

Les
cahiers
du

C L I P

Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement

Habitat et développement durable

Bilan rétrospectif et prospectif

Le véhicule électrique à l'horizon 2050

*Introduction du véhicule électrique dans le parc français
des véhicules particuliers à l'horizon 2050*

Numéro

13

Avril 2001

CLIP
Club d'Ingénierie
Prospective Energie
et Environnement
1, rue du Cerf
92195 Meudon

Liste des membres

ADEME : Agence
de l'Environnement
et de la Maîtrise
de l'Energie
ARP (Renault)
CEA : Commissariat
à l'Energie Atomique
CIRAD : Centre de
Coopération International en
Recherche Agronomique
CNRS/Programme ECODEV
(Centre National
de la Recherche
Scientifique/Programme
Interdisciplinaire
de Recherche
sur les Technologies
pour l'Ecodéveloppement)
CSTB : Centre Scientifique et
Technique du Bâtiment
EDF : Electricité de France
GDF : Gaz de France
IFP : Institut Français
du Pétrole
INERIS : Institut National de
l'Environnement Industriel
et des Risques
INRETS : Institut National de
la Recherche
sur les Transports
et leur Sécurité
PSA : GIE PSA
Peugeot Citroën
STEG : Société Tunisienne de
l'Electricité et du Gaz

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

Directeur de publication :
Benjamin DESSUS
Rédaction :
Carine BARBIER
Maquette :
Ivan PHARABOD

Habitat et développement durable

Synthèse

Introduction

Consommations de chauffage

L'habitat et l'environnement
Le parc de résidences principales (1968-1998)
La surface du parc (1968-1998)
Consommations d'énergie et émissions
L'impact de la réglementation thermique (1975-2000)
L'amélioration des logements anciens
La revalorisation des quartiers anciens

Analyse projective

Les scénarios de maîtrise de la consommation d'énergie de chauffage
Les projections de la population et des conditions de logement (2000-2050)
L'évolution du parc : estimation des entrées et sorties annuelles
L'impact de la construction neuve : les deux réglementations thermiques
La poursuite de la réhabilitation du parc existant
Les différentes mesures et les émissions de gaz à effet de serre

Morphologies urbaines

Les objectifs et le cadre de l'analyse
La représentativité des trois ensembles urbains
Les techniques constructives et les matériaux
Les besoins énergétiques d'exploitation
Comparaison de tissus urbains
Les performances comparées des trois morphologies

Conclusion

Annexes

Bibliographie

Le véhicule électrique à l'horizon 2050

Synthèse

Introduction

Méthodologie

Principe
Rappel des scénarios établis lors de la dernière étude
Modélisation du parc de véhicules particuliers

Construction des scénarios

Caractéristiques des véhicules étudiés
Émissions de polluants
Scénarios d'évolution des parcs automobiles
Les filières carburants et électriques

Analyses des résultats

Émissions de CO2 et consommation d'énergie
Pollution locale

Conclusion

Annexes

Bibliographie

Glossaire

7

9

11

25

37

59

61

72

75

77

79

80

90

95

97

102

103

Editorial

Le présent numéro des cahiers du CLIP présente les synthèses de deux études prospectives, l'une dans le domaine de l'habitat, l'autre dans le domaine de l'automobile.

La première d'entre elles "Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif" s'est penchée sur le problème, majeur pour la consommation énergétique de la France et ses émissions de gaz à effet de serre, des consommations de chauffage du parc de logement.

Ses résultats montrent à l'évidence que les priorités actuelles d'action de maîtrise de l'énergie et de contrôle des émissions de gaz à effet de serre, principalement axées par les pouvoirs publics sur l'habitat neuf devraient être profondément recentrées vers une action volontariste vis à vis de l'habitat existant où les potentiels d'économie d'énergie resteront pour encore longtemps bien supérieurs à ceux de l'habitat à construire. Cette étude montre aussi l'influence des structures urbaines sur les dépenses d'énergie associées aux logements dont l'importance justifie d'accorder une forte priorité aux stratégies de réhabilitation des centres villes.

La seconde étude "Introduction du véhicule électrique dans le parc français des véhicules particuliers à l'horizon 2050" vient combler la lacune que nous avons constatée dans l'étude "Automobile et développement durable", objet des cahiers du CLIP n° 9.

Elle se fonde sur la méthodologie développée dans l'étude précédente et analyse les conséquences de la pénétration de divers types de véhicules électriques dans le parc automobile français, d'ici 2050. Les scénarios de pénétration des véhicules électriques dans le parc français viennent compléter, sans les remettre en cause, les conclusions de l'étude précédente qui faisait apparaître l'intérêt particulier présenté par la solution véhicule hybride du point de vue des bilans énergétiques et environnement global à long terme. Par contre du point de vue de l'environnement urbain, la solution électrique présente des avantages indéniables à l'horizon 2050.

Benjamin DESSUS
Directeur du programme Ecodev

HABITAT ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Bilan rétrospectif et prospectif

Auteurs

Jean-Pierre TRAISNEL
UMR 7543, "Architecture, urbanisme, sociétés, territoires en mutation"
CNRS LTMU, Institut Français d'Urbanisme
Etude réalisée avec la participation de :
Bruno PEUPORTIER, CENERG, Ecole des mines de Paris
Alain BORNAREL, Edith AKIKI, BE HQE TRIBU, Paris.

Synthèse

Depuis 1975, le secteur du bâtiment est exposé à des réglementations thermiques de plus en plus exigeantes, destinées à maîtriser les consommations d'énergie de chauffage dans la construction neuve. En raison de la forte croissance des autres besoins (climatisation, ventilation, eau chaude sanitaire, électricité spécifique, etc.) dans les domaines résidentiel et tertiaire, les contraintes se sont progressivement étendues : la nouvelle réglementation, "performancielle", impose une limitation de la consommation globale d'énergie d'un bâtiment et intègre des exigences destinées à améliorer le confort d'été.

Cette réglementation, applicable aux bâtiments neufs à partir de juin 2001, devrait tempérer les tensions à la hausse des émissions de CO₂ dans ce secteur, moins vives cependant que dans le secteur des transports. Mais les approches sectorielles, fondées sur l'innovation technologique et le renouvellement des parcs – telle l'amélioration de l'isolation des enveloppes de bâtiments neufs ou du rendement des moteurs des voitures particulières – semblent contrariées par les comportements, notamment en matière de déplacements quotidiens. Leur augmentation rapide résulte de plusieurs facteurs, dont la croissance de l'offre d'infrastructure routière et le développement de la périurbanisation.

Les décisions techniques dans ces deux secteurs sont de surcroît fortement contraintes par la durée de vie des infrastructures : celle des logements peut être évaluée à plusieurs centaines d'années. Le renouvellement du parc de résidences principales s'effectue en conséquence très lentement : la construction neuve, forte de 300.000 logements par an, assure essentiellement la croissance du parc, au taux annuel de 1% environ. La relative stabilisation à 380 TWh par an des consommations d'énergie de chauffage constatée entre 1968 et 1998 a pu être obtenue par la conjonction de plusieurs facteurs :

- la montée en puissance de la réglementation thermique dans le logement neuf, de 1974 à 1989 ;
- l'importance de la rénovation urbaine "lourde", qui s'est traduite par la sortie massive du parc de logements anciens et leur remplacement par des logements neufs ;

- l'amélioration du confort et des qualités thermiques des logements anciens, à la faveur des travaux de réhabilitation.

En 1998, soit au terme de 25 ans d'application de ces mesures, on peut estimer l'impact de la réglementation thermique dans le logement neuf à plus de 160 TWh, tandis qu'une réduction complémentaire de la consommation d'énergie de chauffage de 120 TWh a été obtenue par la réhabilitation des logements anciens.

Le chauffage représentait encore 70% de la consommation d'énergie finale dans le parc résidentiel en 1998. L'évaluation du potentiel de réduction de cette consommation a été réalisée à partir de scénarios d'évolution du parc de résidences principales, comparant différentes mesures d'amélioration de la performance énergétique. La projection opérée à l'horizon 2050 renforce le poids des mesures consacrées au parc existant : l'essentiel de la réduction (70%) proviendrait de la poursuite de la réhabilitation thermique du parc antérieur à 1975. Les 30% restants se répartissent à parts égales entre le renforcement des exigences liées au confort thermique d'hiver, par rapport à l'ancienne réglementation de 1988, et la généralisation progressive à l'ensemble du parc des vitrages dits à isolation renforcée (à faible émissivité).

Le scénario témoin (aucune mesure pour l'existant, entrée par construction neuve sans amélioration des performances depuis 1989) indique que les émissions dues au chauffage se stabiliseraient au niveau de 70 MtCO₂ par an, grâce à la réduction des émissions unitaires des procédés de chauffage (de 190 à 155 gCO₂ par kWh entre 1993 et 2050). En complément, le cumul des mesures envisagées précédemment (réhabilitation, renforcement de la réglementation dans le neuf, généralisation des vitrages à isolation renforcée dans l'existant) permettrait de réduire les émissions annuelles dues au chauffage, par habitant, de 0,32 tC (valeur estimée en 1998) à 0,18 tC en 2050.

La réduction des consommations d'énergie de chauffage de l'ensemble du parc n'apparaît pas liée directement au renforcement des exigences envers la construction neuve, même au taux de

5% tous les cinq ans. Pour que cette consommation totale puisse baisser, il serait nécessaire de généraliser l'innovation technique induite par la réglementation, depuis la construction neuve, vers le parc existant, qui n'est pas contraint par des niveaux réglementaires, mais où se situent des gisements d'économie d'énergie encore élevés. La diffusion de l'offre industrielle de produits plus performants soulève la question de l'accompagnement des différents types d'aide qui ont fait leur preuve dans le passé : incitations fiscales, aides au diagnostic thermique, formation des professionnels et information des particuliers, dans une vision de la rénovation plus soucieuse de la sauvegarde du patrimoine urbain.

La reconstitution des différentes dépenses énergétiques du logement permet de mesurer, en complément de la performance attendue de l'enveloppe, le poids de la morphologie urbaine. Pour trois ensembles urbains situés en région parisienne, sont pris en compte :

- l'investissement énergétique dans la construction et les dépenses de réhabilitation (logement et voirie) ;
- les dépenses de chauffage ;
- les dépenses annexes (eau chaude sanitaire, etc.) ;
- les déplacements quotidiens.

L'échelle qui est adoptée pour la représentativité de l'organisation des espaces publics et privés (bâtiments, parcelles, espaces verts, équipements, voiries et stationnement) est celle du quartier. Trois cas contrastés sont comparés, l'immeuble en centre ancien dense, le grand ensemble de l'urbanisme collectif en première couronne et le pavillonnaire en lotissement périphérique, afin d'évaluer les effets de la croissance urbaine, face aux mesures de revitalisation des centres ville et de la banlieue proche.

Les consommations totales d'énergie varient de 800 MJ/m².an pour un logement neuf parisien à 1300 MJ/m².an pour le pavillonnaire neuf périurbain, et à plus de 2000 MJ/m².an pour un pavillon de construction ancienne. A moins d'agir sur les déplacements, un logement en périphérie ne peut atteindre une performance énergétique similaire à celle du logement en centre ville. Les émissions dues aux déplacements atteignent en périphérie deux à trois fois le niveau des émissions dues au chauffage d'un logement neuf. Les émissions totales de CO₂

dans le neuf varient du simple au double (de 10.000 à 20.000 geC/m².an) entre les deux cas extrêmes, de Paris et de la périphérie.

En résumé, le potentiel de réduction des émissions par habitant n'est pas simplement lié aux innovations technologiques, qu'elles s'appliquent aux structures du logement ou qu'elles concernent les voitures particulières : une personne habitant un logement périurbain neuf (réglementation de 2001) émet encore près de 0,8 TeC par an, soit plus du double d'un parisien habitant un logement réhabilité, à un niveau d'isolation thermique bien moins élevé.

Les structures urbaines de la ville centre sont sans doute les plus performantes – les besoins de climatisation étant écartés de l'analyse –, par leur forte compacité. La requalification des centres anciens des grandes villes et de leur proche banlieue semble réunir un grand nombre d'atouts, qu'il s'agisse du confort thermique d'hiver, de la dépendance à la voiture particulière, ou de l'investissement énergétique dans la construction. Les actions programmées de réhabilitation de l'habitat ancien, qui contribuent à densifier la ville et sa plus proche périphérie, permettraient de ralentir la périurbanisation telle qu'elle s'est produite à partir des années 1980.

Au-delà des oppositions désormais classiques entre la voiture et les transports en commun, entre le logement collectif et la maison individuelle, les comparaisons effectuées font apparaître les niveaux souhaitables de consommation d'énergie et d'émission pour les interventions sur l'habitat. En particulier, une limite s'impose dans la recherche d'une compensation de l'augmentation des impacts liés au transport par un effort supplémentaire dans la construction (par exemple, en améliorant le niveau d'isolation thermique).

L'étude soulève la nécessité d'une évaluation des coûts pour l'usager et la collectivité qui serait intégrée aux critères d'implantation de logements neufs. Une ville peu dense, avec des périphéries très étalées, résultant de l'urbanisation de la campagne autour des villes, est une source importante de surconsommation d'énergie d'origine fossile. Cependant, la ville centre est elle-même exposée aux conséquences de la circulation automobile : l'aggravation de la pollution de l'air, le bruit et l'occupation excessive de l'espace public encouragent, et ce n'est pas le moindre des paradoxes, le mouvement de la population vers la

Introduction

Le secteur résidentiel et tertiaire est

une des cibles prioritaires des mesures que la France doit appliquer dans le Programme national de lutte contre le changement climatique : les dispositifs énergétiques destinés au confort thermique et à l'ensemble des équipements prélèvent 46% de l'énergie finale consommée dans le pays. Compte tenu d'un taux élevé d'équipements électriques, la contribution aux émissions est plus modeste, puisqu'elle représente 25% des 108,5 millions de tonnes de carbone émises en 1998. Tandis que les émissions de ce secteur ont crû de 4% entre 1990 et 1998, les émissions du secteur des transports ont connu une croissance beaucoup plus rapide, de 14% au cours de cette période.

En réponse à une dépendance énergétique devenue préoccupante dès 1973, notamment vis à vis des ressources pétrolières, les politiques publiques se sont principalement attachées à augmenter l'efficacité énergétique secteur par secteur, par des mesures techniques telles que :

- le renforcement de la réglementation thermique dans le logement neuf ;
- la baisse de la consommation des véhicules à puissance donnée.

Le principe est celui du "double dividende", la chasse aux gaspillages se traduisant par une moindre émission de gaz à effet de serre, et une meilleure performance économique.

Malgré les progrès techniques réels accomplis dans la construction automobile, l'approche sectorielle appliquée aux transports est un échec : la consommation énergétique des transports s'est en effet élevée constamment depuis 1973, à un taux de croissance annuel moyen de 2%. La croissance des consommations dans le logement, sans être maîtrisée parfaitement, est sensiblement mieux contrôlée. Le renouvellement du parc de résidences principales sous l'effet de la construction neuve est généralement invoqué comme facteur principal de la maîtrise des consommations, ainsi que le remplacement progressif des appareils de chauffage, qui favorise la pénétration du gaz et de l'électricité.

Les consommations d'énergie cumulées des deux secteurs, qui atteignent 70% du total de l'énergie finale dépensée en France, sont largement tributaires des formes urbaines et des réseaux dans lesquels les progrès techniques s'appliquent. Dans

cette étude, une approche intégrée est amorcée, qui replace les besoins de mobilité dans une politique d'aménagement, notamment au moyen des plans de déplacements urbains, favorisant les transports collectifs en site propre.

La très longue durée de vie des infrastructures est une donnée particulière, qui doit peser dans les choix techniques encouragés au sein des deux secteurs, de l'habitat et des transports. Leur sort apparaît donc lié dans le long terme : la capacité à maîtriser les consommations d'énergie et les émissions liées au logement (confort thermique en particulier) doit intégrer les déplacements quotidiens, dont l'augmentation rapide a été largement encouragée par l'extension urbaine.

Trois dimensions doivent en conséquence guider l'analyse des priorités à accorder aux efforts d'économie d'énergie dans le logement :

- la dimension technique (en particulier dans les matériaux d'enveloppe et les équipements de chauffage) ;
- la dimension spatiale (selon le type de forme urbaine, du centre à la périphérie) ;
- la dimension temporelle (en estimant la durée de vie des infrastructures urbaines, logement, réseaux, services).

Les consommations destinées au chauffage : quelles priorités ?

Le premier objectif de l'étude est d'examiner les différentes priorités qui doivent conduire à une réduction des émissions du secteur habitat-tertiaire telles que le secteur retrouve à l'horizon 2010 le niveau atteint en 1990, niveau qui est désormais dépassé. Parmi les diverses dispositions, figure le renforcement progressif pour les vingt ans à venir de la réglementation thermique applicable à la construction neuve : la part accordée au chauffage des locaux, qui décroît constamment depuis 1973, se maintient encore à 70% de la consommation d'énergie finale du secteur.

Cette priorité s'est déjà imposée pour diverses raisons lors des étapes précédentes de la réglementation : après 1973, la dépendance excessive du secteur à l'égard des ressources fossiles (charbon, pétrole) a mis en évidence la nécessité d'une politique de maîtrise de l'énergie largement fondée sur la construction neuve. Il serait cependant utile de s'interroger sur une telle priorité pour la période

2000-2050. D'autres tendances se dessinent dans l'évolution du parc : la ville historique n'est plus livrée aux démolisseurs, et la réhabilitation surpasse la construction neuve dans l'activité économique du secteur de la construction. Une évaluation comparée de l'impact de la réglementation applicable au neuf et des mesures qui concerneraient le parc existant permettra de rendre compte de l'activité réelle du secteur.

