Au type de maçonneries appareillées (briques, pierres de taille, tufeau, etc.) ;
- Aux particularités de la modénature architecturale (balcons ouvragés, encadrements de fenêtres, etc.).

La condition technique d'application de l'ITE est essentiellement dictée par l'ensemble « matériaux / typologie architecturale ».

Une hypothèse simplificatrice, permettant de développer des scénarios contrastés entre énergies de substitution, veut que l'application des règles de réhabilitation des logements, selon leur typologie architecturale, soit indépendante du scénario énergétique. Cette hypothèse pourrait être remise en question dans la recherche de l'obtention d'un label réglementaire « BBC rénovation », qui est écartée dans l'étude. La performance du bâti demeure privilégiée, jusqu'à la « saturation » possible de cette première voie de MDE.

**Tableau 29. Moyennes pondérées des besoins unitaires conventionnels de chauffage par tranche d'âge du bâti en 2005**

(kWh/m <sup>2</sup> SHAB/an)	Maisons individuelles	Immeubles collectifs
avant 1975	314	143
de 1975 à 1989	160	105
de 1990 à 2000	131	74
Moyenne	255	128,5

Source : *Énergies demain*

**Tableau 30. Répartition des effectifs et des consommations de chauffage en 2005 selon la période de construction et la typologie (maison individuelle et immeuble collectif)**

Répartition 2005	avant 1949	1949 à 1974	1975 à 1989	1990 à 2005	Total
Maisons individuelles					
Effectifs (*)	32%	22%	27%	19%	100%
Consommations chauffage	45%	25%	18%	12%	100%
Immeubles collectifs					
Effectifs (*)	23%	44%	18%	14%	100%
Consommations chauffage	32%	51%	10%	7%	100%

(\*) La répartition des effectifs est calculée sur la base des surfaces habitables

Pour la réhabilitation lourde avec ITE, nous ne distinguons pas les conditions selon lesquelles un bouquet de travaux complet pourrait être appliqué – ni du temps d'adaptation de la filière –, par opposition au cas d'une répartition des gestes au rythme de la durée de vie des parties d'ouvrages. Cette seconde catégorie pourrait répondre à certains statuts d'occupation, par exemple l'immeuble collectif en copropriété. Mais à terme, l'impact cumulé est le même : seules changent la vitesse de réalisation et la répartition des coûts dans le temps. Le chemin pour parvenir à 2050 est dans l'étude décrit par un taux de réhabilitation du bâti constant, à 1/40 du parc chaque année, sans distinguer dans la vie de chaque immeuble, à quel rythme s'effectuent les travaux.

Même en réhabilitation légère, on considère qu'un ensemble de gestes est toujours faisable :

- L'isolation de la toiture (ITE toits terrasses ou ITI charpente/couverture)
- La pose de menuiseries performantes
- L'installation d'une VMR ou d'une VMC (ventilation mécanique répartie ou contrôlée), qui serait associée à la rénovation des menuiseries, afin de garantir la nécessaire aération des locaux en relais de la ventilation naturelle. **T31**

Trois types de parois verticales sont concernés par le choix du type d'isolation (intérieure ou extérieure), soit, en règle générale la façade principale (sur rue), la façade arrière (sur cour), les pignons.

La définition architecturale du parc bâti français utilisée pour établir les potentiels de mise en œuvre des différents types d'isolation est issue du modèle Enerter® développé par le bureau

d'études Energies Demain. A partir des données du Recensement Général de la Population de 1999 (RGP 1999) actualisées et enrichies notamment grâce à l'expertise de spécialistes en histoire de l'architecture, et en thermique du bâtiment, ce modèle simule les consommations énergétiques de chacun des près de trente millions de logements français (résidences secondaires et logements vacants compris). Parmi les caractéristiques architecturales et thermiques prises en compte dans Enerter®, on compte notamment :

- la famille<sup>31</sup> « technico-architecturale »
- la hauteur sous plafond
- la composition des parois verticales extérieures (exemples : béton + doublage brique, parpaing, calcaire, béton 20cm + isolant 8cm...) ainsi que l'épaisseur et le coefficient de transmission thermique U associé
- la composition des planchers ainsi que l'épaisseur et le coefficient de transmission thermique U associé
- la composition de la toiture ainsi que l'épaisseur et le coefficient de transmission thermique U associé
- le type de menuiseries utilisé
- le taux de vitrage

La notion de famille « technico-architecturale » désigne les groupes de bâtiments contemporains établis sur la base de similitudes observées en termes de forme architecturale, de position urbaine ou encore de techniques constructives. La figure ci-dessous présente les familles constituées pour la description du parc de maisons individuelles construites avant 1915 utilisées dans le modèle Enerter®. **F35**

**Tableau 31. Présentation des MTD (meilleures technologies disponibles) retenues en réhabilitation du bâti**

Parois extérieures opaques	Épaisseur isolant (m)	Conductivité (W/m.K)	Résistance thermique (m².K/W)
ITI Polystyrène	0,10	0,032	3,13
ITE Polystyrène extrudé + enduit	0,15	0,03	5,00
Toiture			
ITI combles perdus Laine de roche	0,20	0,035	5,71
IT rampant Laine de roche	0,18	0,035	5,14
ITE toit terrasse Polyuréthane	0,15	0,03	5,00
Planchers bas			
Sur local non chauffé Polyuréthane (cave, ou vide sanitaire accessible)	0,10	0,03	3,33
Terre battue ou existant vers Plancher chauffant basse température	0,08	0,032	2,50
Menuiseries/ Vitrages		Coefficient U (W/m².K)	
Vitrage à isolation renforcée (faible émissivité, argon)		1,5	0,67
Menuiseries bois (ou PVC)			

La qualification architecturale des bâtiments compris dans le RGP 1999 réalisée dans le modèle Enerter® repose sur l'analyse croisée de critères relatifs au bâtiment lui-même (maison ou immeuble, période de construction, nombre d'étages, nombre de logements...) et à la zone dans laquelle il se situe (type de tissu urbain, grande région architecturale, matériaux de construction à disposition, etc.).

Les données quantitatives et territorialisées issues du modèle couplées aux possibilités, établies à dire d'experts, de mise en œuvre d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE) des parois verticales de chacun des couples familles « technico-architecturales »-composition des murs a permis d'obtenir les résultats présentés aux figures suivantes. **F36 F37**

Dans le souci de simplifier la lecture des résultats, les familles « technico-architecturales » ont été agrégées.

En maison individuelle, les typologies architecturales apparaissent peu favorables à l'ITE. En excluant les façades avec matériaux traditionnels en façades (pierre, brique) non enduits, seuls les pavillons préfabriqués et les pavillons présentent plus de 50% des surfaces verticales susceptibles d'être isolées par l'extérieur. En immeuble collectif, la part d'application de l'ITE sur les parois extérieures semble plus grande, compte-tenu des matériaux employés hors façades nobles (sur cour par exemple, mais aussi en mur pignons), souvent revêtus d'enduit extérieur, notamment en milieu urbain.

### **L'évolution des besoins de chauffage (en énergie utile) du parc existant à 2050**

L'amélioration des solutions de ventilation par système mécanique contrôlé (VMC simple flux ou double flux) vient compléter la rénovation des bâtis existants par application de l'isolation thermique par l'extérieur – ITE –, ou de la solution par défaut d'isolation par l'intérieur – ITI –, selon le tableau des « MTD ». Par application progressive de la réhabilitation à l'ensemble du parc, au rythme de 500.000 à 600.000 logements par an, l'ensemble des mesures permet de réduire les besoins annuels de chauffage du parc existant de construction antérieure à 2001, à des valeurs comprises entre 60 et 90 kWh/m<sup>2</sup> SHAB (surface habitable) en maison individuelle et entre 42 et 55 kWh/m<sup>2</sup> SHAB en immeuble collectif, en 2050. **T32 T33**

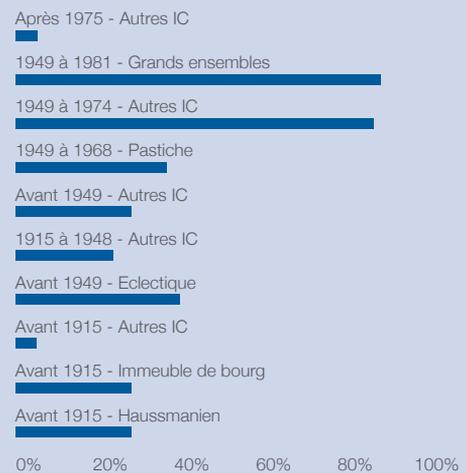
**Figure 35.**  
Nombre de maisons individuelles construites avant 1915 par famille « technico-architecturale »



**Figure 36.**  
Part des murs extérieurs où une ITE est possible selon les typologies architecturales des maisons individuelles



**Figure 37.**  
Part des murs extérieurs où une ITE est possible selon les typologies architecturales des immeubles collectifs



**Tableau 32. Évolution des besoins unitaires, en kWh/m<sup>2</sup> SHAB (maisons individuelles)**

Maisons individuelles	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2050	GAIN
avant 1975	267	248	224	204	187	171	154	90	-66%
de 1975 à 1989	131	124	113	107	102	98	93	72	-45%
de 1990 à 2000	120	110	95	89	86	84	82	62	-48%

**Tableau 33. Évolution des besoins unitaires, en kWh/m<sup>2</sup> SHAB (immeubles collectifs)**

Immeubles collectifs	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2050	GAIN
avant 1975	154	144	129	118	115	114	111	55	-64%
de 1975 à 1989	77	72	65	61	61	62	62	41	-46%
de 1990 à 2000	83	76	66	61	62	63	64	42	-49%

Les gains en besoins de chauffage (ou énergie utile) qui seraient obtenus par réhabilitation totale des logements de construction antérieure à 2001, sur les deux postes de déperditions que sont l'enveloppe et le renouvellement de l'air, atteindraient en moyenne 60% en maison individuelle comme en immeuble collectif. Les gains moyens varient en réalité de 45% à 66% selon la période de construction et la typologie. En écartant une partie de l'isolation thermique par l'intérieur, l'effort moyen sur le bâti serait d'environ 50%, ce qui est l'ordre de grandeur visé, avant d'appliquer des solutions technologiques performantes en rénovation des équipements de chauffage. **F38**

## Les évolutions technologiques : dispositifs de chauffage et de production d'ECS

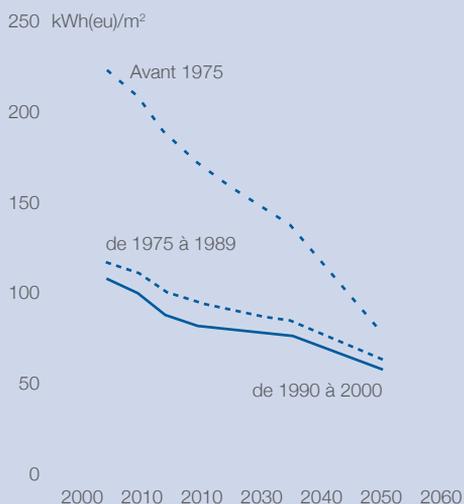
### Les hypothèses : choix des meilleures technologies disponibles (MTD)

Pour chaque énergie, nous supposons que les meilleures technologies disponibles (MTD) compatibles avec les choix de scénarios, se généralisent au gré de leur apparition, dans le parc neuf comme dans l'existant. Les rendements de génération adoptés sont plus proches des rendements « machine » que des rendements moyens en situation de fonctionnement réel. La production d'électricité décentralisée par cogénération occupe une part croissante dans les systèmes de production de chaleur à combustion (bois ou gaz), ce qui peut cependant dégrader les rendements directs de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire au profit d'une augmentation du rendement global thermique et électrique.

Dans les scénarios énergétiques favorisant le bois, les solutions de chauffage central collectif pourront relever des réseaux de chaleur. Les rendements de génération pris en compte seront ceux des chaudières collectives, en supposant que les pertes dans les réseaux sont compensées par les meilleurs rendements des chaudières centralisées de forte puissance.

Le choix des MTD implique une succession de remplacements des technologies. En pratique, la diversité des contraintes techniques et des besoins nécessite une gamme de produits disponibles pour répondre à toutes les configurations. Ainsi, si nous faisons l'hypothèse, dans nos scénarios, d'une disparition des chaudières gaz à condensation, remplacées par des technologies plus performantes, il est certain qu'en pratique, celles-ci resteront pour longtemps encore présentes sur le marché, pour répondre par

**Figure 38.** Décroissance des besoins de chauffage unitaires exprimés en énergie utile pour trois périodes de construction, par réhabilitation progressive du parc entre 2005 et 2050.



exemple à des contraintes fortes d'encombrement dans certains logements. Dans les scénarios favorisant l'électricité, les solutions PAC, en chauffage comme en production ECS, sont favorisées. Les parts de marché et les successions de technologies, présentées en ANNEXE 1 pour l'eau chaude sanitaire et en ANNEXE 2 pour le chauffage, ne sont donc pas à considérer comme des images du marché réel mais comme des scénarios d'augmentation des rendements les plus rapides tout en restant plausibles par rapport à la disponibilité technique des produits.

### **L'énergie bois**

En relai de la chaudière bois, la cogénération bois est envisagée dès 2015 en immeuble collectif équipé en chauffage central collectif, puis dans la maison individuelle neuve. Compte tenu de la gamme des puissances envisagées (de 50 à 150 kW) et de l'espace nécessaire à la chaufferie en pied d'immeuble, les moteurs Stirling sur chaudière collective représenteraient la seule technologie adaptée. En effet, les cycles de Rankine (vapeur ou organique) ou les gazéificateurs avec moteur ne semblent guère envisageables pour ce type de puissance, mais sont mieux adaptées aux chaufferies sur réseau de chaleur. Dans l'offre bois, nous estimons que la cogénération bois pourrait progresser de 0% en 2015 à 100% dès 2030, dans les flux d'équipements énergétiques pour les logements neufs ou en réhabilitation qui peuvent être reconvertis au bois. En solution CCC bois, un appoint gaz ou fioul ou GPL hors zone de desserte gaz apparaît nécessaire, même si cette consommation d'énergie n'est pas prise en compte dans le détail des scénarios qui favorisent le bois. En pratique, les règles de dimensionnement impliquent une limite technico-économique de type 90% de bois, 10% d'énergie complémentaire gaz ou fioul, ce qui modulerait les résultats bruts de consommations de bois (légèrement à la baisse) et d'émissions de CO<sub>2</sub> (inversement, à la hausse).

Pour la production d'ECS associée au chauffage central collectif bois, des considérations technico économiques pourraient réintroduire l'effet Joule pour la période d'été, caractérisée par de plus faibles besoins. Une répartition forfaitaire avec un appoint moyen de 40% est adoptée, en répondant à la production annuelle d'eau chaude sanitaire par 60% de bois, 20% d'appoint gaz et 20% d'appoint électrique. Le solaire thermique est alors écarté.

### **L'énergie gaz**

La technique de base est la chaudière à condensation pour le chauffage, la production d'ECS étant assurée par la chaudière à condensation double service, ou par appoint gaz suivant le niveau d'exigence sur le neuf. Les technologies avancées (chaudière à microcogénération, pompe à chaleur gaz...) sont destinées à remplacer la chaudière à condensation au fur et à mesure de leur introduction sur le marché, les rendements de chaque technologie étant considérés constants dans l'intervalle considéré.

Selon nos hypothèses, la chaudière gaz à condensation, qui occupe la totalité du marché avant 2010, cède peu à peu la place aux technologies de pointe. La pompe à chaleur gaz concerne uniquement la construction neuve. La micro-cogénération (écogénérateur) et la pile à combustible, qui apparaît dès aujourd'hui pour les fortes puissances, entame la pénétration du parc en 2015 en équipements collectifs, et dix ans plus tard en maisons individuelles.

Ainsi, la chaudière à condensation (dont le rendement de génération est de 95% en chauffage) disparaît totalement de l'offre dans nos scénarios dès 2015 en maison individuelle ou en immeuble collectif neuf. Les pompes à chaleur gaz, qui améliorent le rendement de génération (144% en chauffage) en comparaison des chaudières gaz à condensation, atteignent ainsi une part de marché maximale de 50% de l'offre gaz dans le neuf au cours de la période 2015-2030. La cogénération opère une percée totale à 100% de l'offre en réhabilitation dès 2020, et à 75% en maison individuelle neuve, avant de laisser une place prépondérante à la pile à combustible dans tous les segments du parc. La part croissante des technologies les plus performantes se traduit par une croissance du rendement moyen de génération des équipements énergétiques, tout en privilégiant la production électrique associée au chauffage et à la production d'eau chaude sanitaire.

### **L'énergie électrique**

Pour l'électricité, la technique de chauffage de base est la pompe à chaleur (PAC) qui peut se décliner en plusieurs technologies selon la nature de l'environnement : capteurs de chaleur enterrés (sol ou nappe) ou sur air. En fonction du tissu (discontinu ou continu), les capteurs enterrés seront horizontaux ou verticaux. La préférence est donnée aux capteurs enterrés quand le contexte le permet.

Par ailleurs, la production d'ECS est assurée, en fonction du niveau d'exigence sur le neuf, au moyen d'un ballon de stockage chauffé par solaire thermique avec appoint effet Joule (en niveau THPE, donc pas au-delà de 2012) ou appoint PAC.

Les coefficients de performance (COP<sup>32</sup>) des pompes à chaleur correspondent comme pour les autres énergies aux MtD (meilleures technologies disponibles) et à des rendements « machine » ; ils progressent tous pendant la période retenue, les valeurs extrêmes étant de 2,3 en 2010 (exemple de la PAC air/eau haute température en réhabilitation, qui assure le double service, chauffage et ECS) et de 5 en 2050 (exemple de la PAC eau/eau en maison individuelle neuve).

Dans le neuf, différentes solutions de pompes à chaleur sont envisageables et assurent le relai de l'effet Joule, qui disparaît de l'offre électrique en 2012, compte tenu de l'effet « BBC ». En raison des segments de construction neuve retenus :

- pour les maisons individuelles en tissu discontinu (rural uniquement), toutes les solutions PAC sont envisageables ;
- pour les maisons individuelles en tissu continu (une partie du rural et l'ensemble de l'urbain), les capteurs seront de préférence verticaux, les solutions sur air étant possibles ;

- pour les immeubles collectifs, (CCC uniquement puisque le CCI est exclu par principe dans nos scénarios), la solution électrique est aussi basée sur des PAC, selon l'exemple d'opérations en France qui mutualisent les capteurs verticaux enterrés (de préférence) ou sur air si la première solution n'est pas possible.

Au cours de la période 2015-2050, la PAC air/eau reste dominante en maison individuelle et en immeuble collectif sous forme de chauffage central collectif, le chauffage central individuel étant écarté en immeuble collectif.

Dans la réhabilitation de l'existant, hors effet Joule qui peut continuer à accompagner le bois en AIC (appareil indépendant de chauffage), les parts de marché des différentes technologies de PAC tendent à s'équilibrer en 2050 dans l'offre électrique.

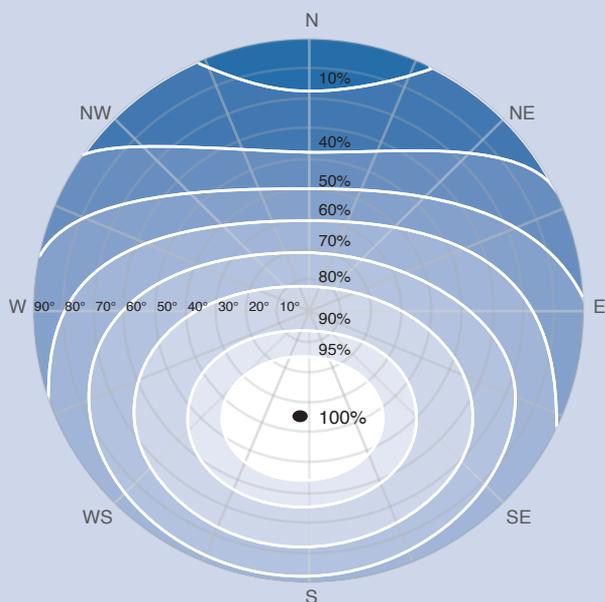
## Le solaire thermique et la production d'eau chaude sanitaire

### Les principes de solarisation pour la production d'eau chaude sanitaire

L'hypothèse retenue dans l'étude consiste à favoriser l'intégration généralisée du solaire thermique pour la seule production d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment, sans optimisation préalable

Figure 39.

Irradiation annuelle relative en France, fonction de l'orientation et de l'inclinaison - Source : d'après Cythelia

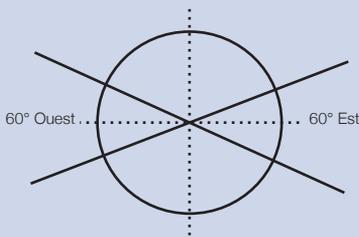


ble qui consisterait par exemple pour le neuf à sélectionner la configuration la plus économique pour atteindre le niveau de label recherché :

- à 100% dans le neuf, sauf quand l'ECS peut être produite par chaudière bois ou par pompe à chaleur ;
- et selon les caractéristiques urbaines et architecturales dans le parc existant.

Si l'orientation sud donne la meilleure performance théorique annuelle (en cas d'insolation également répartie entre la matinée et l'après midi) pour un panneau solaire présentant une pente de 20 à 50° sur l'horizontale, une rotation de 30° par rapport à cet azimut ne conduit pas à des pertes notables de productivité annuelle du capteur solaire : la perte d'irradiation annuelle demeure dans ce cas inférieure à 5%. La perte est de moins de 10% pour une orientation Sud-Est ou Sud-Ouest (rotation de 45° en azimut). **F39**

**Figure 40.**  
Enveloppe des orientations d'axes de toiture acceptables (deux secteurs exclus : 60° est et 60° ouest)



On peut donc admettre que les pans de toitures bien orientés constituent un ensemble représentant 1/3 des configurations possibles (azimuts des axes compris dans un double secteur de 60° d'ouverture), ce qui concerne essentiellement le parc de maisons individuelles et les immeubles collectifs construits avant 1949, pour lesquels les toitures terrasses restent l'exception. **F40**

Les toitures terrasses dominent néanmoins en immeuble collectif de construction postérieure à 1945. En raison de leur forte dépendance aux morphologies urbaines (orientation des pans de toiture, encombrement des toits terrasses, nombre d'étages, présence possible de masques), les potentiels de solarisation (exprimés en% de logements) seront soumis à une borne supérieure, que nous estimons comprise entre 20% et 50% en fonction de la typologie et du contexte urbain. Cette borne supérieure est supposée atteinte en fin de période de conversion énergétique et de renouvellement des couvertures de toiture. **T34**

### Règles de dimensionnement et productivité du solaire thermique pour l'ECS

Le dimensionnement des panneaux solaires est effectué sur la base de 0,75 m<sup>2</sup> par personne, ce qui est inférieur à la pratique actuelle (les installations courantes sont basées sur le taux de 1 m<sup>2</sup> par personne, soit de 3 à 4 m<sup>2</sup> pour une maison individuelle), mais permet d'obtenir une productivité du mètre carré supérieure pour un investissement moindre. **T35**

**Tableau 34. Hypothèses de taux d'équipement en solaire thermique (en % de logements existants) selon le tissu (rural / urbain) et la typologie**

	Rural	Urbain
Maison individuelle	30%	20%
Immeuble collectif toits terrasses	50%	40%
Immeuble collectif toits en pente	30%	20%

Taux atteint en fin de cycle de rénovation sur le parc de construction antérieure à 2005

**Tableau 35. Estimation des taux de couverture solaire des besoins en ECS sur la base d'un dimensionnement à 0,75 m<sup>2</sup> capteurs/personne, pour les trois zones climatiques**

Zone climatique / Station	Besoins par personne kWh/an	Besoins (3 pers) kWh/an	Apports solaires (2,25 m <sup>2</sup> ) kWh/an	Couverture solaire (%)	Apports solaires par m <sup>2</sup> kWh/m <sup>2</sup> /an
H1 (Reims)	634	1 902	821	43%	365
H2 (Poitiers)	617	1 852	884	48%	393
H3 (Montpellier)	582	1 745	977	56%	434

Résultats obtenus par la méthode SOLO (site [www.tecsol.fr](http://www.tecsol.fr))

Hypothèses : panneau orienté sud, incliné à 30°, stockage de 180 litres pour 3 personnes.

Ces règles de dimensionnement conduisent à une situation en 2050 dans laquelle les 9 millions de logements construits après 2010 sont tous équipés en solaire thermique, contre environ 30% des 26 millions de résidences principales de construction antérieure à 2010, soit près de la moitié du parc final de 2050, en excluant les logements qui feraient appel au bois pour la production de l'ECS. Selon les règles de dimensionnement adoptées, et pour cette moitié du parc final, la contribution solaire aux besoins d'eau chaude sanitaire approche 100% en été, contre 20 à 30% pour les mois les moins ensoleillés d'hiver. Cela tend à accroître la saisonnalité des énergies d'appoint, notamment l'électricité, dont il conviendrait d'estimer l'impact sur le contenu CO<sub>2</sub> moyen du kWh électrique ECS, ce qui n'est pas réalisé dans l'étude.

# Les quatre scénarios énergétiques

## Les principes adoptés : le choix de l'énergie de chauffage est déterminant

A partir de 2012, en raison du choix que nous avons fait d'une performance de bâti identique à toutes les solutions, les seules variables susceptibles de modifier les consommations de chauffage des logements neufs et leurs émissions de CO<sub>2</sub> sont le rendement du système et le type d'énergie de chauffage, car nous faisons l'hypothèse que les comportements ne se différencient pas selon l'énergie de chauffage. Des différents combustibles fossiles, charbon, fioul, GPL et gaz naturel, seul ce dernier subsiste à partir de 2010 dans les flux de systèmes de chauffage neufs et existants, en complément du bois et de l'électricité pour le chauffage et la production d'ECS, le solaire thermique poursuivant sa progression pour la production d'ECS.

Il en est de même dans le parc existant, dans la mesure où les niveaux atteints par les gestes de réhabilitation sont indépendants du choix de l'énergie de chauffage.

Pour le poste chauffage, le bois énergie est favorisé :

- soit en premier choix d'énergie (les compléments étant alors apportés selon deux scénarios, gaz/élec ou élec/gaz)
- soit en deuxième choix si l'énergie en premier choix du scénario n'est pas techniquement possible.

Les trois énergies considérées, bois, gaz naturel et électricité sont successivement généralisées

dans leur champ d'application. Il convient de souligner que, pour l'électricité, la préférence est donnée à la solution PAC, l'effet Joule assurant le complément du bois si nécessaire. L'ECS solaire est associée aux packs de solutions gaz et électricité (hors PAC) pour l'obtention des niveaux de consommations énergétiques visés notamment dans le neuf.

En remarquant qu'il existe à terme toujours une solution électrique pour le poste chauffage, donc qu'il n'y a pas lieu d'envisager une énergie de rang inférieur pour compléter son champ d'application, les combinaisons forment quatre scénarios, les effectifs de logements répondant en 2050 aux combinaisons suivantes :

- BOIS/GAZ/ELEC
- BOIS/ELEC/GAZ
- GAZ/BOIS/ELEC
- ELEC/BOIS/GAZ

Il est convenu de ne pas développer de scénario qui serait basé sur une prévision de parts de marché des différentes énergies sur les flux de neuf et de rénovation, ce qui nécessiterait de disposer d'une méthode d'analyse multicritère (de coût, d'impact environnemental, etc.) selon laquelle répartir les différentes solutions envisagées, mais d'indiquer les filières qui devraient être encouragées. L'objectif visé est de rechercher, à partir de ces scénarios tranchés, quelles sont les conditions technologiques les plus favorables à l'obtention du facteur 4 – sur les émissions liées directement aux consommations énergétiques – dans le parc résidentiel.