La morphologie urbaine : besoins énergétiques et mobilité

Le deuxième objectif, au travers d'une approche intégrée, est de rendre compte simultanément des usages du logement et des besoins de mobilité quotidiens, induits tous deux par la forme et la densité urbaine : les consommations d'énergie et les émissions seront estimées pour différentes configurations urbaines. L'échelle du bâtiment apparaît trop limitée en ce qu'elle omet les infrastructures indispensables aux différents types d'activité liées au logement : dans un premier temps, l'échelle urbaine pertinente sera limitée à la voirie, aux espaces publics et privés directement axés sur le logement. Il faudrait néanmoins l'élargir pour répondre plus complètement, selon *La théorie générale de l'urbanisation* de CERDA, au double besoin du *mouvement*, dédié à la rencontre, le lien, l'échange, le travail, et d'*établissement*, donnant aux activités un abri et un cadre organisé. C'est aussi à une échelle plus large que les critères techniques et environnementaux interfèrent avec les objectifs sociaux (principe d'équité) présents dans la problématique du développement durable.

Les phases de l'analyse

L'analyse des différentes actions techniques proposées s'effectue par comparaison des consommations d'énergie et des émissions de carbone obtenues selon différentes hypothèses :

- pour la dimension temporelle, à partir d'un scénario de référence considérant le simple jeu de renouvellement et d'extension du parc de logements (entrées par construction neuve dont une partie compense les sorties du parc) ;
 - pour la dimension spatiale, en considérant trois situations urbaines contrastées, dans le même contexte climatique (la région parisienne).
- La difficulté principale réside dans l'estimation des consommations d'énergie de logements appartenant à un parc très diffus. Les composantes à prendre en compte, notamment dans l'estimation des besoins de chauffage, sont multiples :

- la localisation climatique ;
- le type de logement (maison individuelle, logement en immeuble collectif) ;
- l'âge de la construction et les caractéristiques de l'enveloppe selon la réglementation en vigueur (ancien avant 1975, 1975 à 1989, 1989 à 2000) ;
- la nature de l'équipement de chauffage (combustibles fossiles, gaz, électricité, chauffage collectif ou individuel).

Un modèle de parc est proposé, qui s'appuie sur les données statistiques concernant le chauffage des locaux, disponibles pour la période 1968-1998. Les niveaux de consommation des différentes composantes du parc sont ainsi estimés, permettant l'analyse, dans la première partie de l'étude :

- des mouvements dans le parc ;
- des consommations d'énergie ;
- de l'impact de la réglementation thermique (1975-2000) ;
- de l'importance de l'amélioration thermique des logements anciens.

Sur cette base est conduite, en une deuxième partie, une analyse projective de différentes mesures techniques concernant le chauffage des locaux à l'échelle nationale (2000-2050) :

- la réglementation thermique appliquée à la construction neuve ;
 - la réhabilitation thermique de l'habitat existant ;
 - la diffusion de technologies d'enveloppe performantes (Vitrages à isolation renforcée, VIR).
- La dimension urbaine est intégrée dans la troisième partie de l'étude, consacrée à l'analyse comparative des différentes dépenses énergétiques du logement liées à la morphologie urbaine :
- l'investissement énergétique dans la construction et les dépenses de réhabilitation (logement et voirie) ;
 - les dépenses de chauffage ;
 - les dépenses annexes (eau chaude sanitaire, etc.) ;
 - les déplacements quotidiens.

Une première typologie est proposée pour rendre compte, par une analyse comparative, des impacts énergétiques et environnementaux (émissions de dioxyde de carbone dans un premier temps) d'interventions urbaines projetées, qu'il s'agisse de l'implantation d'ensemble de logements neufs, de restructuration de tissus urbains existants, d'interventions en périphérie urbaine. Les ensembles urbains étudiés sont tous trois situés en région parisienne. Il s'agit d'un îlot urbain du Paris haussmannien, d'un grand ensemble de logements collectifs en banlieue et d'un lotissement de maisons individuelles périurbain.

Consommations de chauffage

Consommations de chauffage des résidences principales en France (1968 - 2000)

L'habitat et l'environnement

L'activité du secteur du bâtiment s'appuie sur une importante consommation de ressources (énergie, matériaux, eau) :

- tout au long du processus de construction / entretien / démolition ;
- quotidiennement, en phase d'exploitation.

La consommation d'énergie ainsi que la contribution à la dégradation de la qualité de l'air et à l'effet de serre atmosphérique s'effectuent essentiellement au cours de l'exploitation¹. L'activité de construction (industrie des matériaux, chantier et transport) consomme de 3 à 4 GJ d'énergie finale par mètre carré de surface habitable. Au taux de 280.000 logements construits annuellement, la consommation d'énergie de cette activité se limiterait à 2 ou 3 Mtep, à un niveau qui apparaît très éloigné de l'énergie finale consommée pour l'exploitation (60 Mtep en 1998 pour l'habitat).

Les émissions liées à la phase d'exploitation du logement ont cependant connu une décroissance notable au cours des années 1980, suivie d'une légère croissance dans la décennie passée, pour atteindre 16 MteC en 1998 (tableau 1), tandis que les émissions de carbone dues aux trans-

ports ont connu une nette progression : elles représentaient près de 40% du total en 1998 (23% pour le seul transport des personnes).

Afin d'observer l'évolution des consommations d'énergie destinée au chauffage des seules résidences principales, de 1968 à 1998, l'évolution du parc est analysée selon la procédure suivante (figure 1) :

- reconstitution statistique de la taille du parc (en nombre de logements)
- reconstitution de l'évolution de la surface moyenne d'un logement ;
- calcul de la taille du parc (en millions de mètres carrés) ;
- calcul de l'accroissement annuel du parc (en millions de mètres carrés) ;
- reconstitution statistique des entrées annuelles par construction neuve ;
- estimation de la surface unitaire d'un logement neuf (en mètres carrés par logement) ;
- calcul des entrées annuelles par construction (en millions de mètres carrés) ;
- calcul des sorties du parc annuelles (en millions de mètres carrés), par différence entre les entrées et l'accroissement constaté.

Répartition 1998	Mtep	% du total	MteC	% du total
Habitat	60,1	29%	27	25%
Tertiaire	36,0	17%		
Agriculture	3,5	1,5%	4	3,5%
Industrie	57,5	27,5%	21	19,5%
Transports				
personnes	31,1	15%	25	23%
marchandises	21,1	10%	16	15%
Centrales électriques et autres			15	14%
TOTAL	209,3	100%	108	100%

Tableau 1
Consommation d'énergie finale et émissions en France en 1998

Le parc de résidences principales (1968-1998)

Le nombre de logements et la construction neuve : données statistiques

Le parc de résidences principales, qui comptait 24,35 millions de logements en 1999, est en croissance de 54,7% depuis 1967. Le taux de croissance annuel, qui était de 1,54% entre 1973 et 1984, s'est réduit au cours des années 1990-1997 à 1,1% par an, ce qui représente un apport, dans le parc, de 240.000 résidences principales par an en moyenne.

S'il se compose en majorité de maisons individuelles (56% environ), la répartition entre individuel et collectif - en nombre d'unités et non en superficie - semble se stabiliser depuis plusieurs années (tableau 2).

Le parc de logements s'accroît par construction neuve, pour l'essentiel, ainsi que par réaffectation et transformation de locaux (tableau 3). Les sorties du parc s'effectuent par destruction ou transformation en locaux à autre destination, en fusion également. Ce dernier cas, qui entraîne une diminution du nombre de logements, se traduit par un accroissement de la surface du logement final.

Pour ce qui concerne le seul parc de résidences principales, qui représentent 83% environ du parc de logements, l'accroissement annuel dans la décennie passée se stabilise en moyenne à + 237.000 unités, résultant :

- de l'entrée par construction de 290.000 logements ;
- de l'entrée par réaffectation de 53.000 logements ;
- de 106.000 sorties, dont 49.000 par démolition (figure 2).

Le nombre de logements mis en chantier a très nettement décliné depuis les années 1970 : approchant alors les 500.000 logements neufs par an, il s'établit à moins de 300.000 au terme de la décennie passée (tableau 4). La baisse de l'activité, qui était plus prononcée dans le collectif au milieu des années 1990, alors que le logement individuel restait à peu près stable, semble toucher l'ensemble du secteur³. La reprise amorcée avant 2000 devrait interrompre la récession du logement collectif, et opérer un rééquilibrage entre les deux types de logement.

La construction neuve a fortement contribué au rajeunissement du parc. Ce rajeunissement est plus sensible pour les maisons individuelles, car il est amorcé depuis 1955 : en 1994, plus du tiers de ce parc avait moins de 20 ans, contre 24% pour le collectif. L'estimation d'un âge moyen pour l'ensemble du parc est délicate, car certaines résidences, certes en nombre limité, ont plus d'un siècle d'existence. Paris est une ville en majorité du 19^{ème} siècle, tandis que le 18^{ème} siècle domine à Bordeaux. Un grand nombre de constructions traditionnelles demeure en zone rurale. Ce parc ancien est sujet à de multiples mouvements. A la suite de sorties massives du parc de résidences principales au cours des années 1970-1980, à usage de résidences secondaires, le mouvement semble s'inverser : un grand nombre de ces logements revient dans le parc principal.

Les sorties du parc par démolition se font plus rares⁴, les mouvements principaux d'entrées et sorties s'exerçant à l'intérieur du parc existant. Ceux-ci alimentent la part de la rénovation/réhabilitation dans l'activité économique du secteur du bâtiment, le montant des travaux de gros

Figure 1

Procédure de reconstitution des mouvements dans le parc
(Basée sur la connaissance de la taille du parc pour deux années données)

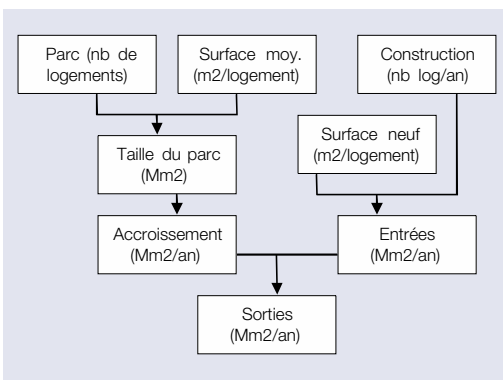
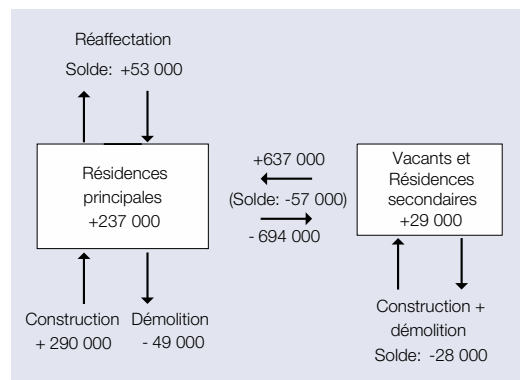


Figure 2

Entrées-sorties annuelles du parc de résidences principales
(estimations d'après : Compte du logement, février 1994)



entretien et de réhabilitation étant largement supérieur à l'investissement en construction neuve, notamment en région Ile de France (tableau 5).

Les trois âges du parc

Le parc peut se diviser actuellement en trois parts sensiblement égales :

- les logements d'avant 1949 ;

- les logements de la période de "reconstruction" intensive (1949-1975) ;

- les logements construits après 1975 (donc répondant à la première réglementation thermique effective).

Les poids correspondant à cette répartition du parc, dans la consommation d'énergie de chauffage, sont différents, compte tenu de l'amélioration des performances d'isolation des logements les plus

	1967	1970	1973	1978	1984	1988	1992	1994	1996	1998
Maisons individuelles										
(M)		8,3	8,9	10,1	11,0	11,8	12,34	12,5	13,1	13,2
(%)		50,6	52	53	54,0	55,4	55,7	55,8	56,2	56,0
En immeuble collectif										
(M)		8,1	8,2	8,6	9,4	9,5	9,9	9,9	10,2	10,4
(%)			48	47	46,0	44,6	44,3	44,2	43,8	44,0
Total résidences principales (M)	15,7	16,4	17,1	18,6	20,4	21,26	22,1	23,0	23,3	23,7
Parc total de logements (M)		19,1	20,3	22,2	24,6	25,7	27,0	27,5	28,2	
Logements construits (M)										
avant 1949 (%)	75*	66,0	58,7	51,3	43,5	39,5	36,7	35,4		
de 1949 à 1974 (%)	25	34,0	41,3				35,0	34,6		
depuis 1975 (%)	-	-	-				28,3	30,0	31,5	33
Surface des logements										
Moyenne du parc(m2)		68	72	77	82,0	84,8	86,4		88,0	
individuel (m2)					96	100	102		105	
collectif (m2)						66	66		66	
Surface par personne										
Moyenne du parc(m2)	3,06**		25	27,6	31	32	34		35	2,4**
individuel (m2)					33	35	37		39	
collectif (m2)					27	29	30		30	

* En 1968, les 8,34 millions d'immeubles dénombrés par l'enquête de réhabilitation se répartissaient en : 28,8% achevés avant 1871 ; 24,8% entre 1871 et 1914 ; 21,1% entre 1915 et 1948 ; 15,7% entre 1949 et 1961 ; 9,6% entre 1962 et 1968.

** personne par logement

Tableau 2

Evolution du parc de résidences principales (1967-1998)

Source : CIPP, 1998, et INSEE

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Parc de logements *	24.412	24.720	24.995	25.242	25.482	25.737	26.000	26.268	26.540
Sorties du parc	-134	-140	-147	-146	-136	-136	-138	-138	-139
Entrées par réaffectation	+ 83	+79	+83	+89	+95	+96	+96	+96	+96
Entrées par construction	+ 359	+336	+311	+297	+296	+303	+310	+315	+312
Bilan en fin de période	24.720	24.995	25.242	25.482	25.737	26.000	26.268	26.540	26.809

* logements vacants et résidences secondaires compris

Tableau 3

Mouvements dans le parc en milliers de logements (1984-1992)

Source : DAEI, DHC, Compte du logement, février 1994

	1970	1981	1985	1989	1990	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Logements (milliers)	482	399	296	339	306	277	256	302	286	272	270	283

Tableau 4

Nombre de logements mis en chantier

En milliards de francs	France	Ile de France
Neuf	114	23
Amélioration-entretien	153	32,6
Total logement	267	55,6

Tableau 5

L'activité de la construction de logements en 1998
Source : Fédération Française du Bâtiment

récents (tableau 6). La part relative au parc construit depuis 1975 s'établit ainsi à 25% environ de la consommation nationale d'énergie destinée au chauffage, contre 75% pour les deux tiers du parc les plus anciens. Les consommations unitaires de chauffage sont en effet estimées, en 1998, à 180 kWh/m² en moyenne, et à 200 kWh/m² pour les 67% du parc construits avant 1975⁵.

En 1945, l'âge moyen des logements dépassait 100 ans. S'il semblait s'établir aux alentours de 50 ans dans les années 1990, compte-tenu de l'intense activité de la construction des années 1970-1980, ce chiffre ne doit en aucun cas être confondu avec la durée de vie moyenne d'un logement. Au taux de démolition de 50.000 unités par an, ce qui est bien supérieur au taux estimé actuellement, il faudrait en effet près de 500 ans pour détruire et renouveler en totalité le parc existant en 2000.

Il faut donc admettre que la durée de vie d'un logement est sans commune mesure avec celle des autres parcs ou équipements consommateurs d'énergie (véhicules, appareils électroménagers, etc.). La vision patrimoniale apparaît comme la plus appropriée à ce secteur : la décision de détruire un bâtiment et le constat d'obsolescence sont de moins en moins liées à des considérations techniques mais beaucoup plus à des critères socioculturels. De ce point de vue, le parc antérieur à 1948 est moins menacé que celui des

grands ensembles : la démolition s'impose lorsque les problèmes relevant de l'échelle urbaine ne rencontrent pas de solution, ou lorsque les coûts de réhabilitation techniques sont trop élevés. Des besoins de renouvellement du patrimoine HLM se font jour, sur des fractions du parc construites de 1950 à 1960, de l'ordre de 15.000 logements par an, bien que le niveau actuel de destruction apparaisse plus faible, sur la base des données disponibles pour le parc géré par le mouvement social HLM (tableau 7).

Les logements construits depuis la reconstruction se conformeront-ils à cette visée patrimoniale ? Il est difficile de l'affirmer. Le logement a peu à peu adopté les caractéristiques d'un produit industriel (normes, modes de fabrication, certification des composants), dans une conception sous influence nord-américaine – le MRU, ministère de la reconstruction et de l'urbanisme, a organisé nombre de voyages outre-Atlantique dans les années 1950. La tradition latine demeure cependant influente, qui conçoit le logement pour plusieurs générations⁶. Le logement social n'échappe pas à cette tradition : les opérations de construction ne sont pas programmées pour une durée de vie donnée, comme le seraient des produits de consommation ou des biens industriels soumis au rythme de l'innovation technologique.

Tableau 6

Performance moyenne du parc en 1998

Période de construction	Avant 1975	1975-1998	Total du parc
Part en % du nombre de résidences	67%	33%	100%
Consommation moyenne (kWh/m ² .an, chauffage)	200	140	180
Poids en % de la consommation d'énergie finale de chauffage	75%	25%	100%

Tableau 7

Parc géré par le mouvement social HLM

	Logements locatifs	Construction annuelle	Rénovation annuelle	Destruction annuelle
Nombre de logements (en milliers)	3.500	50	100	5

Tableau 8

Evolution des surfaces de logements (1970-1996)

Surface en m ²	1970	1973	1978	1984	1988	1992	1996
Moyenne du parc	68	72	77	82	84,8	86,4	88
Maison individuelle	-	-	-	96	100	102	105
Immeuble collectif	-	-	-	65	66	66	66

Tableau 9

Taille des logements selon la période de construction

Source : IAURIF, 1992, Données métropole.

Période de construction	avant 1948	1949-1974	1975-1981	1982-1988	après 1988
Individuel (m ²)	99,1	99,2	109,6	109,2	110,9
Collectif (m ²)	61	69	68,2	66,5	62,3
Ensemble (m ²)	85,9	81,2	93,3	95,2	89,7
% individuel (estimation)	65%	40%	61%	67%	56%

La surface du parc (1968-1998)

La croissance de la surface unitaire

En raison de l'augmentation continue des surfaces de logements (68 m² en 1970, 88 m² en 1996), l'évolution du parc doit être décrite en millions de mètres carrés de surface habitable, et non plus en nombre de logements (tableau 8).

Alors que le nombre de logements a augmenté de près de 55%, la taille du parc a quasiment doublé en trente ans, passant de 1069 millions de mètres carrés en 1968 à 2076 millions de mètres carrés en 1998 (figure 3). L'unité de mesure (en surface et non en nombre de logements) facilite également l'analyse des mouvements dans le parc.

L'estimation des mouvements dans le parc

La contribution de la construction neuve à l'accroissement du parc, en surface, peut être estimée à partir des statistiques de la construction neuve, donnant le nombre d'unités et la taille des logements selon la période de construction (tableau 9 et figure 4). En fonction de ces indications, on adoptera les superficies suivantes :

- pour le logement individuel, une surface de 100 m² pour l'ancien, 105 m² dans les années 1970, puis 110 m² ;
- pour le logement collectif, une surface de 60 m² dans l'ancien, et une surface moyenne de 66 m² ensuite.

Pour la période 1968-1998, on peut ainsi estimer annuellement l'entrée en construction neuve, en adoptant une surface de 95 m² par logement neuf depuis 1975. Par différence entre l'accroissement annuel du parc et la construction neuve, on mesure l'importance des sorties du parc : en net recul depuis le milieu des années 1980, elles se limitent à 1,4 millions de mètres carrés par an (figure 5).

Tandis que la construction neuve participait activement au rajeunissement du parc dans les années 1970 (à raison d'un tiers pour la compensation des sorties de logements anciens et de deux tiers pour l'accroissement du parc), elle contribue aujourd'hui essentiellement à l'accroissement du parc, et pour une faible part (5% environ) au remplacement des logements anciens sortis du parc. La construction massive de logements avait alors nettement favorisé la maison individuelle (60% des constructions neuves en moyenne dans l'intervalle 1975-1990), mais la part du logement collectif semble s'être redressée au cours des années 1990. La répartition en logements achevés atteint 48% de logements en immeubles collectifs, contre 52% de maisons individuelles, en moyenne de la période 1993 à 1996. En surface, les parts sont différentes, puisque la surface unitaire moyenne du logement individuel (110 m²) dépasse largement celle du logement en collectif (66 m²) : les maisons individuelles ont encore représenté les deux tiers des surfaces de logements neufs dans la décennie passée.

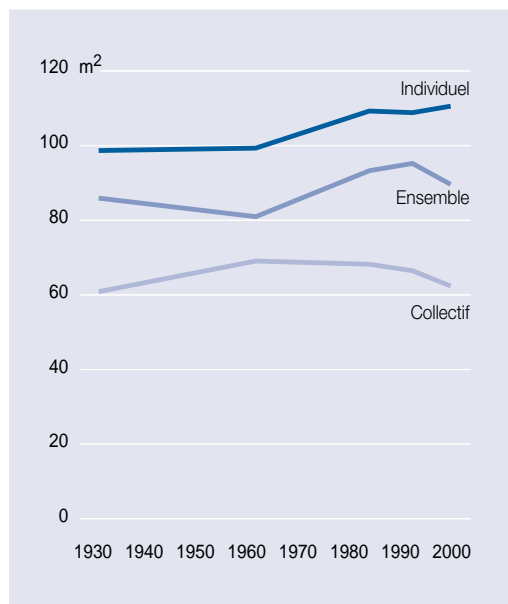
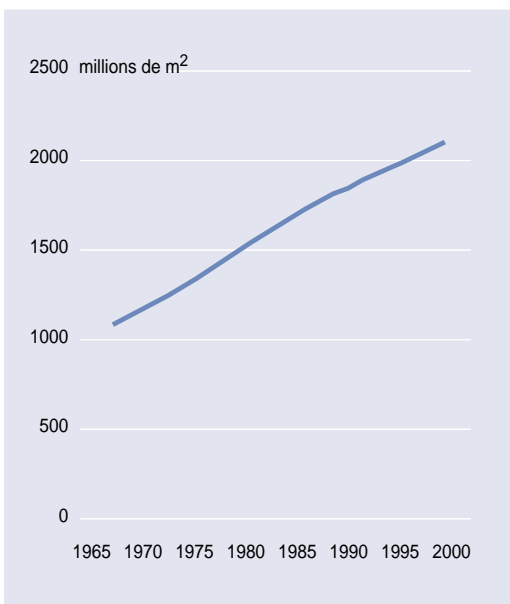


Figure 3

Evolution de la taille du parc de résidences principales, 1968-1998

Figure 4

Evolution de la surface moyenne des logements en fonction de la période de construction

Consommations d'énergie et émissions

La prépondérance des besoins de chauffage

La consommation d'énergie finale des résidences principales (de l'ordre de 260 kWh/m² en 1998), est destinée principalement au chauffage, à hauteur de 70% de l'ensemble des besoins énergétiques d'exploitation. Cette part est en baisse régulière depuis 1973 (tableau 10) : la réduction de la consommation d'énergie de chauffage unitaire s'établit à 45%, tandis que les besoins spécifiques ont connu une croissance de 125% dans le même intervalle de 25 ans.

En énergie primaire, la répartition est différente, compte tenu de la part de l'électricité dans les usages spécifiques tels que l'éclairage : ce poste représente alors 20% pour le résidentiel - et près

de 50% pour le tertiaire -, tandis que les parts du chauffage, de l'eau chaude et de la cuisson, s'établissent respectivement à 57%, 17% et 6%.

L'évolution des consommations (1968-1998)

Malgré l'accroissement continu du parc, qui a vu sa surface doubler de 1968 à 1998, la consommation annuelle d'énergie de chauffage totale a retrouvé en 1998 son niveau de 1968 (figure 6). Elle a cessé de croître au milieu des années 1970, à la faveur des mesures d'économie d'énergie qui sont venu répondre au premier choc pétrolier, pour se stabiliser ces dernières années à 370-380 TWh.

Après le pic des années 1970, la consommation unitaire moyenne par mètre carré ne cesse de décroître⁷. Elle a été réduite de moitié en trente

Tableau 10
Evolution des consommations unitaires moyennes, par usage, des résidences principales (énergie finale)

	1973		1994		1998	
	(en kWh/m ²)	(en %)	(en kWh/m ²)	(en %)	(en kWh/m ²)	(en %)
Chauffage	329,7	87	189	77	179	70
Eau chaude sanitaire	21,6	5,7	22,2	9	28,3	11
Cuisson	14	3,7	13,6	5,5	18	7
Usages spécifiques, électricité	13,7	3,6	20,8	8,5	30,8	12
Total	379	100	245,6	100	256,1	100

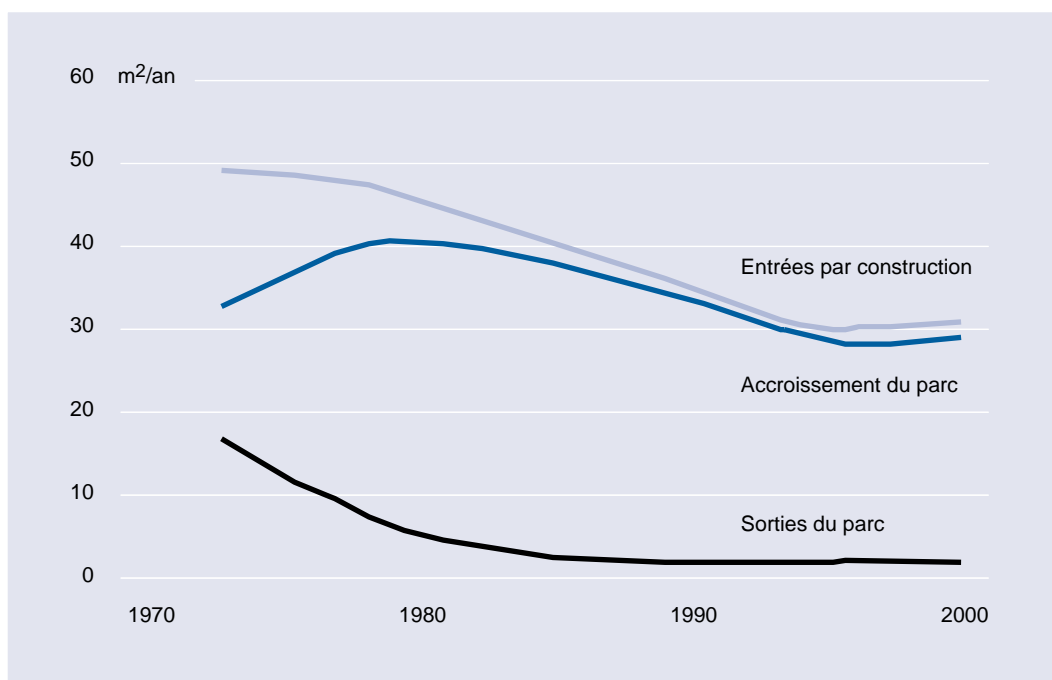


Figure 5
Mouvements dans le parc, 1973-1998, en millions de m²/an

ans, passant de 350 kWh/m² en 1968 à 180 kWh/m² en 1998. La baisse sensible des consommations unitaires moyennes a ainsi compensé l'augmentation du parc en nombre de logements (+ 48 %) et en taille (la surface moyenne d'un logement passe de 67 m² à 88 m²). Elle a pu être obtenue par la conjonction de plusieurs facteurs :

- la montée en puissance de la réglementation thermique dans le logement neuf, de 1974 à 1989 ;
- l'importance de la rénovation urbaine "lourde", qui s'est traduite par la sortie massive du parc de logements anciens, souvent dépourvus des éléments de confort (eau, WC, installation sanitaire, chauffage central), et leur remplacement par des logements neufs (près de 500.000 logements par an dans les années 1970) ;
- l'amélioration du confort et des qualités thermiques des logements anciens, à la faveur des travaux de réhabilitation, notamment dans le parc social.

Il convient de mesurer l'impact réel de ces différents facteurs dans la période révolue, avant d'éta-

blir des projections sur l'intervalle 2000-2050. Les estimations des besoins de chauffage sont fondées sur un mètre carré moyen, défini selon les qualités d'enveloppe, le type de logement et la zone climatique⁸. Le calcul est basé sur la méthode des besoins de chauffage par logement, soit BV x DH en kWh/an :

- le coefficient BV, en W/K intègre la part récupérable des apports internes et des apports solaires directs ;
- DH représente les degrés x heures, base 18°C.

Les émissions de dioxyde de carbone

Le chauffage des résidences principales représente une part prépondérante des émissions de l'ensemble du secteur résidentiel et tertiaire, qui s'élevait à 27 MtC (millions de tonnes de carbone) en 1998, soit près de 100 MtCO₂. L'estimation de cette part n'est pas simple. L'INESTENE a évalué, pour l'année 1990, les émissions à plus de 120 MtCO₂ dans les logements (tableau 11). La part du chauffage représenterait plus de 80% des

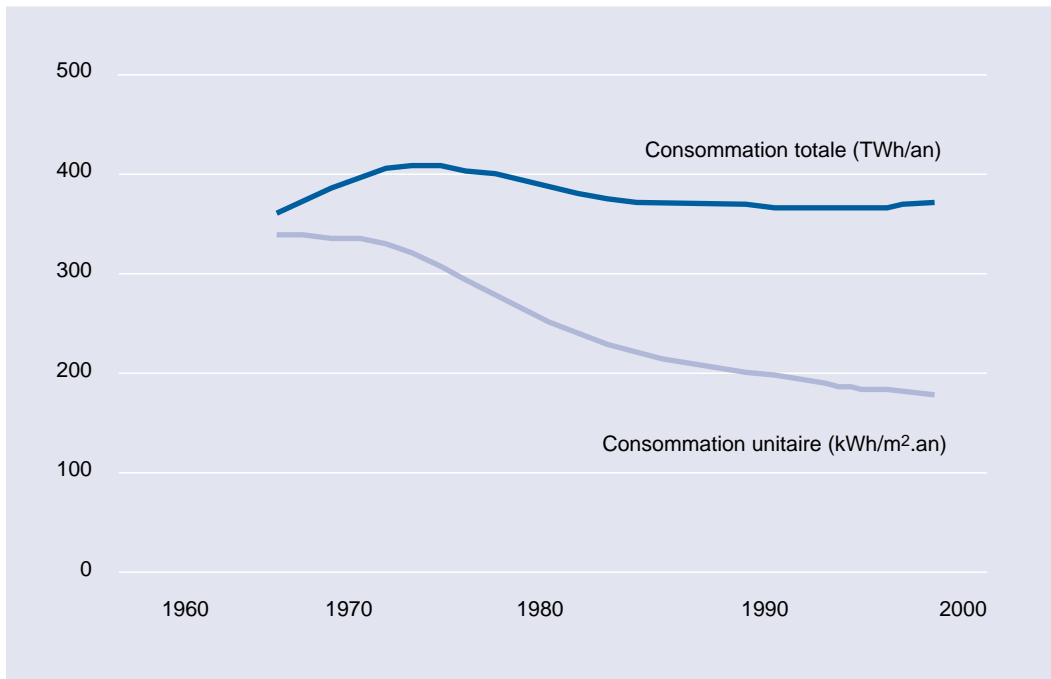


Figure 6
Evolution de la consommation d'énergie de chauffage 1968-1998

	En millions de tonnes de CO ₂	Répartition en %
Electroménager, éclairage et chauffage électrique	38,7	31,77
Chauffage hors électricité	74,2	60,92
Eau chaude hors électricité	3,7	3,04
Cuisson hors électricité	5,2	4,27
Total	121,8	100,00

Tableau 11
Répartition des émissions de CO₂ dans le logement en 1990
Source : INESTENE, *Habitat et pollution atmosphérique, Paris, Plan urbanisme construction architecture, Septembre 1995*

émissions du logement au début des années 1990, pour décroître depuis, sous l'effet de l'augmentation des équipements électriques, et de la part de marché du chauffage électrique.

Les émissions liées au chauffage seront évaluées par unité de surface (en $\text{gCO}_2/\text{m}^2.\text{an}$) sur la base des deux données suivantes :

- la consommation unitaire de chauffage (en kWh/m^2) ;
- l'émission unitaire moyenne (en gCO_2/kWh) tenant compte des parts de marché des différentes énergies.

Pour les valeurs unitaires estimées de 180 kWh/m^2 et de 185 gCO_2/kWh en 1998, les émissions atteignaient 0,033 tCO_2 par mètre carré soit

69 MtCO_2 pour l'ensemble du parc (constitué de plus de 2.000 Millions de mètres carrés).

Une approche plus précise serait obtenue par une désagrégation plus complète du parc, distinguant les parts de marché des énergies de chauffage (combustibles fossiles, gaz, électricité, bois) dans l'estimation des consommations, et, directement, dans les émissions. Ces part diffèrent selon l'âge de la construction, et sans doute selon les régions climatiques, ce qui complique la reconstitution d'un modèle de parc global. La simplification adoptée consiste à appliquer un taux moyen d'émission à une consommation moyenne, intégrant différents modes de chauffage (figure 7).