## Les champs d'application des énergies

### Le champ d'application de l'énergie bois dans le neuf

Toutes les communes sont supposées disposer de ressources suffisantes en bois-énergie (en raison des faibles volumes nécessités par le neuf) dans un périmètre limité. **E2 T36 T37**

### Le champ d'application de l'énergie gaz naturel dans le neuf

L'identification des communes reliées au réseau de gaz naturel donne environ 25% des 36.000 communes en 2005. Parmi les 27.000 communes écartées, la plupart sont des petites communes les moins susceptibles d'être reliées au réseau de gaz naturel. En pourcentage de population, on relève que 80% de la population française vit dans une commune qui est, au moins partiellement, desservie par le gaz naturel. **E3**

Le graphique ci-dessous illustre la répartition par typologie de commune des constructions neuves de la période 2000-2005 : environ 65% des maisons individuelles et près de 90% des immeubles collectifs appartiennent à des communes desservies en gaz naturel. **F41**

Par application des règles établies sur la période 2005-2035, cette répartition est celle de la construction neuve, dans le scénario « gaz ». **F42**  
Remarque : le passage envisageable de l'air propané au gaz naturel pour Ajaccio à partir de 2012-2015 suite au raccordement de la Corse au réseau de transport de gaz naturel n'est pas pris en compte dans ce graphique, ni dans cette étude d'une manière générale. **T38**

### Le champ d'application de l'énergie électrique dans le neuf et les quatre scénarios

Etant donné qu'il y a toujours une solution électrique de type PAC disponible avant 2050, l'en-

#### Encadré 2.

##### Règles (énergie bois)

1. En zone rurale, une installation bois est prévue par immeuble (maison individuelle ou immeuble collectif).
2. En zone urbaine, pour les immeubles collectifs, les opérations groupées permettent la création de mini réseaux de chaleur alimentés au bois, appoint gaz pour le chauffage et l'ECS ; le chauffage individuel au bois est exclu en maison individuelle, mesure conservatrice en raison des émissions de particules, plus difficiles à contrôler sur des chaudières bois de petite puissance.  
Dans tous les cas, les besoins en eau chaude sanitaire (en énergie utile) sont supposés être assurés en moyenne à 60% par le bois, à 20% par le gaz, et à 20% par effet Joule.

#### Encadré 3.

##### Règles (énergie gaz naturel)

1. Aucune commune n'est prévue en connexion nouvelle d'ici 2050 (hypothèse simplificatrice sachant que le réseau continue de s'étendre, mais les zones d'extension représenteront une faible proportion de la construction neuve)
2. Dans les communes desservies, les zones urbanisées au cours de l'intervalle 2005-2050 sont supposées systématiquement connectées (donc toute maison individuelle et tout immeuble collectif neufs), bien que ce ne soit pas le cas actuellement. L'hypothèse considère que les extensions seront localisées afin d'être raccordées.
3. Il existe toujours une solution gaz naturel quand le combustible est disponible (condensation en base avec évolution des technologies jusqu'à BBC).

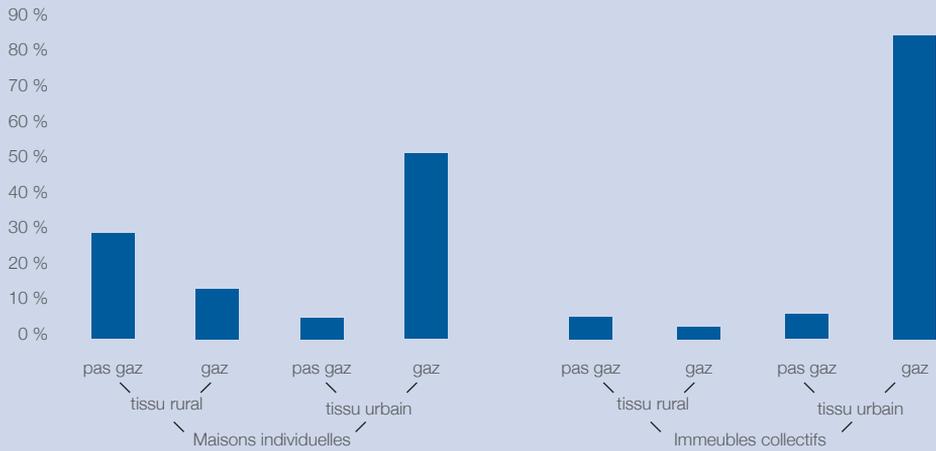
Tableau 36. Synthèse: scénarios BOIS/GAZ/ELEC (neuf, solutions de chauffage)

BOIS/GAZ/ELEC	Maison individuelle	Immeuble collectif
COMMUNES RURALES Avec Réseau GAZ	BOIS CCI	BOIS CCC (chaudière)
COMMUNES RURALES Sans Réseau GAZ	BOIS CCI	BOIS CCC (chaudière)
AUTRES (URBAIN) Avec Réseau GAZ	GAZ CCI	RÉSEAU CHALEUR BOIS
AUTRES (URBAIN) Sans réseau gaz	SOLUTION ELEC	RÉSEAU CHALEUR BOIS

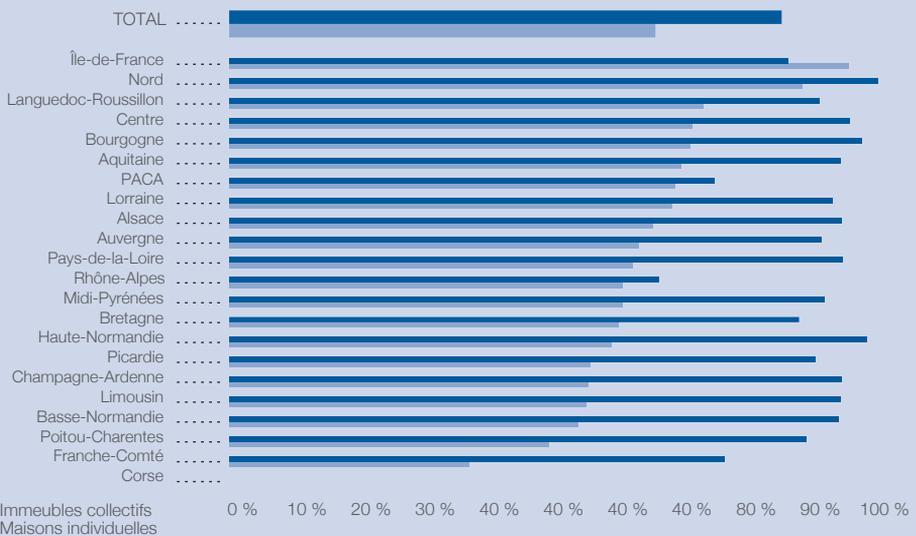
Tableau 37. Synthèse: scénarios BOIS/ELEC (neuf, solutions de chauffage)

BOIS/ELEC/GAZ	Maison individuelle	Immeuble collectif
COMMUNES RURALES Avec Réseau GAZ	BOIS CCI	BOIS CCC (chaudière)
COMMUNES RURALES Sans Réseau GAZ	BOIS CCI	BOIS CCC (chaudière)
AUTRES (URBAIN) Avec Réseau GAZ	SOLUTION ELEC	RÉSEAU CHALEUR BOIS
AUTRES (URBAIN) Sans réseau gaz	SOLUTION ELEC	RÉSEAU CHALEUR BOIS

**Figure 41.**  
Répartition typologique des nouvelles constructions selon le type de tissu (urbain/rural)  
et la présence d'un réseau de gaz naturel



**Figure 42.**  
Part des constructions neuves dans des communes reliées au gaz



Remarque : le passage envisageable de l'air propané au gaz naturel pour Ajaccio à partir de 2012-2015 suite au raccordement de la Corse au réseau de transport de gaz naturel n'est pas pris en compte dans ce graphique, ni dans cette étude d'une manière générale.

**Tableau 38. Synthèse: scénarios GAZ (neuf, solutions de chauffage)**

GAZ/BOIS/ÉLEC	Maison individuelle	Immeuble collectif
COMMUNES RURALES Avec Réseau GAZ	GAZ CCI	GAZ CCC
COMMUNES RURALES Sans Réseau GAZ	BOIS CCI	BOIS CCC (chaudière)
AUTRES (URBAIN) Avec Réseau GAZ	GAZ CCI	GAZ CCC
AUTRES (URBAIN) Sans Réseau GAZ	SOLUTION ÉLEC	RÉSEAU CHALEUR BOIS

Figure 43. Choix énergétiques pour la construction neuve (2005-2050)

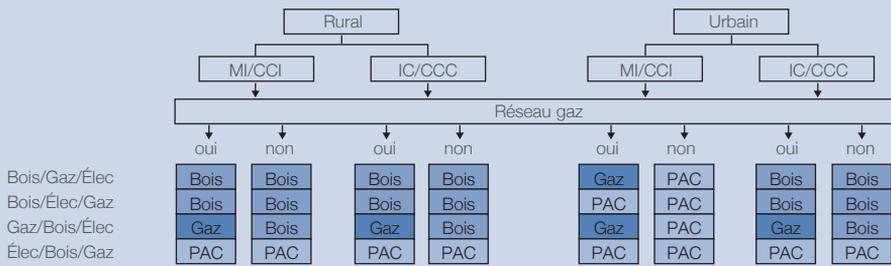
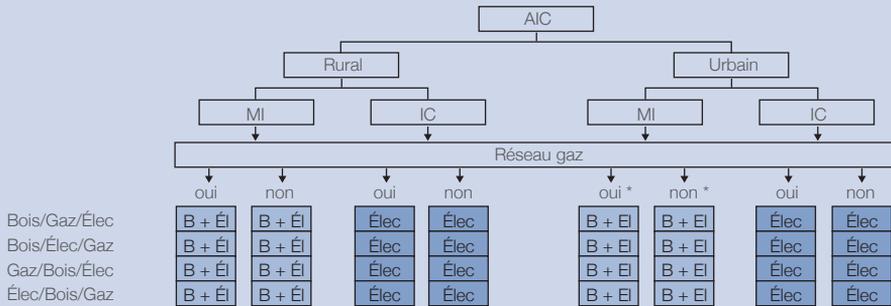


Figure 44. Choix énergétiques en réhabilitation pour la typologie AIC (appareil indépendant de chauffage).



\* Urbain, maison individuelle: possibilité de maintien de l'AIC en bois

Figure 45. Choix énergétiques en réhabilitation pour la typologie CCI

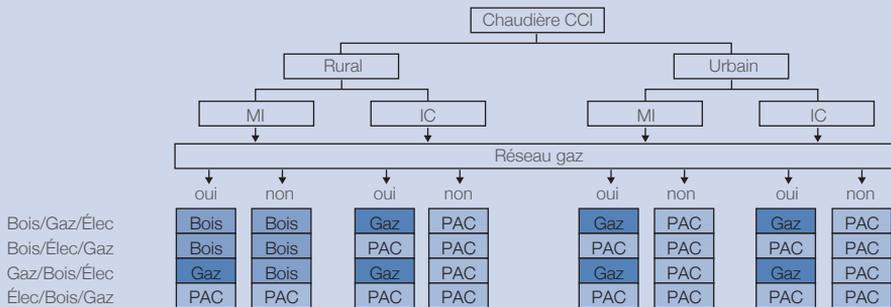
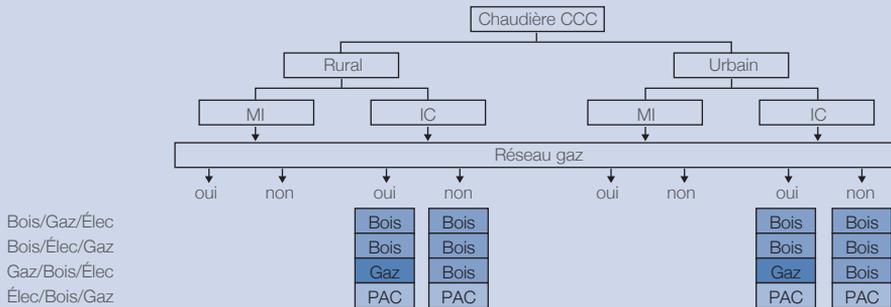


Figure 46. Choix énergétiques en réhabilitation pour la typologie CCC



semble des segments (maison individuelle, immeuble collectif, rural et urbain) est couvert en totalité avant la fin de la période, sans besoin d'énergie n°2, bois ou gaz.

Les quatre scénarios se distinguent selon que l'introduction des trois énergies est possible ou écartée dans les huit segments de construction neuve considérés, résultant des 3 oppositions binaires (rural/urbain, maison individuelle/immeuble collectif, présence réseau de gaz oui / non). En énergie de rang 1, le bois pourrait être introduit dans six des huit segments de construction neuve (scénarios Bois/Gaz/Elec ou Bois/Elec), le gaz dans quatre segments, l'électricité dans la totalité des segments. Ces règles produisent cependant des effets assez contrastés selon les régions (cf. ANNEXE 3). **F43**

### **L'application des différentes énergies de chauffage dans le parc existant**

Les quatre scénarios définis précédemment (BOIS / GAZ / ELEC ; BOIS / ELEC / GAZ ; GAZ / BOIS / ELEC ; ELEC / BOIS / GAZ) obéissent à plusieurs règles, selon la présence ou non dans la commune considérée d'un réseau de chaleur et d'un approvisionnement en gaz de réseau. On retiendra comme principes :

- l'introduction du bois en milieu urbain sous la seule typologie de CCC (chauffage central collectif) ;
- la possibilité de maintien du bois en AIC (appareils indépendants de chauffage) pour les maisons individuelles en rural, avec appoint effet Joule ;
- pas de conversion vers le bois, même en CCI, pour cette même catégorie de maisons individuelles en urbain ; une hypothèse inverse pourrait faire courir un risque notable en termes de qualité de l'air, en raison des performances (émissions de particules) des équipements disponibles ;
- même en rural, pas de possibilité d'approvisionnement bois en IC CCI, en raison des difficultés de stockage du combustible ;
- la possibilité de maintien de l'effet Joule (tout électrique) ou de conversion en PAC air/air ; la préférence étant donnée à la conversion PAC ;
- la conversion vers l'effet Joule est toujours écartée, même lorsque la solution PAC n'est pas encore disponible (exemple des PAC collectives en 2005) ; dans ce cas, et dans l'attente d'une solution PAC, l'énergie de départ est conservée.

Ce dernier point concerne en particulier le scénario ELEC/BOIS/GAZ : pour les immeubles collectifs en CCC au gaz, au GPL ou au fioul, la logique de priorité à la PAC voudrait que le bois soit favorisé (car dans nos hypothèse cette énergie vient automatiquement en priorité) si la solution PAC électrique n'est pas disponible. Néanmoins, pour amplifier à 2050 les effectifs « Elec-PAC », l'énergie fossile de départ est maintenue jusqu'à l'apparition de la solution PAC électrique.

Les conversions énergétiques vers les trois solutions privilégiées (bois, gaz, électricité) dépendent de l'installation de chauffage initiale : AIC, CCI ou CCC.

Pour les CCI à systèmes hydrauliques, les solutions PAC ht (haute température) sont disponibles en maison individuelle aujourd'hui, mais pas avant 2020 en immeuble collectif. Avant cette date pour les immeubles, la matrice de substitution applique les règles suivantes pour le champ d'application de l'électricité :

- Absence de réseau de gaz naturel : maintien du GPL et du fioul (effectifs faibles) ;
  - Réseau de gaz naturel : maintien du gaz naturel.
- Pour les solutions CCC bois, il conviendrait de prévoir une chaudière de relève gaz (voire fioul hors réseau) avec une consommation de type 90% bois, et 10% en complément fossile. Dans le scénario ELEC/BOIS/GAZ, la solution PAC haute température pour l'équipement en CCC n'apparaît qu'après 2020 : dans l'intervalle, on applique la même règle que pour les CCI, maintien de l'énergie fossile de départ sans passage au bois.

Un principe de répartition des effectifs de logements existants, en rénovation d'équipements de chauffage et selon les quatre scénarios est présenté en ANNEXE 4.

Les figures suivantes présentent les solutions envisageables en réhabilitation selon les quatre scénarios proposés :

- pour chaque typologie d'équipement de chauffage de départ (AIC : appareil indépendant de chauffage, CCI : chauffage central individuel, CCC : chauffage central collectif),
  - selon le type de contexte urbain/rural,
  - la typologie de logement (maison individuelle / immeuble collectif)
  - et l'existence ou non d'un réseau de gaz naturel.
- Ainsi, pour la typologie AIC, deux solutions s'imposent quel que soit le scénario : Bois + Elec ou Elec seul (Elec = effet Joule)<sup>33</sup>. **F44 F45 F46**

### L'évolution des effectifs du parc de résidences principales (stock + neuf) selon les quatre scénarios

La répartition des énergies de chauffage en 2050 est très contrastée en 2050 pour le parc neuf construit dans l'intervalle 2010-2050.

Dans le scénario BGE (BOIS/GAZ/ELEC), compte tenu des hypothèses adoptées, tous les immeubles collectifs peuvent être équipés au bois (en chauffage central collectif) ; en comptant les maisons individuelles, le bois équipe les 2/3 des logements neufs. Les règles d'implantation des maisons individuelles (hors rural où la chaudière bois est acceptée), de préférence en densification de bourgs, favorisent l'extension des réseaux de gaz existants : il y a donc peu de logements individuels qui recourent à la PAC électrique (environ 3% en moyenne sur l'ensemble du parc neuf).

Dans le scénario BEG (BOIS/ELEC/GAZ), les effectifs « bois » sont identiques aux précédents, le solde soit 1/3 étant pris en totalité par les solutions électriques : le gaz est donc totalement absent.

Dans le scénario GBE (GAZ/BOIS/ELEC), le gaz étant prioritaire, il équipe les trois quarts des logements, et près de 90% des immeubles collectifs, le solde affecté aux solutions électriques étant identique au premier scénario BGE, soit 3%.

Dans le scénario EBG (ELEC/BOIS/GAZ), la totalité des effectifs est en électrique (PAC). **F47**

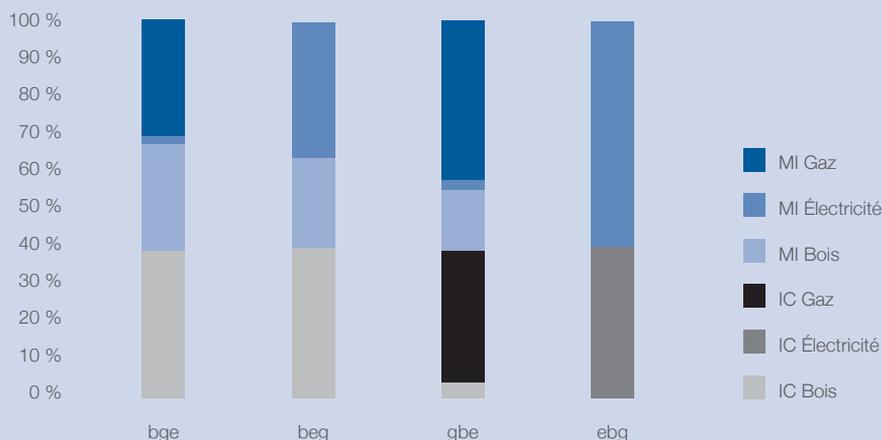
En tenant compte des flux de rénovation des équipements énergétiques dans le parc existant, qui viennent en complément des solutions appliquées au neuf, le gaz, le fioul et le GPL subsistent jusqu'en 2020/2030 dans l'offre de rénovation de systèmes pour les scénarios BOIS/ELEC/GAZ et ELEC/BOIS/GAZ, dans les immeubles collectifs actuellement en CCI gaz, en attente de solution mature de pompe à chaleur. Au-delà, les PAC commencent à remplacer les CCI gaz persistants. De leur côté, les CCC gaz (rural comme urbain) sont reconvertis au bois.

En 2050, compte tenu de la durée de vie de l'ordre de 15-25 ans des équipements énergétiques, toutes les énergies fossiles ont disparu dans les scénarios BOIS/ELEC/GAZ et ELEC/BOIS/GAZ.

L'évolution des effectifs du neuf et du parc existant (antérieur à 2001) correspondants aux quatre scénarios sont présentés sur la période 2005- 2050 dans les figures suivantes. Les effectifs en chauffage urbain sont maintenus, mais les sources d'approvisionnement sont peu à peu converties à la biomasse. Les nouveaux réseaux bois alimentant les maisons individuelles en CCI ou les immeubles collectifs équipés en CCC sont inclus dans l'énergie bois correspondant à la typologie de chauffage. **F48 F49 F50 F51**

En résumé, les règles d'affectation des énergies, établies selon la localisation (rural/urbain), la présence ou non de réseau de chaleur et de la desserte en gaz, aboutissent à des répartitions du

**Figure 47.**  
Répartition des effectifs de logements neufs (2010-2050) selon les quatre scénarios



parc résultant en 2050 très contrastées selon les quatre scénarios :

- BOIS/GAZ/ELEC : le bois est présent dans 43% des effectifs, le gaz est présent à 26% en chauffage central individuel (en maison ou immeuble), l'électricité équipe les 31% restants ;
- BOIS/ELEC : le bois occupe la même place que dans le scénario précédent, le solde étant à totalité équipé en électrique (le gaz est en effet totalement absent) ;
- GAZ/BOIS/ELEC : la position du bois est réduite à un peu plus de 25%, le gaz occupe envi-

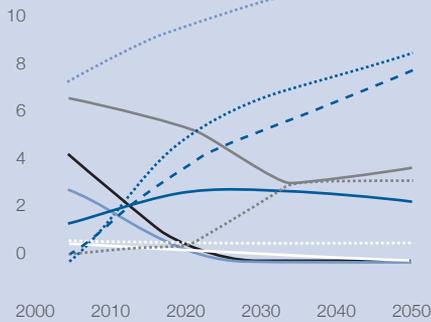
ron 43%, l'électricité équipe les mêmes segments que dans le scénario BOIS/GAZ/ELEC ;

- ELEC/BOIS/GAZ : le gaz étant totalement absent, le bois est présent à 18% sous forme d'appareils indépendants de chauffage avec appoint électrique et en réseau de chaleur, les PAC électriques équipent plus de 53% des logements en chauffage central indépendant, 14% des logements en chauffage central collectif, l'effet joule subsistant dans moins de 15% des logements.

**Figures 48 49 50 51**  
Évolution des effectifs de logements (neufs + stock 2001)

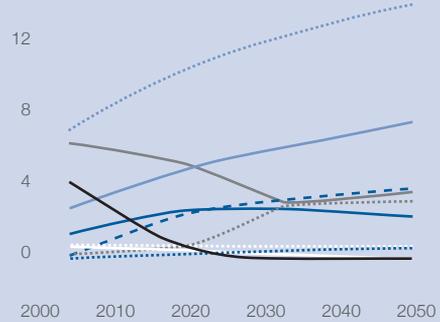
**Scénario "bois/gaz/élec"**

12 Millions de logements.



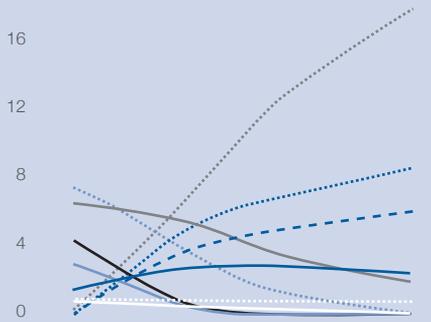
**Scénario "gaz/bois/élec"**

16 Millions de logements.



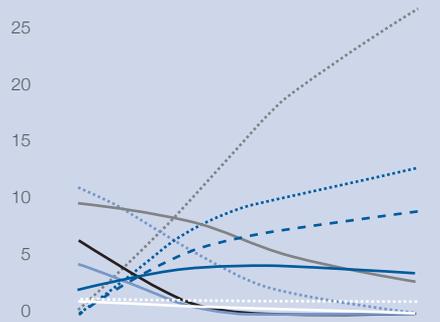
**Scénario "bois/élec/gaz"**

20 Millions de logements.



**Scénario "élec/bois/gaz"**

30 Millions de logements.



## Synthèse des résultats à 2050

### Le solde « consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire – production d'électricité » en énergie finale

L'effort particulièrement important en réhabilitation du bâti permet de compenser la quasi stagnation des besoins totaux en eau chaude sanitaire. En énergie finale, le chauffage occupe une place prépondérante, de 88,5% de la consommation totale des deux postes en 2005, part qui décline légèrement en 2050 entre les valeurs extrêmes de 77% pour le scénario Elec/Bois/Gaz à 83% pour le scénario Bois/Elec/Gaz. Les facteurs de réduction sur les deux postes cumulés, après déduction de la production d'électricité par cogénération et photovoltaïque, apparaissent significatifs, et voisins de 2 dans les scénarios où le bois et le gaz dominent. En revanche, une reconversion importante des équipements en pompes à chaleur électriques permet d'obtenir un facteur de réduction de 3 (Scénario Bois/Elec/Gaz), et de 8,8 lorsque l'électricité est relayée quasi uniquement par les chauffages indépendants au bois et les réseaux de chaleur existants. Les deux postes considérés représentent encore une part dominante des consommations finales du parc<sup>34</sup>. **T39**

Pour le scénario Bois/Gaz/Elec, les consommations totales en énergie finale décroissent lentement de 2005 à 2050, de 50% dans l'intervalle, en tenant compte de la production électrique du gaz (74%) et du PV (26%). La part du bois croît fortement à plus de 190 TWh en 2020-2025 – la prise en compte d'installations de cogénération pourrait intervenir après ce pic -, avant de décliner aux alentours de 130 TWh en 2050, soit 50% des consommations totales. La part de l'électricité dans les consommations d'énergie finale s'établit à 7%, contre 40% pour le gaz en 2050 (avant déduction de la production électrique).

Pour le scénario Bois/Elec/Gaz, les consommations totales en énergie finale décroissent plus rapidement de 2005 à 2050, de -67% dans l'intervalle, en tenant compte de la production électrique du seul PV (7,3 TWh), car après le bois, l'électricité équipe la quasi totalité des segments disponibles. La part du bois croît fortement à plus de 190 TWh en 2020-2025 avant de décliner, tout en représentant 74% des consommations totales en 2050. La part de l'électricité dans les consommations d'énergie finale s'établit à 18%, contre 4% pour le gaz ainsi que pour le chauffage urbain en 2050.

Le scénario Gaz/Bois/Elec se distingue par une part importante de production électrique par

Tableau 39.

Facteurs de réduction des soldes (consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, production d'électricité) en énergie finale (2005 / 2050)

	Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
		(TWh ef)	2005	2050	2005	2050	2005	2050	2005
Bois		88,1	129,2	115,2	52,9	8,9			
Charbon		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Chauffage urbain		16,1	5,8	5,8	5,8	5,8			
Électricité		56,2	16,5	28,1	16,2	45,2			
Fioul		102,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
Gaz		167,8	101,0	5,7	191,1	0,6			
GPL		11,3	0,0	0,0	0,0	0,0			
TOTAL chauffage + ECS		444,9	252,9	155,3	266,5	61,0			
Production électrique	Cogé (*)	0,0	-19,3		-61,1				
	PV (+)	0,0	-6,9	-7,3	-8,2	-10,6			
TOTAL (SOLDE)		444,9	226,8	148,0	197,3	50,4			
Facteur de réduction 2005/2050			2	3,0	2,3	8,8			

(\*) Cogénération au gaz pour les scénarios BGE et GBE ; la cogénération bois n'est pas prise en compte.

(+) Le PV (photovoltaïque) vient en compensation des consommations de la RT pour les logements neufs en BEPOS (2020-2050), en complément de la cogénération gaz le cas échéant.