L'impact de la réglementation thermique (1975-2000)

L'évolution des performances de la construction neuve

La dynamique de la construction neuve, qui s'appuyait sur près de 500.000 logements par an dans les années 1970, de performance thermique supérieure au logement ancien (sur le plan du

chauffage et de l'isolation tout au moins), a eu un impact certain sur la consommation moyenne du parc. Le gain aurait certainement été plus important si cette création massive de logements n'avait autant bénéficié à la maison individuelle (60% des constructions neuves), au détriment du logement collectif, dont les besoins de chauffage sont théo-

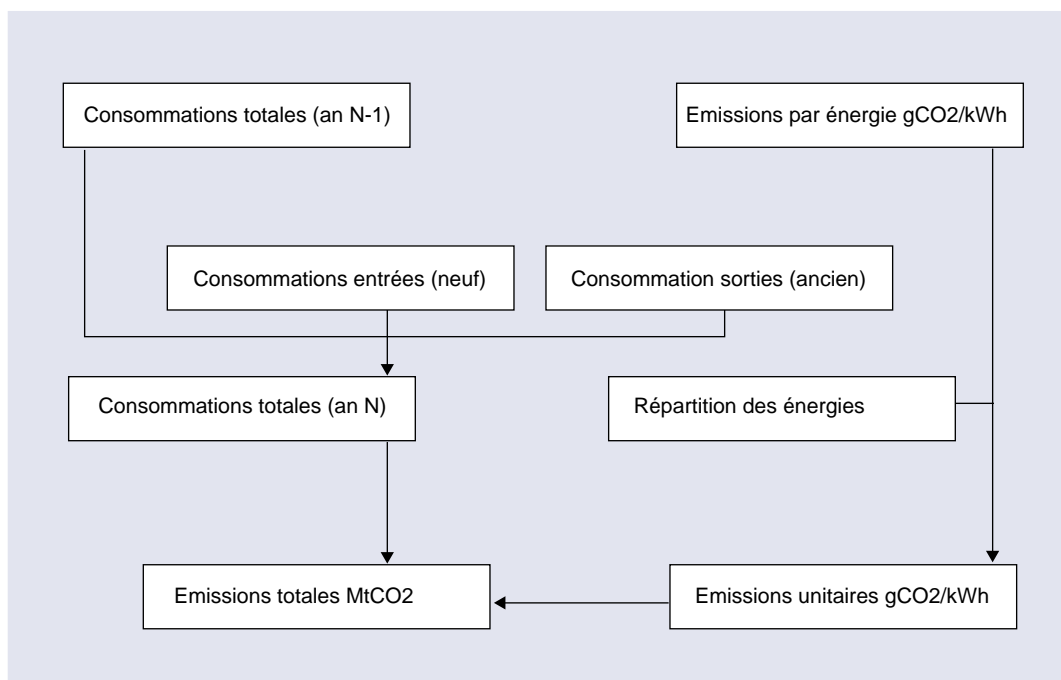


Figure 7

Procédure simplifiée d'estimation des émissions totales

(cas du scénario excluant les interventions sur le logement existant)

riquement plus faibles. Les progrès technologiques ont visé essentiellement les parties courantes de l'enveloppe des constructions.

L'introduction de matériaux d'enveloppe isolants a été progressive dans la construction moderne (copeaux et fibres de bois, liège, laine minérale). Elle s'est généralisée à la faveur des normes de construction, dont les premières ont été établies par l'arrêté du MRU du 17 septembre 1952⁹.

En 1974, le coefficient de déperdition volumique global G exprimé en W/m^3K , à la base de la réglementation (arrêté du 10 avril 1974), a repris pour le généraliser le principe des arrêtés de 1952, de 1954 et de 1957 : les consommations de chauffage des constructions neuves ont été réduites de 20 à 25% en moyenne (la réduction du niveau d'isolation pour la zone H1 est de 50%).

Cette réglementation s'est renforcée en plusieurs étapes :

- 1982 : réduction de 25% des besoins de chauffage et introduction du coefficient B ;
- 1985-1988 : réduction de 25% du bilan global, prenant en compte les autres usages énergétiques ;
- NRT 2000 : application des niveaux d'isolation thermique exigés auparavant pour le chauffage électrique à l'ensemble du parc neuf.

Le renforcement de la réglementation concernant le logement neuf s'est traduit par une amélioration sensible du niveau d'isolation moyen de l'enveloppe¹⁰ et des taux de renouvellement

d'air : le coefficient G (en $W : m^3°C$) a décroché ainsi de 2,40, avant 1975, à 0,70 en 1988 (figure 8).

La nouvelle réglementation thermique, qui doit entrer en vigueur en 2001, est dédiée essentiellement aux bâtiments tertiaires qui seront soumis aux mêmes exigences énergétiques que les logements, afin de combler l'écart qui est actuellement de 25% entre les deux secteurs. Les progrès attendus concernent, outre le chauffage et l'eau chaude sanitaire, la climatisation et l'éclairage. La conception architecturale déficiente des bâtiments "aquarium", qui s'est engouffrée dans les failles d'une réglementation thermique encore basée sur un coefficient volumique (G1), devrait enfin cesser. En dépit de consommations de chauffage, de ventilation et de climatisation parfois importantes, le confort dans ces bâtiments est en effet souvent contrarié par l'effet de paroi froide en hiver et par les surchauffes excessives dès la mi-saison.

Pour le logement, si les ambitions visant la consommation d'énergie de chauffage restent plus modestes, le champ d'application est également élargi à la prise en compte de la thermique d'été (par l'introduction d'une température intérieure maximale) et de la climatisation, tout en distinguant les exigences entre qualité d'enveloppe et ventilation. Il faut cependant souligner que la souplesse accordée à la conception, après avoir été encouragée en 1982 quand les vitrages sud n'ont plus été pénalisés en période de chauffage, se réduit progressivement, ici par la suppression des

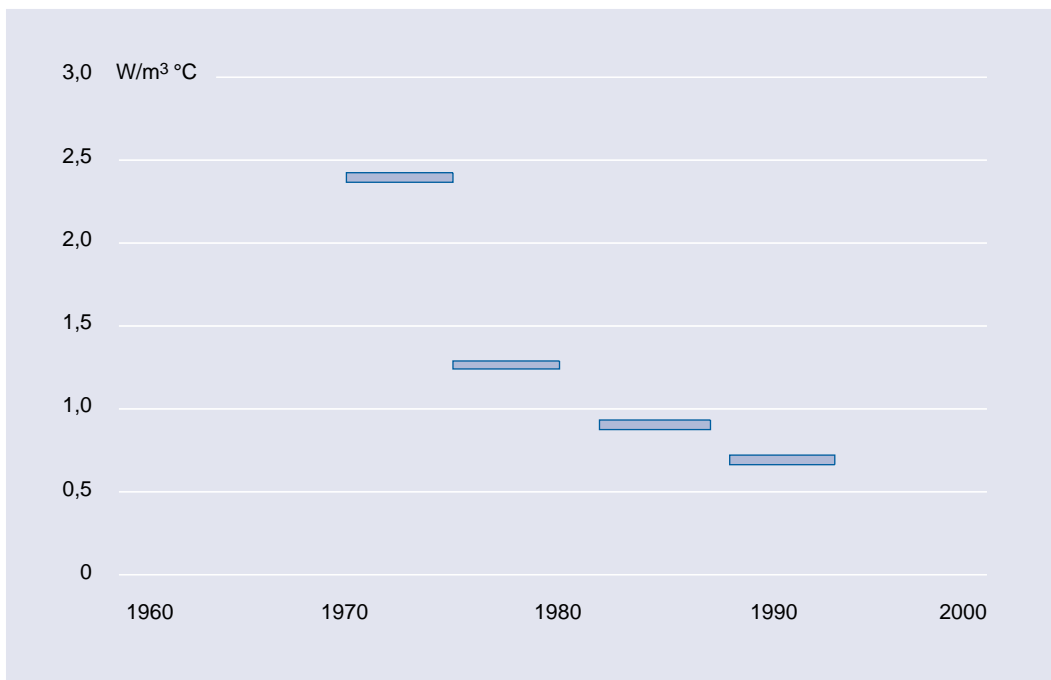


Figure 8

Evolution du coefficient G ($W/m^3°C$) 1970-1998
D'après : A. POUGET, "Les réglementations françaises pour l'habitat et le secteur non résidentiel neuf", in : R. Dehausse, *Energétique des bâtiments*, Tome 3, Paris, PYC Edition, 1989.

possibilités de compensation entre les différents postes de déperditions thermiques.

Les gains technologiques concernent en particulier les deux principaux points faibles de l'enveloppe, vitrages et ponts thermiques. La distinction entre les différents types de chauffage est supprimée au profit de la généralisation des niveaux d'isolation actuellement exigées pour le chauffage électrique. Le surcoût total est estimé à moins de 1% du coût de la construction, pour une amélioration sensible du confort général, et une baisse attendue de 7% de la consommation de chauffage. Ainsi, la consommation moyenne annuelle du parc neuf serait de 82 kWh/m² après juin 2001, au lieu de 88 kWh/m² en 2000.

En 2005, est programmée une nouvelle réduction des consommations de 10% suivie d'un renforcement tous les cinq ans. En adoptant l'hypothèse d'une croissance des performances attendues au même taux (gain de 10% tous les cinq ans) jusque 2050, la consommation d'énergie de chauffage du logement neuf décroîtrait de 82 kWh/m² en 2001, à 66,3 kWh/m² pour la période 2010-2015 et à 31,7 kWh/m² pour la période 2045-2050 (tableau 12).

Le scénario de référence : la construction neuve

L'impact de la réglementation thermique appliquée à la construction neuve peut être estimé à partir du jeu des entrées / sorties du parc, qui repose sur les deux hypothèses suivantes :

- toute sortie du parc s'applique à un logement

de médiocre performance, d'une consommation d'énergie de chauffage de l'ordre de 395 kWh/m² de 1968 à 1983, valeur décroissant légèrement jusque 360 kWh/m² en 1998¹¹ ;

- toute entrée par construction s'effectue en respect de la réglementation thermique¹².

Il peut être apprécié par le calcul de l'évolution que suivraient les consommations d'énergie totales CT entre deux années consécutives, n-1 et n, dans cette hypothèse de mouvements dans le parc limités aux entrées - sorties :

$$CT_n = CT_{n-1} + CN_n - SA_n$$

Où : CN_n est la consommation de la construction neuve, SA_n est la consommation correspondant aux sorties du parc ancien au cours de l'année écoulée (en réalité, il serait plus précis de prendre la moyenne des deux années pour recouvrir la saison de chauffage).

Il faut d'emblée relever que l'effet de renouvellement du parc reste très partiel, puisque seuls 156 millions de mètres carrés sont sortis en 30 ans, pour 1163 millions de mètres carrés entrés par construction neuve. De fait, ce renouvellement apparaît trop faible pour enrayer à lui seul la croissance des consommations totales, sous l'effet de l'augmentation de la taille du parc : sur la période 1973-1998, la consommation totale d'énergie de chauffage aurait connu une croissance continue, de 405 TWh à 492 TWh par le simple jeu des entrées - sorties, alors que celle-ci a atteint 374 TWh en 1998. La croissance des consommations aurait certes été plus vive si la construction neuve n'avait pas été soumise à la

Période	Consommation annuelle en kWh/m2
1988-1993	95,0
1993-1995	92,0
1995-1998	90,0
1998-2000	88,0
2000-2005	81,8
2005-2010	73,7
2010-2015	66,3
2015-2020	59,7
2020- 2025	53,7
2025-2030	48,3
2030-2035	43,5
2035-2040	39,1
2040-2045	35,2
2045-2050	31,7

Tableau 12

Renforcement de la réglementation thermique (1989-2050)

réglementation thermique : la consommation d'énergie aurait alors dépassé 660 TWh en 1998 (figure 9). La différence provient en partie d'une performance de la construction neuve sans doute supérieure au simple respect de la règle-

mentation (consécutive aux labels "haute performance énergétique" par exemple), mais surtout des travaux d'économie d'énergie qui ont été entrepris à grande échelle dès 1975 dans le logement existant.

L'amélioration des logements anciens

Le renouvellement du parc s'opère très largement à la faveur du mouvement interne aux logements existants, notamment dans les échanges entre le parc de résidences principales et le parc constitué des résidences secondaires et des logements occasionnels ou vacants. Les mouvements vers le parc principal (environ 640.000 entrées par an, pour plus de 690.000 sorties) s'accompagnent le plus souvent de travaux d'amélioration des conditions de confort.

L'évaluation de l'impact de la réhabilitation du parc ancien sur la consommation d'énergie finale repose sur deux données :

- la performance unitaire de cette réhabilitation, en kWh/m² de consommation annuelle de chauffage ;
- le taux annuel de logements ayant fait l'objet de travaux d'amélioration thermique.

Les gains unitaires de la réhabilitation thermique

La première donnée est estimée sur la base d'un modèle de parc simplifié (décrit en Annexe 2), décrivant trois zones climatiques, et deux logements, un individuel de 90 m² et un collectif de 60 m². L'amélioration thermique des logements résulte d'une quadruple opération (tableau 13). Après la rénovation de l'équipement de chauffage, qui se traduit par une réduction du coefficient de consommation moyen de 1,6 environ à 1,17, la mesure relative aux vitrages est sans doute la plus efficace, en ce qu'elle crée une synergie entre les différentes composantes du confort, par réduction conjuguée :

- de l'effet de paroi froide ;
- de la condensation de la vapeur d'eau ;

- des infiltrations parasites de l'air froid
- de la transmission des bruits aériens.

Le confort acoustique est estimé satisfaisant pour un indice d'affaiblissement acoustique de 35 dB (A) : ce seuil est approché par les fenêtres dites performantes, équipées de double vitrage "4 - 6 - 6" (33 db (A) pour les bruits de route), alors qu'il reste inaccessible au fenêtres à simple vitrage, d'indice d'affaiblissement de 28 db (A).

Appliquée au parc ancien de qualité thermique médiocre, puisque sa consommation de chauffage moyenne dépasse 395 kWh/m², cette réhabilitation permet un gain annuel¹³ d'environ 200 kWh/m². On considère qu'un tel niveau de réduction des consommations a été maintenu bien au-delà d'une décennie, même si le stock de logements les moins performants apparaissait totalement réhabilité, ce qui s'est certainement produit au cours des années 1990. Lorsque la réhabilitation se charge du logement moyen de 1968 (consommation de 330 kWh/m²), un gain de 200 kWh/m² signifie que la consommation finale est de 130 kWh/m², soit le niveau de la construction neuve de 1978. Cela est tout à fait concevable, au prix d'un renforcement des opérations décrites précédemment (augmentation de l'isolation des toitures, isolation partielle des murs, etc.).

L'estimation du rythme de la réhabilitation

Pour le deuxième point, le rythme annuel des travaux d'amélioration thermique, qui n'est sans doute pas constant au cours de la période 1975-2000, peut être apprécié en modifiant le bilan précédent des consommations d'énergie totales CT¹ entre deux années consécutives, n-1 et n

Composant de la construction	Mesure
Isolation des toitures	0 → + 10 cm de laine minérale
Vitrages	simple vitrage → double vitrage "norma"
Ventilation	- 50% des taux de renouvellement d'air → (1 → 0,5 vol/h)
Equipement de chauffage	Combustible fossile → 50% électrique, 50% gaz avec régulation

Tableau 13

Quatre mesures d'économie d'énergie

(figure 10). Connaissant les niveaux de consommations constatés dans les deux années consécutives (CT'_{n-1} et CT'_n), le gain de consommation dû à la réhabilitation peut être estimé, en appliquant la procédure suivante :

$$CT'_n = CT'_{n-1} + CN_n - SA_n - RA_n$$

Où : CN_n est la consommation de la construction neuve (donnée statistique), SA_n est la consommation correspondant aux sorties du parc ancien (valeur estimée comme précédemment), RA_n est le gain total de consommation dû à la réhabilitation, au cours de l'année écoulée.

Le nombre de logements réhabilités est ensuite évalué, sur la base d'une surface habitable moyenne de 77 m² (figure 11). En moyenne, la réhabilitation du parc concernerait 300.000 logements par an, soit 7.500.000 logements de 1975 à 2000. Mais les variations de rythme sont importantes : le taux maximum de logements réhabilités serait obtenu dans l'intervalle 1980-1986, avec plus de 500.000 logements par an. C'est en effet au cours de cette période qu'ont été lancés les "Fonds spéciaux grands travaux" (FSGT) dont a bénéficié une part notable du parc social, et qu'ont été mises en place les incitations fiscales en faveur des travaux d'isolation thermique chez les propriétaires occupants.

Cette estimation ne semble pas toutefois traduire la permanence des travaux d'isolation dans la période récente, puisque le taux de réhabilitation apparaît voisin de zéro entre 1995 et 2000.

Les logements construits avant la réglementation thermique de 1975 représentaient les deux tiers du parc total en 1998, soit près de 16 millions de logements. L'estimation précédente permet de considérer que plus de la moitié du parc ancien serait encore susceptible d'être réhabilitée sur le plan thermique, soit plus de 650 millions de mètres carrés avec un gain annuel potentiel de 200 kWh/m². Une faible part de ces logements anciens est cependant destinée à sortir du parc. Les estimations ainsi obtenues n'ont de sens que globalement, puisqu'elles résultent de l'analyse du parc dans sa totalité. On pourrait aussi considérer que les travaux d'amélioration thermique sont restés plus modestes, que le gain annuel est deux fois plus faible (100 kWh/m²), et qu'il s'appliquerait en conséquence à un nombre double de logements anciens, afin que l'évolution constatée des consommations globales d'énergie de chauffage du parc de résidences principales soit toujours respectée.