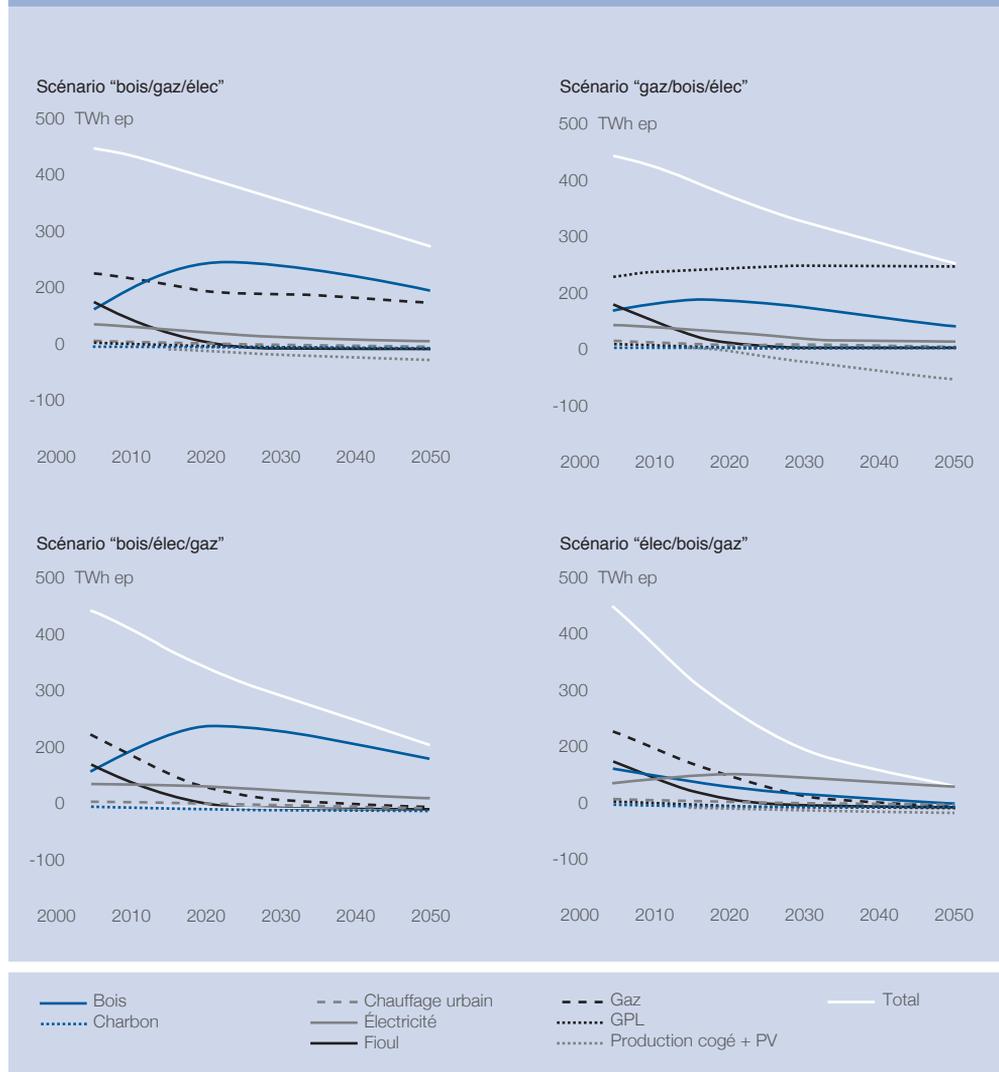
cogénération gaz (88% des 69 TWh<sub>ep</sub> produits en 2050), ce qui améliore le facteur de réduction des consommations totales, de -55% dans l'intervalle 2005-2050. La part du gaz se stabilise à environ 190 TWh entre 2030-2050 et représente (avant déduction de la production électrique) 72% des consommations totales en 2050 en raison de l'importance des équipements de cogénération, pile à combustible et pompe à chaleur. La part de l'électricité dans les consommations d'énergie finale s'établit à 6%, contre 20% pour le bois et seulement 2% pour le chauffage urbain en 2050.

Enfin, la réduction des consommations totales atteint -88% dans l'intervalle 2005-2050 pour le scénario Elec/Bois/Gaz, avec une production électrique à 100% PV, de 10,6 TWh<sub>ep</sub>. La part de l'électricité se stabilise à environ 70 TWh<sub>ep</sub> dans l'intervalle 2015-2025 avant de décliner de 2030 à 2050 et représente, avant déduction de la production électrique, 72% des consommations totales en 2050. La part du gaz dans les consommations d'énergie finale s'établit à 6%, contre 20% pour le bois et seulement 2% pour le chauffage urbain en 2050. **F52 F53 F54 F55**

**Figures 52 53 54 55**

**Évolution des soldes énergétiques finaux**

(consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, production d'électricité)



### Les soldes énergétiques (consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire et production d'électricité) en énergie primaire

Les différences entre scénarios s'estompent en énergie primaire, les rendements en énergie primaire des PAC électriques et des chaudières gaz et bois étant de même ordre. Par ailleurs, la production électrique comptabilisée en énergie primaire avec un coefficient de 2,58<sup>35</sup> sur l'énergie finale, améliore le bilan des scénarios pour lesquels le gaz est fortement présent. La part du chauffage, à 84% du total des deux postes en

2005 en énergie primaire, demeure prépondérante tout en se réduisant à 74% pour le scénario Elec/Bois/Gaz, et à environ 80% pour les trois autres scénarios.

Ainsi, le facteur 4 sur les consommations de chauffage et d'ECS en énergie primaire est largement atteint par les scénarios Gaz/Bois/Elec et Elec/Bois/Gaz, ce qui montre l'importance d'élargir l'éventail des solutions énergétiques si le facteur 4 devait être établi sur ce seul critère. Pour les scénarios qui privilégient le bois, les facteurs de réduction en énergie primaire demeurent inférieurs à 3. **T40 F56 F57 F58 F59**

Tableau 40.

Facteurs de réduction des soldes énergétiques (consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, production d'électricité) en énergie primaire (2005 / 2050)

	Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
		(TWh ep)	2005	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Bois		88,1	129,2	115,2	52,9	8,9			
Charbon		3,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Chauffage urbain		16,1	5,8	5,8	5,8	5,8			
Électricité		145,0	42,6	72,5	41,9	116,7			
Fioul		102,4	0,4	0,4	0,4	0,4			
Gaz		167,8	101,0	5,7	191,1	0,6			
GPL		11,3	0,0	0,0	0,0	0,0			
TOTAL chauffage + ECS		533,7	279,0	199,7	292,2	132,5			
Production électrique	Cogé (*)	0,0	-49,9	-18,8	-157,6	-27,3			
	PV (+)	0,0	-17,7	0	-21,1	0			
TOTAL (SOLDE)		533,7	211,5	180,9	113,5	105,2			
Facteur de réduction 2005/2050			2,5	2,9	4,7	5,1			

(\*) Cogénération au gaz pour les scénarios BGE et GBE ; la cogénération bois n'est pas prise en compte.

(+) Le PV (photovoltaïque) vient en compensation des consommations de la RT pour les logements neufs en BEPOS (2020-2050), en complément de la cogénération gaz le cas échéant.

Tableau 41. Estimation des consommations unitaires (CU, par mètre carré de surface habitable) en énergie finale et en énergie primaire pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

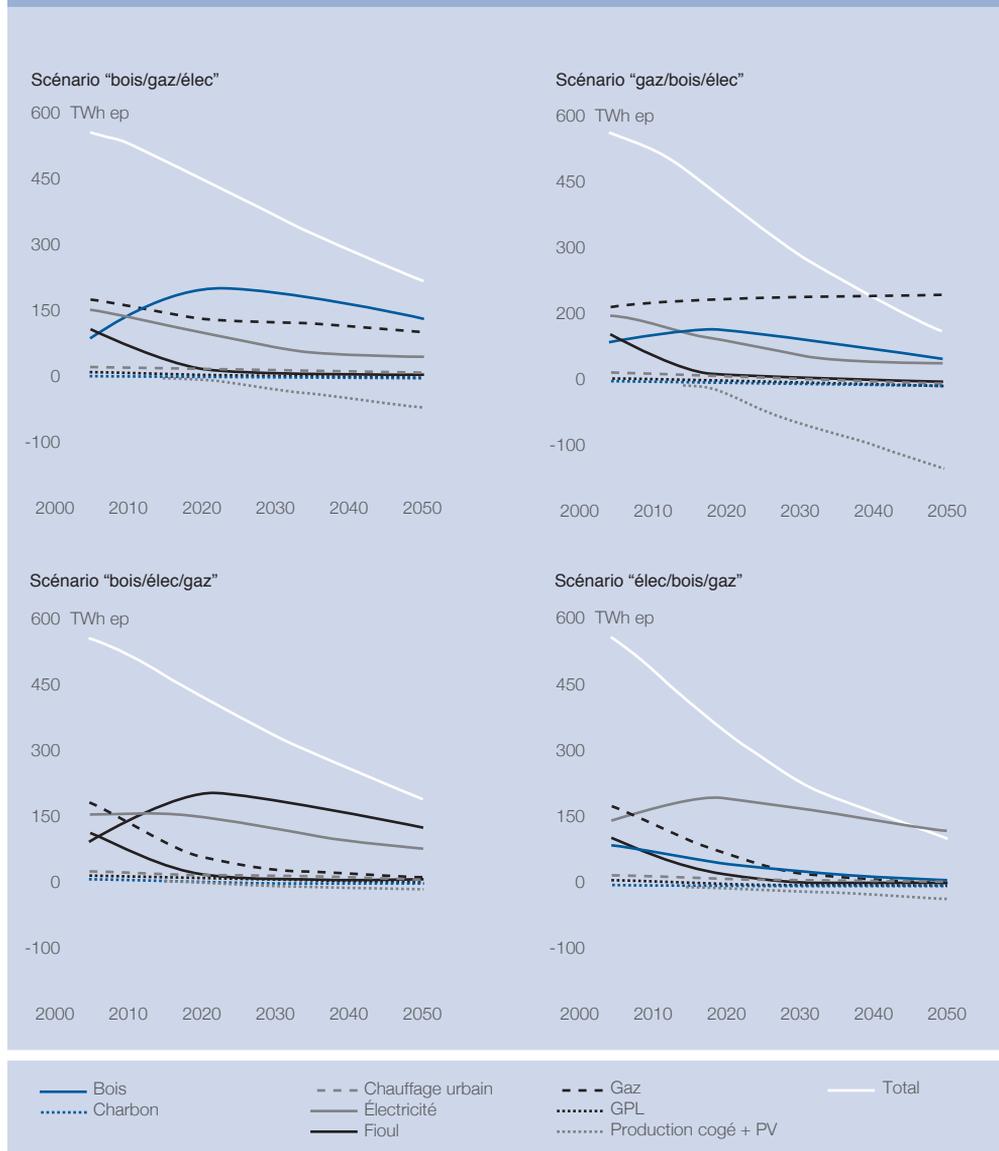
	2005	BGE 2050	BEG 2050	GBE 2050	EBG 2050
Total TWhef (*)	445	235,5	155,3	211,5	61
CU moyen (kWhef/m²)	189	74	49	67	19
Total TWhef (*)	533	261,7	199,7	237,2	132,5
CU moyen (kWhef/m²)	227	82	63	75	42

(\*) La part de gaz attribuée à la production d'électricité par cogénération est déduite des consommations totales des équipements de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Les surfaces habitables totales (parc existant et neuf 2005-2050) sont estimées à 2350 millions de mètres carrés en 2005, et de 3180 millions de mètres carrés en 2050.

En consommations unitaires, et pour les deux postes étudiés, le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, le niveau de départ est d'environ 227 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB en 2005. Après prise en compte des choix d'équipements énergétiques et des énergies associées, les scénarios conduisent à des consommations totales de 132 à 262 TWh<sub>ep</sub> en 2050, soit des consommations unitaires moyennes de 42 à 82 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB.

Compte tenu des niveaux de consommation du neuf, de 35 à 45 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB pour les deux seuls postes considérés, le niveau de 80 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB serait atteint en moyenne du parc existant en 2050 pour tous les scénarios, sauf pour le scénario BGE, les consommations unitaires du parc existant approchant les 100 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB, avant prise en compte des autres postes de la réglementation thermique. **T41**

**Figures 56 57 58 59**  
**Évolution des soldes énergétiques primaires**  
 (consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, production d'électricité)



## Les émissions de CO<sub>2</sub> dues au chauffage et à l'eau chaude sanitaire

Les hypothèses adoptées pour le contenu CO<sub>2</sub> se conforment aux conventions existantes, en prenant en compte les seules émissions « directes » (combustion pour les fossiles, fonctionnement de la centrale pour l'électricité), sans les émissions des cycles en amont pour les fossiles et le bois et en amont et aval pour l'électricité (la préparation du combustible, son retraitement et le transport et distribution sur le réseau électrique). Pour l'électricité, le contenu CO<sub>2</sub> est distinct selon les deux usages considérés (chauf-

fage et production d'eau chaude sanitaire), et à ce stade s'appuie, sans révision des valeurs adoptées en 2005, sur la méthode du contenu du kWh moyen saisonnalisé<sup>36</sup>. **T42**

Pour les émissions de CO<sub>2</sub> évitées par la production décentralisée d'électricité, il n'existe pas de référence conventionnelle. Dans la mesure où l'essentiel de la production s'effectue par cogénération sur le chauffage, nous adoptons l'hypothèse que le contenu moyen du kWh évité est identique à celui du chauffage électrique, ce qui permet de réduire dans une proportion notable les émissions liées au gaz naturel, comptabilisées y compris pour l'électricité produite dans les consommations de combustible gaz des postes chauffage et production d'ECS.

Pour la production photovoltaïque, l'hypothèse adoptée est celle d'un contenu CO<sub>2</sub> moyen évité de 70 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>ef</sub> (en émissions directes), ce qui correspondrait à un mix d'environ 20% de cycle combiné gaz à 350 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>ef</sub>, et de 80% EnR et nucléaire (à 0 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>ef</sub>, toujours en émissions directes). La production PV, nulle durant la nuit, n'étant pas continue sur les 8760 heures de production électrique délivrée par le réseau, la valeur adoptée est ainsi légèrement supérieure à la moyenne nationale indiquée dans la note ADEME-EDF de 2005, de 60 gCO<sub>2</sub>/kWh. **T43**

Dans les scénarios où il est fortement présent, le gaz naturel apparaît comme la principale source d'émissions de CO<sub>2</sub> en 2050, à un niveau élevé de

**Tableau 42. Conversions adoptées en émissions de CO<sub>2</sub> pour les énergies de chauffage**

Énergie de chauffage	gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>ef</sub>
Charbon	355
Fuel	271
GPL	231
Gaz	205
Réseaux de chaleur urbains (*)	200
Bois	0
Électricité (chauffage / ECS)	180 / 40

Source : CITEPA pour les fossiles, AMORCE pour les réseaux de chaleur<sup>38</sup> (d'après Enquête Annuelle de Branche - SNCU 2007), ADEME-EDF pour l'électricité. Valeurs sans amont pour les fossiles et le bois, et sans amont ni aval pour l'électricité.

(\*) Les réseaux de chaleur neufs apparaissent dans le bois-énergie, soit à 0 g CO<sub>2</sub>/kWh dès 2010. Il conviendrait de tenir compte d'un appoint gaz de 20% environ dans les réseaux de chaleur, ce qui conduirait à un facteur de conversion de 40 gCO<sub>2</sub>/kWh lorsqu'ils sont alimentés à 80% en biomasse.

**Tableau 43. Facteurs de réduction des soldes énergétiques (consommations de chauffage et d'ECS, production d'électricité) en émissions de CO<sub>2</sub> (2005 / 2050)**

	Scénario	B / G / E		G / B / E		E / B / G	
		2005	2050	2050	2050	2050	2050
	(Mt CO <sub>2</sub> )						
Bois		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Charbon		1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chauffage urbain (*)		3,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Électricité		7,1	2,1	3,7	2,1	6,3	6,3
Fioul		27,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gaz		34,4	20,7	1,2	39,2	0,1	0,1
GPL		2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL chauffage + ECS		76,2	23,0	5,1	41,5	6,7	6,7
Production électrique	Cogé (*)	0	-3,5		-11,0		
	PV (+)	0	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	
TOTAL (SOLDE)		76,2	19,1	4,7	29,9	6,1	6,1
Facteur de réduction 2005/2050			4,0	16,3	2,5	12,5	

(\*) Le contenu CO<sub>2</sub> des réseaux de chaleur existants décroît régulièrement entre 2015 et 2050 (de 200 gCO<sub>2</sub>/kWh à 40 gCO<sub>2</sub>/kWh)

(\*) Cogénération au gaz pour les scénarios BGE et GBE ; la cogénération bois n'est pas prise en compte.

(+) Le PV (photovoltaïque) vient en compensation des consommations de la RT pour les logements neufs en BEPOS (2020-2050), en complément de la cogénération gaz le cas échéant.

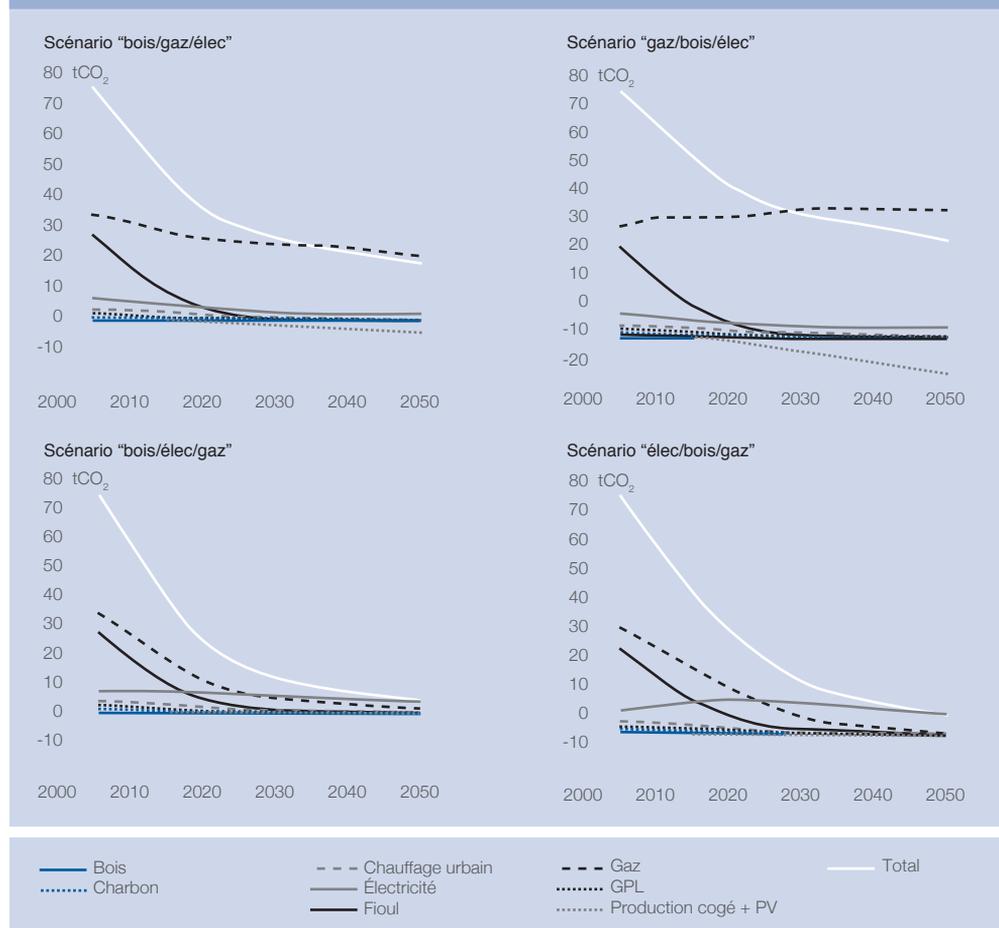
20 MtCO<sub>2</sub> dans le scénario Bois/Gaz/Elec, avant déduction des émissions évitées par cogénération de 3,5 MtCO<sub>2</sub>, et à près de 40 MtCO<sub>2</sub> lorsque le gaz est en premier rang (scénario Gaz/Bois/Elec), avant déduction des émissions évitées par cogénération de 11 MtCO<sub>2</sub>. Dans ces conditions, le facteur 4 est atteint pour le scénario Bois/Gaz/Elec, mais semble plus difficile à atteindre, dans le jeu d'hypothèses adoptées, pour le scénario Gaz/Bois/Elec, à 2,5. Cependant, compte tenu des niveaux élevés de cogénération gaz, les résultats sont sensibles aux conditions de production de l'électricité qui serait remplacée par cette production décentralisée (cf. infra).

La conjonction du bois et de l'électricité donne les meilleurs résultats. Avec la méthode adoptée du contenu du kWh électrique aligné sur les valeurs 2005, le facteur 16 est dépassé pour le scénario Bois/

Elec/Gaz, combinant un facteur de conversion avantageux en émissions pour le bois, à une bonne performance énergétique des équipements électriques, grâce aux pompes à chaleur, enfin une plus forte production de PV que dans les autres scénarios en raison des compensations comptabilisées en énergie primaire, nécessaires en neuf. Lorsque l'électricité est privilégiée sur le bois (scénario Elec/Bois/Gaz), le facteur de réduction des émissions atteint 12,5.

Dans tous les scénarios, la contribution du chauffage urbain existant (et avant extension) est fortement réduite, en raison de la rénovation des immeubles desservis et d'un taux d'émissions en CO<sub>2</sub> du chauffage urbain en baisse, réduit de 80% par conversion des combustibles fossiles à la biomasse ou aux énergies fatales (incinération des ordures ménagères) en 2050, avec un appoint gaz de 20%. **F60 F61 F62 F63**

**Figures 60 61 62 63**  
Évolution des soldes en émissions de CO<sub>2</sub> (consommations de chauffage et d'ECS, production d'électricité)



## Les usages de l'énergie : le chauffage

En 2050, l'intégralité du programme de réhabilitation a été mise en œuvre. Les systèmes de chauffage et de production d'ECS ont quant à eux été renouvelés en fonction des règles décrites dans le chapitre précédent, pratiquement deux fois dans l'intervalle 2010-2050.

En énergie finale, la décroissance des consommations totales dépend essentiellement des niveaux de réhabilitation du bâti existant et des performances du bâti neuf, ainsi que des rendements moyens des systèmes de chauffage. Par rapport à la situation 2005, les scénarios bénéficient tous d'un facteur de réduction supérieur à 2 sur les besoins du chauffage du parc existant. Ce facteur 2 est ensuite amplifié par l'évolution des rendements de chauffage dans ce même parc existant, qui permet dans un premier temps de compenser les consommations supplémentaires dues à la croissance du parc : en effet, le parc total croît en surface de 42%, passant de 2350 millions de m<sup>2</sup> à 3350 millions de m<sup>2</sup> de 2005 à 2050, mais ces surfaces supplémentaires génèrent beaucoup moins de besoins de chauffage en énergie utile. Dans un deuxième temps, l'amélioration des rendements des installations de chauffage permet d'obtenir un taux final de réduction des consommations très significatif. L'électricité présente les meilleurs rendements en énergie finale, en raison de la présence dominante des pompes à chaleur. Pour le gaz et le bois, les rendements des chaudières et chaufferies sont plus faibles. Lorsque les équipements de cogénération se généralisent, principalement entre 2030 et 2050, l'analyse des

seules consommations liées au chauffage masque l'effet de compensation permis par la production électrique, l'efficacité énergétique globale étant améliorée. Les facteurs de réduction par rapport à la situation 2005 s'étagent ainsi de 1,8 pour les scénarios « Gaz/Bois/Elec » à 1,9 pour le scénario « Bois/Gaz/Elec ». Le facteur de réduction peut atteindre 8,4 quand l'électricité est fortement présente (scénario Elec/Bois/Gaz) et s'élève à 3 lorsque l'électricité vient compléter les installations bois prioritaires (scénario Bois/Elec/Gaz). **T44 F64**

Dans le scénario (Bois/Gaz/Elec), toutes les énergies carbonées déclinent au profit du bois, qui culmine à plus de 180 TWh, soit une augmentation de 100% par rapport à 2005. Le scénario (Bois/Elec/Gaz) s'en distingue par une décroissance plus rapide du gaz, tandis que l'électricité se maintient en consommation, en dessous de 40 TWh cependant. Le bois connaît une évolution similaire dans les deux scénarios, où il occupe une position prioritaire. **F65**

Dans le scénario (Gaz/Bois/Elec), le gaz naturel demeure l'énergie de chauffage dominante, relativement stable à 160 TWh environ, dont plus d'un tiers est consacré à la production électrique, le bois étant l'autre énergie durablement présente avec un maximum à 115 TWh en 2020. Toutes les autres énergies déclinent, l'électricité à un rythme plus lent. **F66**

Enfin, dans le scénario privilégiant l'électricité (Elec/Bois/Gaz), seule l'énergie électrique ne s'effondre pas, et connaît un « pic » en 2020 aux alentours de 55 TWh/an. **F67**

**Tableau 44. Facteurs de réduction des consommations de chauffage en énergie finale (2005 / 2050)**

Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
	2005	2050	2005	2050	2005	2050	2005	2050
Chauffage (TWh ef)								
Bois	87,9	119,0	105,5	48,4	8,9			
Charbon	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
Chauffage urbain	14,1	4,5	4,5	4,5	4,5			
Électricité	34,8	9,9	18,2	10,0	32,3			
Fioul	93,2	0,4	0,4	0,4	0,4			
Gaz	151,8	73,6	0,6	150,8	0,6			
GPL	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0			
TOTAL	393,9	207,5	129,3	214,2	46,8			
Facteur de réduction 2005/2050		1,9	3,0	1,8	8,4			

Figures 64 65 66 67

Évolution des consommations énergétiques finales de chauffage du parc de résidences principales



**Les usages de l'énergie : l'eau chaude sanitaire**

Les besoins totaux en eau chaude sanitaire, continûment croissants avant 2005, connaissent une relative stabilisation vers 2030, l'augmentation de la population étant alors compensée par une généralisation de mesures d'économie d'eau. La réduction des besoins demeure faible et ne peut en aucun cas suivre le rythme de celle qui est appliquée au chauffage. L'application systématique du solaire thermique dans le neuf (sauf en cas de production par le bois énergie ou par pompe à chaleur) et pour une part de 30% du stock en 2050, contribue à annuler la croissance totale des consommations.

Pour les énergies dominantes que seraient le bois et le gaz, dans les scénarios Bois/Gaz/Elec ou Gaz/Bois/Elec, l'effet sur les consommations totales est quasiment nul entre 2005 et 2050. Il faut cependant prendre en compte, pour les consommations de gaz, l'effet majorant de l'introduction de technologies de cogénération dont les bénéfices ne sont appréhendables que dans le bilan global, après valorisation de l'électricité produite. En revanche, l'amélioration des rendements de génération d'ECS permise par les pompes à chaleur électriques produit des résultats significatifs : le facteur de réduction entre 2005 et 2050 varie de 2 lorsque l'électricité vient relayer le bois (Scénario Bois/Elec/gaz), à 3,6,

lorsque l'électricité assure la quasi-totalité des besoins, assistée par les réseaux de chaleur existants (Scénario Elec/Bois/Gaz). T45 F68 F69  
 Lorsque le bois et le gaz demeurent prioritaires, les consommations connaissent un pic en 2030

pour ces énergies, à 41 TWh pour le gaz (scénario Gaz/Bois/Elec) et à plus de 10 TWh pour le bois. Lorsque l'électricité est fortement présente, les consommations de l'ensemble des énergies de production d'ECS décroissent. F70 F71

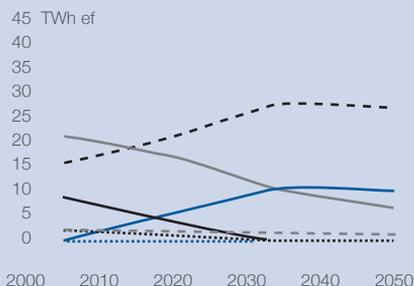
**Tableau 45. Facteurs de réduction des consommations d'ECS en énergie finale (2005 / 2050)**

Scénario		B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
ECS (TWh ef)	2005	2050	2050	2050	2050
Bois	0,2	10,1	9,7	4,5	0,0
Charbon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chauffage urbain	2,0	1,3	1,3	1,3	1,3
Électricité	21,4	6,6	9,9	6,2	12,9
Fioul	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Gaz	16,0	27,4	5,1	40,2	0,0
GPL	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	51,1	45,5	26,0	52,3	14,2
Facteur de réduction 2005/2050		1,1	2,0	1,0	3,6

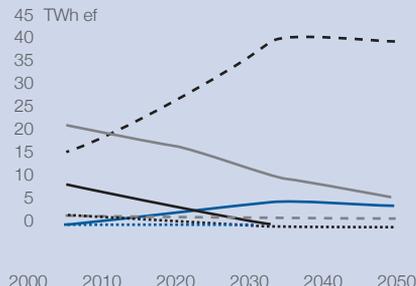
**Figures 68 69 70 71**

**Évolution des consommations énergétiques finales d'eau chaude sanitaire du parc de résidences principales**

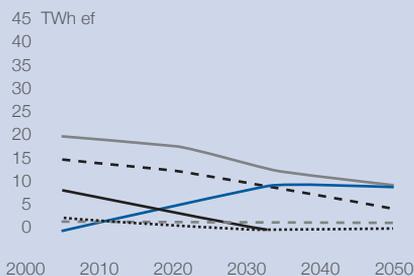
**Scénario "bois/gaz/élec"**



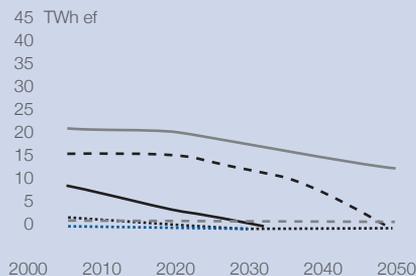
**Scénario "gaz/bois/élec"**



**Scénario "bois/élec/gaz"**



**Scénario "élec/bois/gaz"**



- Bois
- ..... Charbon
- Chauffage urbain
- Électricité
- Fioul
- Gaz
- ..... GPL

### La production décentralisée d'énergie électrique (cogénération et photovoltaïque)

La production électrique décentralisée s'effectue selon deux modes :

- par cogénération associée aux équipements énergétiques de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire au gaz naturel, dont les besoins dimensionnent le système,
- et par systèmes photovoltaïques, dimensionnés en compensation des postes de la RT, hors bois et contribution solaire thermique, pour les seuls logements en BEPOS construits dans l'intervalle 2020-2050.