Le nombre de logements anciens n'ayant fait l'objet d'aucune intervention thermique se situerait dans cette dernière hypothèse entre un et deux millions de logements en 2000. Cette révision à la baisse des niveaux de réhabilitation, et inversement à la hausse du nombre de logements, semble mieux refléter les résultats des différentes enquêtes - logement. En effet, en 1992, les catégories "sans confort" (ne disposant pas des éléments suivants : eau, W-C, et installa-

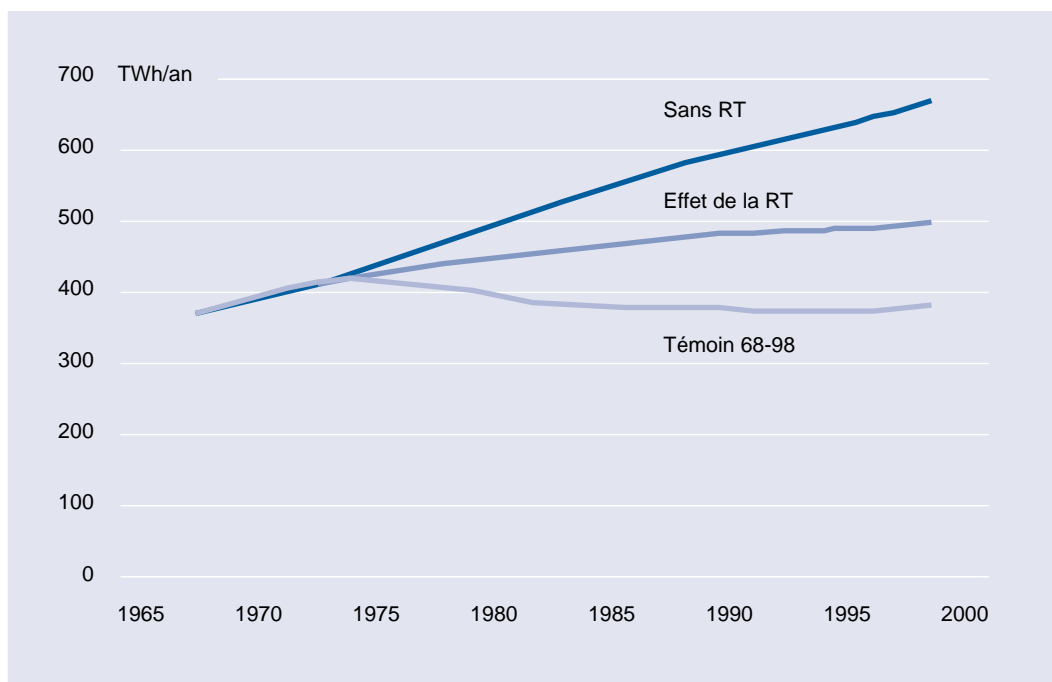
Figure 9

Trois scénarios de consommation d'énergie du parc 1968-1998 (TWh/an)

Effet de la réglementation thermique (RT) : jeu des entrées (neuf selon l'évolution de la RT) et sorties du parc

Témoin 1968-1998 : données statistiques des consommations

Sans réglementation thermique : jeu des entrées (neuf au taux 1973) et sorties du parc



tion sanitaire), comportaient 1,37 millions de logements. Le nombre de logements "inconfortables" atteignait cependant 4,4 millions en ajoutant aux précédents ceux qui ne disposaient pas de chauffage central. En 1996, 1.400.000 logements étaient de confort médiocre, dont les deux tiers en immeuble collectif et en majorité dans le parc ancien, le degré d'insatisfaction croissant

avec l'âge du logement dans le parc locatif¹⁴. Mais dans cette hypothèse, les logements anciens réhabilités se maintiendraient à un niveau de consommation élevé, soit 230 kWh/m² pour le logement moyen construit avant 1970 : ils pourraient potentiellement faire l'objet de travaux complémentaires d'amélioration thermique, certes à un coût final plus élevé.

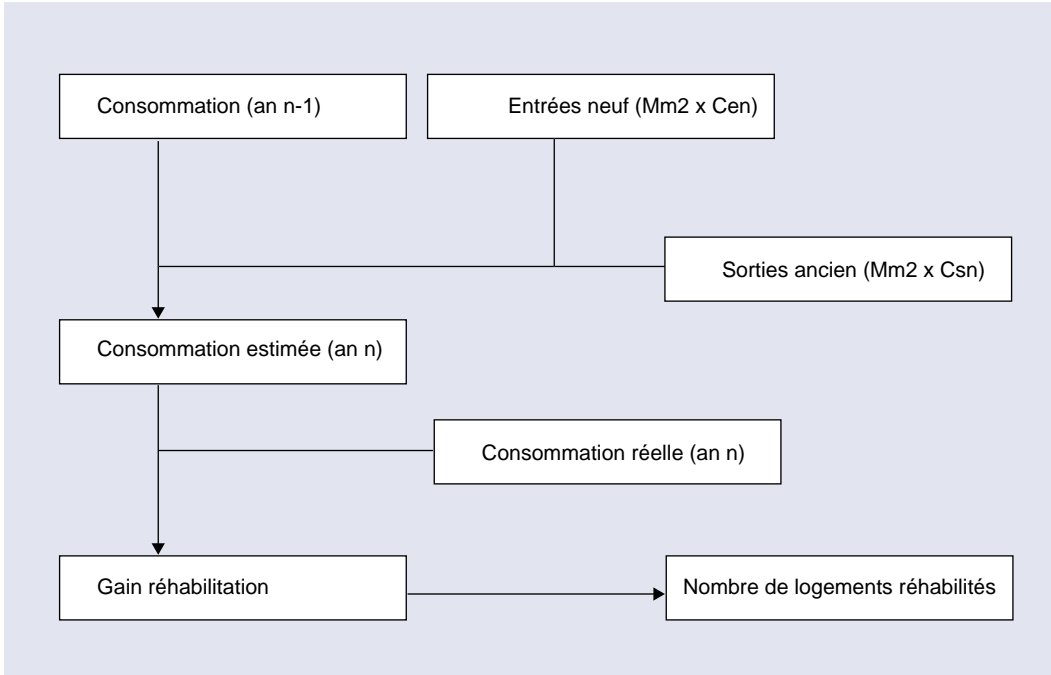


Figure 10

Procédure d'estimation du taux annuel de réhabilitation
 Cen : consommation unitaire du logement neuf entré dans le parc l'année n, en kWh/m²
 Csn : consommation unitaire du logement ancien sorti du parc l'année n, en kWh/m²
 La consommation estimée (an n) résulte du seul jeu des entrées / sorties.

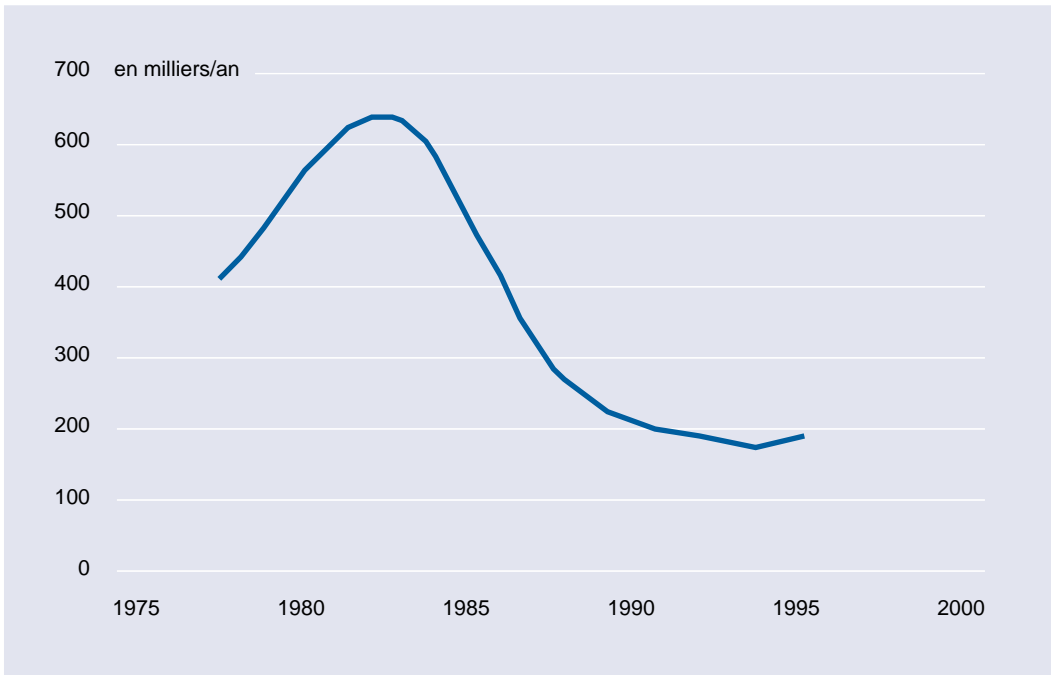


Figure 11

Estimation du nombre de logements réhabilités (en milliers/an)
 Hypothèses : gain de 200 kWh/m².an, surface du logement de 77 m².

La revalorisation des quartiers anciens

En conclusion, l'amélioration des performances moyennes de chauffage du parc repose essentiellement sur la réhabilitation du parc ancien, et en particulier sur l'amélioration des niveaux de confort thermique. La valorisation des quartiers anciens est un des moyens de la sauvegarde du patrimoine urbain inaugurée par la loi Malraux en 1962. La reconquête des centres villes est également appelée à enrayer la dispersion urbaine. Quatre-vingt-cinq secteurs sauvegardés ont été créés en trente ans, six cents zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP) ont été instituées depuis le lancement de cette nouvelle procédure en 1983. L'Intérêt manifeste pour l'habitat ancien peut être daté du *Rapport sur l'amélioration de l'habitat ancien* de Nora-Eveno¹⁵. La sauvegarde des quartiers anciens bénéficie de la procédure d'acquisition - amélioration P.L.A. des organismes HLM, qui permet de réaliser des logements sociaux dans les villes (6.000 à 7.000 logements par an), nombre qui reste modeste en raison du coût élevé des procédures d'acquisition et de mises aux normes de confort.

La réhabilitation a connu une première période d'activité intense dans le parc social au cours des années 1980 : les deux tiers des interventions concernaient alors les travaux d'économie d'énergie et la réfection de la peau des bâtiments. L'essentiel semble avoir été réalisé dans cette décennie, dans le sillage de la mise en place d'une politique de l'habitat ancien qui s'est appuyé sur les PACT -ARIM (Propagande et action sociale contre les taudis, créé en 1942, et Association de rénovation immobilière, créée en 1968), ainsi que sur l'Agence nationale pour l'amélioration de l'habitat, créée en 1970. La lutte

pour la résorption de l'habitat insalubre a donné lieu parfois à la création d'ensembles de qualité médiocre, au prix de démolitions excessives. Celles-ci se sont ralenties après 1985, au rythme de 25.000 logements par an, au bénéfice des travaux d'"amélioration aidée". Ceux-ci toucheraient 300.000 logements par an au total (soit un effectif plus important que la construction neuve), qui se répartissent en 125.000 logements en locatif privé, 115.000 en locatif HLM, 60.000 logements occupés par leurs propriétaires. En 1994, on constatait que les logements d'avant 1949 se trouvaient pratiquement tous réhabilités, au terme de multiples opérations, bénéficiant des subventions ANAH (35.000 logements par an en moyenne de 1979 à 1987), ou de la prime à l'amélioration de l'habitat (460.000 logements au total dans cette période).

Les travaux liés au confort thermique se sont poursuivis au cours des années 1990, au sein de préoccupations plus vastes, ayant trait à l'amélioration de la sécurité technique, de l'environnement des immeubles, des parties communes, du confort acoustique, ainsi qu'à la restructuration des logements. Outre le confort et la sécurité, les travaux ont eu pour objectif de réduire les coûts de maintenance et d'entretien et de faciliter la gestion des parties communes. La menuiserie a constitué le premier poste de dépense (26%) devant l'isolation thermique (16%)¹⁶. Les besoins de réhabilitation concernaient encore 700.000 logements en 1996, bien que 300.000 aient déjà été réhabilités au niveau de la peau. Au cours des années 1990, les travaux d'amélioration et de gros entretien ont représenté la moitié de l'activité des entreprises intervenant dans le domaine du logement.

Analyse projective

Analyse projective du parc (2000-2050)

Les scénarios de maîtrise de la consommation d'énergie de chauffage

En 1995, la consommation d'énergie finale en France et les émissions par habitant s'élevaient pour l'habitat respectivement à 845 kep (kilogramme équivalent pétrole) et 305 kgC (kilogramme de carbone). L'évolution de ces deux indicateurs à l'horizon 2050, pour ce qui concerne le chauffage, dépend de multiples paramètres, certains agissant à la hausse, telle l'augmentation des normes de confort qui se traduit en particulier par des surfaces habitables par personne plus élevées. D'autres paramètres vont favoriser la réduction des consommations et des émissions : les niveaux de performance thermique s'améliorent au rythme de la diffusion de techniques d'enveloppe et d'équipements thermiques plus efficaces (chauffage et ventilation) dans la construction neuve et dans la rénovation du logement existant.

Afin d'estimer et de classer les différentes possibilités de réduction des consommations d'énergie et des émissions, plusieurs types d'action applicables à l'ensemble du parc de résidences principales sont envisagés (tableau 14), les deux premières hypothèses excluant toute action sur le parc existant :

- le jeu de la construction neuve (accroissement du nombre de logements et compensation des

sorties du parc ancien) au niveau des performances de 1989-1999 maintenues jusque 2050 (scénario témoin) ;

- l'impact de la nouvelle réglementation thermique (NRT) dans la construction neuve, applicable en 2001 et évolutive (renforcement des exigences tous les cinq ans) ;
- la poursuite de la réhabilitation thermique du parc ancien ;
- la diffusion progressive de vitrages performants dans l'ensemble du parc existant.

Une telle comparaison déterminera quelles stratégies pourraient être adoptées en vue de scénarios de développement sobre, pour contrarier l'effet d'une augmentation conjuguée de la population et des niveaux de confort attendus. Pour cette raison, la taille du parc sera estimée en mètres carrés et non pas en nombre de logements, comme résultante des deux évolutions suivantes :

- les effectifs de la population ;
- la surface habitable moyenne par personne.

On pourra également estimer le taux de croissance des surfaces moyennes de logements, qui permettra d'évaluer l'évolution prévisible des taux d'occupation moyen des logements (figure 12).

Composantes du parc	Entrées (neuf)	Sorties (ancien)	Existant
Scénario de référence	RT 89	Référence	-
Scénario 1 <i>NRT 2000</i>	NRT 2000	Référence	-
Scénario 2 <i>réhabilitation</i>	RT 89	Référence	Réhabilitation ancien antérieur à 1975
Scénario 3 <i>Diffusion VIR*</i>	RT 89	Référence	Id + VIR dans tout le parc antérieur à 2000
Scénario <i>cumul</i>	NRT 2000	Référence	Id + VIR dans tout le parc antérieur à 2000

*(Scénario 2 + VIR)

Tableau 14

Différents scénarios de réduction des consommations d'énergie de chauffage, parc de résidences principales

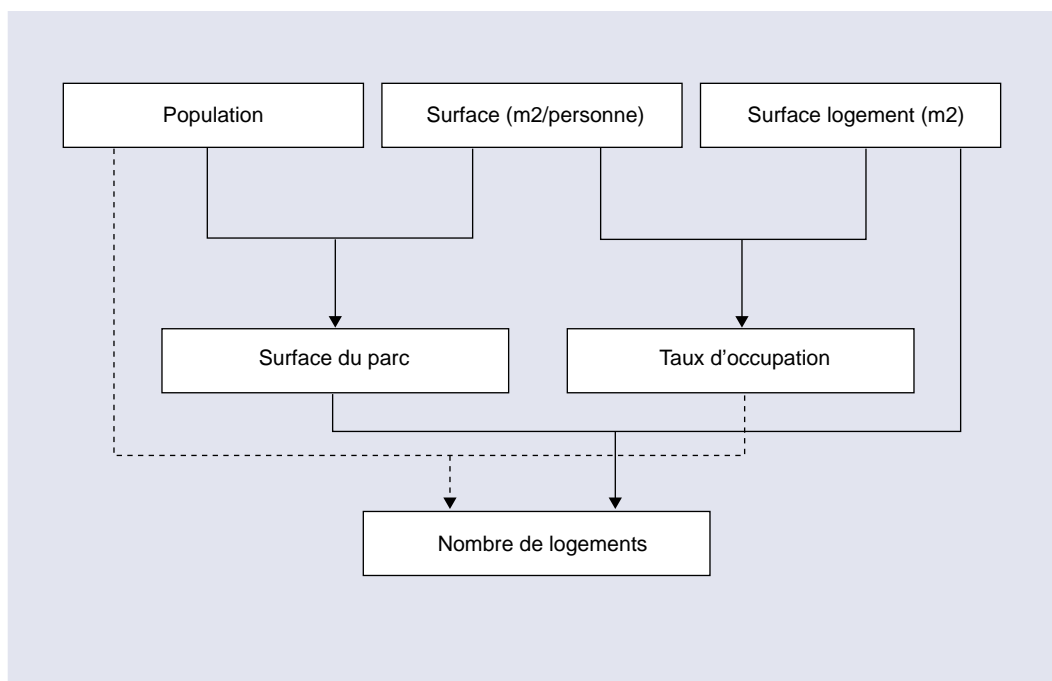


Figure 12
Projection des
caractéristiques du parc

Les projections de la population et des conditions de logement (2000-2050)

La population de la France métropolitaine s'élevait à 58.490.000 habitants environ en 1997. L'INED, Institut national d'études démographiques, a établi trois scénarios d'évolution de la population (figure 13), à partir des données de 1995 (58.130.000 habitants).

Trois projections ont été proposées par cet institut jusqu'à 2050 :

- une projection basse (fécondité 1,5, migrations nettes + 50.000 par an) ;
- une projection centrale (fécondité 1,8, migrations nettes + 50.000 par an) ;
- une projection haute (fécondité 2,1, migrations nettes + 50.000 par an) ;

La projection centrale de l'INED a été adoptée, qui montre une stabilisation de la population dès 2030, autour de 65 millions d'habitants, suivie d'une baisse légère dans les deux dernières décennies de la projection. Cette projection correspond, jusqu'à 2025, à un taux d'accroissement de population de 0,35% par an, constaté depuis plusieurs années (figure 14), mais les deux courbes divergent ensuite.

L'accroissement du parc de résidences principales s'effectue au rythme de 260.000 logements par an.

Si le taux de croissance était maintenu jusqu'en 2050, le parc atteindrait alors 37,18 millions d'unités. Il est peu probable que ce soit le cas, compte tenu de la stagnation de la population projetée aux alentours de 2030 : le nombre de personnes par logement pourrait en effet descendre en moyenne à 1,75, alors qu'il est voisin de 2,4 en 1999.

La décroissance prévisible du nombre de personnes par logement, sans être aussi rapide, est cependant justifiée par un certain nombre d'évolutions sociales et démographiques. Les travaux de l'Institut national de la démographie (I.N.E.D.) projettent :

- une augmentation du nombre de personnes seules, notamment des personnes âgées ;
- une augmentation du nombre de familles monoparentales ;
- une diminution du nombre de familles nombreuses.

Les traits les plus marquants de l'évolution du logement se manifestent en faveur :

- de logements mieux adaptés, en particulier aux personnes âgées ;
- de logements plus grands, destinés aux familles monoparentales et aux familles "recomposées" ;

- d'un meilleur accès aux centres urbains, se traduisant par une demande plus forte vers l'ancien ;
- d'une amélioration générale du confort.

On retiendra en particulier l'augmentation de la surface disponible par personne : la courbe de croissance est ainsi prolongée jusqu'en 2050. Le taux de croissance annuel est en baisse progressive depuis 1983 : de 2% à cette date, il décroît à 1% en 2000, et serait proche de zéro (0,1%) en 2050. La surface habitable par personne, voisine de 36 mètres carrés en 2000, se stabiliserait à 45 ou 46 mètres carrés en 2050. Une progression

similaire est projetée pour la surface moyenne d'un logement : de près de 89 mètres carrés en 2000, elle atteindrait 100 mètres carrés en 2050 (figure 15).

Cette double évolution permet de calculer le taux d'occupation moyen des logements, qui se stabiliserait à 2,2 personnes par logement en 2050, alors qu'il atteint 2,45 en 2000 (Figure 16).

Ces chiffres sont proches des estimations réalisées en 1995-1996 par le LTI-Research Group pour la Commission européenne¹⁷ : la surface habitable par personne s'élèverait en 2050 à 42 m² en

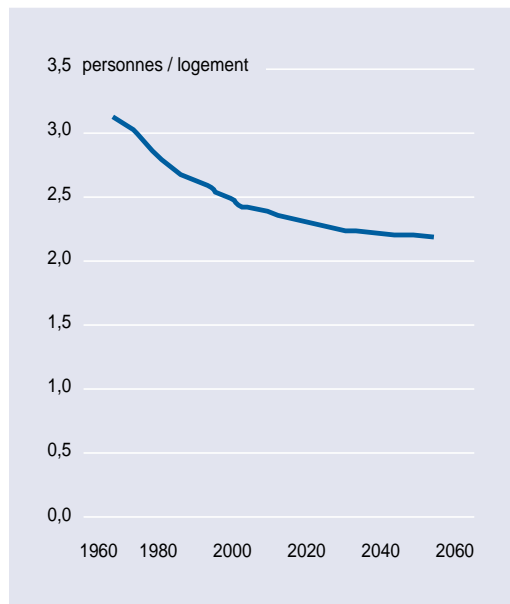
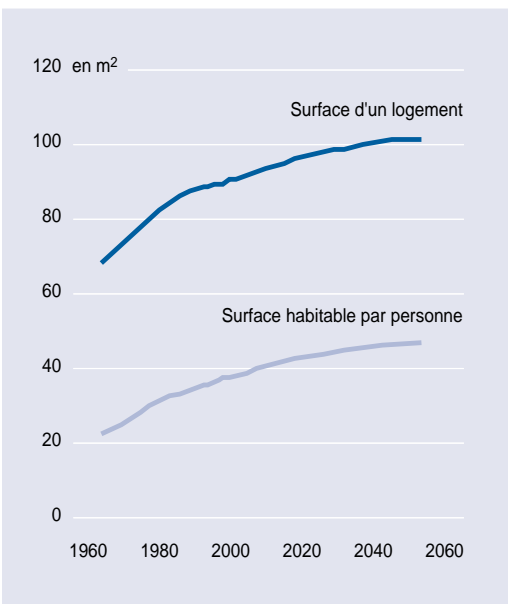
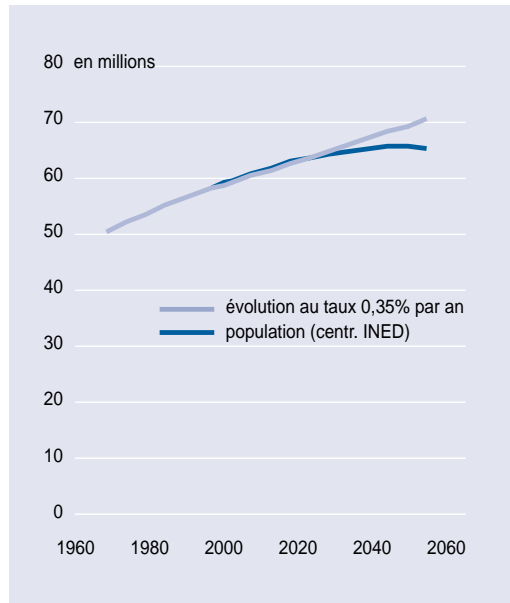
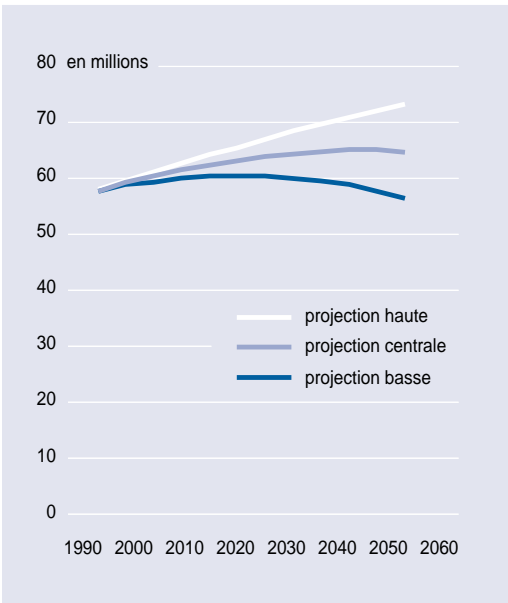


Figure 13
Projections de population
INED

Figure 14
Comparaison de deux
projections de population

Figure 15
Projection des surfaces
moyennes

Figure 16
Taux d'occupation moyen
des logements

Tableau 15
Hypothèses d'évolution du logement en 2050

	France, Scénario " ECODEV "	Europe, Scénario " LTI-Research Group "
Surface habitable (m2/personne)	45	42
Surface moyenne d'un logement (m2)	100	94
Taux d'occupation moyen (nombre de personnes/logement)	2,20	2,24

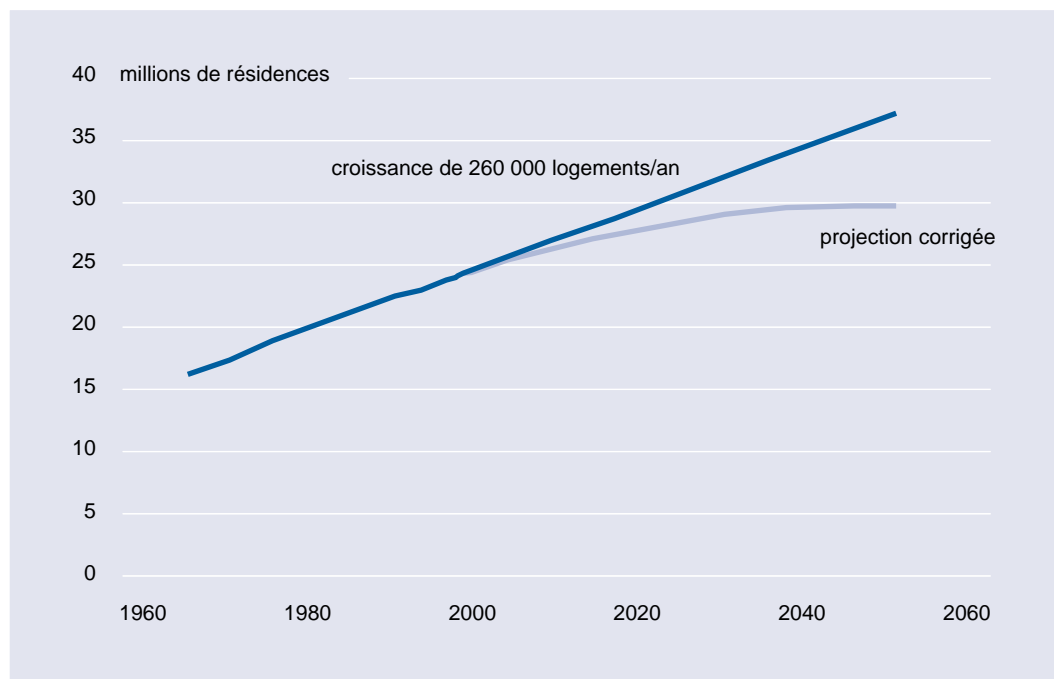


Figure 17
Evolution du parc, en millions de résidences principales

moyenne pour l'Europe, chiffre basé sur le niveau supérieur actuel des états européens. Au taux de 2,24 personnes par logement, la surface moyenne d'un logement s'établirait à 94 m² (tableau 15). Le nombre de logements (obtenu par le rapport : population / taux d'occupation) est ainsi estimé à 29,6 millions d'unités en 2050. Compte tenu de

la stagnation de la population projetée au milieu du siècle et de la stabilisation des taux d'occupation, le nombre de logements atteint également un palier, très distinct du niveau que l'on obtiendrait avec une augmentation continue du nombre de logements, au rythme actuel de 260.000 logements par an (figure 17).

L'évolution du parc : estimation des entrées et sorties annuelles

Les projections établies ci-dessus permettent de dresser l'évolution du parc de résidences principales, en mètres carrés habitables : la taille du parc, qui a doublé entre 1968 et 2000, connaîtrait un accroissement de près de 50% dans les cinquante années à venir pour atteindre 2.960 millions de mètres carrés en 2050 (figure 18).

L'accroissement annuel du parc, qui approche actuellement 30 millions de mètres carrés, serait deux fois plus faible dans trente ans, et proche de zéro au milieu du siècle (figure 19). Cet accroissement des surfaces totales résulte de l'augmentation de la population et de l'augmen-

tation de la surface habitable par personne. A partir de cette évolution mécanique, il est possible d'apprécier le jeu des entrées par construction et des sorties par démolition ou par affectation à d'autres usages. Pour la période 1998-2000, l'apport annuel par construction a été estimé à environ 31 millions de mètres carrés par an (plus de 325.000 logements d'une surface unitaire moyenne de 95 m²). La construction neuve devrait se réduire progressivement, pour se consacrer exclusivement au remplacement des sorties du parc en 2050, puisque le parc atteindrait un palier au milieu du siècle.

Après une forte décreue des sorties du parc entre 1968 (au cœur d'une période de "rénovation" lourde, accompagnée de destructions massives de tissus urbains anciens) et 1993, le mouvement semble se stabiliser à 1,5 millions de mètres carrés par an. Il est toutefois difficile de déterminer la nature des logements extraits du parc, qu'il s'agissent de leur taille ou de leur âge. Dans le

passé, il pouvait s'agir de logements anciens de taille réduite, détruits ou réunis. Récemment, la sortie par démolition concerne aussi des immeubles de l'urbanisme collectif des années 1960-1970. Leur localisation selon les zones climatiques, qui peut refléter les mobilités résidentielles entre les différents bassins d'emplois, est également délicate.

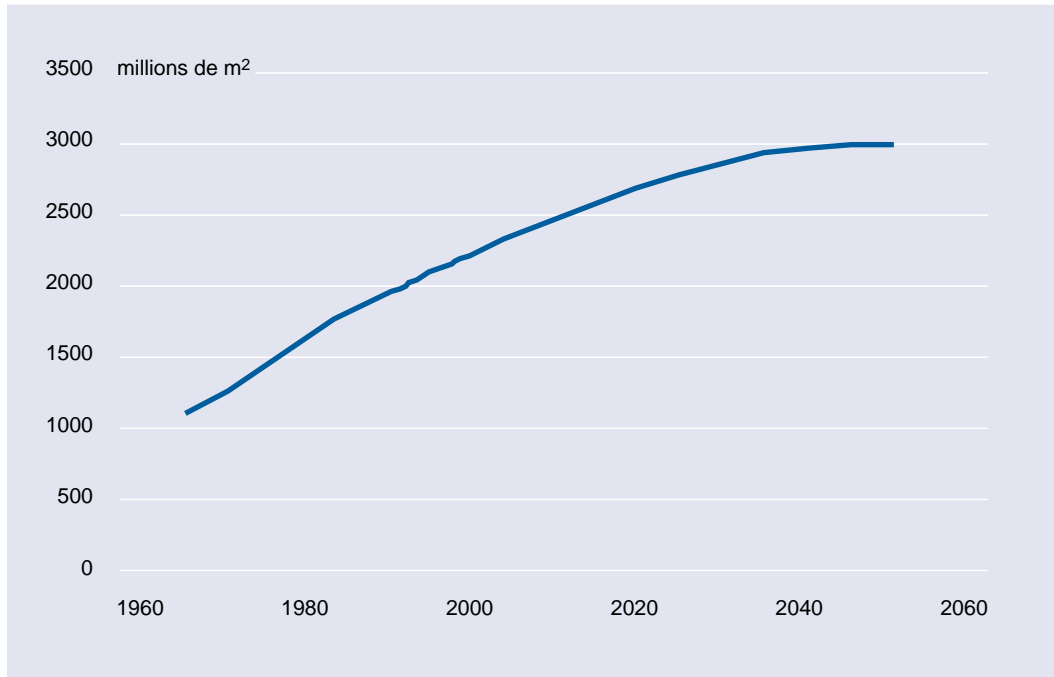


Figure 18
Projection de la taille du parc

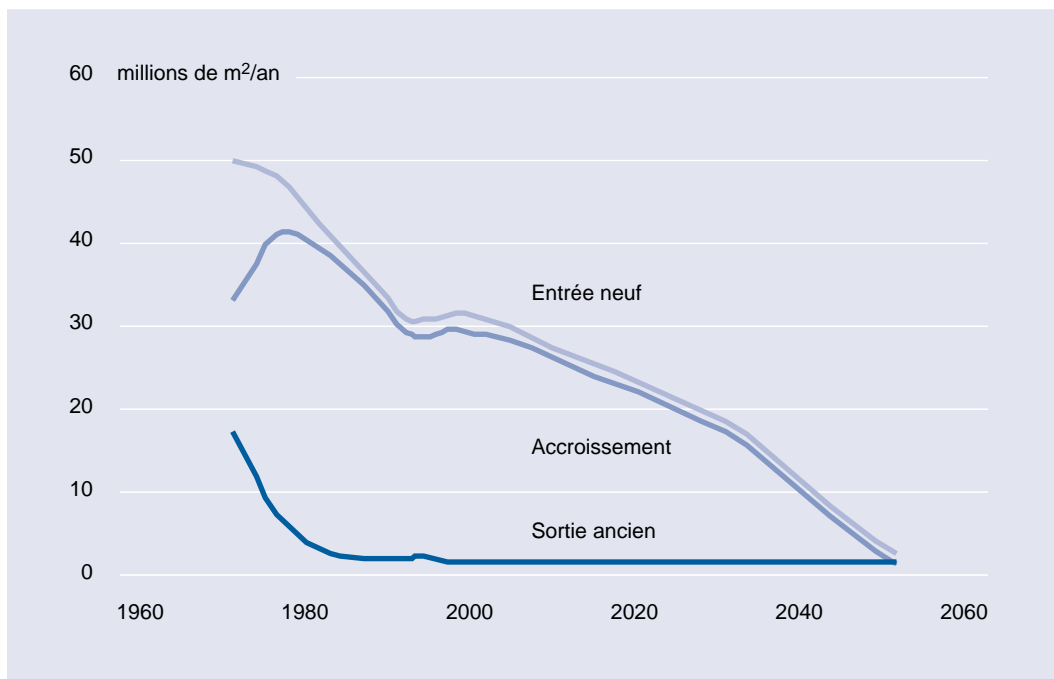


Figure 19
Mouvements dans le parc

L'impact de la construction neuve : les deux réglementations thermiques

Le scénario de référence : maintien de la réglementation de 1989

Chaque année, le parc se renouvelle - et s'accroît - par entrée de logements neufs, répondant à la réglementation thermique en vigueur, tandis qu'un nombre plus réduit de logements anciens sort du parc, dont une faible partie disparaît par démolition. Dans ce scénario de référence, les sorties du parc ont été affectées d'un taux décroissant de consommation de 398 kWh/m² en 1973 à 250 kWh/m² en 2050, pour tenir compte de l'amélioration lente et progressive du parc ancien. L'entrée jusqu'en 2050 de logements neufs répondant à la réglementation thermique de 1989 (soit une consommation unitaire moyenne estimée à 88 kWh/m²) se traduirait par un accroissement continu de la consommation du parc, de 378 TWh en 2000, à 400 TWh en 2010, avant de se stabiliser à 435 TWh à partir de 2040 (figure 20) : la poursuite de la construction neuve, au niveau de performance établi par la réglementation en vigueur dans la période 1989-2000, ne permettrait à elle seule une décroissance de la consommation totale du parc qu'à la condition d'une augmentation limitée de la taille du parc, inférieure à 10 millions de mètres carrés par an, trois fois plus faible qu'aujourd'hui.