En conséquence, le niveau de production électrique par cogénération est le plus élevé dans le scénario Gaz/Bois/Elec, avec près de 61 TWh produits en 2050, pour une consommation totale de gaz de 191 TWh pour le chauffage, l'ECS et la production électrique. Le scénario Bois/Gaz/Elec se situe en deuxième position, avec plus de 19 TWh produits en 2050, pour une consommation totale de gaz de 101 TWh pour le chauffage, l'ECS et la production électrique. Pour ces deux scénarios, il convient de relever que la production d'électricité par cogénération est excédentaire à l'échelle des périmètres étudiés, très largement pour le scénario Gaz/Bois/Elec (61 TWh produits pour 16 TWh consommés pour le chauffage et la production d'ECS électrique), et de quelques TWh pour le scénario

Bois/Gaz/Elec. Ces deux scénarios devraient contribuer à réduire le contenu CO<sub>2</sub> de la production d'électricité.

Le gaz étant absent en 2050 dans les deux autres scénarios (Bois/Elec/Gaz et Elec/Bois/Gaz), la production électrique par cogénération est nulle. **T46**

Dans les quatre scénarios, la production photovoltaïque intervient en compensation des cinq postes de la réglementation thermique de niveau BEPOS à partir de 2020, hors EnR destinée au chauffage et à l'ECS, et en complément de la cogénération lorsqu'elle est présente. Le bilan est effectué en énergie primaire. La production PV est donc maximale pour le scénario Elec/Bois/Gaz, lorsque les PAC électriques répondent à l'essentiel des besoins en chauffage et ECS, avec plus de 10 TWh de production et plus de 80 millions de mètres carrés installés en 2050. **T47**

Les taux de couverture des consommations électriques totales par production photovoltaïque devraient être estimés en intégrant les autres postes de la RT (éclairage, ventilation, auxiliaires), car les systèmes sont dimensionnés selon ce principe dans les logements en BEPOS. Par ailleurs, contrairement à la cogénération, la période de production est maximale en été, lorsque les consommations de chauffage et d'ECS sont les plus faibles.

**Tableau 46. Consommations électriques (chauffage + ECS) et production électrique par cogénération et par PV en 2050**

Scénario	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
Consommation électricité chauffage + ECS (TWh ef)	16,5	28,1	16,3	45,2
Production électrique par cogénération (TWh ef)	19,3	0	61,1	0
Production électrique PV (TWh ef)	6,8	7,3	8,2	10,6
TOTAL Production électrique (TWh ef)	26,2	7,3	69,3	10,6
SOLDE (TWh ef)	-9,7	20,8	-53,0	34,6
<i>Solde négatif : production électrique décentralisée par cogénération et PV supérieure aux consommations électriques de chauffage et d'ECS</i>				

**Tableau 47. Compensation BEPOS par photovoltaïque, cumul des surfaces en 2050 (Mm<sup>2</sup> : millions de mètres carrés)**

	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
Surfaces PV installées BEPOS (Mm <sup>2</sup> )	52,7	56,0	62,8	81,5

On peut néanmoins relever, qu'en énergie finale et en bilan annuel pour 2050, et pour les deux seuls postes de consommation énergétique retenus dans l'étude, la part de l'électricité consommée dans chaque scénario assurée par production locale (cogénération + photovoltaïque) par le secteur résidentiel varie de 0,23 (scénario EBG) à 4,26 fois la consommation d'électricité (scénario GBE). **F72** **F73**

### La contribution des EnR thermiques (bois, solaire, pompes à chaleur)

Trois sources d'énergies renouvelables sont valorisées en chauffage et production d'eau chaude sanitaire dans les scénarios :

- le bois énergie, principalement en chauffage et plus modestement en eau chaude sanitaire,
- le solaire thermique,
- la chaleur puisée à l'environnement dans les pompes à chaleur<sup>37</sup>.

Figure 72.

#### Consommations énergétiques finales (chauffage + ECS) et productions électriques (PV + cogénération)

pour les quatre scénarios. Conventions de contenu CO<sub>2</sub> évité : 180 gCO<sub>2</sub>/kWh en cogénération et 70 g en photovoltaïque.

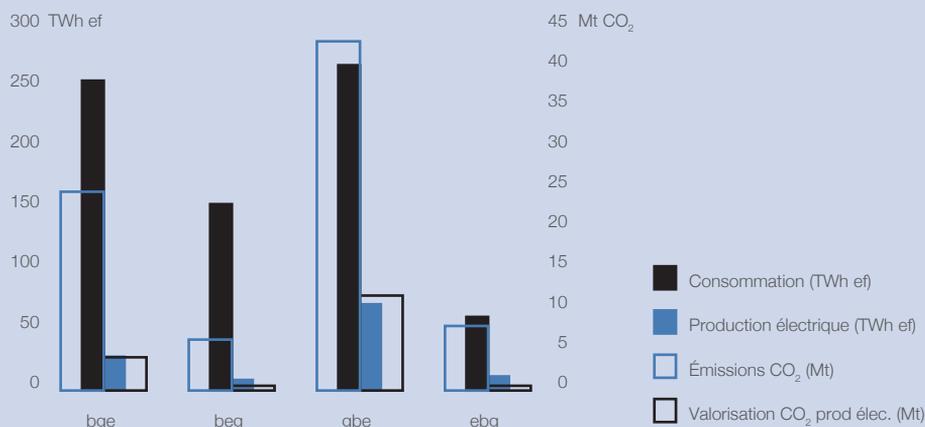
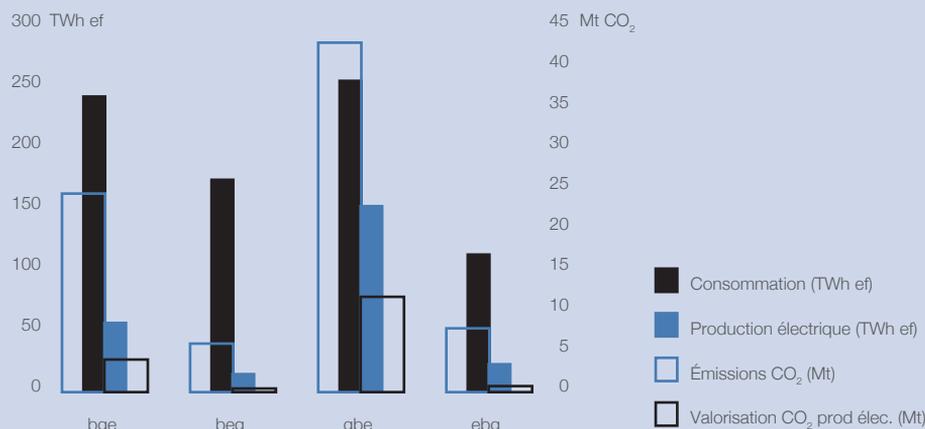


Figure 73.

#### Consommations énergétiques primaires (chauffage + ECS) et productions électriques décentralisées (PV + cogénération)

pour les quatre scénarios. Conventions de contenu CO<sub>2</sub> évité : 180 gCO<sub>2</sub>/kWh en cogénération et 70 g en photovoltaïque.



Le solaire thermique, limité à la production d'eau chaude sanitaire, équipe tous les logements neufs dans l'intervalle 2010-2050 hors production d'ECS par pompe à chaleur électrique ou chaudière bois, et une part notable du parc construit avant 2005 (30%).

Pour les EnR captées par les PAC, la méthode utilisée consiste à attribuer à l'environnement la part du COP (coefficient de performance exprimé en Ef/Eu) supérieure à 1, soit une part de 1,2 à 4 pour les PAC électriques, et de 0,44 et 0,11 pour les PAC gaz respectivement en chauffage et en production d'ECS. **T48**

Le niveau de contribution des EnR thermiques, en énergie finale, est le plus élevé lorsque les solutions énergétiques privilégient le bois et l'électricité, les rendements des PAC électriques (exprimés par le rapport Ef/Eu) étant supérieurs à 3 dès 2015 : la production EnR thermique serait ainsi de plus de 200 TWh pour le scénario Bois/Elec/Gaz.

En prenant en compte la production d'électricité photovoltaïque des logements en BEPOS, il conviendrait d'ajouter entre 6,8 TWh<sub>ef</sub>, pour le scénario Bois/Gaz/Elec, et 10,6 TWh<sub>ef</sub>, pour le scénario Elec/Bois/Gaz. Mais cette production ne contribue pas à satisfaire directement la demande de chauffage et d'eau chaude sanitaire, contrairement aux EnR thermiques considérées.

En 2050, la part d'EnR en énergie finale<sup>38</sup> peut atteindre 84% (scénario Bois/Elec/Gaz) lorsque le bois et les PAC électriques dominent les équipements de chauffage et de production d'ECS, même si le niveau de contribution solaire est limité à un peu plus de 8 TWh dans ce scénario. En énergie primaire, les écarts demeurent sensibles entre les scénarios, avec un minimum de 33% environ pour le scénario donnant la priorité au gaz, et un maximum de 71% pour le scénario Bois/Elec/Gaz. **T49**

**Tableau 48. Contributions des EnR thermiques en énergie finale selon les quatre scénarios (chauffage et ECS en 2050)**

EnR en 2050 (TWh ef)	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
Bois (en TWh ef)	119,0	105,5	48,4	8,9
Chauffage (en %)	71,5%	52%	53%	6%
EnR issu PAC électriques (en TWh ef)	7,8	49,9	8,0	82,0
Chauffage (en %)	5%	25%	9%	58%
EnR issu PAC gaz (en TWh ef)	0,9	0,0	1,9	0,0
Chauffage + ECS (en %)	0,5%	0%	2%	0%
Bois (en TWh ef)	10,1	9,7	4,5	0,0
ECS (en %)	6%	5%	5%	0%
EnR issu PAC électriques en TWh ef)	14,2	29,7	11,8	45,8
ECS (en %)	8,5%	15%	13%	33%
Solaire (en TWh ef)	14,2	8,4	16,9	3,6
ECS (en %)	8,5%	4%	18%	3%
Total ENR (en TWh ef)	166,3	203,2	91,5	140,2
Total ENR (en %)	100%	100%	100%	100%
Rappel consommations en TWh ef (Chauffage + ECS, hors gaz attribué à la production électrique par cogénération)	235,5	155	211,5	61

**Tableau 49. Part des EnR thermiques décentralisées en énergie finale et en énergie primaire selon les quatre scénarios (chauffage et ECS – production électrique en 2050)**

Part EnR en 2050 (*)	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
En énergie finale	61%	84%	37%	73%
En énergie primaire (*)	56%	71%	33%	53%

(\*) La part d'EnR de la production électrique, centralisée ou non, n'est pas prise en compte.

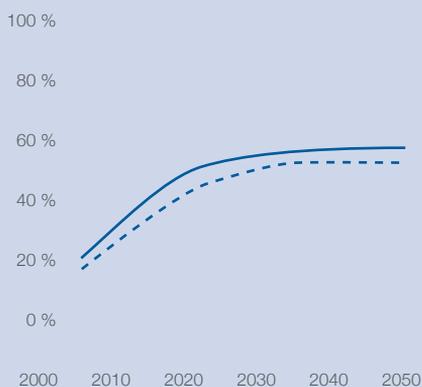
(\*) Les EnR sont incluses avec un coefficient de conversion de 1.

En énergie finale, les parts d'EnR croissent sensiblement jusqu'en 2025 pour tous les scénarios, puis se stabilisent en raison de la diminution des consommations de bois ou continuent à croître en cas de forte présence de PAC électriques, les rendements des PAC s'améliorant dans le temps. Le scénario Gaz/Bois/Elec subit une légère diminution de taux d'énergie renouvelable à partir de 2035 en raison du choix de pousser la cogénération dans les scénarios technologiques, par piles à combustibles principalement<sup>39</sup>. Un autre choix favorisant les pompes à chaleur gaz permettrait

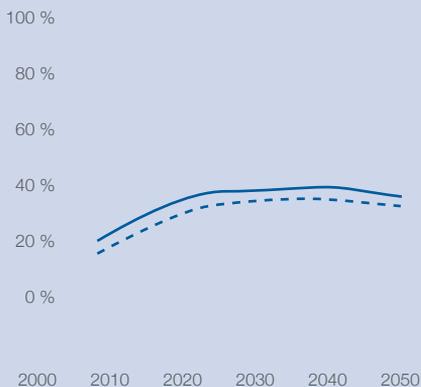
l'atteinte d'un meilleur taux d'énergie renouvelable, au détriment éventuel de l'efficacité globale obtenue avec la pénétration dominante des piles à combustibles. **F74 F75 F76 F77**

**Figures 74 75 76 77**  
**Parts d'EnR thermiques dans les consommations (énergie finale et énergie primaire)**  
**(chauffage + eau chaude sanitaire, production électricité)**

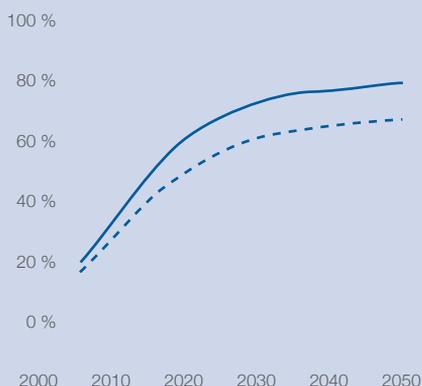
Scénario "bois/gaz/élec"



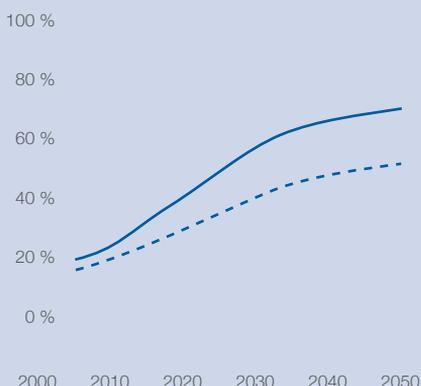
Scénario "gaz/bois/élec"



Scénario "bois/élec/gaz"



Scénario "élec/bois/gaz"



— EF      - - - EP

# L'analyse des résultats et les perspectives

## Le point de passage à 2020 et les décisions du Grenelle de l'environnement

### La réduction des consommations énergétiques en 2020

L'objectif affiché dans le Grenelle de l'Environnement est de réduire de 38% les consommations de chauffage et d'ECS entre 2008 et 2020, par la réhabilitation du parc résidentiel et tertiaire, les consommations étant exprimées en énergie primaire et hors EnR. Pour ce qui concerne le parc résidentiel, et en supposant un rythme linéaire de réhabilitation des logements du stock entre 2005 et 2050, cet objectif est atteint dans tous les scénarios, notamment ceux qui privilégient le bois, car les consommations de bois énergie sont déduites en leur qualité d'EnR. Seule cette énergie bois, déjà fortement présente en 2005, a été retranchée pour tous les scénarios en énergie primaire. **T50**

En énergie finale, hors conventions de type « Grenelle », le bois énergie étant pris en compte dans les consommations, les réductions sont plus faibles, sauf pour le scénario Elec/Bois/Gaz, qui présente les rendements de génération de chaleur les plus élevés et une part du bois énergie réduite. **T51**

### La part des EnR dans les consommations énergétiques en 2020

L'intégration des ENR thermiques dans le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire devrait répondre à une partie de l'objectif de 20 Mtep d'énergie renouvelable dans la consommation d'énergie totale annuelle de la France en 2020. Cet objectif incluant les autres secteurs consommateurs d'énergie (industrie, transports, tertiaire, etc.) est en cohérence avec le paquet Climat-Energie de l'Union européenne, prévoyant pour la France 23% d'énergie renouvelable par rapport à la consommation totale d'énergie finale.

**Tableau 50. Taux de réduction des consommations de chauffage et d'ECS hors EnR (stock d'avant 2005, situation 2020) en énergie primaire**

Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
	2005	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Consommations Chauffage + ECS (TWhef)	534	388	357	370	370	307	307	307
Dont Bois énergie (TWhef)	88	159	157	102	102	46	46	46
Consommations Chauffage + ECS hors bois (TWhef)	446	229	200	268	268	261	261	261
2020 par rapport à 2005 (*) (en énergie primaire hors ENR)		-48%	-55%	-40%	-40%	-42%	-42%	-42%

**Tableau 51. Taux de réduction des consommations de chauffage et d'ECS (stock d'avant 2005, situation 2020) en énergie finale**

Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
	2005	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Consommations Chauffage + ECS (TWhef)	445	336	283	317	317	213	213	213
2020 par rapport à 2005 (*) (en énergie finale)		-24%	-36%	-29%	-29%	-52%	-52%	-52%

Le Comité opérationnel « Energies renouvelables » prévoit que ce niveau nécessiterait 9 Millions de logements équipés de chauffage individuel bois et un doublement des logements raccordés aux réseaux de chaleur alimentés à hauteur de 94% en ENR et incinération des ordures ménagères. Le nombre de logements utilisant le chauffage au bois est supérieur dans les deux scénarios bois, mais bien inférieur à cet objectif dans les deux autres scénarios. **T52**

## Les problèmes posés par l'ensemble des scénarios : l'importance de la réhabilitation

### La réhabilitation en coûts, main d'œuvre comprise

Le marché de l'amélioration et de la réhabilitation du logement est estimé à 40 milliards d'Euros en 2007, dont 5 milliards d'Euros pour les logements sociaux. L'ensemble des travaux touche annuellement 9 millions de logements, dont 50% pour la réhabilitation, l'amélioration énergétique occupant une place encore faible, estimée à 30% du marché total, soit 13 milliards d'Euros. A ce niveau, seuls 2,5 millions de logements apparaissent concernés, mais avec des gestes souvent limités, qui appellent des compléments dans 70% des cas<sup>40</sup>. Par exemple, sur les 580.000 toitures refaites par an, seulement un tiers reçoit une isolation thermique, alors que

le surcoût estimé entre une toiture non isolée et une toiture bien isolée ne serait que de 20%. Sur les 800.000 équipements de chauffage rénovés, la plus grande partie est renouvelée à l'identique. Pour les 26 ou 27 millions de logements du parc total, cela représente un taux de renouvellement assez modéré, mais qui apparaît représentatif de la durée de vie des ouvrages concernés : environ 15 ans pour les ouvertures, 31 ans pour les toitures (ce qui est faible, mais il n'est pas certains que les travaux s'appliquent à la totalité du logement), 23 ans pour les équipements de chauffage. **T53**

Une première estimation a été effectuée sur les coûts de réhabilitation du bâti dans notre scénario (cf. ANNEXE 5). En appliquant les MtD (meilleures technologies disponibles) selon la méthodologie établie plus haut<sup>41</sup>, le coût total de réhabilitation du bâti s'établirait dans une fourchette de 345 à 656 milliards d'Euros (HT), soit de 8,6 à 16,4 milliards d'Euros annuels, si l'effort de réhabilitation est réparti en 40 ans.

Ce montant comprend les gestes classiques de rénovation à l'identique : par exemple le coût de ravalement classique d'une façade est augmenté du coût de l'isolation thermique par l'extérieur. Les dépenses affectées aux ouvertures représenteraient annuellement de 3.100 à 5.000 millions d'Euros, ce qui est inférieur à l'estimation des travaux par l'observatoire OPEN, à 5.880 millions d'euros. Pour les toitures, l'estimation des dé-

**Tableau 52. Part d'EnR thermiques dans les consommations finales (Chauffage + ECS – production élec.) et logements équipés en chauffage au bois (situation 2020)**

Scénario	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
Part EnR (%)	52%	64%	36%	42%
Nb de logements au bois (en millions)	11,3	11,3	5,6	1,8

*EnR prises en compte : bois, solaire thermique, part des PAC gaz et électriques prise à l'environnement*

**Tableau 53. Marché de travaux ayant un impact énergétique, hors intérieur (1)**

	Marché des travaux	Ouvertures	Chauffage	Toiture/combles
Logements concernés (*) (en milliers)	1 720	1 394	863	580 (dont 163 ITE)
Dépenses engagées HT (en millions d'Euros)	11 140	5 880	3 920	- (1 340)
Taux de renouvellement sur le parc RP (°)		0,064	0,043	0,032
DV (durée de vie en années)		15,7	23,2	31

(\*) Un logement peut faire l'objet de plusieurs gestes

(°) Le parc est estimé à 26 millions de résidences principales en 2006, pour un taux de croissance annuel du parc de 1%. Si DV est la durée de vie d'une partie d'ouvrage, et N le nombre de logements concernés par le geste correspondant, pour un parc donné (STOCK), on peut calculer le taux de renouvellement par  $1/DV = N/STOCK + 1/100$ .

(1) Données logements et dépenses : d'après OPEN, novembre 2008

penses varie de 1.775 à 2.950 millions d'Euros, le surcoût dû à l'isolation étant de l'ordre de 20%, selon l'OPEN.

Enfin en supposant que tout le parc de construction antérieure à 2000 est concerné, le coût moyen par logement se situe entre 12.700 et 24.200 €HT, avant rénovation des équipements énergétiques et de ventilation. **T54 F78 F79**

En 2006, les dépenses totales consacrées au logement (construction neuve comprise) ont atteint 415,9 milliards d'euros, dont 128,7 milliards d'euros en dépenses d'investissement<sup>42</sup>, pour un parc total proche de 30 millions de logements, en incluant les résidences secondaires et les logements vacants sur la France entière (DOM inclus). La dépense en capital est de l'ordre de 116 milliards d'euros pour le parc métropolitain (27 millions de résidences principales, soit 90% du total).

Dans notre scénario de réhabilitation, l'effort moyen annuel à appliquer à ce parc, compris entre 8 et 16 milliards d'euros, est déjà en partie contenu dans les investissements actuels, dans le compte des gros travaux d'entretien et d'amé-

lioration (40,4 milliards d'euros). L'augmentation des dépenses de ce compte sur le parc existant serait alors de 15 à 35%. L'incidence sur les filières de la construction, qui apparaît mesurée en montant de travaux, ne peut être estimée qu'à la condition de préciser le degré de spécialisation et surtout de coordination des travaux envisagés, comme la Fondation Bâtiment Energie l'a souligné dans ses appels à projets, en suscitant l'émergence du métier d'améliorateur<sup>43</sup>. A ces montants, il conviendrait d'ajouter la part revenant à la rénovation des équipements énergétiques, non estimée dans le cadre de l'étude.

### L'échelle et le rythme des travaux de réhabilitation

Les conditions de réhabilitation du parc doivent être accordées au statut d'occupation et de propriété des logements. Trois catégories principales dominent le parc :

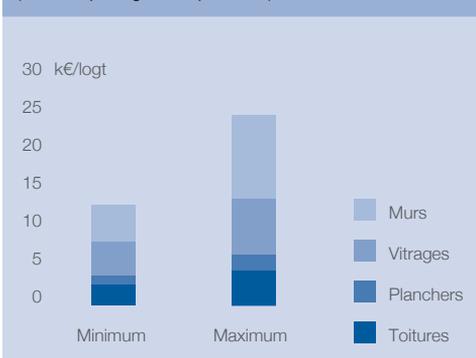
- les maisons individuelles, qui représentent 57% du parc total de résidences principales en 2006, majoritairement hors parc social qui compte

**Tableau 54. Estimation des coûts de réhabilitation cumulés (2005-2050) selon le composant d'enveloppe**

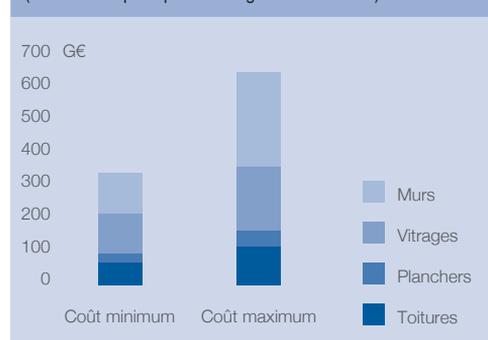
	Toitures	Planchers	Fenêtres	Murs	Total
Coût mini (G€ HT)	71	23	124	127	345
En %	21	7	36	37	100
Coût maxi (G€ HT)	118	47	200	291	656
En %	18	7	30	44	100
Nombre de logements (en M) (*)	27,145	21,877	27,145	27,145	
En %	100	81	100	100	

(\*) Dans cette estimation, le nombre de logements à réhabiliter comprend les vacants, qui rentrent dans le stock au cours de l'exercice de réhabilitation 2005-2050. Au sein d'un immeuble collectif, ces logements sont par ailleurs inclus dans les gestes de réhabilitation à l'échelle de l'immeuble (ravalement thermique, menuiseries, systèmes de ventilation, etc.).

**Figure 78. Estimation des coûts de réhabilitation moyens (en € HT par logement, prix 2005)**



**Figure 79. Estimation des coûts de réhabilitation du bâti (en G€ HT prix 2005) pour l'ensemble du parc (Résidences principales et logements vacants).**



pour seulement 3,4% des maisons, et occupées à plus de 80% par leur propriétaire ;

- les logements en parc locatif public social, sous forme d'immeubles collectifs essentiellement, qui représentent 13% du parc total ;
- les logements dans des immeubles en copropriété, qui comptent pour 29% du total (11% de propriétaires occupants et 18% en location environ). **T55**

Dans tous les cas, il convient de privilégier :

- des interventions à une échelle la plus large possible, de l'îlot puis de l'immeuble, avant d'appliquer les gestes de réhabilitation au logement ;
- un programme de travaux mis en œuvre en une fois, sous forme de rénovations lourdes.

L'échelle de l'intervention est importante pour assurer la cohérence urbaine, architecturale et technique des améliorations souhaitées. De nombreuses parties d'édifice peuvent être en limite de propriété (pignons, façades sur cour, etc.), ce qui nécessite de définir des modalités particulières d'intervention, entre propriétaires ou vis-à-vis du domaine public. Les règles d'alignement pourraient être ajustées par exemple pour faciliter l'utilisation de l'isolation par l'extérieur.

Une mutualisation des moyens de production et de distribution de chaleur peut également être adoptée lors de telles opérations (exemple de mini réseaux de chaleur), ainsi que la pose de systèmes solaires collectifs, là où les expositions sont les plus favorables. L'échelle urbaine permet également d'améliorer la qualité environnementale de l'ensemble de l'îlot. Face à la question de la précarité énergétique qui concernerait un ménage sur cinq<sup>44</sup>, notamment dans les immeubles insalubres, les opérations de type PIG (programme d'intérêt général) ou d'OPAH (opération programmée d'amélioration de l'habitat) en renouvellement urbain doivent être lancées en

priorité. Le récent programme national de requalification des quartiers anciens dégradés (PNR-QAD) visant les centres-villes en déclin pourrait également intégrer des objectifs ambitieux de réhabilitation énergétique aux intentions affichées de requalification des bâtis les plus dégradés, de réalisation de logements sociaux et d'aménagement des équipements et espaces publics.

Les interventions à l'échelle d'un appartement dans un immeuble collectif doivent être réduites aux gestes qui s'avèrent impossibles à l'échelle de l'immeuble. Par exemple, l'isolation thermique par l'intérieur pourrait être écartée tant que l'isolation extérieure est possible, en raison :

- de la quasi impossibilité, au moyen de cette technique, de traiter les ponts thermiques (liaisons plancher / façade, mur de refend / façade, etc.) ;
- de la nécessité de garantir une inertie thermique utile au confort d'été, surtout en absence de planchers lourds ;
- de la perte de surface habitable consécutive aux épaisseurs souhaitées en rénovation forte (10 à 15 cm).

Il serait envisageable d'écarter totalement ce type d'isolation des bouquets de travaux, tant que les matériaux à changement de phase et super isolants ne sont pas disponibles, au moins pour répondre aux deux derniers critères évoqués.

Face au montant élevé des investissements nécessités par la rénovation lourde, pour un particulier, une copropriété ou une collectivité, il peut être justifié d'échelonner les travaux dans le temps sous forme de rénovations partielles successives. Il est alors préférable que celles-ci ne soient pas de nature intrusive, sauf si les logements concernés sont inoccupés. Les gestes concernent essentiellement l'isolation de la toiture, l'isolation des façades par l'extérieur et le remplacement des menuiseries

**Tableau 55. Parc de résidences principales selon le statut d'occupation**

Logement (en milliers) Statut d'occupation	Maison	Appartement	Ensemble
Propriétaire	12 027	2 867	14 894
Locataire d'un logement vide non HLM	1 710	4 154	5 864
Locataire d'un logement vide HLM (*)	502	3 315	3 817
Locataire d'un logement loué meublé	61	415	476
Logé gratuitement	363	367	730
Ensemble	14 663	11 118	25 781

Source : INSEE, RP2006, France métropolitaine

(\*) Secteur social et logements des collectivités locales et des établissements publics

associé à un système de ventilation mécanique contrôlée afin d'éviter les désordres (condensations intérieures notamment). Il est toujours préférable d'améliorer les performances thermiques de l'enveloppe au maximum avant de rénover les équipements de production de chaleur, pour bénéficier de la réduction des puissances installées, donc du coût d'investissement.

### **Les travaux en copropriétés**

Le nombre d'appartements situés dans des immeubles en copropriété peut être estimé pour l'année 2005 à 5,3 millions en résidences principales, pour 450.000 immeubles environ. La capacité moyenne des immeubles est inférieure à 12 logements.

La programmation des travaux dans les immeubles en copropriété peut être intégrée à un écoplan d'amélioration de l'efficacité énergétique, sur le principe proposé en 2008 par le Comité opérationnel « Rénovation des bâtiments existants » du Grenelle de l'environnement<sup>45</sup>. Un audit énergétique serait établi pour la copropriété, pouvant se traduire par un DPE, diagnostic de performance énergétique, obligatoire à ce niveau, et précisant la performance énergétique de l'immeuble, son comportement thermique, son mode technique et économique. A la suite de l'audit, il est souhaitable que les travaux à entreprendre pour les parties et les équipements communs ainsi que pour les parties privatives soient programmés dans leur ensemble, et a minima au rythme des interventions périodiques, telles que le ravalement des façades, le changement des menuiseries extérieures ou la rénovation de la couverture, qui nécessitent l'ouverture d'un chantier lourd (échafaudage, dépose et repose de matériaux, etc.). Ces gestes d'entretien du bâti devraient être assortis obligatoirement d'amélioration thermique de l'enveloppe, sous forme de « ravalement thermique »<sup>46</sup>, lorsque les caractéristiques architecturales et constructives le permettent.

La programmation des travaux et leur financement interviennent dans un contexte très différent de celui du logement social public. Les occupants des logements en copropriété se répartissent de façon à peu près égale entre propriétaires et locataires<sup>47</sup>. Les locataires sont plus jeunes (42 ans en moyenne contre 55 ans) et ont des revenus inférieurs en moyenne de plus de 30% à ceux des propriétaires, mais pour une taille de ménage plus petite.

Il convient de distinguer les situations, notamment pour les 350.000 logements situés dans des copropriétés en difficulté, qui devraient bénéficier d'aides prioritaires, ainsi que pour les situations « fragiles » et à surveiller qui sont estimées à 600 000. Pour les copropriétés plus solides, il serait possible de maintenir les obligations de travaux, et de retenir deux propositions<sup>48</sup> :

- constitution par les copropriétaires d'un fonds à partir de provisions ou d'une épargne attachée au lot ;
- financement par l'emprunt contracté par la copropriété ou par les copropriétaires.

### **Les conditions d'une réhabilitation massive du parc de logements**

Compte tenu de la diversité des situations (typologie d'immeubles, matériaux, configurations urbaines), il est difficile d'entrevoir une industrialisation forte de la réhabilitation, la plupart des travaux s'effectuant sur mesure. Des assemblages de solutions préfabriquées sont cependant envisageables, comme les blocs fenêtres avec volets, les équipements de ventilation (notamment la VMC double flux), ainsi que toutes les solutions d'assemblage entre les parties d'ouvrages, pour assurer la continuité des solutions d'isolation entre elles.

Deux types de programmes peuvent être lancés en parallèle :

- Un programme de rénovation lourde des bâtiments les plus énergivores, par bouquets de travaux ambitieux ; les conditions seraient d'ordre technique et architectural (possibilité d'isolation par l'extérieur par exemple) et financières (capacité d'investissement forte par immeuble) ;
- Un programme de rénovation échelonnée, par parties d'ouvrage les plus déperditives (toitures, façades, menuiseries et étanchéité), en ne retenant dans un premier temps que les façades pouvant être isolées par l'extérieur.

Dans le premier cas, la priorité pourrait être donnée au parc social, ce qui permettrait le lancement et la consolidation de la filière d'acteurs, avant généralisation au parc en propriété privée ou en copropriété, sous forme de gestes et d'investissements plus échelonnés dans le temps, selon le deuxième type de programme.

Pour toute catégorie de logements, un programme ambitieux de réhabilitation nécessite la mise en place de mécanismes financiers appropriés, par exemple gérés par les banques avec appui et contrôle de l'Etat, ou sous la forme de tiers investisseurs.

## Les scénarios bois : la question de la disponibilité de la ressource

### *L'estimation du gisement disponible en métropole*

Les scénarios bois présentent un maximum de consommation annuelle de plus de 190 TWh vers 2030 pour les deux postes du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire. Compte tenu de la consommation actuelle, de 88 TWh environ, il conviendrait de disposer d'environ 100 TWh supplémentaires en 2030, soit un doublement des prélèvements actuels en France métropolitaine.

Par ailleurs, deux autres questions sont soulevées par les niveaux de consommations de bois énergie :

- Leur répartition entre les différentes régions, qui peut créer des déficits locaux importants et nécessiter des transferts de matériaux, donc des consommations d'énergie de transport conséquentes et enfin des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- Leur répartition dans le temps, un pic de consommation entraînant une mobilisation temporaire de ressources, ce qui ne correspond pas à l'optimum d'une filière (pérennité des emplois et rentabilité des investissements).

Le secteur domestique, avec 7,8 Mtep annuelles, soit environ 90 TWh, consomme la plus grande partie des ressources de bois-énergie en France, utilisées à hauteur de 9,2 millions de tep en 2004. Le potentiel de développement s'appuie sur un gisement constitué de quatre classes :

- les coproduits non triturables de l'industrie du bois (écorces, sciures...),
- certains produits bois en fin de vie (palettes, cagettes...),
- les bois issus de l'entretien des haies, bocages et espaces boisés,
- les résidus de l'exploitation et de l'entretien de la forêt, de loin le plus important.

L'étude ADEME / IFN - SOLAGRO « Evaluation du potentiel bois-énergie » de 2004 a estimé le gisement forestier mobilisable, sur la base des conditions 2003-2004 :

- une forêt qui occupait 15,4 millions d'hectares en 2003, soit un volume sur pied de 2,1 milliards de m<sup>3</sup> de bois ;
- des prélèvements de bois (bois d'œuvre, bois de trituration, bois-énergie) qui s'élevaient à 61 millions de m<sup>3</sup> par an, inférieur à l'accroissement biologique naturel net de ces espaces, de 88,3 millions de m<sup>3</sup> par an ;

L'équivalent énergétique des résidus de récolte des bois d'œuvre ou des bois de trituration (branchages, petits bois) était estimé sur l'ensemble du territoire à 7,3 millions de tep par an. Dans l'hypothèse d'une augmentation des prélèvements de bois d'œuvre et d'industrie (à 100% de l'accroissement biologique annuel), l'étude estimait que le gisement énergétique destiné au parc de logements s'élèverait à 12,2 millions de tep, soit 140 TWh PCI sur la base des conditions 2004, dont 80% est mobilisable à un prix inférieur à 26 €/MWh (bois entrée chaufferie).

Pour une forêt qui ne cesse de s'accroître en surface et en volume au taux de 0,4% par an<sup>49</sup>, l'accroissement biologique serait ainsi de 98 millions de m<sup>3</sup> en 2030, pour un gisement énergétique s'élevant à 13,5 Mtep soit 157 TWh en 2030. Il conviendrait de compléter cette ressource énergétique, soit en exploitant plus précisément les surfaces d'extension à des fins énergétiques, soit en améliorant la valorisation énergétique des autres gisements (entretien des haies, bocages, parcs et jardins publics et privés), pour un total de 20 à 25 TWh, soit 2 Mtep en 2030. Cette mise à disposition de la ressource en priorité au bénéfice du parc résidentiel suppose cependant que les autres secteurs d'activité (papier, meuble, etc.) n'augmentent leurs besoins en bois qu'en relèvent de ce secteur, soit après 2030, ce qui n'est pas assuré. En conclusion, la croissance des consommations de bois trouverait avantage à être répartie sur une période plus longue (de 30 ou 40 ans) afin de permettre à la filière de s'organiser, face à une ressource qui aurait également le temps de doubler en volume, ce qui semble exclus dans l'intervalle de 20 ou 25 ans résultant de notre scénario de rénovation.

### *L'adéquation entre consommations et ressources régionales : le bois et la géothermie profonde ou moyenne*

L'inventaire des ressources forestières établi par le CEMAGREF en 2007<sup>50</sup> pour l'ensemble du territoire métropolitain, indique qu'il existe des déséquilibres importants entre les régions, par exemple avec un déficit de 1 TWh en Basse-Normandie, contre un excédent de 4,7 TWh en Rhône-Alpes.

Les régions qui ne semblent pas disposer de ressources complémentaires importantes sont la Basse-Normandie et la Haute-Normandie, le Nord-Pas de Calais et la Picardie, l'Île-de-France, les Pays de la Loire et la région Provence-Alpes-

Côte d'Azur. Les possibilités d'échanges de la ressource entre régions voisines pourraient être exploitées, à condition de développer des filières de conditionnement adapté : le granulé semble pouvoir plus facilement faire l'objet d'une manutention sur de longues distances, ce qui diminue l'importance des limites régionales. Il conviendrait dans ce cas de prendre en compte les impacts du transport, mais dans des conventions communes à l'ensemble des scénarios (seules les émissions de CO<sub>2</sub> directes étant prises en compte à ce stade).

Il est également envisageable de recourir à la géothermie, puisque le mode de distribution de la chaleur emprunte les mêmes voies, les réseaux de chaleur couplés essentiellement avec des installations de chauffage central collectif.

Le potentiel de la géothermie profonde, estimé à 0,75 Mtep en 2020<sup>51</sup> soit 9 TWh environ - hors système de pompes à chaleur - apparaît toutefois bien inférieur à celui du bois. En incluant cette ressource, le potentiel de chaleur renouvelable hors solaire thermique et PAC, mobilisable pour le secteur résidentiel serait de 12 Mtep en 2020, soit environ 140 TWh, ce qui serait insuffisant pour répondre aux besoins des deux scénarios bois (Bois/Gaz/Elec et Bois/Elec/Gaz) en 2020, de près de 160 TWh. **T56**

Mais le gisement de géothermie profonde et moyenne est important dans bon nombre de régions qui sont déficitaires en bois :

- la Haute-Normandie
- l'Île-de-France
- la Picardie,
- et partiellement le Nord-Pas-de-Calais et la région PACA. **F80**

En raison des déficits régionaux qui apparaissent dès 2010-2020, il peut être opportun dans les régions concernées, de reconsidérer le rythme de conversion des installations de chauffage au bois énergie. Il serait opportun de conditionner cette conversion énergétique à un niveau minimum de réhabilitation énergétique du bâti, dans une démarche de bouquets de travaux bien ciblés.

Le gaz naturel pourrait être maintenu dans l'intervalle, ce qui permettrait de reporter les investissements nécessaires à la conversion au bois. En outre, la chaudière gaz installée peut à terme jouer le rôle d'appoint à la chaudière biomasse, ce qui évite un investissement pénalisant le passage futur à la biomasse.

### Les réseaux de chaleur

Si un grand nombre de mesures analysées concerne spécifiquement le bâtiment, d'autres pistes d'action relèvent d'une approche plus large liée à l'aménagement urbain et en particulier au développement de réseaux de chaleur.

Nous avons fait l'hypothèse d'une transition progressive des réseaux existants vers la biomasse ou un équivalent (OM + bois). Même en tenant compte de l'appoint nécessaire de 20% de gaz naturel pour la gestion des pointes et la production d'eau chaude sanitaire hors saison de chauffage, cette reconversion biomasse + OM avec appoint gaz, permettrait de réduire fortement le contenu en CO<sub>2</sub> des réseaux de chaleur actuellement de 200 gCO<sub>2</sub>/kWh pour les 354 réseaux de chaleur de l'arrêté du 4 mai 2009<sup>52</sup>, qui consomment une part importante de gaz et de fioul.

Pour les réseaux ou mini-réseaux qui seraient créés, notamment pour assurer la conversion

**Tableau 56. Potentiel de chaleur renouvelable (biomasse + géothermie) estimé à 2020**

	Potentiel Résidentiel-Tertiaire 2020 (ktep) (a)	Potentiel résidentiel 2020 (ktep) (a)
Bois individuel	7 400	7 400
Biomasse (bâtiments + réseaux de chaleur)	2 000	1 500
Part chaleur de la Cogénération (biomasse)	2 400	1 800
Géothermie profonde	500	375
Géothermie intermédiaire	250	187,5
Part EnR des UIOM (+) et du bois DIB (*)	900	675
Total	13 450	11 937,5

(a) Source : Rapport du Comité opérationnel n° 10, 2008.

(a) La part de chaleur disponible destinée au résidentiel est ici estimée aux ¾ du potentiel avancé pour le secteur total (résidentiel et tertiaire), sauf pour le bois individuel (100% résidentiel).

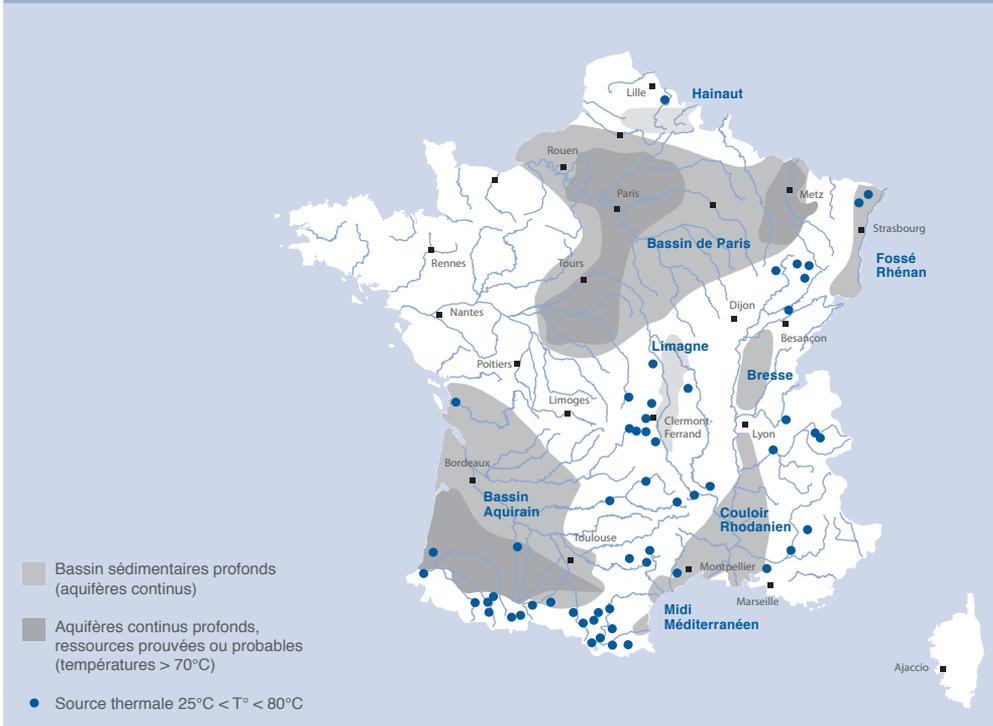
(+) UIOM : Unité d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM)

(\*) DIB : déchets industriels banals

Figure 80.

Gisement géothermique français moyen et profond

(source : La géothermie en France, Syndicat des énergies renouvelables, mars 2009)



« post-carbone » des chauffages collectifs des immeubles, une première analyse de la présence des réseaux dans les communes de zones urbaines montre un effet de seuil au-delà de 30% de part de logements en CCC parmi les immeubles collectifs : les deux tiers des communes disposent alors d'au moins un réseau de chaleur. En attente d'une approche modélisée, la règle suivante peut être adoptée :

- 20% < (CCC/Total IC) < 40% : 50% des CCC sont réhabilités en CU
- 40% < (CCC/Total IC) : 75% des CCC sont réhabilités en CU

Pour les réseaux de chaleur, l'ADEME Pays de Loire fonde les conditions d'éligibilité aux aides régionales pour un réseau de chaleur bois sur plusieurs critères :

- une valeur seuil de la densité thermique du réseau de chaleur supérieure à 1000 kWh par mètre linéaire de réseau ;
- pour les bâtiments existants, une consommation unitaire inférieure à 250 kWhép/ m<sup>2</sup>/ an ;
- un temps de retour sur investissement avant subvention inférieur à 25 ans ;

- un temps de fonctionnement à plein régime supérieur à 1200 h par an.

Une étude de quantification du gisement de création ou d'extension de réseaux de chaleur a été conduite par GDF SUEZ. Elle a permis d'évaluer le gisement exploitable de chaleur renouvelable distribuée par réseau à 12 TWh/an en 2020, dont 9 sont dus à l'extension et à la construction de nouveaux réseaux EnR et 3 à la substitution de moyens de production fossiles sur les réseaux existants.

Ce résultat est basé sur une hypothèse de sélection économique, en ne retenant que les installations dont le surcoût par rapport au chauffage collectif au gaz est inférieur à 20 €/MWh de chaleur livrée<sup>53</sup>. Descendre sous ce niveau de surcoût implique d'opter uniquement pour des réseaux de chaleur de forte densité énergétique (plus de 2,5 GWh de chaleur livrée par km et par an). En considérant des logements collectifs de 70 m<sup>2</sup> consommant environ 100 kWh/m<sup>2</sup> SHAB /an pour le chauffage et l'ECS, il faut raccorder au moins 500 de ces logements si la densité de la zone urbaine est supérieure à 700 logements par kilomètre de réseau

ou 1000 logements si cette densité n'est que de 500 logements/km réseau. Toutes les zones moins denses ont été systématiquement exclues du gisement économiquement exploitable. Malgré cette sélection stricte, le rythme actuel d'équipement et de renouvellement des moyens de chauffage serait insuffisant dans l'intervalle 2008-2020 pour que la demande supplémentaire en chaleur renouvelable livrée par réseau atteigne le niveau de 12 TWh/an en 2020. Il conviendrait d'appliquer une politique plus volontariste. **F81**

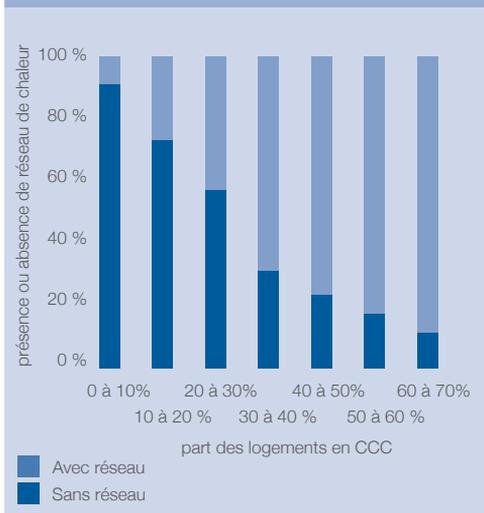
## Les contenus CO<sub>2</sub> des énergies dans les différents scénarios

### Le cas particulier de l'électricité

Le contenu en CO<sub>2</sub> de chaque kWh électrique consommé n'est pas simple à déterminer. Cette difficulté provient de deux spécificités. En premier lieu, l'électricité se stockant difficilement, la production doit en permanence être ajustée à la demande. Les usages provoquant de fortes variations des consommations (journalières et surtout saisonnières) sont donc particulièrement responsables de la mise en œuvre de moyens de production fonctionnant un nombre d'heures limité dans l'année, essentiellement à partir d'énergies fossiles donc à contenu carbone important. Par ailleurs, la forte part de nucléaire et d'hydraulique dans le parc de production électrique français permet d'afficher, pour les consommations de base, des émissions de gaz à effet de serre relativement faibles, mais cela rend également d'autant plus sensible la différenciation des facteurs d'émission entre les usages de base et les usages électriques contribuant à la pointe ou provoquant une saisonnalité de la demande.

Le sujet du contenu carbone des différents usages de l'électricité est en France un sujet controversé. Plusieurs méthodologies ont été proposées dont l'usage est plus ou moins adapté en fonction des problèmes traités. Nous avons choisi dans cette étude d'utiliser celle de la note ADEME / EDF parue en 2005. Nous indiquons cependant par la suite comment ces résultats sont susceptibles d'être modifiés quand on utilise des méthodes de contenu marginal plutôt que des contenus moyens de CO<sub>2</sub> du kWh différenciés en fonction des usages, en prenant en compte la modification de la demande d'électricité qu'entraînent les différents scénarios. Afin de comparer les émissions en 2050 pour les quatre scénarios, nous devons alors supposer que la variabilité due aux aléas climatiques, à la disponibilité des modes de production et à l'équilibre de gestion dans l'appel

**Figure 81.** Proportion statistique de présence de réseau dans les communes de zones urbaines en fonction de la part de logements en chauffage central collectif (CCC)  
(Source : Énergies Demain)



des différents modes de production, est nulle quels que soient le scénario et la période considérés. Nos résultats sont ainsi établis sur les trois conventions suivantes des contenus CO<sub>2</sub> de l'électricité produite ou consommée :

- 180 gCO<sub>2</sub>/kWh pour le chauffage et la valorisation de la production par cogénération ;
- 40 gCO<sub>2</sub>/kWh pour l'usage d'eau chaude sanitaire ;
- 70 gCO<sub>2</sub>/kWh pour la valorisation de la production photovoltaïque.

En toute rigueur, comme le rappelle la note de cadrage de 2005, les indicateurs proposés devraient être *a minima* réactualisés tous les quatre ans. Pour des périodes d'action dépassant 10 ou 15 ans, ce qui est le cas de cette étude, il faudrait employer une méthode tenant compte des évolutions futures dans la structure de production et des changements de profils de consommation. Pour cela, il conviendrait de connaître les quantités totales consommées, la courbe de charge totale française, les moyens de production d'électricité nationaux et ceux produisant l'électricité importée<sup>54</sup>, et leur durée d'utilisation sur la période étudiée. Lorsque l'étude porte sur un secteur ou quelques usages, comme c'est le cas ici, cet exercice demanderait de connaître les courbes de charge des autres secteurs, afin de bien identifier les modes de production appelés pour les usages saisonnalisés étudiés. Une telle étude demanderait à être effectuée pour répondre à la fragilité de nos hypothèses.

## La question du cycle de vie

Les contenus carbone des énergies utilisées pour l'étude (bois, gaz, électricité) ne prennent pas en compte les émissions dues au cycle de vie complet, mais uniquement les émissions directes en CO<sub>2</sub>. Deux élargissements du périmètre d'analyse sont donc possibles, en remontant dans l'analyse du cycle de vie, et en intégrant l'ensemble des gaz à effet de serre.

Pour le gaz naturel, le GPL et le fioul, la prise en compte de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement en énergie (exploration-production, transport international, transformation le cas échéant, transport et distribution nationale) conduirait à augmenter les valeurs. Par exemple, les valeurs couramment retenues sont de 234 g eq CO<sub>2</sub>/kWh pour le gaz naturel (soit 205 gCO<sub>2</sub>/kWh d'émissions directes et 29 g eq CO<sub>2</sub>/kWh d'émissions en amont). Les émissions de CO<sub>2</sub> de la production électrique augmenteraient en fonction des quantités de combustibles fossiles utilisées dans le mix de production et des rendements électriques des centrales.

Les contenus carbone disponibles dans la littérature prennent en compte les principaux gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, CH<sub>4</sub>, HFC...) ramenés à un équivalent CO<sub>2</sub> en prenant un PRG (potentiel de réchauffement global) à 100 ans. Ainsi, le méthane est comptabilisé avec un PRG de 21. La prise en compte d'un PRG à un temps plus court modifierait à la hausse l'ensemble des émissions ACV des énergies, en particulier celle du gaz.

Les ordres de grandeur des émissions totales en ACV (analyse du cycle de vie) et en équivalent CO<sub>2</sub> modifient particulièrement les contenus en équivalent CO<sub>2</sub> des filières énergétiques qui ne sont pas directement consommatrices d'énergie fossile, le nucléaire et le bois.

Pour le nucléaire, plusieurs sources sont disponibles :

- en France, le contenu du kWh nucléaire en sortie de centrale passerait de 0 à 4 g eq CO<sub>2</sub>/kWh<sup>55</sup>, auxquels il faut ajouter 8% à 15% de pertes sur le réseau de transport et de distribution, soit 5 g eq CO<sub>2</sub>/kWh.
- Pour des contextes plus variés, le contenu serait de 28 g eq CO<sub>2</sub>/kWh, selon le site du Sandia National Laboratories, de 9 à 70 g eq CO<sub>2</sub>/kWh pour les centrales nucléaires neuves, selon une étude de l'Université de Stanford<sup>56</sup>, ou de 2 à 77 g eq CO<sub>2</sub>/kWh selon la *Sustainable Development Commission* du Royaume Uni<sup>57</sup>.

Pour le bois, la mise à disposition du combustible (préparation et transport) ainsi que la contribution de l'étape de combustion à l'effet

de serre (émissions de méthane et de protoxyde d'azote) apportent une correction variant de 33 à 42 g eq CO<sub>2</sub>/kWh selon le produit utilisé (bûche, granulé, plaquette)<sup>58</sup>. La correction en CO<sub>2</sub> seul est estimée à 13 g, selon la méthode du DPE (diagnostic de performance énergétique).

Faute d'exercice de prospective spécifique sur l'ACV apportant un cadrage plus précis des émissions totales par usage, un ordre de grandeur de 30 g eq CO<sub>2</sub>/kWh en énergie finale est adopté dans le strict cadre de l'étude, pour les trois énergies principales, bois, gaz et électricité, et pour le poste chauffage.

Les corrections apportées, qui considèrent une stabilité des conventions adoptées dans l'intervalle 2005 - 2050, dépendent, pour la consommation d'électricité, de l'usage (chauffage ou production d'eau chaude sanitaire) et, pour la production décentralisée d'électricité, du type d'équipement (cogénération gaz ou solaire photovoltaïque).

Deux situations de production/consommation électrique sont ainsi distinguées forfaitairement pour le surplus ACV :

- Usage ou production saisonnalisée : correction de + 30 g eq CO<sub>2</sub>/kWh en énergie finale, appliquée au chauffage et à la valorisation de la production électrique par cogénération ;
- Usage ou production non-saisonnalisée : correction de + 10 g eq CO<sub>2</sub>/kWh en énergie finale, appliquée à la production d'eau chaude sanitaire et à la valorisation de la production électrique par équipement photovoltaïque. **E4**

### Encadré 4.

#### Construction des hypothèses.

La construction de ces deux hypothèses repose sur la situation simplifiée suivante :

- Production électrique par la filière gaz selon un rendement de 35%
- Mix électriques selon la nature du kWh :
  - Saisonnelisé : 70% nucléaire + hydraulique et 30% gaz
  - Non saisonnelisé : 90% nucléaire + hydraulique et 10% gaz
- Emissions des différentes filières :
  - Nucléaire et hydraulique : 0 en direct et 5 g eq CO<sub>2</sub> / kWh électrique en ACV
  - Gaz : 205 en direct et 235 g eq CO<sub>2</sub> / kWh gaz en ACV

Ces calculs aboutissent aux résultats suivants :

- Saisonnelisé :
  - 176 g eq CO<sub>2</sub> / kWh électrique en émissions directes
  - 205 g eq CO<sub>2</sub> / kWh électrique en ACV, soit un surplus de 29 g
- Non saisonnelisé :
  - 59 g eq CO<sub>2</sub> / kWh électrique en émissions directes
  - 72 g eq CO<sub>2</sub> / kWh électrique en ACV, soit un surplus de 13 g

*Par souci de simplification, nous retenons alors des surplus ACV de 30 g et 10g respectivement pour les kWh produits (ou consommés) de manière saisonnalisée et non saisonnalisée.*

Dans tous les cas, a été écartée la part des émissions relatives à la fabrication des installations de production et des équipements (PAC, chaudières panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, isolants, etc.). Leur prise en compte ne devrait cependant pas modifier sensiblement les hiérarchies entre les scénarios, dans la mesure où leur poids relatif aux émissions directes est faible quel que soit le scénario. **T57**

Les conventions internes à l'étude, qui se traduisent, pour le gaz et l'électricité, par un surcroît d'émissions de l'ordre de 15 à 20%, permettent d'évaluer l'importance de la correction à apporter aux résultats des quatre scénarios. Le point de départ en 2005, pris comme référence dans l'exercice « facteur 4 », s'élève à 89,1 MtCO<sub>2</sub>. Les émissions totales en 2050 sont ainsi majorées en proportion des consommations énergétiques pour chaque scénario, ce qui ne modifie pas fondamentalement les facteurs de réduction en émissions de CO<sub>2</sub>, le scénario BOIS/ELEC/GAZ étant cependant le plus affecté. **T58**

### Les évolutions possibles des contenus carbone des kWh gaz et électricité

Les hypothèses faites sur les contenus CO<sub>2</sub> des différentes énergies ont une incidence forte sur le facteur de réduction en émissions de CO<sub>2</sub> à 2050 des quatre scénarios étudiés. Les contenus des kWh fossiles sont peu susceptibles d'évoluer, bien que les vecteurs énergétiques gaz et carburants liquides soient susceptibles de véhiculer davantage d'énergies renouvelables non carbonées<sup>60</sup>.