Scénario 1 : mise en place de la nouvelle réglementation thermique (NRT 2000)

Le renforcement thermique devrait se traduire par une réduction des consommations unitaires du logement neuf de 10% tous les cinq ans. Dans ce scénario, un tel accroissement des exigences est étendu, par hypothèse, jusque 2045-2050 : la consommation annuelle du neuf devrait en conséquence se limiter à 31,7 kWh/m² dans cette période (tableau 12). Ces exigences devraient être satisfaites dans des conditions économiques raisonnables, au moins dans les premières décennies : le seuil de 50 kWh/m², qui est déjà atteint dans certains logements individuels à chauffage électrique (données CEREN), serait requis pour l'ensemble du parc vers 2025 (figure 21).

Plusieurs facteurs d'évolution du logement devraient faciliter la progression des performances unitaires :

- une répartition entre la maison individuelle et le collectif, qui tend à l'équilibre ;
- une taille croissante des logements, qui joue en réalité uniquement par l'effet d'échelle, dans l'expression des consommations unitaires (par m³ ou par m² de volume ou de surface habitable) ;

Figure 20
Consommation du parc selon la réglementation thermique de 1989 (TWh/an)
Scénario de référence
Témoin RT 89 : jeu des entrées sorties après 2000, sans réhabilitation de l'existant
(entrées par construction neuve selon la réglementation 1989-2000)

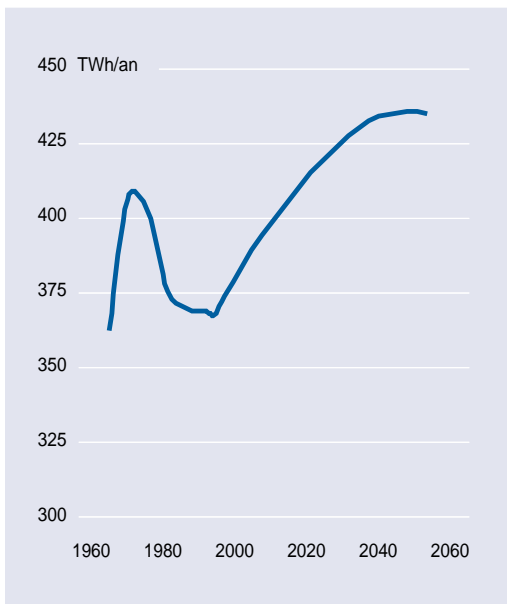
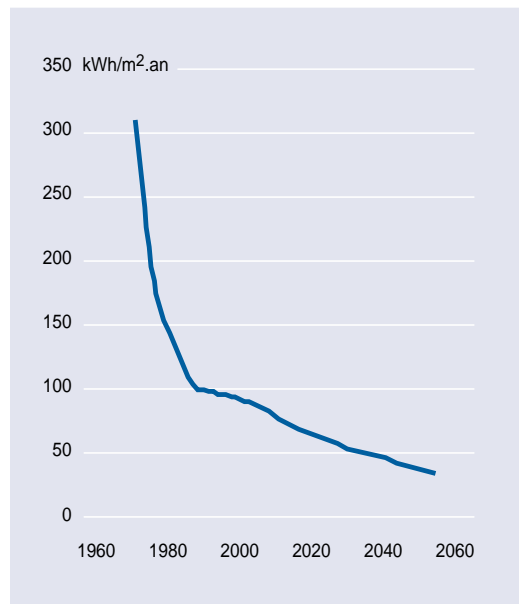


Figure 21
Consommations unitaires du logement neuf



- une mobilité résidentielle qui s'effectue en priorité vers les climats moins rigoureux (zones H2 et H3). Du point de vue constructif, différentes technologies devraient concourir à l'amélioration de l'isolation thermique :

- une réduction des ponts thermiques (d'un k linéique des planchers et toitures, respectivement de 0,4 et 0,8 W/m°C, à 0,3 W/m°C) ;
- une amélioration des conductivités des matériaux isolants et une optimisation des épaisseurs (U murs et toitures de 0,25 et de 0,13 W/m²C respectivement) ;
- l'utilisation de vitrages à isolation renforcée et de fermetures performants (U jour-nuit voisin de 1 W/m²C) ;

On parviendrait ainsi à des besoins de chauffage de l'ordre de 50 kWh/m² en zone H1 pour la maison individuelle avec une récupération de chaleur sur l'air extrait (double-flux, soit un taux de renouvellement d'air apparent de 0,2 volume/heure). L'optimisation des apports solaires, et l'amélioration des performances des systèmes de chauffage devraient concourir aux objectifs recherchés, en moyenne pour les trois zones, en 2045.

Une politique aussi volontariste exigerait que la totalité des innovations technologiques soit généralisée rapidement à l'ensemble du parc, au fur et

à mesure de leur apparition. C'est le cas des vitrages à isolation renforcée (VIR) : la consommation d'un logement neuf ainsi équipé et répondant par ailleurs à la réglementation 2001, pour les autres composants de l'enveloppe, voit sa consommation réduite à 66 kWh/m². Cette valeur recoupe le renforcement de la réglementation vers 2015 : on peut supposer en effet que la généralisation des VIR dans la construction neuve s'effectuera à cette échéance de 10 ou 15 ans.

L'impact de la réglementation appliquée au logement neuf est évalué par comparaison avec le scénario précédent, en affectant au parc neuf, dès 2000, le taux de 81,8 kWh/m², puis une valeur décroissant progressivement à 31,7 en 2045-2050. La consommation totale tend à se stabiliser vers 2035 à 413 TWh (figure 22).

Entre ces deux scénarios de construction neuve (renforcement de la nouvelle réglementation ou maintien des niveaux de normes "1989"), le gain serait de l'ordre de 3 TWh en 2010, ce qui représente une baisse de moins de 1% de la consommation totale du parc résidentiel. C'est seulement vers 2050 que deviendraient sensibles les effets du renforcement de la réglementation, avec un gain d'environ 24 TWh par rapport au maintien des consommations actuelles du neuf (tableau 16).

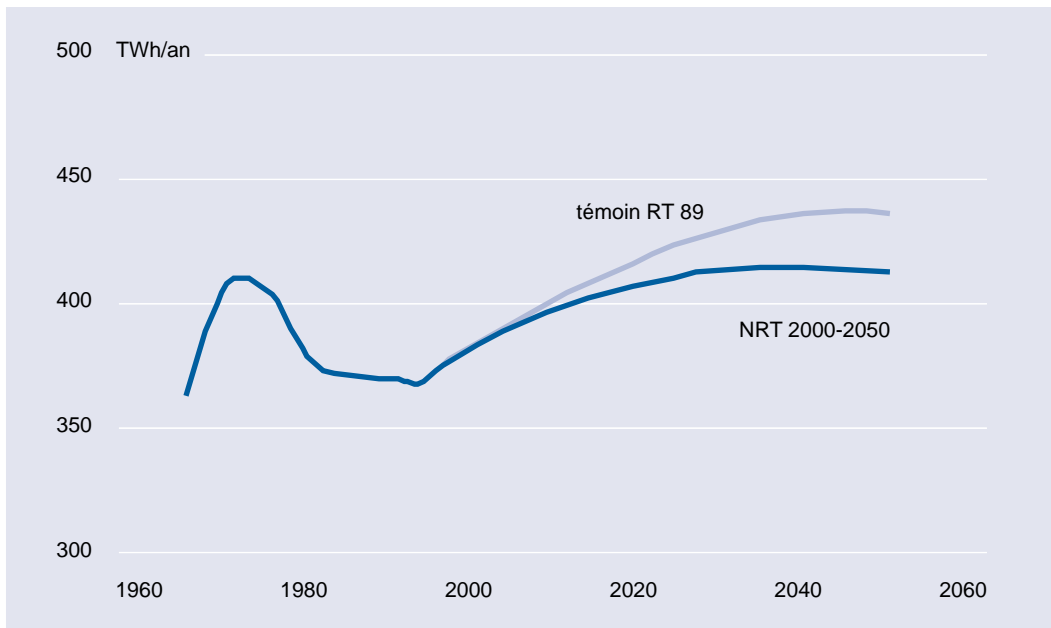


Figure 22

Impact de la nouvelle réglementation thermique (TWh/an)

Comparaison du scénario 1 / scénario de référence

Témoin RT 89 : jeu des entrées sorties après 2000, sans réhabilitation de l'existant

(entrées par construction neuve selon la précédente réglementation)

NRT : id., avec la nouvelle réglementation thermique de la construction neuve progressive

(première étape applicable en juin 2001)

	2000	2010	2025	2050
Scénario de référence (RT 1989) (TWh/an)	378	398	422	435
Gain Scénario 1 " NRT 2000 " (TWh/an)	-	3	13	24
Gain Scénario 1 " NRT 2000 " (%)	-	-0,75	-3	-5,5

Tableau 16

Scénario "Nouvelle réglementation thermique"

La poursuite de la réhabilitation du parc existant

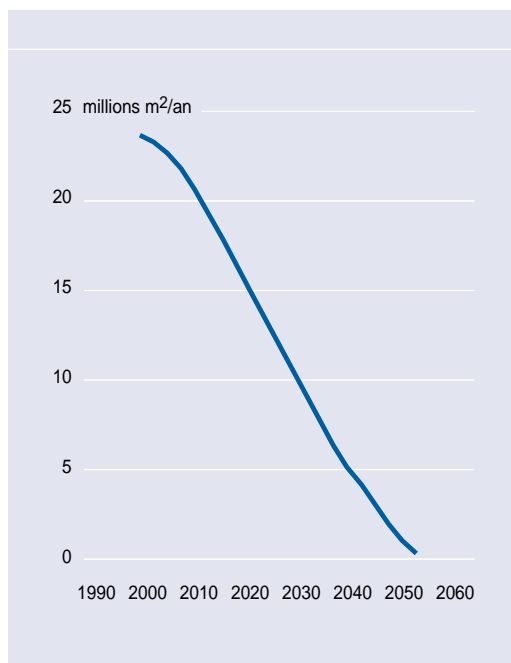


Figure 23

Surfaces de logements réhabilités

Les logements construits avant 1975

En 1998, le pourcentage de logements construits avant 1975 était de 67%, soit près de seize millions de logements, dont près de la moitié peut être considérée comme réhabilitée entre 1975 et 1998, au taux d'un gain moyen de 200 kWh/m² sur la consommation annuelle de chauffage.

Dans ce deuxième scénario alternatif, la réhabilitation complémentaire des quelque 580 millions de mètres carrés restant (compte tenu de la sortie probable du parc de 70 millions de mètres carrés de logements anciens dans l'intervalle 2000-2050) est supposée répartie selon une courbe décroissante jusque 2050 (Figure 23). Une politique volontariste de travaux de maîtrise de l'énergie dans le parc existant serait ainsi relancée dans cette hypothèse, à un taux supérieur à 200.000 logements par an dans la première décennie 2000-2010 : le rythme des années 1985-1990, tel qu'il a été estimé précédemment, serait donc rétabli.

Le taux annuel de réhabilitation pour l'intervalle 2000-2050 serait en moyenne de 150.000 logements de 77 mètres carrés. Le gain de perfor-

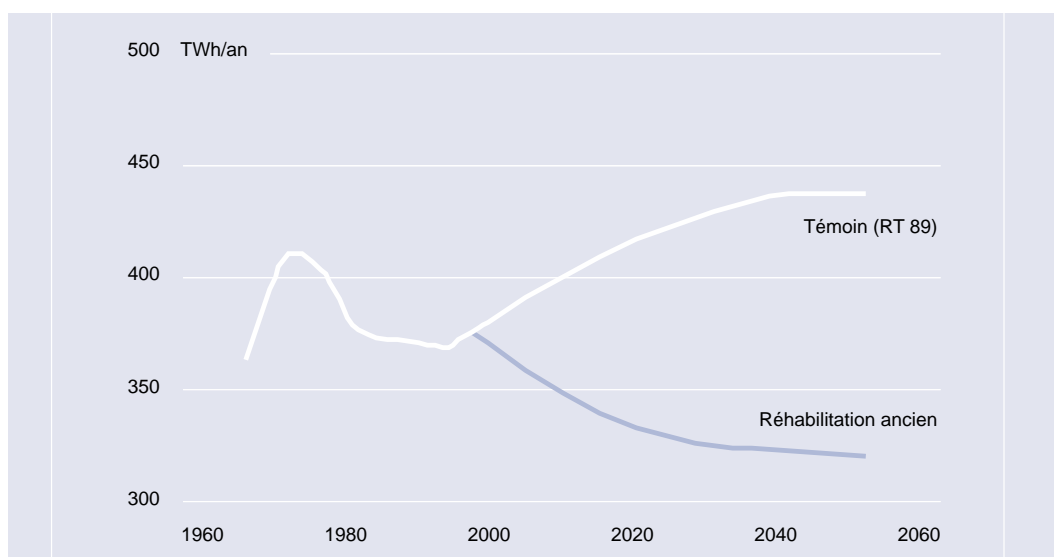


Figure 24

Poursuite de la réhabilitation (TWh/an)

Comparaison du scénario 2 / scénario de référence

"Témoin RT 89" : jeu des entrées sorties après 2000, sans réhabilitation de l'existant

(entrées par construction neuve selon la précédente réglementation)

"Réhabilitation" : mesure précédente + réhabilitation au taux de 200kWh/m².an, selon la courbe de la figure 23.

Tableau 17

Scénario "Réhabilitation du parc antérieur à 1975"

	2000	2010	2025	2050
Scénario de référence (TWh/an)	378	398	422	435
Gain Scénario 2 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 " (TWh/an)	9	52	96	117
Gain Scénario 2 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 " (%)	-2%	-13%	-22%	-27%

Tableau 18

Scénario "Réhabilitation du parc antérieur à 1975"

	2000	2010	2025	2050
Scénario de référence (TWh/an)	378	398	422	435
Gain Scénario 3 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 + VIR " (TWh/an)	9	57	109	142
Gain Scénario 3 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 + VIR " (%)	-2%	-14%	-26%	-33%

mance est supposé constant, à 200 kWh/m² sur la consommation annuelle de chauffage, traduisant une application de technologies plus avancées (isolation de l'enveloppe, gestion de l'air et des apports solaires, équipements de chauffage), à un parc de qualité moyenne en hausse progressive.

Scénario 2 : les gains attendus de la réhabilitation

Par rapport au scénario de référence de la construction neuve (maintien des niveaux des normes "1989"), les gains de la réhabilitation seraient immédiats : la baisse de la consommation totale du parc s'amorce dès 2000, grâce à l'amélioration thermique de plus de 200.000 logements par an (figure 24).

La réhabilitation de la totalité du parc antérieur à 1975 (dont une part de 50% aurait été déjà assurée avant 1998) entraînerait une réduction très sensible de la consommation totale, bien supérieure à celle du scénario précédent, de plus de 50 TWh en 2010, et de près de 120 TWh (soit cinq fois plus que la seule NRT 2000) en 2050 (Tableau 17).

Scénario 3 : réhabilitation et généralisation des vitrages à isolation renforcée

Les scénarios précédents intègrent différents progrès techniques dans la réduction projetée des consommations d'énergie de chauffage, concernant l'enveloppe comme les équipements de chauffage et de ventilation, ainsi que certains dispositifs architecturaux (exposition des vitrages, inertie thermique de la construction) permettant

une meilleure valorisation des gains solaires. L'impact d'une innovation technique particulière, appliquée aux parois vitrées, peut également être considéré. La généralisation des vitrages à isolation renforcée (VIR) à la totalité du parc actuel pourrait accroître le potentiel de gains technologiques dans le parc existant, qui apparaît déjà considérable dans le scénario précédent. Associés à des fermetures (persiennes, volets, etc.) de perméabilité faible, ces doubles vitrages, à faible émissivité, la lame d'air (de 12 à 16 mm) contenant de l'argon, permettent d'abaisser le coefficient de déperditions (U jour nuit) à des valeurs voisines de 1 W/(m².K). On a considéré ici une valeur moyenne U jour nuit avec menuiserie de 1,65 W/m².K, ce qui permet de réduire les déperditions de moitié par rapport à un double vitrage "norma" non équipé de protections nocturnes.

Le gain annuel unitaire (en surface habitable) est estimé à 12 kWh/m². La généralisation progressive, en cinquante ans, des VIR dans les 2.130 millions de mètres carrés habitables qui constituent le parc en 2000 (en équipant 42,6 millions de mètres carrés habitables par an) se traduirait par un gain supplémentaire de 5 TWh en 2010 et de plus de 25 TWh en 2050 (tableau 18). Ce gain additionnel apparaît équivalent à celui qui serait obtenu par la seule application de la nouvelle réglementation thermique.

Les perspectives ainsi ouvertes devraient contenter les professionnels du verre : pour les cinquante ans à venir, le remplacement total des vitrages du parc existant entraînerait une augmentation de la consommation de verre plat de 20 à 30% (selon le taux de logements déjà équipés en double vitrage en 2000).

Les différentes mesures et les émissions de gaz à effet de serre

La consommation d'énergie de chauffage

La perspective la plus optimiste consiste à cumuler, à l'échéance de 2050, l'ensemble des évolutions projetées :

- la poursuite de la réhabilitation de l'existant ;
- le renforcement de la réglementation de la construction neuve ;

- l'équipement complet du parc, neuf au travers de la NRT, et existant en complément de la réhabilitation "standard", en vitrages à isolation renforcée.