Pour ce qui concerne l'électricité, les valeurs moyennes adoptées ne permettent pas de rendre compte, dans un parc de production électrique donné, des gains d'émissions de CO<sub>2</sub> qui seraient obtenus par une baisse de la consommation électrique de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire en hiver, ni à l'inverse des surcroûts d'émissions dus à une hausse de ces mêmes consommations, qui mobiliseraient plus ou moins les moyens marginaux toujours thermiques sur la période considérée. Par ailleurs, dans le futur, le parc de production peut évoluer, entraînant une

**Tableau 57. Conventions adoptées pour les émissions directes et avec ACV**

Énergie/ Postes de consommation	Émissions directes (gCO <sub>2</sub> /kWh)	Émissions avec ACV (g eq. CO <sub>2</sub> /kWh)
BOIS (chauffage/ECS)	0	30
GAZ (chauffage/ECS)	205	235
ÉLECTRICITÉ (chauffage)	180	210
ÉLECTRICITÉ (ECS)	40	50
Production électrique décentralisée (*)		
Cogénération GAZ	180	210
PV	70	80

(\*) Émissions évitées par la production électrique de la cogénération gaz en compensation d'un kWh électrique « chauffage », et par la production électrique du PV en compensation d'un kWh électrique « moyen », sans prise en compte du cycle de vie des équipements de production décentralisée.

**Tableau 58. Estimation de la correction due à la prise en compte de l'ACV pour les quatre scénarios**

Scénario	B / G / E		B / E / G		G / B / E		E / B / G	
	2005	2050	2050	2050	2050	2050		
Émissions directes (Mt CO <sub>2</sub> )	76,2	19,0	4,6	29,9	6,0			
Facteur de réduction		4,0	16,7	2,5	12,8			
Avec ACV (+) (Mt eq CO <sub>2</sub> )	89,1	25,8	8,9	35,8	7,4			
Facteur de réduction		3,5	10,0	2,5	12,0			

(+) La correction de + 30 g eq. CO<sub>2</sub>/kWh a été systématiquement étendue aux énergies de chauffage et de production d'ECS que sont le charbon, le chauffage urbain, le GPL et le fioul.

modification des contenus unitaires moyens en émissions directes, surtout à l'horizon temporel de l'étude.

Les caractéristiques de chaque scénario définissent le contexte qui pourra être favorable soit à la hausse soit à la baisse des contenus CO<sub>2</sub>. Par exemple, dans nos scénarios, une faible consommation d'électricité associée à une forte production électrique décentralisée d'origine co-génération et/ou PV favorise la baisse des contenus CO<sub>2</sub> électriques. A l'inverse, une forte consommation électrique favorise la hausse, d'autant plus si elle est assortie d'une faible production par co-génération et/ou PV.

L'analyse des quatre scénarios selon ces critères permet de définir une situation plus ou moins favorable à la hausse ou à la baisse des contenus CO<sub>2</sub> de l'électricité en général et du chauffage électrique en particulier. Le contexte du scénario Elec/Bois/Gaz risque de favoriser le plus à la hausse le contenu CO<sub>2</sub>, et à l'inverse, le scénario Gaz/Bois/Elec serait le plus propice à la baisse. **T59**

Du point de vue méthodologique, trois attitudes sont possibles pour une étude prospective aux horizons 2020 et 2050:

- le maintien des contenus définis dans la note ADEME-EDF, démarche retenue dans un premier temps pour comparer les scénarios ; mais cela implique que la structure de production et la courbe de charge de la demande électrique nationale évoluent conjointement en se conformant aux conditions prévalant en 2005, ce qui a peu de chances de se produire pour tout scénario à moyen et long terme ;
- le recours à des contenus marginaux, dans un parc de production supposé identique tout au long de la période considérée, qui devra en conséquence rester limitée ; à la condition que la plage de variation des consommations électriques pour laquelle s'applique la méthode reste marginale, cela permet d'engager la discussion en faisant apparaître un second jeu de valeurs à comparer aux résultats obtenus par l'approche précédente, pour le pic de consommation électrique de 2020 ;

- le constat d'une difficulté à décrire les conditions de production et de consommation électriques à 2050 appropriées à chaque scénario : dans ce cas une étude de sensibilité, objet d'un troisième chiffrage, peut rendre compte de l'effet de différentes hypothèses de contenu CO<sub>2</sub> sans préjuger des causes des évolutions de ces contenus.

### **L'évaluation de l'impact marginal des variations de consommations électriques de chauffage : application en 2020**

Si les volumes d'électricité consommés en 2050 sont toujours inférieurs à ceux de 2005 pour les quatre scénarios, l'impact des pics intermédiaires de consommations électriques de chauffage et d'eau chaude sanitaire doit également être examiné. Le pic dépasse 72 TWh<sub>ef</sub> en 2020 pour le scénario Elec/Bois/Gaz, soit une augmentation de 16 TWh<sub>ef</sub> par rapport au niveau de 2005.

La méthode du contenu marginal permet d'évaluer l'effet d'une mesure d'augmentation ou de réduction des consommations électriques pour un usage qui mobilise des moyens de production très particuliers, tels que le thermique (centrales à gaz et à fioul, éventuellement à charbon) pour le chauffage<sup>61</sup> pour un parc de production électrique qui n'évoluerait pas. S'il est cependant impossible dans le cadre de cette étude de projeter le parc de production à 2050, et dans une moindre mesure à 2020, les méthodes marginales sont utilisées dans notre étude pour fournir un second chiffrage, en attribuant à tout kWh électrique supplémentaire (ou même à tout kWh économisé) un contenu CO<sub>2</sub> représentatif de la moyenne sur la saison de chauffage des derniers moyens de production mis en œuvre pour assurer l'équilibre offre/demande. Dans ce cas, les contenus CO<sub>2</sub> du chauffage électrique supplémentaire peuvent être évalués à 500 g CO<sub>2</sub>/kWh. Les émissions d'un scénario sont alors celles obtenues selon la méthode de référence ADEME-EDF, plus ou moins les émissions du kWh moyen marginal mobilisé ou économisé entre les deux situations de 2005 et 2020, ainsi comptabilisées. **T60**

**Tableau 59. Effets sur les contenus CO<sub>2</sub> du kWh électrique selon les scénarios**

	B / G / E	B / E / G	G / B / E	E / B / G
Consommations d'électricité	faibles	moyennes	faibles	fortes
Production d'électricité décentralisée	moyennes	très faibles	fortes	faibles
Effet sur le contenu CO <sub>2</sub> du kWh élec.	en baisse	stable	en baisse	en hausse

**Tableau 60. Situation en 2005 et en 2020 pour les quatre scénarios en énergie finale (chauffage + ECS)**

Chauffage + ECS (TWh/ef)	2005	BGE 2020	BEG 2020	GBE 2020	EBG2020
Bois	88	190	188	114	47
Charbon	3	0,7	0,7	0,7	0,7
Chauffage urbain	16	11	11	11	11
Électricité	56	36	53	36	72
Fioul	102	15	15	15	21
Gaz	168	130	52	183	73
GPL	11	2	2	2	2
Production cogé + PV		-2	-0,5	-5	-0,7
Total	445	382	323	353	227

Pour le scénario BOIS/ELEC/GAZ qui tend à stabiliser les consommations électriques à des fins de chauffage et de production d'ECS, une réduction de consommation d'électricité de l'ordre de 2,8 TWh pourrait ainsi se traduire par un gain en émissions de CO<sub>2</sub> de 1,4 MtCO<sub>2</sub> ; à l'inverse, le scénario ELEC/BOIS/GAZ, qui connaît une augmentation de consommation d'électricité de 16 TWh entre 2005 et 2020, serait affecté par un surcroît d'émissions de 8 MtCO<sub>2</sub>. Nous observons alors que la prise en compte de ces deux règles de calcul différentes, toutes deux imparfaites, introduit une variation des résultats en termes d'émission de gaz à effet de serre qui ne dépasse pas 10 Mt eq CO<sub>2</sub> à l'horizon 2020 et ne change pas fondamentalement l'ordonnement des scénarios, l'écart entre les scénarios BOIS/GAZ/ELEC et ELEC/BOIS/GAZ n'apparaissant pas significatif dans les deux hypothèses en 2020. **F82**

### Le secteur électrique en 2050

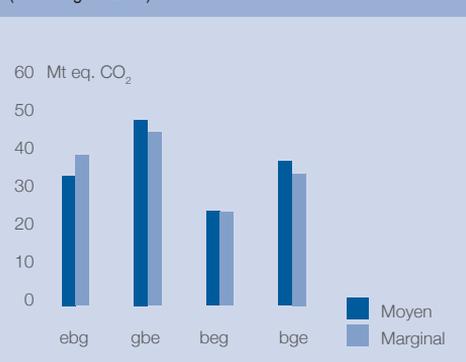
Pour des horizons de projection plus lointains, 2050 par exemple, aucune des deux approches adoptées précédemment – le maintien des conventions 2005 comme la méthode du contenu du kWh marginal – ne semble appropriée car les délais envisagés permettent une restructuration profonde de la demande et du parc de production électrique. Face à une structure demande/parc encore indéterminée, nous ne sommes pas en mesure de définir les contenus CO<sub>2</sub> des kWh électriques selon les scénarios, cependant tous les scénarios ne nous autorisent pas à considérer les différentes valeurs de facteurs d'émission comme également probables.

En 2050, le parc de production électrique aura été renouvelé en quasi-totalité, l'essentiel du parc actuel devant être remplacé entre 2020 et 2030. A cette date, il faudra également raisonner dans un

cadre européen. Les secteurs de consommation sont de leur côté sujets à des transformations profondes, consécutives à la diminution probable de la demande industrielle du fait de la mondialisation de l'économie, à une demande accrue des technologies de communication avec un appel assez régulier sur la courbe de charge et surtout à une forte hausse de la demande du secteur des transports. La motorisation électrique des véhicules sur courte distance va probablement multiplier les appels, de nuit principalement, sur le réseau. Pour le secteur du bâtiment, et face aux perspectives de réchauffement climatique, la diffusion massive de la climatisation peut provoquer des pointes de milieu de journée faisant appel à de la génération par combustibles fossiles.

Les évolutions technologiques prévisibles ouvrent également le champ des possibles, avec le développement des « smart grid », permettant un meilleur pilotage de la demande dont celle de chauffage électrique, les progrès dans le stockage de l'électricité et de l'énergie, et enfin le dévelop-

**Figure 82. Comparaison des deux méthodes d'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> en 2020 (Chauffage + ECS)**



pement de la séquestration géologique du carbone qui permettrait d'utiliser des combustibles fossiles dans des installations centralisées sans émission dans l'atmosphère.

Les considérations qui précèdent vont dans le sens d'une large ouverture du débat sur le contenu en carbone du kWh. Elles vont surtout dans le sens d'une politique active de maîtrise des consommations et une valorisation des énergies renouvelables pour réduire autant que faire se peut le contenu en carbone des usages de pointe.

### Étude de l'impact d'une variation du contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique chauffage sur le taux de réduction en émissions de CO<sub>2</sub>

Pour représenter plus largement les états possibles du secteur électrique en 2050, il est convenu de faire varier le contenu CO<sub>2</sub> du kWh moyen de chauffage électrique et du kWh moyen effacé grâce à la cogénération, de 100 g/kWh à 500 g/kWh, sans changer les contenus kWh du gaz (205 gCO<sub>2</sub>/kWh), du bois (0 gCO<sub>2</sub>/kWh), et de la production d'ECS par énergie électrique, maintenue à 40 gCO<sub>2</sub>/kWh. Le contenu du kWh électrique effacé grâce à la production photovoltaïque est considéré stable à 70 gCO<sub>2</sub>.

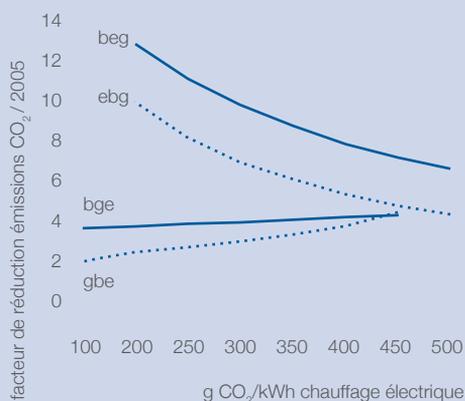
Pour le scénario (BOIS/GAZ/ELEC) qui a faiblement recours tant au gaz (donc sans forte production par cogénération) qu'à l'électricité, le facteur 4 est approché dès le niveau de 100 gCO<sub>2</sub>/kWh électrique, mais sans variation notable dans la plage considérée. En revanche, lorsque la production électrique par cogénération est importante (scénario GAZ/BOIS/ELEC), une hypothèse de fort contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique consommé en chauffage ou produit par l'équipement de chauffage provoque une amélioration du facteur de réduction totale en CO<sub>2</sub> qui atteindrait la cible de 4 pour des contenus CO<sub>2</sub> supérieurs à 400 gCO<sub>2</sub>/kWh. Si une telle hypothèse apparaît peu probable dans le

contexte actuel, il conviendrait cependant de la replacer dans une situation inédite d'un solde (production électrique par cogénération – chauffage électrique) positif. Pour les deux scénarios qui privilégient l'électricité (BOIS/ELEC/GAZ et ELEC/BOIS/GAZ), et pour lesquels l'évolution probable des contenus CO<sub>2</sub> est plutôt à la hausse, les facteurs de réduction demeurent supérieurs à 4 en 2050 même pour des contenus moyens de l'ordre de 500 gCO<sub>2</sub>/kWh. **F83**

Les résultats des quatre scénarios tendent à converger pour des valeurs élevées du contenu moyen du kWh de chauffage électrique, sous réserve du domaine de validité des contenus CO<sub>2</sub> proposés dans les différentes situations énergétiques attachées aux différents scénarios. **T61**

Il conviendrait de mener en complément une étude de sensibilité au contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique dédié à la production d'eau chaude sanitaire. En effet, ce poste représente une part plus importante des consommations électriques en 2050 qu'en 2005, et le mix de production pourrait s'avérer différent en heures creuses.

**Figure 83.** Étude de sensibilité des facteurs de réduction en CO<sub>2</sub> obtenus en 2050 par rapport à la situation 2005, au contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique



**Tableau 61.** Plages de validité des contenus CO<sub>2</sub> et facteurs de réduction des quatre scénarios

Scénario	Plage de validité de lecture du graphe « Étude de sensibilité » (gCO <sub>2</sub> /kWh chauffage élec.)
BGE	Plage gauche
BEG	Plage centrale
GBE	Plage gauche
EBG	Plage droite

## Les ressources complémentaires à explorer : surfaces habitables, morphologies et technologies

### La réduction des surfaces habitables et l'effet de la morphologie

La surface des logements a un impact direct sur les consommations de chauffage, sauf à concevoir une régulation thermique liée à l'occupation de chaque pièce traitée indépendamment. Mais les gains sont difficiles à estimer, en raison du difficile découplage thermique entre les différentes zones d'un même logement, et de la grande variété des temporalités d'occupation des logements. En effet, les rythmes des différents membres d'une même famille tendent à s'individualiser. Quand bien même le taux d'occupation de 100% resterait globalement centré sur la période nocturne (20h-6h), il devient difficile de le considérer proche de 0% durant la période diurne en semaine : au-delà de la grande variété des rythmes scolaires au sein d'une même famille, la majorité des actifs connaissent des périodes d'activité à temps partiel, selon des horaires de plus en plus flexibles, éventuellement d'activité à domicile. Il ne faut pas pour autant négliger la ressource de produire des économies d'énergie par une meilleure maîtrise de la demande, notamment par la mise en place d'une régulation pour la période nocturne.

La réduction de la taille du parc peut parallèlement être envisagée pour réduire la demande totale d'énergie. Dans l'évolution tendancielle des surfaces habitables du parc, la part de maisons individuelles est maintenue à 57%, dans le neuf comme dans le stock, avec une surface moyenne de la maison neuve stabilisée à 120 m<sup>2</sup> SHAB. Le stock ne connaissant pas, par convention, de division des grands appartements, la surface habitable moyenne croît par diminution de la taille des ménages, pour atteindre 45,5 m<sup>2</sup>/pers en 2050.

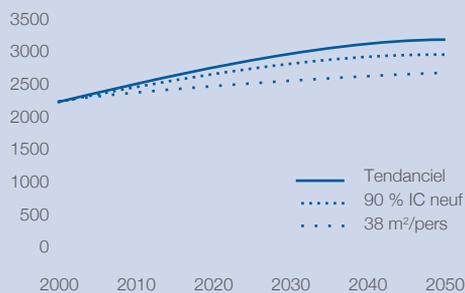
Une variante consiste à envisager une part d'immeubles collectifs plus importante en construction neuve. La surface habitable (SHAB) par personne y étant plus faible (35 m<sup>2</sup> contre plus de 50 m<sup>2</sup> en maison individuelle en 2050), un taux de logements en collectif de 90% pendant la période 2005-2050 – sans intervention particulière sur le stock – permettrait de réduire la surface totale, stock + neuf, de 7% en 2050. Cette réduction de surfaces totales étant atteinte en

grande proportion pour des bâtiments de niveau BBC, le gain en consommations énergétiques sur l'ensemble des postes de la réglementation thermique serait d'environ 7 à 8 Mtep annuelles (80 à 93 TWh/an).

Une seconde variante consiste à stabiliser la surface habitable à la valeur moyenne de la période 2000-2005 (38 m<sup>2</sup>/pers.). La réduction de la surface totale du parc atteindrait alors 16% en 2050, ce qui peut se traduire par une réduction analogue de 16% des consommations énergétiques pour les cinq postes de la réglementation thermique (bien que le poste de l'eau chaude sanitaire soit plus étroitement lié à la taille du ménage), s'appliquant aux quatre scénarios envisagés dans l'étude. Une telle stabilisation des surfaces habitables peut s'envisager, non seulement pour des raisons économiques (coût croissant de la construction neuve en raison des performances environnementales attendues, de l'énergie, coût de la réhabilitation thermique du stock, dans un contexte d'endettement des ménages), mais également pour des raisons sociétales (moindre décohabitation des jeunes, pratiques croissantes de colocations, etc.). **F84**

Il serait envisageable de réduire significativement les surfaces totales, par une mobilité résidentielle favorisée, alors qu'elle est actuellement bloquée, permettant de mieux accorder le type de logement occupé et le cycle de vie des personnes et des ménages. Il n'est pas exclu que les personnes seules, qui occupent un tiers des logements, parfois de grande taille, et en particulier les personnes âgées, souhaiteraient disposer d'une surface plus petite et mieux située, notamment par rapport aux services de proximité, dans une moindre dépendance à la voiture particulière.

**Figure 84.**  
Évolutions des surfaces totales (m<sup>2</sup> SHAB) du parc de RP à 2050 selon trois jeux d'hypothèses.



Il faut cependant relever que la réglementation thermique n'apporte pas d'effet levier dans cette réduction des surfaces, au contraire : le calcul du coefficient réglementaire (Cep en kWhép/m<sup>2</sup>SHON) avantage les grandes surfaces. Les petits volumes doivent compenser le moins bon rapport Surface habitable / Surface d'enveloppe par des prestations constructives (traitement de l'isolation thermique des parois) plus élevées et plus coûteuses, à moins de jouer sur la contiguïté. Celle-ci peut apporter des gains de 30 à 50% sur les besoins de chauffage d'un logement dans une configuration de maison de ville, par rapport à un pavillon en rez-de-chaussée, à prestations équivalentes (isolation des parois, vitrages, type de VMC).

### **Quelques technologies de réduction des consommations énergétiques**

Des gisements d'économies pourraient être exploités dans la production d'eau chaude sanitaire, qui tend à devenir un poste aussi important que le chauffage, à mesure que les performances du bâti s'améliorent, tout au moins dans le neuf. Sur la base des hypothèses retenues dans les scénarios, la réduction des besoins unitaires étant en 2050 de 30% sur les besoins théoriques, la part de l'ECS dans les consommations finales des deux postes du confort thermique est en progression : de 11,5% en 2005, elle s'élève en 2050 à 17 ou 18% dans les deux scénarios « bois », à près de 20% dans le scénario Gaz/Bois/Elec, et à plus de 23% dans le scénario Elec/Bois/Gaz.

Il serait possible de récupérer la chaleur des eaux grises de baignoire et de douche, par des systèmes internes au logement. L'économie complémentaire pourrait être de 20% des consommations ECS avec par un système simple de préchauffage de l'eau de douche par échangeur sur l'eau grise. La récupération de chaleur peut également s'effectuer sur collecteur d'eau usée pour alimenter des réseaux de chaleur à travers une PAC<sup>62</sup>. Cette solution s'adresse aux communes, aux intercommunalités mais également aux copropriétés et aux gestionnaires de grands bâtiments (HLM, maisons de retraite, hôpitaux), de préférence dans le neuf.

# CONCLUSIONS

L'exercice visant à diviser par 4 les émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 dans le parc résidentiel en France métropolitaine repose sur un jeu d'hypothèses dont certaines facilitent l'exercice, tandis qu'un certain nombre de facteurs tendanciels pourraient à l'inverse ralentir la décroissance programmée de ces émissions. Il en est ainsi des évolutions démographiques, de la structure actuelle du parc face à une faible mobilité résidentielle et des possibles effets rebonds dans les comportements. Les modalités d'actions sont par ailleurs plus difficiles à appliquer à une échelle large, et relèvent de l'organisation plus globale de nos sociétés urbaines. Enfin, les filières professionnelles dans leur ensemble doivent s'organiser de manière à répondre aux nombreuses ruptures technologiques autant que procédurales qui s'engagent.

## **La démographie, la structure du parc et la mobilité résidentielle**

Les projections démographiques indiquent nettement un vieillissement de la population : plus d'un quart de la population aura plus de 65 ans en 2050, la part des personnes de plus de 75 ans dans le total doublant par rapport à 2005, à près de 16%. La demande de confort thermique, de chauffage et de climatisation, risque donc de s'accroître, avec un resserrement de la zone de confort dans un intervalle de 22-25°C.

Par ailleurs, les tendances observées plaident pour l'accroissement à un rythme soutenu de l'espace habitable par personne, en raison non seulement du vieillissement de la population, les personnes âgées consommant en moyenne davantage d'espace habitable que les personnes plus jeunes, mais également parce que la proportion de personnes seules est appelée à s'accroître, les personnes seules consommant à âge égal davantage d'espace habitable que les personnes vivant dans un ménage d'au moins deux personnes<sup>63</sup>.

En revanche, il n'est pas assuré que la consommation d'espace habitable poursuive sa croissance sous l'effet de la progression des niveaux de vie, dans un contexte de décrochage entre les possibilités d'emprunt des ménages accédant à la propriété et les prix de l'immobilier. Le secteur de l'immobilier devra de plus prendre en compte les coûts de réhabilitation, pour l'ancien, et des ruptures technologiques engagées par les nouvelles étapes réglementaires dans le neuf. En complément, l'intérêt pour la maison individuelle, plus spacieuse que l'appartement à taille identique de ménage, ne devrait plus s'établir au même rythme, en raison de la stagnation attendue du nombre d'actifs et de ménages avec enfants dans les prochaines décennies.

La mobilité résidentielle demeure faible, avec un taux de rotation annuel moyen de 8,5%, et de 10 à 12% dans le parc social, qui représente 4 millions de logements, dont 35% occupés par une personne seule. Afin de sortir de la sous-occupation mécanique d'un grand nombre de logements, l'adaptation de l'offre – en termes de taille de logements – à la demande des ménages demanderait une programmation à long terme de la transformation de l'habitat ancien et des modalités de la construction neuve en « produit logement » autant qu'en localisation. En particulier, il a été constaté, que le vieillissement des ménages s'accompagne d'un déplacement vers les centres des aires urbaines, des ensembles collectifs et des plus petits logements<sup>64</sup>, ce qui peut favoriser une meilleure adaptation du parc au cycle de vie des personnes et une décroissance des surfaces habitables.

## **La prise en compte des variables comportementales**

Notre scénarisation a écarté l'effet rebond, qui pourrait cependant effacer une part non négligeable, de 20 à 30% – mais son importance décroît avec le revenu – des économies d'énergie permises par la réhabilitation du parc existant. Une réponse consiste pour les ménages à modifier leur comportement

vers une sobriété s'appuyant sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de leur logement, à confort équivalent. Une stagnation, voire une décroissance, des revenus dans un contexte d'augmentation des coûts des énergies fossiles, pourrait limiter l'importance de cet effet de croissance des consommations, à l'intérieur d'un secteur donné (ici, celui du logement), ou entre secteurs (celui des déplacements quotidiens ou de loisirs, par exemple). Des mesures comme la taxation ou la réglementation sont parfois envisagées pour contrarier l'effet rebond, mais leur application demanderait que soient parallèlement proposés des instruments centrés sur les modes de vie, afin d'aider les usagers à s'engager dans une véritable réduction de leur empreinte environnementale. On peut penser à ce sujet à la multiplication des capteurs permettant d'assister les comportements, de type régulation du chauffage global et par pièce, détecteurs de présence, programmation horaire des appareils, apprentissage par les systèmes de régulation des habitudes des habitants. Le développement des smart grids et des compteurs intelligents permettront d'optimiser les apports thermiques en fonction des usagers et de la gestion du réseau.

Dans le collectif résidentiel, la mise en place de contrats de performances énergétiques, fixant des objectifs quantifiés de réduction des consommations énergétiques, avec garantie de résultats, pourraient également contribuer à l'évolution souhaitée.

### **Une somme d'actions coordonnées à une échelle ambitieuse**

La rénovation énergétique dans le parc résidentiel telle qu'elle a été envisagée est censée s'appuyer sur des technologies existantes ou susceptibles de franchir à court et moyen terme les étapes nécessaires à leur large diffusion : isolation par l'extérieur, isolants thermiques minces, équipements de ventilation avec récupérateur de chaleur sur l'air extrait, pompes à chaleur électrique ou gaz dans le neuf ou en substitution aux chaudières existantes, cogénération à gaz ou à bois, mini-réseaux de chaleur valorisant la biomasse, la géothermie et les énergies fatales.

L'impact sur les consommations totales sera d'autant plus important que la mise en œuvre s'effectuera à grande échelle. Il s'agit d'une question à la fois industrielle, de fabrication massive de composants et systèmes, de conception et de mise en œuvre par des corps de métiers formés et coordonnés, et enfin opérationnelle et financière. Les économies d'échelle et de mutualisation (exemple des réseaux de chaleur) appellent le lancement de multiples opérations programmées, au niveau d'un îlot ou d'un quartier. Les besoins de restructuration des filières de la construction, autour d'interventions parfois segmentées mais qui devront être coordonnées dans le temps, ainsi que les leviers financiers à mettre en place, sont encore peu identifiés.

La nécessité d'une prise en compte de l'aménagement urbain est renforcée par les enjeux d'adaptation au changement climatique, et notamment de lutte contre l'effet d'îlot de chaleur. Il sera en effet d'autant plus difficile de produire du confort d'été à faible coût énergétique que l'inertie thermique des logements aura été dégradée par une isolation intérieure, faute de coordination à l'échelle de l'immeuble ou de l'îlot, et sans aménagement concerté des espaces extérieurs, telle que la végétalisation des espaces extérieurs, mais aussi des enveloppes de bâtiments.

### **Au-delà de 2050 : vers la ville post-carbone**

Les hypothèses retenues pour la construction neuve, en rupture vis-à-vis du processus d'étalement urbain, permettent d'entrevoir une contribution du neuf à l'évolution des formes urbaines existantes, dont la mutation sera lente, en raison du faible taux de renouvellement du parc de logements. La ville de 2050 serait déjà construite, en moyenne pour la métropole, à 75% par des constructions antérieures à 2010. Mais cette moyenne cache de nombreuses disparités régionales, en particulier si l'on se réfère aux dynamismes des bassins de vie, qui apparaissent très différenciés<sup>65</sup>.

Une densification permettrait aussi de créer des « îlots de fraîcheur », sur le modèle des villes méditerranéennes classiques, à condition de réduire les émissions de chaleur dues aux consommations énergétiques – ce qui serait le cas pour les bâtiments –, plus concentrées dans les centres urbains et liées pour une bonne part à la circulation automobile. En périphérie, la densification devra préserver les aménités environnementales recherchées par les ménages, tout en limitant le recours aux voitures particulières : les comportements sont appelés à évoluer dans l'ensemble des secteurs de consommation pour éviter l'effet de rebond global.

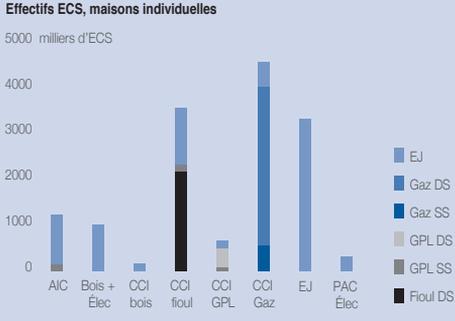
La poursuite de la réduction des émissions de carbone dues au parc de logements pourrait s'appuyer sur une conversion au bois des équipements de chauffage central dans les maisons individuelles en milieu urbain, solution écartée en raison des émissions de particules : cette question devra être résolue dans les décennies à venir. La cogénération bois est appelée à prendre le relai des chaudières, dans les réseaux de chaleur, dans les équipements collectifs puis dans les maisons individuelles et contribuer ainsi à la compensation des consommations énergétiques des logements, sans provoquer d'émissions de carbone supplémentaires. Cette voie permettrait de disposer d'électricité à plus faible contenu carbone, si le développement général du bois s'avérait massif dans l'appareil de production. D'autres choix énergétiques pourraient être possibles, par exemple par injection plus importante de biogaz dans les réseaux de gaz naturel ainsi que par l'intensification de la décarbonisation du mix électrique avec l'essor des EnR, décentralisées ou non. La variété des solutions, illustrée par le choix des quatre scénarios, pourrait être enrichie, afin de garantir une relative liberté de choix énergétiques adaptée à chaque situation : si la neutralité carbone repose avant tout sur les performances énergétiques des formes urbaines, l'effort doit être également réparti entre celles-ci et la décarbonisation des sources d'énergie.

# ANNEXES

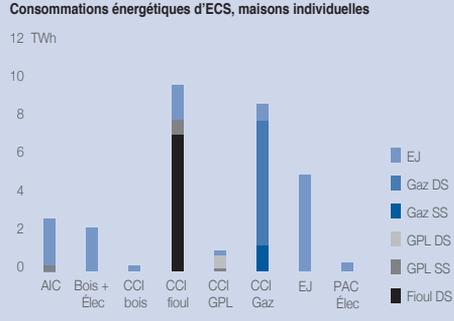
## ANNEXE 1 : LES ÉNERGIES DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE SELON L'ÉNERGIE DE CHAUFFAGE

### Reconstitution des effectifs et des consommations dans le parc existant

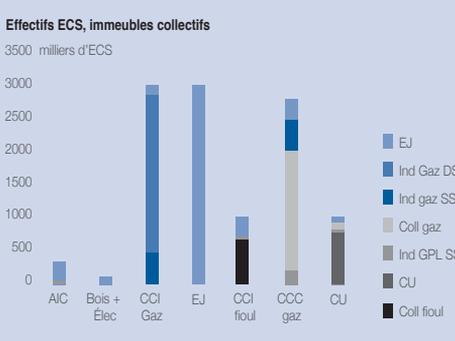
**Figure 85.**  
Reconstitution pour l'année 2005 des effectifs selon les énergies de production d'ECS selon l'énergie de chauffage



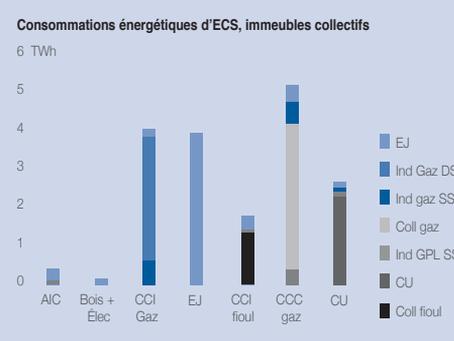
**Figure 86.**  
Reconstitution des consommations énergétiques d'ECS en énergie finale selon l'énergie de chauffage pour l'année 2005



**Figure 87.**  
Reconstitution pour l'année 2005 des effectifs selon les énergies de production d'ECS selon l'énergie de chauffage



**Figure 88.**  
Reconstitution des consommations énergétiques d'ECS en énergie finale selon l'énergie de chauffage pour l'année 2005



Les effectifs et les consommations d'énergie sont reconstitués, selon l'énergie de chauffage pour l'année 2005. 53% des maisons individuelles recourent à l'effet Joule pour la production de l'eau chaude sanitaire, soit 7,7 millions de logements, pour une grande part équipés de chauffage électrique, soit totalement, soit en appont du chauffage bois. Les chaudières dite à double service (chauffage et eau chaude) représentent une part importante de la production de l'eau chaude, soit respectivement 23% du total des logements pour le gaz, 14% pour le fioul et 3% pour le GPL. Le gaz et le GPL en simple service équipent chacun 3 à 4% des effectifs. (F85) Compte tenu des meilleurs rendements des systèmes électriques en comparaison des chaudières gaz ou

fioul, les consommations d'énergie destinées à la production d'ECS dans les maisons individuelles se répartissent comme suit : 41% d'électricité, 23% de fioul ; 21% de gaz. Pour les maisons individuelles, les consommations finales totales ainsi reconstituées s'établissent à 29 TWh en 2005, valeur proche de celle du CEREN (31,5 TWh). (F86)

En immeuble collectif également, la production d'ECS par effet Joule domine (38% des effectifs pour 32% des consommations soit 12 TWh), devant la chaudière individuelle gaz double service (21% des effectifs). La consommation totale des immeubles collectifs s'établirait à 18 TWh, pour une estimation CEREN de 18,4 TWh. (F87-88)

## Choix des solutions de production d'eau chaude sanitaire en fonction de l'équipement de chauffage

**Tableau 62. Solutions de production d'eau chaude sanitaire en fonction de l'équipement de chauffage (logement réhabilité, rendements sans cogénération)**

Solution chauff	ECS	Rdt 2010	Rdt 2020	Rdt 2050
MI CCI PAC	PAC	1,56		2,4
MI EJ ÉLEC	EJ	0,8		0,8
MI CCI GAZ	GAZ DS	0,68		0,68
MI CCI BOIS	BOIS/GAZ/EJ	0,52		0,52
MI AIC Bois +EJ	EJ	0,8		0,8
IC CCI PAC	PAC	-	1,36	2,4
IC CCI ÉLEC	EJ	0,8		0,8
IC CCI GAZ	GAZ DS	0,68		0,68
CCC PAC	PAC	-	1,36	2,4
CCC GAZ	GAZ	0,68		0,68
CCC CHU	CHU	0,56		0,56
CCC BOIS	BOIS/GAZ/EJ	0,56		0,56

(Rendement total Rdt = rendement de génération ECS \* Rendement stockage et distribution)

**Tableau 63. Solutions de production d'eau chaude sanitaire en fonction de l'équipement de chauffage (logement neuf, rendements sans cogénération)**

Solution chauff	ECS	Rdt 2010	Rdt 2050
MI CCI PAC	PAC	1,56	2,4
MI EJ ÉLEC	EJ	0,8	0,8
MI CCI GAZ	GAZ DS	0,68	0,68
MI CCI BOIS	BOIS/GAZ/PAC	0,52 (bois)	
MI AIC Bois +EJ	-		
IC CCI PAC	-		
IC CCI ÉLEC	-		
IC CCI GAZ	-		
CCC PAC	PAC	1,36	2,4
CCC GAZ	GAZ	0,68	0,68
CCC CH. URB	CHU	0,56	0,56
CCC BOIS	BOIS/GAZ/PAC	0,56	0,56

MI : maison individuelle ; IC : logement en immeuble collectif ; CCI : chauffage central individuel ; CCC : chauffage central collectif ; EJ : effet Joule ; CH. URB : chauffage urbain. DS : double service.

Rendement total Rdt = rendement de génération ECS \* Rendement stockage et distribution

**Tableau 62.** Le rendement de stockage et de distribution, pris forfaitairement à 0,8, dépend en réalité du type de stockage de l'eau chaude (installation individuelle ou collective, production instantanée ou non).

Pour les chauffages bois (CCI en maison individuelle ou CCC en immeuble collectif) et quel que soit le scénario, les besoins (en énergie utile) sont supposés assurés à 60% par le bois, à 20% par le gaz, et à 20% par effet Joule, affectés des rendements correspondants à chaque énergie pour l'estimation des consommations énergétiques.

**Tableau 63.** Le rendement de stockage et de distribution, pris forfaitairement à 0,8, dépend en réalité du type de stockage de l'eau chaude (installation individuelle ou collective, production instantanée ou non). Pour les chauffages bois (CCI en maison individuelle ou CCC en immeuble collectif) et quel que soit le scénario, les besoins (en énergie utile) sont supposés assurés à 60% par le bois, à 20% par le gaz, et à 20% par PAC électrique, affectés des rendements correspondants à chaque énergie pour l'estimation des consommations énergétiques.

## ANNEXE 2 : EVOLUTION DES PARTS DE MARCHÉ DES TECHNOLOGIES ET DES RENDEMENTS POUR CHAQUE OFFRE ENERGETIQUE : BOIS, GAZ, ELECTRICITE (2005-2050)

Energie bois

Tableau 64. Rendements de génération (chauffage, production d'ECS) et efficacité de production d'électricité des technologies bois (2005-2050)

Rendement	Chauffage	ECS	Efficacité électrique <sup>(1)</sup>
Chaudière bois CCI (MI neuf et réhabilitation)	0,75	0,7	-
Chaudière Stirling bois CCI (MI neuf et réhabilitation)	0,65	0,6	0,1
Chaudière bois CCC (IC neuf et réhabilitation)	0,75	0,7	-
Chaudière Stirling bois CCC (IC neuf et réhabilitation)	0,6	0,7	0,15

(1) L'efficacité électrique n'est pas un rendement. Elle permet d'estimer la quantité d'électricité produite par rapport à la quantité de bois ou de gaz consommée pour la production de chaleur.

Figure 89.

Evolution des systèmes énergétiques bois, en maison individuelle (CCI) et en immeuble collectif (CC)



Energie gaz naturel

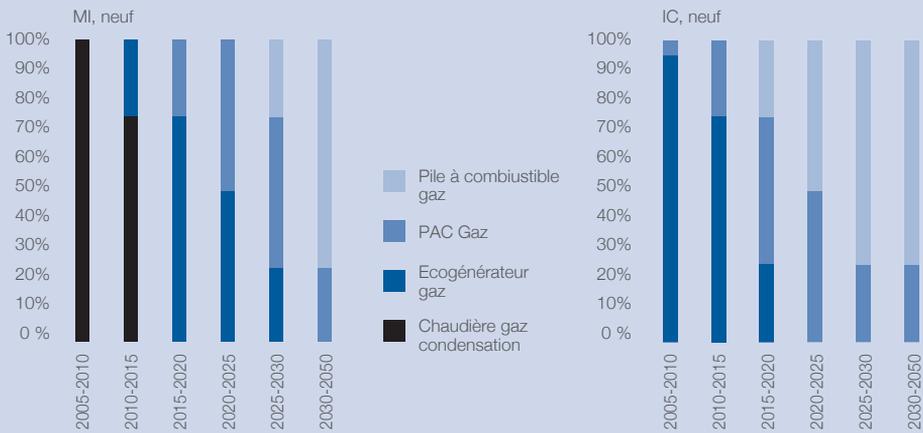
Tableau 65. Rendements de génération (chauffage, production d'ECS) et efficacité de production électrique des technologies gaz (2005-2050)

Rendement en PCI (conversion de *1,11 sur valeurs PCS)	Chauffage	ECS	Efficacité électrique <sup>(1)</sup>
<b>MI CCI (neuf)</b>	0,75	0,7	-
Chaudière gaz condensation	1,05	0,94	-
Chaudière gaz à micro-cogénération (*)	0,89	0,78	0,16
Pompe à chaleur gaz	1,44	1,11	-
Pile à combustible gaz	0,56	0,44	0,50
<b>MI CCI (réhabilitation)</b>			
Chaudière gaz condensation	1	0,94	-
Chaudière gaz à micro-cogénération (*)	0,83	0,78	0,16
Pompe à chaleur gaz	1,44	1,11	-
Pile à combustible gaz	0,50	0,44	0,50
<b>IC CCI (neuf<sup>(2)</sup>)</b>			
Chaudière gaz condensation	1,05	0,94	-
Chaudière gaz à micro-cogénération (*)	0,89	0,78	0,16
Pile à combustible gaz	0,56	0,44	0,50
<b>IC CCI (réhabilitation)</b>			
Chaudière gaz condensation	1	0,94	-
Chaudière gaz à micro-cogénération (*)	0,83	0,78	0,16
Pile à combustible gaz	0,50	0,44	0,50
<b>IC CCC (neuf)</b>			
Chaudière gaz condensation	1,05	1	-

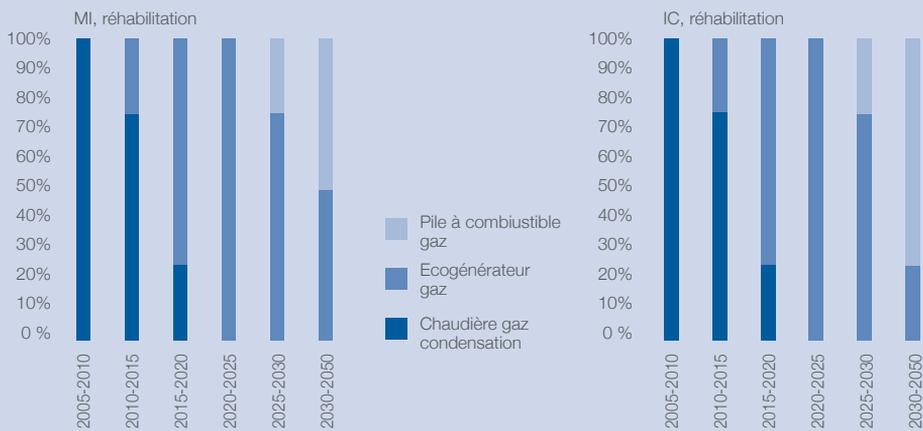
(1) L'efficacité électrique n'est pas un rendement. Elle permet d'estimer la quantité d'électricité produite par rapport à la quantité de bois ou de gaz consommée pour la production de chaleur.

(2) En réalité, nous avons écarté dans les scénarios les solutions CCI gaz en immeuble collectif neuf.

**Figure 90. Pénétration des technologies de gaz naturel dans le neuf en maison individuelle et en immeuble collectif équipé de chauffage central collectif (CCC)**



**Figure 91. Pénétration des technologies de gaz naturel en réhabilitation en maison individuelle et en immeuble collectif équipé de chauffage central individuel (CCI)**



**Figure 92. Pénétration des technologies de gaz naturel en réhabilitation en immeuble collectif équipé de chauffage central collectif (CCC)**

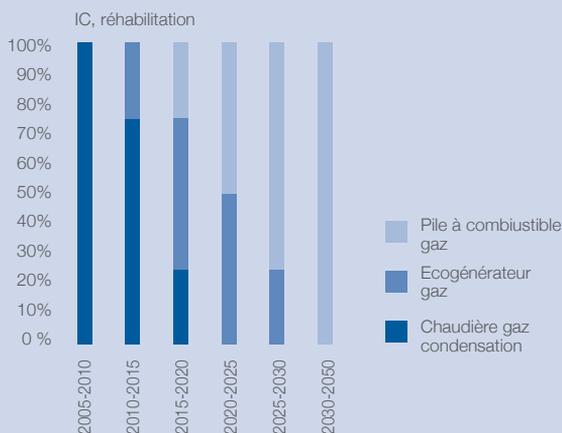
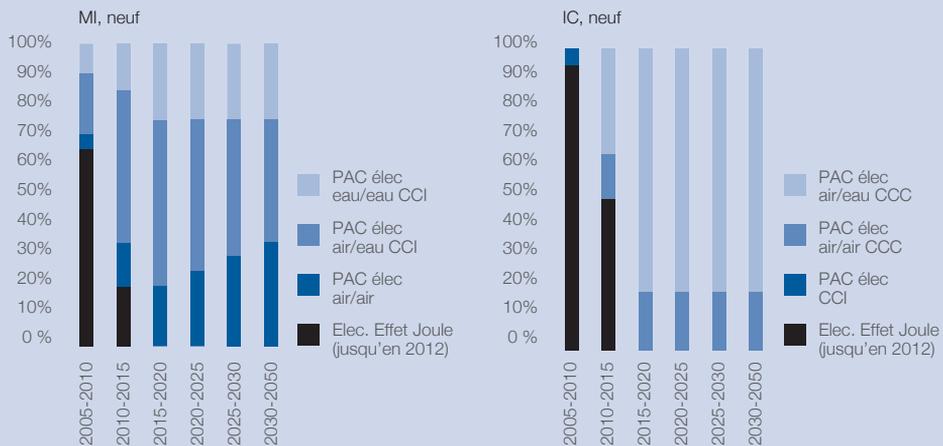


Tableau 66. Rendements de génération (chauffage, production d'ECS) des technologies électriques (2005-2050)

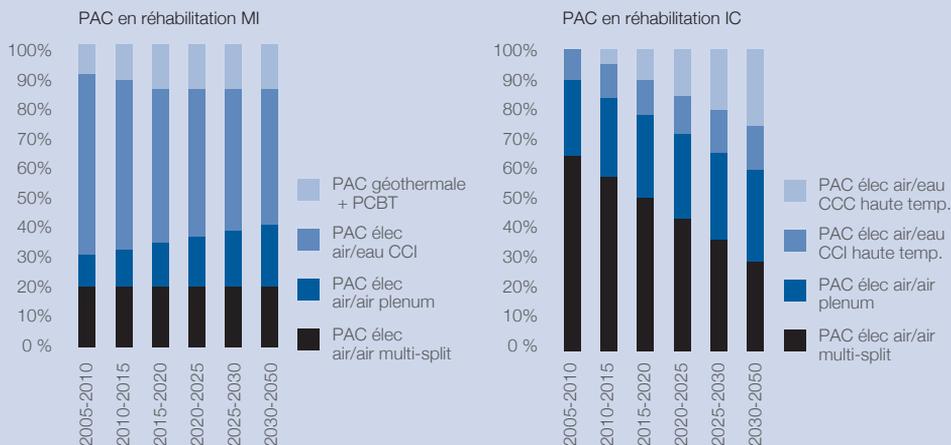
	2005-2010	2010-2015	2015-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2050
<b>MI (neuf) Chauffage</b>						
PAC r/r en MI avec appoint effet Joule compris	2,71	3,37	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/o CCI en MI avec appoint effet Joule compris	3,25	3,69	4,00	4,20	4,35	4,50
PAC géo CCI en MI (pas d'appoint effet Joule)	3,94	4,27	4,50	4,70	4,85	5,00
<b>MI (neuf) ECS</b>						
Solaire + appoint effet Joule MI	2	2	2	2	3	3
PAC dédiée ECS	2	2	2	2	3	3
<b>IC (neuf) Chauffage</b>						
PAC r/r CCC DRV en IC avec appoint effet Joule compris	2,71	3,18	3,50	3,70	3,85	4,00
PAC r/o CCC basse température en IC avec appoint effet Joule compris	/	2,80	3,21	3,60	3,80	4,00
PAC r/R CCI en IC (appoint effet Joule compris)	2,90	3,44	4,00	4,30	4,40	4,50
<b>IC (neuf) ECS</b>						
PAC dédiée	/	3	3	3	3	3
Solaire + appoint effet Joule	2	2	2	2	3	3
<b>MI (réhabilitation) Chauffage</b>						
PAC r/r multi-split	2,86	3,42	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/r plenum	2,86	3,42	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/o CCI haute température	2,86	3,42	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC géothermales sur planchers eau (rénovation lourde)	3,91	4,26	4,50	4,70	4,85	5,00
<b>MI (réhabilitation) ECS</b>						
Solaire + appoint effet Joule	2	2	2	2	3	3
PAC + appoint effet Joule	1,6	1,88	2,16	2,44	2,72	3
<b>IC (réhabilitation) Chauffage</b>						
PAC r/r multi-split	2,71	3,37	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/r plenum	2,71	3,37	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/o CCI haute température	2,80	3,40	4,00	4,30	4,40	4,50
PAC r/o CCC haute température	/	2,35	2,85	3,20	3,40	3,50
<b>IC (réhabilitation) ECS</b>						
Effet Joule (°)	1	1	1	1	1	1
PAC dédiée	/	/	/	3	3	3

(°) Rendement de génération seulement, avec stockage (ballon ECS à accumulation : rendement = 0,7)

**Figure 93.**  
Pénétration des Technologies de pompes à chaleur électrique dans le neuf, en maison individuelle et en immeuble collectif.



**Figure 94.**  
Pénétration des différentes technologies de pompes à chaleur électrique en réhabilitation, en maison individuelle et en immeuble collectif



## ANNEXE 3 : REPARTITION DES ENERGIES DE CHAUFFAGE DANS LE NEUF PAR REGION ET POUR LES DIFFERENTS SCENARIOS

Figure 95 96.

Répartition des énergies de chauffage en maison individuelle neuve selon la région selon les scénarios

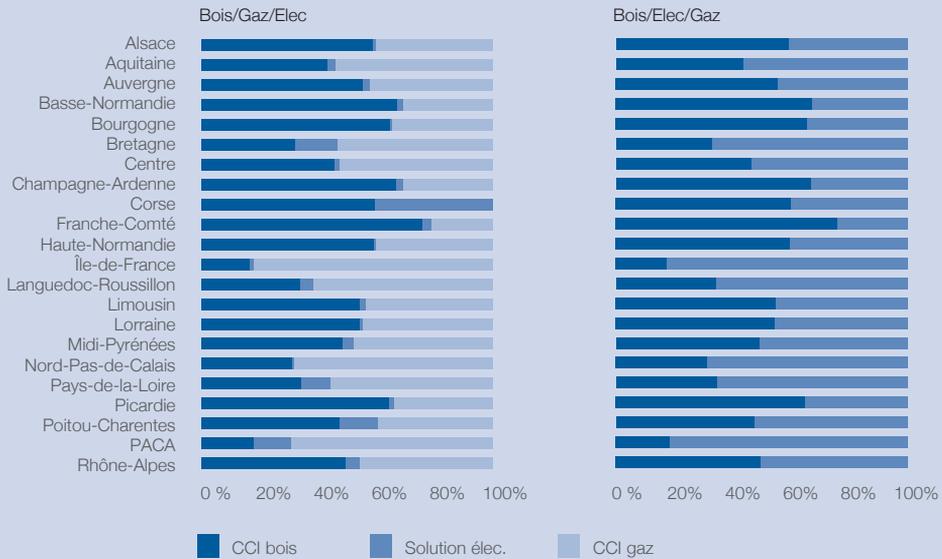
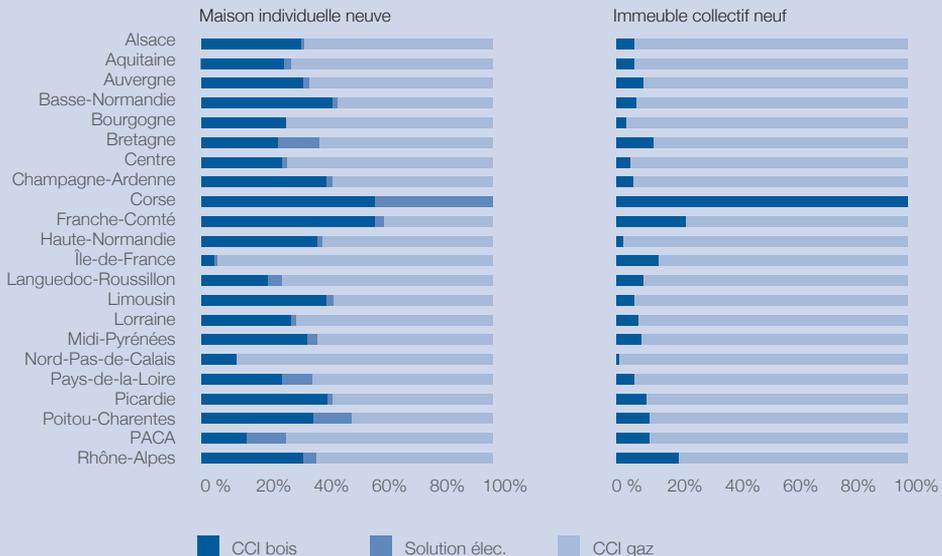


Figure 97 98.

Répartition des énergies de chauffage en maison individuelle neuve et en immeuble collectif neuf (scénario Gaz/Bois/Elec)





## ANNEXE 5 : ESTIMATION DES COUTS DE REHABILITATION DU BATI (logements construits avant 2000)

Réhabilitation des toitures					
Coûts unitaires (en €/m <sup>2</sup> traité)	IC terrasse	IC combles perdus	IC sous rampant	MI combles perdus	MI sous rampant
Coût min	142	12	108	12	108
Coût max	235	35	166	35	166
Surfaces traitées par logement (m <sup>2</sup> )	12 à 13	12 à 13	12 à 13	60 à 72	60 à 72
Nb de logements touchés	IC Terrasse (16% des IC)	IC combles perdus (42% des IC)	IC sous rampant (42% des IC)	MI combles perdus (50% des MI)	MI sous rampant (50% des MI)
avant 1975	1 285 413	3 374 209	3 374 209	4 861 284	4 861 284
de 1975 à 1990	387 759	1 017 867	1 017 867	2 042 961	2 042 961
de 1991 à 2000	190 957	501 262	501 262	843 073	843 073
TOTAL	1 864 129	4 893 338	4 893 338	7 747 318	7 747 318
TOTAL GÉNÉRAL	27 145 440				
Coût min	IC	IC	IC	MI	MI
En €	terrasse	combles perdus	sous rampant	combles perdus	sous rampant
avant 1975	2 346 943 237	520 624 732	4 685 622 589	3 602 249 169	32 420 242 518
de 1975 à 1990	701 729 660	155 665 382	1 400 988 440	1 692 569 089	15 233 121 805
de 1991 à 2000	321 432 497	71 303 688	641 733 189	725 675 266	6 531 077 398
TOTAL	3 370 105 394	747 593 802	6 728 344 219	6 020 493 525	54 184 441 721
TOTAL GÉNÉRAL	71 050 978 660				
Coût max	IC	IC	IC	MI	MI
En €	terrasse	combles perdus	sous rampant	combles perdus	sous rampant
avant 1975	3 884 025 780	1 518 488 802	7 201 975 462	10 506 560 075	49 831 113 500
de 1975 à 1990	1 161 313 169	454 024 032	2 153 371 122	4 936 659 844	23 413 872 403
de 1991 à 2000	531 948 146	207 969 089	986 367 680	2 116 552 860	10 038 507 852
TOTAL	5 577 287 095	2 180 481 923	10 341 714 263	17 559 772 780	83 283 493 756
TOTAL GÉNÉRAL	118 942 749 816				
Coût min / logt	IC	IC	IC	MI	MI
En €/logt	terrasse	combles perdus	sous rampant	combles perdus	sous rampant
avant 1975	1 826	154	1 389	741	6 669
de 1975 à 1990	1 810	153	1 376	828	7 456
de 1991 à 2000	1 683	142	1 280	861	7 747
TOTAL	1 808	153	1 375	777	6 994
TOTAL GÉNÉRAL	2 617				
Coût max / logt	IC	IC	IC	MI	MI
En €/logt	terrasse	combles perdus	sous rampant	combles perdus	sous rampant
avant 1975	3 022	450	2 134	2 161	10 251
de 1975 à 1990	2 995	446	2 116	2 416	11 461
de 1991 à 2000	2 786	415	1 968	2 511	11 907
TOTAL	2 992	446	2 113	2 267	10 750
TOTAL GÉNÉRAL	4 382				

<b>Réhabilitation des planchers</b>		
Coûts unitaires (en €/m <sup>2</sup> traité)	IC	MI
Coût min	29	29
Coût max	58	58
Surfaces traitées par logement (m <sup>2</sup> )	12 à 13	60 à 72
Nb logements touchés	IC (100% des IC)	MI (66% des IC)
avant 1975	8 033 832	6 416 895
de 1975 à 1990	2 423 492	2 696 708
de 1991 à 2000	1 193 481	1 112 856
TOTAL	11 650 804	10 226 460
TOTAL GÉNÉRAL	21 877 264	
Coût min (en €)	IC	MI
avant 1975	2 995 658 181	11 491 174 848
de 1975 à 1990	895 693 668	5 399 295 395
de 1991 à 2000	410 279 155	2 314 904 100
TOTAL	4 301 631 004	19 205 374 343
TOTAL GÉNÉRAL	23 507 005 347	
Coût max (en €)	IC	MI
avant 1975	5 991 316 362	22 982 349 696
de 1975 à 1990	1 791 387 336	10 798 590 790
de 1991 à 2000	820 558 311	4 629 808 200
TOTAL	8 603 262 009	38 410 748 686
TOTAL GÉNÉRAL	47 014 010 695	
Coût min / logt (en €/logt)	IC	MI
avant 1975	373	1 791
de 1975 à 1990	370	2 002
de 1991 à 2000	344	2 080
TOTAL	369	1 878
TOTAL GÉNÉRAL	1 074	
Coût max / logt (en €/logt)	IC	MI
avant 1975	746	3 582
de 1975 à 1990	739	4 004
de 1991 à 2000	688	4 160
TOTAL	738	3 756
TOTAL GÉNÉRAL	2 149	

<b>Réhabilitation des fenêtres</b>		
Coûts unitaires (en €/m <sup>2</sup> traité)	IC	MI
Coût min	418	418
Coût max	670	670
Surfaces traitées par logement (m <sup>2</sup> )	6,5 à 7	13,5 à 15
nb logements touchés	IC (100% des IC)	MI (100% des MI)
avant 1975	8 033 832	9 722 568
de 1975 à 1990	2 423 492	4 085 922
de 1991 à 2000	1 193 481	1 686 146
TOTAL	11 650 804	15 494 636
TOTAL GÉNÉRAL	27 145 440	
Coût min (en €)	IC	MI
avant 1975	23 384 357 645	55 632 984 052
de 1975 à 1990	7 024 943 866	24 919 779 536
de 1991 à 2000	3 330 059 958	10 446 101 526
TOTAL	33 739 361 469	90 998 865 114
TOTAL GÉNÉRAL	124 738 226 583	
Coût max (en €)	IC	MI
avant 1975	37 482 104 359	89 172 486 399
de 1975 à 1990	11 260 077 488	39 943 187 294
de 1991 à 2000	5 337 655 914	16 743 751 250
TOTAL	54 079 837 761	145 859 424 944
TOTAL GÉNÉRAL	199 939 262 705	
	coût min / logement	
	IC	MI
avant 1975	2 911	5 722
de 1975 à 1990	2 899	6 099
de 1991 à 2000	2 790	6 195
TOTAL	2 896	5 873
TOTAL GÉNÉRAL	4 595	
	coût max / logement	
	IC	MI
avant 1975	4 666	9 172
de 1975 à 1990	4 646	9 776
de 1991 à 2000	4 472	9 930
TOTAL	4 642	9 414
TOTAL GÉNÉRAL	7 365	

<b>Réhabilitation des murs</b>				
Coûts unitaires (en €/m <sup>2</sup> traité)	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
coût min	131	84	131	84
coût max	393	131	393	131
Surfaces traitées par logement (m <sup>2</sup> )	20 à 21	20 à 21	62 à 67	62 à 67
nb logements touchés	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
avant 1975	4 820 299	3 213 533	2 722 319	7 000 249
% d'applicat° avant 1975	60%	40%	28%	72%
de 1975 à 1990	1 866 089	557 403	2 410 694	1 675 228
% d'applicat° de 1975 à 1990	77%	23%	59%	41%
de 1991 à 2000	143 218	1 050 263	320 368	1 365 778
% d'applicat° de 1991 à 2000	12%	88%	19%	81%
TOTAL	6 829 606	4 821 199	5 453 381	10 041 255
TOTAL GÉNÉRAL	27 145 440			
Coût min (en €)	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
avant 1975	13 191 461 262	5 639 097 944	22 239 584 929	36 669 849 959
de 1975 à 1990	5 085 689 918	974 080 789	20 990 974 295	9 353 462 993
de 1991 à 2000	375 707 377	1 766 685 071	2 833 635 503	7 746 105 249
TOTAL	18 652 858 557	8 379 863 804	46 064 194 727	53 769 418 201
TOTAL GÉNÉRAL	126 866 335 290			
Coût max (en €)	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
avant 1975	39 574 383 787	8 794 307 508	66 718 754 786	57 187 504 102
de 1975 à 1990	15 257 069 755	1 519 102 183	62 972 922 886	14 586 948 239
de 1991 à 2000	1 127 122 131	2 755 187 432	8 500 906 510	12 080 235 567
TOTAL	55 958 575 672	13 068 597 123	138 192 584 182	83 854 687 909
TOTAL GÉNÉRAL	291 074 444 886			
Coût min / logement (en €/logt)	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
avant 1975	2 737	1 755	8 169	5 238
de 1975 à 1990	2 725	1 748	8 707	5 583
de 1991 à 2000	2 623	1 682	8 845	5 672
TOTAL	2 731	1 738	8 447	5 355
TOTAL GÉNÉRAL	4 674			
Coût max / logement (en €/logt)	IC ITE	IC ITI	MI ITE	MI ITI
avant 1975	8 210	2 737	24 508	8 169
de 1975 à 1990	8 176	2 725	26 122	8 707
de 1991 à 2000	7 870	2 623	26 535	8 845
TOTAL	8 194	2 711	25 341	8 351
TOTAL GÉNÉRAL	10 723			

## Liste des abréviations et acronymes

**BBC** : bâtiment basse consommation (label)

**BEPOS** : bâtiment à énergie positive

**CCI** : chauffage central individuel

**CCC** : chauffage central collectif

**Cep** : coefficient de consommation conventionnelle d'énergie d'un bâtiment pour le chauffage, la ventilation, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux exprimé en kWh/m<sup>2</sup> d'énergie primaire (m<sup>2</sup> de SHON)

**CESI** : chauffe-eau solaire individuel

**CESC** : chauffe eau solaire en installation collective

**CMS** : combustibles minéraux solides

**DHUP** : Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature)

**DPE** : Diagnostic de Performance Energétique

**ECS** : eau chaude sanitaire

**EnR** : énergie renouvelable

**FBE** : fondation bâtiment énergie

**H1, H2, H3** : zones climatiques de la réglementation thermique

**IC** : immeuble collectif

**IR** : isolation répartie

**ITE** : isolation thermique par l'extérieur

**ITI** : isolation thermique par l'extérieur

**MI** : maison individuelle

**MTD** : meilleure technologie disponible

**PAC** : pompe à chaleur

**PCBT** : Plancher chauffant basse température

**RP (parc)** : résidences principales

**RT 2005** : réglementation thermique 2005

**SHAB** : surface habitable.

**SHON** : surface hors œuvre nette d'une construction, obtenue à partir de la surface hors œuvre (somme des surfaces de planchers mesurées au nu extérieur du gros œuvre) après déduction des combles et des sous-sols non aménageables, des toitures-terrasses, des balcons, des loggias, des surfaces non closes situées au rez-de-chaussée, des surfaces de stationnement des véhicules. Pour une habitation individuelle, on peut considérer que la SHON est égale à 1,2 fois la surface habitable.

**SNCU** : Syndicat national du chauffage urbain

**THPE** : très haute performance énergétique (label)

**PV** : photovoltaïque

**Ubât** : coefficient moyen de déperdition par les parois et les baies du bâtiment, exprimé en W/m<sup>2</sup>.K

**UNCMI** : Union nationale des constructeurs de maisons individuelles

**VMC** : ventilation mécanique contrôlée

**VMR** : ventilation mécanique répartie

## Bibliographie

- ADEME**, *Synthèse du bilan environnemental du chauffage domestique au bois*, décembre 2005.
- ADEME-EDF**, *Note de cadrage sur le contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique*, 2005.
- ADEME / IFN - SOLAGRO**, *Évaluation du potentiel bois-énergie*, 2004.
- ANIL**, *Le parc de logements en copropriété en France*, HABITAT ACTUALITE, avril 2004.
- CEMAGREF**, Note de synthèse. *Disponibilités en biomasse forestière pour des usages énergétiques et industriels en France*, C. Ginisty, P. Vallet, S. Chabé-Ferret, C. Levesque, C. Chauvin, octobre 2007 (version actualisée décembre 2007).
- CENTRE D'ANALYSE STRATEGIQUE**, *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, 25 septembre 2007.
- CITEPA**, Inventaire CCNUCC, décembre 2008.
- CLUB DE L'INFORMATION DE L'HABITAT**, « Les résultats 2008 de l'observatoire OPEN », *Le point sur le marché de l'amélioration de l'habitat N°14*, novembre 2008
- COMPTE DU LOGEMENT 2006**, Édition juillet 2008 (site : [www.statistiques.equipement.gouv.fr](http://www.statistiques.equipement.gouv.fr))
- EDF**, *Profil environnemental du kWh EDF*, janvier 2009
- EFFINERGIE**, Guide « Réussir un projet de Bâtiment Basse Consommation », décembre 2008.
- État des lieux et potentiel du biométhane carburant*, Étude ADEME, AFGNV, ATEE Club Biogaz, GDF SUEZ, IFP, MEEDDAT, septembre 2008.
- GDF SUEZ Réseaux de chaleur**. *Marché actuel - Perspectives*, Direction de la Recherche et de l'Innovation, juin 2008.
- GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT** – Comité opérationnel « Rénovation des bâtiments existants », rapport de février 2008.
- GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT** – Comité opérationnel n° 10, *Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale 2008 - 2012 – 2020*, rapport 2008.
- JACOBSON, M. Z.**, “Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security”, *Energy Environ. Sci.*, 2009, 2, pp. 148 – 173.
- JACQUOT (A.)**, *De plus en plus de maisons individuelles*, Insee Première N°885, février 2003.
- JACQUOT (A.)**, *Des ménages toujours plus petits, Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030*, Insee Première N°1106, octobre 2006.
- JACQUOT (A.)**, *La demande potentielle de logements : un chiffrage à l'horizon 2020*, Notes de synthèse du SESP N°165 (48p.), avril-mai-juin 2007.
- LEON (O.), GODEFROY (P.)**, *Projections régionales de population à l'horizon 2030. Fortes croissances au Sud et à l'Ouest*, Insee Première N°1111, décembre 2006.
- MOREL (B.), REDOR (P.)**, *Enquêtes annuelles de recensement 2004 et 2005, La croissance démographique s'étend toujours plus loin des villes*. Insee Première N°1058, janvier 2006.
- ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique)**, *Changement climatique, Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, La Documentation française, 2009.
- PLATEAU (C.), RAKOTOMALALA (J.), ROBERT (A.)**, *Hausse générale de la construction de logements, détente du marché dans les villes moyennes*, SESP en bref N°9, août 2006.
- ROBERT-BOBEE (I.)**, *Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050. La population continue de croître et le vieillissement se poursuit*, Insee Première N° 1089 - Juillet 2006.
- SYNDICAT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES**, *La géothermie en France*, mars 2009.
- TRASNEL (J.P.)**, Cahiers du CLIP, N°13, *Habitat et développement durable, étude rétrospective et prospective*, mai 2001.
- UNCMI**, *La construction de maisons individuelles, Une tenue remarquable, Point de conjoncture, Bilan et perspectives du marché et questions d'actualité*. Conférence de presse du jeudi 23 février 2006.

## Notes

- 1 Sauf mention particulière, l'unité de surface de logement, exprimée en mètre carré, fait référence à la surface habitable.
- 2 Cf. *Habitat et développement durable, étude rétrospective et prospective*, Cahiers du CLIP, N°13, mai 2001.
- 3 Cf. *Habitat et développement durable, les perspectives offertes par les énergies renouvelables*, Cahiers du CLIP, N°16, septembre 2004.
- 4 Cf. *Cogénération et émissions de CO<sub>2</sub>, impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur les émissions de CO<sub>2</sub> en France*, Cahiers du CLIP, N°15, janvier 2004.
- 5 Cf. *Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur*, Cahier du CLIP, N°19, janvier 2007
- 6 Un groupe de travail de l'ONERC a de son côté conclu que la réduction des besoins de chauffage dans le secteur résidentiel-tertiaire, de l'ordre de 3 à 4 Mtep en 2050 pour les scénarios B2 et A2, ferait plus que compenser la consommation supplémentaire de climatisation résidentielle spontanée, évaluée à 0,5 Mtep dans les mêmes conditions. Cf. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, *Changement climatique, Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, La Documentation française, 2009.
- 7 Chiffres France entière, cf. Comptes du logement 2008.
- 8 Par définition, aux recensements, le nombre de ménages et le nombre de résidences principales sont égaux. Les personnes résidant en collectivité sont considérées comme vivant « hors ménages ordinaires » ; c'est le cas notamment des étudiants en résidence universitaire, des personnes résidant en maison de retraite ou en foyers de travailleurs (source : INSEE).
- 9 Sources : *Insee, situation démographique et projections de population 2005-2050* ; I. Robert-Bobée, *Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050. La population continue de croître et le vieillissement se poursuit*, Insee Première N°1089, juillet 2006.
- 10 A. Jacquot, *Des ménages toujours plus petits, Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030*, Insee Première N°1106, octobre 2006.
- 11 La répartition de la population en 5 classes d'âge, ainsi que l'âge moyen, est projeté par région jusqu'en 2030, cf. O. Léon, P. Godefroy, *Projections régionales de population à l'horizon 2030. Fortes croissances au Sud et à l'Ouest*, Insee Première N°1111, décembre 2006.
- 12 Cf. Cahiers du CLIP, N°13, *Habitat et développement durable, étude rétrospective et prospective*, Mai 2001.
- 13 Émissions de dioxyde de carbone seules, les émissions des autres gaz à effet de serre ne sont pas indiquées ici car elles ne sont pas traitées dans l'étude, centrée sur le contenu CO<sub>2</sub> en émission directe.
- 14 Source CITEPA/ inventaire CCNUCC, décembre 2008.
- 15 L'électricité spécifique correspond à l'électricité nécessaire pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'usage de l'énergie électrique. On ne prend pas en compte dans l'électricité spécifique : l'eau chaude, le chauffage et la cuisson qui peuvent utiliser différents types d'énergie.
- 16 Cette question mériterait d'être approfondie, notamment quand la taille du ménage décroît au cours des ans, pour une surface du logement constante.
- 17 Le dimensionnement est opéré l'année *t* sur la base d'une taille de ménage donnée, et pour un logement de surface donnée.
- 18 La réglementation thermique ne concerne que les qualités du bâti et des équipements. En ce qui concerne les comportements, elle se base sur des scénarios conventionnels de présence et d'usage, tout comme les normes de consommation des véhicules automobiles par exemple. Il existe donc un écart entre les performances dites réglementaires et les consommations constatées lors de l'usage du bâtiment, en fonction des points de consigne réels et du comportement des habitants. En particulier, la consigne conventionnelle de chauffage à 19°C, avec une fonction « chauffage réduit » à 16°C, est rarement respectée dans le cas d'un bâtiment, les habitants attendant un confort supérieur : les consommations réelles peuvent donc être sensiblement supérieures à la consommation conventionnelle pour le chauffage.
- 19 Coefficient de référence réglementaire exprimé en énergie primaire, défini par la méthode de calcul accompagnant la RT2005 et comprenant, en complément du chauffage,

- de la production d'eau chaude sanitaire, et de la climatisation pris en compte dans le C<sub>max</sub>, les postes de l'éclairage, de la ventilation, et des auxiliaires.
- 20 La S.H.O.N. (surface hors œuvre nette) d'une construction, est obtenue à partir de la surface hors œuvre (somme des surfaces de planchers mesurées au nu extérieur du gros œuvre) après déduction des combles et des sous-sols non aménageables, des toitures-terrasses, des balcons, des loggias, des surfaces non closes situées au rez-de-chaussée, des surfaces de stationnement des véhicules. Pour une habitation individuelle, on peut considérer que la SHON est égale à environ 1,2 fois la surface habitable.
  - 21 L'énergie primaire permet de prendre en compte les pertes énergétiques lors de la transformation de l'énergie. Elle correspond à l'énergie distribuée au consommateur (dite énergie finale) multipliée par un coefficient qui vaut par convention 2,58 pour l'électricité, 0,6 pour le bois (seulement pour le label BBC) et 1 pour les autres énergies et le bois hors label BBC.
  - 22 Cf. LOI ADOPTÉE PAR L'ASSEMBLÉE NATIONALE ET LE SÉNAT, de programme relatif à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, déposé le 21 octobre 2008.
  - 23 Le coefficient de rigueur climatique est augmenté de 0,1 si l'altitude de la construction est comprise entre 400 et 800 m et de 0,2 si l'altitude de la construction est supérieure à 800 m.
  - 24 Une mission est en cours (CSTB, ADEME et Effinergie) afin de valider les différentes hypothèses du BEPOS et préciser les modalités de prise en compte des énergies locales afin d'éviter les surcompensations qui seraient dommageables à la qualité du bâti.
  - 25 Cf. Rapport Pelletier du 15 février 2008. Les usages semblent se référer au diagnostic de performance énergétique (Chauffage, ECS, climatisation).
  - 26 Le rapport ne précise pas la convention adoptée pour la surface unitaire. Par cohérence avec la réglementation applicable à la construction neuve, on adoptera le m<sup>2</sup> SHON, bien que la situation 2008-2012 soit établie à partir des DPE, utilisant le m<sup>2</sup> de surface habitable (SHAB), éventuellement le m<sup>2</sup> de surface « loi Carrez ».
  - 27 Il s'agit sans doute de la surface habitable, sur les postes du chauffage et de l'eau chaude sanitaire (non précisé dans les textes).
  - 28 On pourra se référer au Guide « Réussir un projet de Bâtiment Basse Consommation » (Effinergie, décembre 2008) qui présente des solutions permettant de répondre aux exigences du label BBC.
  - 29 Les besoins de chauffage conventionnels sont estimés par cumul des déperditions thermique par l'enveloppe et par renouvellement d'air (infiltrations + ventilation naturelle ou mécanique).
  - 30 La réduction des besoins de chauffage à 2050 inclut l'utilisation de l'isolation thermique par l'intérieur lorsque l'ITE est écartée, avec une réduction de la conductance de la paroi équivalente à une isolation classique de 10 cm de polystyrène. Mais il serait préférable d'ajourner ce type de geste jusqu'à l'obtention d'isolants minces à changement de phase (cf. ci-dessous, l'analyse des résultats et les perspectives).
  - 31 La matrice considérée ne compte pas moins de 21 familles architecturales (Pavillon de banlieue, Maison de ville, Barres,...) dans lesquelles sont regroupées les 244 typologies qu'elle comprend.
  - 32 Les valeurs présentées en ANNEXE 2 sont des COP machine, adoptés pour le calcul des consommations de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Il en est de même pour tous les équipements énergétiques retenus dans cette étude, les rendements adoptés étant toujours les plus favorables.
  - 33 En AIC, la solution « Élec » consiste en convecteurs ou radiateurs électriques « effet Joule ». La solution « bois + élec » concerne les logements qui ne peuvent assurer tout leur chauffage avec les poêles à bois et qui utilisent alors un complément à effet Joule dans les pièces non chauffées par le bois.
  - 34 Sur la base des valeurs forfaitaires issues de la réglementation thermique RT 2005, les postes de l'éclairage, de la ventilation et des auxiliaires avoisinent 15 ou 20 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB (soit de 6 à 7,5 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup> SHAB). Pour les 3,2 millions de mètres carrés de surface habitable en 2050, les consommations de ces postes complémentaires de la RT 2005 s'élevaient annuellement à 19 ou 23 TWh<sub>ep</sub>, à additionner aux consommations de chauffage et d'ECS de 50,4 à 226,8 TWh<sub>ep</sub> selon les scénarios. Mais des ruptures technologiques sont aussi susceptibles de réduire sensiblement les niveaux de consommation, par exemple par généralisation de lampes à

- diodes électroluminescentes, de ventilateurs à vitesse variable, de réduction des circuits de chauffage donc d'auxiliaires.
- 35 Le coefficient de conversion en énergie primaire de 2,58 pour l'électricité, que nous employons dans l'étude par référence à la réglementation thermique, est le résultat d'une convention de l'AIE, pour un mix de production incluant une part importante de production thermique au fioul. La méthode de calcul pourrait évoluer en prenant en compte les mix et les rendements réels constatés : par exemple, sur la base des données du Commissariat général au développement durable, la valeur calculée sur le mix moyen français pour 2009 est de 3,15. Cf. *Repères, Chiffres clés de l'énergie*, édition 2009.
- 36 Cf. ADEME-EDF, *Note de cadrage sur le contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique*, 2005. La méthode des contenus saisonnalisés par usage utilisée dans cette note est établie sur la moyenne historique de la période 2000-2004, qui demanderait une mise à jour pour prendre en compte l'évolution des consommations et de la composition du parc électrique français. Le contenu en CO<sub>2</sub> du solde import/export est par ailleurs conventionnellement affecté d'une valeur correspondant à la production en base du parc électrique français. Faute de disposer d'une méthode plus satisfaisante, la sensibilité des résultats au contenu CO<sub>2</sub> du kWh électrique est discutée plus loin.
- 37 L'essentiel de la chaleur prise à l'environnement revient aux pompes à chaleur électriques, car les pompes à chaleur à gaz sont introduites seulement dans le parc neuf à partir de 2010 pour les immeubles collectifs et de 2015 pour les maisons individuelles, mais jamais en totalité du parc desservi au gaz, avec des coefficients de performance de 1,44 pour le chauffage et 1,15 pour l'ECS.
- 38 La part d'EnR thermique contribuant aux postes de chauffage et d'ECS est calculée selon la formulation suivante : (Total Chauffage ECS + Part EnR PAC + Solaire thermique) / (Total Chauffage ECS + Part EnR PAC + Solaire thermique), exprimée en GWh /an, en énergie finale puis en énergie primaire. La part du gaz attribuée à la production électrique par cogénération est prise en compte (donc déduite) des consommations de chauffage et d'ECS.
- 39 Cf. ANNEXE 2 : pour les solutions gaz de 2030 à 2050, la pile à combustible équipierait 75% du parc neuf, 50% du marché de la réhabilitation des maisons individuelles, et 75% (CCI) à 100% (CCC) de celui des immeubles collectifs.
- 40 Cf. Club de l'information de l'Habitat, « Les résultats 2008 de l'observatoire OPEN », *Le point sur le marché de l'amélioration de l'habitat N°14*, novembre 2008.
- 41 Les coûts ont été estimés à partir des tableaux de prix des entreprises et des retours de chantier. Les conditions d'interventions très diverses (accès du chantier, régions, type de logement, etc.) expliquent la variabilité des coûts, du simple au double.
- 42 Cf. DAEI/SESP et DGUHC, *Comptes du logement*, édition 2008.
- 43 L'améliorateur est appelé à proposer au maître d'ouvrage un ensemble cohérent de travaux, en matière d'évolution de la qualité d'usage du logement, intégrant la facilité d'utilisation, la convivialité, le confort et la qualité d'ambiance, tout en permettant une réduction drastique des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> pour un coût global acceptable. Cf. FBE, Appel à projet 2005.
- 44 Cf. Séminaire National EPEE I : *Prévenir la Précarité Energétique : outils, actions et retours d'expérience*, Paris 18 septembre 2009 (programme European Fuel Poverty and Energy Efficiency).
- 45 Cf. Rapport présenté par Philippe Pelletier, février 2008.
- 46 L'obligation de « ravalement thermique » des immeubles existants, dans un délai de 10 ans, est une mesure proposée par la Commission énergie en 2007, Cf. *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Centre d'analyse stratégique, 25 septembre 2007, p.152. L'obligation deviendrait immédiate dans le cas de vente des immeubles « à la découpe ». Ravalement thermique est compris dans le sens extensif de réhabilitation thermique des bâtiments. Les mesures d'accompagnement consistent en la mise en place par les établissements bancaires de produits spécifiques pour le financement des travaux et en la possibilité, pour le propriétaire, de capitaliser des provisions sur charges, éventuellement sous condition de ressources.
- 47 Cf. *Le parc de logements en copropriété en France*, ANIL, HABITAT ACTUALITE, avril 2004.
- 48 Cf. Rapport Pelletier, février 2008.
- 49 Cette tendance s'inverse-t-elle ? L'enquête Teruti de 2008 montre que les sols boisés ont reculé légèrement entre 2006 et 2008, de 0,16% (Agreste, *Chiffres et données, l'Utilisation du territoire en 2008*, n°208).
- 50 CEMAGREF, *Note de synthèse. Disponibilités en biomasse forestière pour des usages énergétiques et industriels en France*,

- C. Ginisty, P. Vallet, S. Chabé-Ferret, C. Levesque, C. Chauvin, octobre 2007 (version actualisée décembre 2007).
- 51 Cf. Grenelle de l'environnement, Comité opérationnel n° 10, *Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale 2008 - 2012 - 2020*, Rapport 2008. Les chiffres produits dans ce rapport incluent les DOM.
- 52 Cf. Document AMORCE, 2009.
- 53 *Réseaux de chaleur. Marché actuel - Perspectives*, GDF Suez, Direction de la Recherche et de l'Innovation, juin 2008.
- 54 Il faudrait dans ce cas prendre en compte les importations et exportations d'électricité et la nature des filières électriques les produisant.
- 55 Source ACV du kWh EDF : <http://service-public.edf.com/accueil-com-fr/edf-service-public/l-environnement/l-impact-environnemental-101012.html>
- 56 Mark Z. Jacobson, "Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security", *Energy Environ. Sci.*, 2009, 2, pp.148 - 173.
- 57 Cf. Stefan Hirschberg, *Life Cycle Analysis of Carbon Dioxide Emissions from Different Energy Sources*, Paul Scherrer Institut, Switzerland, Communication du 7 octobre 2008, Bruxelles. Lorsque la part d'électricité devient importante dans le cycle de vie, les contrastes entre pays peuvent être accentués par la nature du mix énergétique.
- 58 ADEME, *Synthèse du bilan environnemental du chauffage domestique au bois*, décembre 2005.
- 60 Le contenu CO<sub>2</sub> du gaz naturel pourrait cependant baisser par injection de biométhane ou d'hydrogène d'origine non carbonée. Le gisement en biogaz, estimé à 6,5 TWh/an pour 2020 par le Comité opérationnel n°10 du Grenelle en 2008, représenterait 1,2% de la consommation de gaz naturel si celle-ci demeurerait constante à environ 500 TWh/an hors branche énergie. Une étude plus récente estime ce potentiel à 16,2 Mtep soit 188 TWh/an pour 2050 (Cf. *État des lieux et potentiel du biométhane carburant*, Étude ADEME, AFGNV, ATEE Club Biogaz, GDF SUEZ, IFP, MEEDDAT, septembre 2008). Cela entraînerait une baisse de 38% du contenu CO<sub>2</sub> du gaz naturel, toujours dans l'hypothèse d'une consommation totale hors branche énergie de 500 TWh.
- 61 Un raisonnement similaire pourrait être effectué pour la production d'eau chaude sanitaire.
- 62 Exemple : PAC gaz pour le système « Degrés Bleus » de la Lyonnaise des eaux.
- 63 A. Jacquot, « La demande potentielle de logements : un chiffrage à l'horizon 2020 », *Notes de synthèse du SESP*, N°165 (48p.), avril-mai-juin 2007.
- 64 Cf. Driant J.-C. DRIANT J.-C. « La mobilité des personnes âgées dans le marché du logement : une approche dynamique », dans BONVALET C., DROSSO F., BENGUIGUI F. et HYUN M. (ed.) *Viellissement et logement : stratégies résidentielles et patrimoniales*, La Documentation française, 2007, pp. 251-270.
- 65 P. Julien, J. Pournard, *Les bassins de vie, au cœur de la vie des bourgs et petites villes*, INSEE Première, N°953, avril 2004.

## Numéros précédents des Cahiers du CLIP

### 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 CO<sub>2</sub> : Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur les émissions de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> dans le monde
- ▶ Les réductions potentielles d'émissions de CO<sub>2</sub> par des plantations forestières sur des terres agricoles dans le monde à l'horizon 2050

### N°18 - Janvier 2007 - ☒ □

- ▶ Pompes à chaleur et habitat. Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur

### N°19 - Septembre 2009 - ☒ □

- ▶ Eau et biocarburant 2030

☒ Version imprimée disponible - □ Format électronique (Acrobat pdf) disponible sur le site [www.iddri.org](http://www.iddri.org) - ☒ Epuisé

Pour toute demande d'exemplaire ou renseignement, veuillez contacter Pierre Barthélemy (Id드리) : [pierre.barthelemy@iddri.org](mailto:pierre.barthelemy@iddri.org)