Le scénario 2, estimé le plus performant, est comparé directement au scénario de référence. Les deux autres mesures sont appliquées en cumul une par une (tableau 19).

En TWh/an	2000	2010	2025	2050
Scénario de référence (RT 1989)	378	398	422	435
Scénario 2 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 "	369	346	326	318
Scénario 2 + " NRT 2000 "	369	343	313	294
Scénario 2 + " NRT 2000 " + VIR	369	338	300	269
Gain total par rapport à la référence	9	60	122	167
	(-2%)	(-15%)	(-29%)	(-38%)

Tableau 19
Cumul des différents scénarios et consommation d'énergie

Le gain d'énergie de chauffage par rapport à la consommation témoin basée sur la réglementation RT 1989 serait de 60 TWh en 2010, et approcherait 170 TWh en 2050, la consommation du parc dans son ensemble décroissant avant de se stabiliser à 270 TWh/an (figure 25).

La consommation moyenne unitaire serait alors de 90 kWh/m², soit une valeur deux fois moindre que celle qui est estimée en 1998 (179 kWh/m² en moyenne du parc, figure 26).

Ce cumul de mesures est supposé traduire l'effet d'entraînement technologique de la réglementation thermique qui se met en place en 2001, progressive jusqu'en 2050, depuis la construction neuve, à destination du parc existant. C'est en effet dans le parc existant, en particulier antérieur à 1975, que les gains sont potentiellement les plus élevés, à condition qu'y soient diffusées les technologies performantes (isolation des parois vitrées et opaques, contrôle des infiltrations, installations de chauffage)

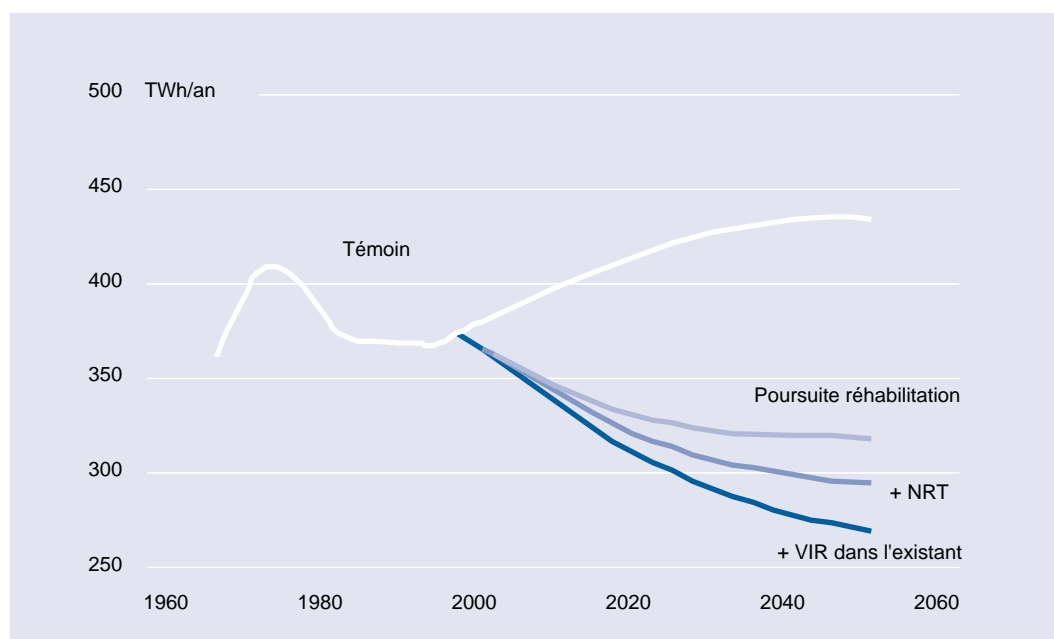


Figure 25

Cumul des scénarios

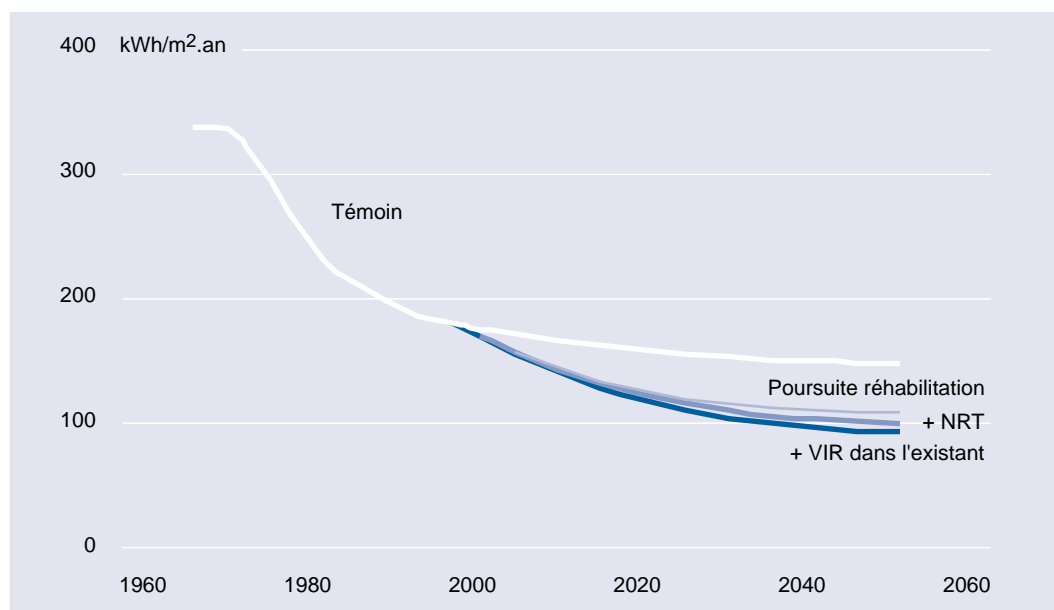


Figure 26

Consommation moyenne de l'ensemble du parc

"Témoin RT 89" : jeu des entrées sorties après 2000, sans réhabilitation de l'existant (entrées par construction neuve selon la précédente réglementation)
 "Réhabilitation" : mesure précédente + réhabilitation au taux de 200kWh/m².an.
 + NRT : mesures précédentes + renforcement de la réglementation applicable à la construction neuve
 + VIR : mesures précédentes + généralisation progressive des VIR dans le parc antérieur à 2000.

promues par la nouvelle réglementation. On peut supposer que la réglementation a été conçue dans l'objectif d'une diffusion "naturelle" des avancées technologiques. Il faut toutefois souligner que celle-ci est censée s'exercer depuis le secteur de la construction neuve, contraint par des niveaux réglementaires, vers le parc existant, qui, à l'inverse, ne l'est pas. La diffusion de l'offre industrielle de produits plus performants devra certainement être accompagnée des différents types d'aide qui ont fait leur preuve dans le passé : incitations fiscales, aides au diagnostic thermique, formation des professionnels et information des particuliers.

Les émissions de dioxyde de carbone

Les émissions de gaz à effet de serre peuvent également être estimées. La comparaison entre les différentes mesures techniques est enrichie d'une dimension supplémentaire : si les émissions sont réduites proportionnellement aux gains de consommation d'énergie, le déclin continu du charbon et du fioul au profit de l'électricité et du gaz apporte également un gain d'émission par unité d'énergie finale consommée¹⁸.

Cette baisse structurelle des émissions liées au chauffage des résidences principales est significative : sous l'effet des transferts des parts du charbon et du fuel vers le bois, l'électricité et le gaz, comme sources d'énergie pour le chauffage, le gain serait par kWh, de près de 20% entre 1993 et 2050¹⁹. Pour 185 gCO₂/kWh d'énergie finale de chauffage, en 1998, l'émission décroît à 155 gCO₂/kWh en 2050 (figure 27).

Appliquée au scénario de référence, cette baisse structurelle permettrait de maintenir les émissions à un niveau pratiquement constant, voisin de 70 MtCO₂/an (figure 28) soit 19 MteC/an. La stabilisation des émissions dues au confort thermique dans l'habitat serait ainsi obtenue par une seule mesure technique, liée aux équipements de chauffage du parc (qu'il s'agisse des transferts de part de marché entre sources, ou de l'amélioration des performances des systèmes les plus émetteurs, tels le fioul), conjuguée au statut quo, les entrées par construction neuve s'effectuant selon la précédente réglementation dans le simple jeu des

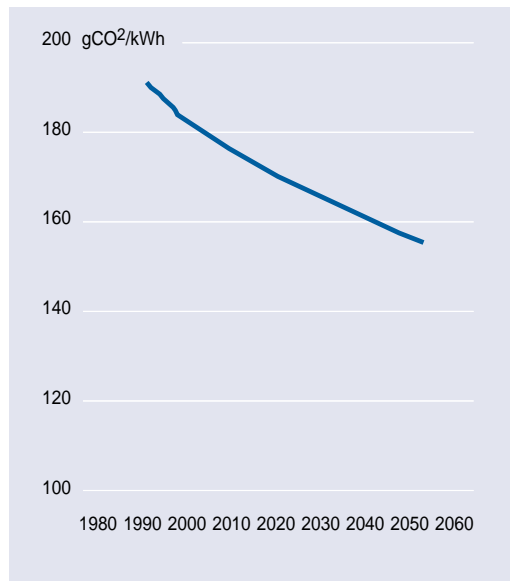


Figure 28

Emissions de CO₂ dues au chauffage

"Témoin à 185 g CO₂/kWh" : jeu des entrées sorties après 2000, sans réhabilitation de l'existant (entrées par construction neuve selon la précédente réglementation)

"Référence RT 1989" : mesure précédente + évolution des énergies de chauffage

"Réhabilitation" : mesure précédente + réhabilitation au taux de 200kWh/m².an.

+ NRT : mesures précédentes + renforcement de la réglementation applicable à la construction neuve

+ VIR : mesures précédentes + généralisation progressive des VIR dans le parc antérieur à 2000.

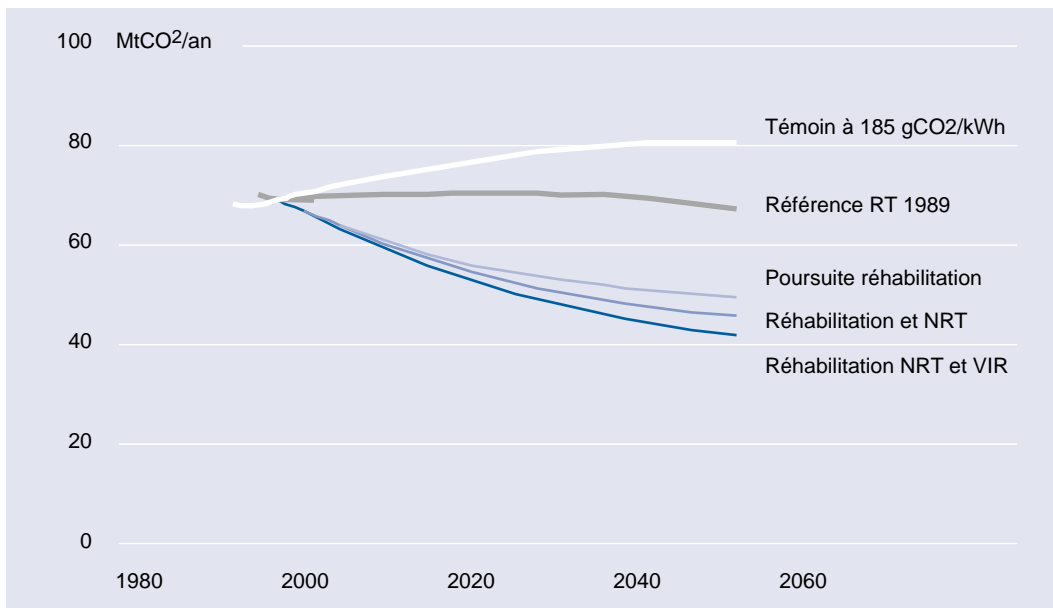


Figure 27

Emissions de CO₂

entrées sorties à partir de 2000, sans réhabilitation de l'existant. Le maintien de la structure actuelle des équipements de chauffage se traduirait au contraire par une augmentation constante des émissions, avant une stabilisation à plus de 80 millions de tonnes de CO₂ en 2035.

Outre l'évolution prévisible des parts de marché des différentes énergies de chauffage, qui permet de stabiliser immédiatement les émissions, sans aucune autre intervention sur l'évolution du parc (scénario dit de référence), les autres mesures présentent des potentiels de réduction des émissions assez variés, qui peuvent être classés par ordre décroissant de gain par rapport au scénario de référence :

- le scénario 2 "amélioration du parc antérieur à 1975" se traduirait par une réduction de 9 MtCO₂

soit 2,5 MteC en 2010, (5 MteC en 2050) grâce aux effets de la réglementation de 1989 conjuguée avec la réhabilitation annuelle de cent cinquante mille logements environ en moyenne ;

- le scénario 1 "mise en place et renforcement de la réglementation thermique (NRT)" aurait un effet additionnel inférieur à 0,15 MteC en 2010, qui devient plus conséquent en 2050 (1 MteC) ;

- la généralisation en 50 ans des vitrages à isolation renforcée dans le parc antérieur à 2000 apporterait un gain complémentaire de 1 MteC en 2050. Par le cumul de ces différentes mesures, depuis la situation témoin qui bloquerait l'évolution des équipements de chauffage, les émissions de CO₂ seraient réduites de près de 50% en 2050, et de près de 30% par rapport au niveau actuel (tableau 20).

Conclusion

Le scénario témoin (aucune mesure pour l'existant, entrée par construction neuve sans amélioration des performances depuis 1989) se traduit par une stabilisation des émissions dues au chauffage dans la totalité du parc, au niveau de 70 MtCO₂ par an, grâce à la réduction des émissions unitaires des procédés de chauffage (de 190 à 155 gCO₂ par kWh entre 1993 et 2050).

En complément, le cumul des mesures envisagées précédemment (réhabilitation, renforcement de la réglementation dans le neuf, généralisation des vitrages à isolation renforcée dans l'existant) permettrait de réduire les émissions annuelles dues au chauffage, par habitant,

de 0,32 teC (valeur estimée en 1998) à 0,18 teC en 2050 (figure 29).

Une réduction aussi massive des émissions ne pourra être obtenue que par une politique volontariste, telle qu'elle est relancée en 2000 par la nouvelle réglementation thermique, aux conditions suivantes :

- qu'une progressivité similaire à celle qui est dessinée ici soit réellement projetée dans les décennies à venir pour le neuf, ce qui permettrait d'assurer 20% de la réduction en 2050 ;

- que diverses mesures (incitatives, réglementaires, etc.) facilitent rapidement le transfert des technologies depuis le secteur de la construction neuve à celui de la réhabilitation de l'existant, où se situeraient 80% du potentiel de réduction des émissions en 2050, si la généralisation des VIR dans tout le parc antérieur à 2000 est associée aux travaux de maîtrise de l'énergie dans l'existant.

La comparaison des scénarios confirme l'importance d'une vision patrimoniale, qui pourrait être réévaluée à chaque nouvelle échéance réglementaire : 60% de la surface du parc de résidences principales, tel qu'il a été projeté en 2050, serait en effet déjà construit aujourd'hui.

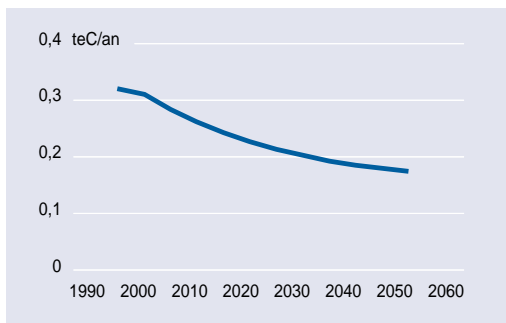


Figure 29

Émissions par habitant (en teC/an)

	2000	2010	2025	2050
Témoin (185 gCO ₂ /kWh)	70	74	78	80
Scénario de référence (RT 1989) (MtCO ₂)	69	70	70	67
Scénario 2 " Réhabilitation du parc antérieur à 1975 " (MtCO ₂)	67	61	54	49
Scénario 2 + " NRT 2000 " (MtCO ₂)	67	60	52	45
Scénario 2 + " NRT 2000 " + VIR (MtCO ₂)	67	59	50	41
Gain total par rapport au " témoin " (MtCO ₂)	3	14	28	39
Gain total par rapport au " témoin "	-4%	-19%	-36%	-48%

Tableau 20

Cumul des différents scénarios et émissions de CO₂

Morphologies urbaines

Analyse comparative de morphologies urbaines

Les objectifs et le cadre de l'analyse

Le contexte : dispersion et mobilité

La priorité donnée, dans l'analyse précédente, aux mesures techniques de réduction des consommations d'énergie de chauffage, ne doit pas occulter les autres postes de consommation d'énergie et de matériaux qui interviennent dans le cycle de vie du logement (construction, exploitation, démolition) et dans les usages induits, notamment les déplacements quotidiens. La question de la mobilité locale est devenue préoccupante : le secteur des transports est principalement responsable de l'augmentation des rejets de polluants dans l'air, et considéré comme une des sources principales de nuisance, notamment par le bruit. L'augmentation du nombre de déplacements et des distances parcourues résulte d'un contexte favorable à l'extension urbaine, qui oriente vers la périphérie les développements des résidences et des activités commerciales ou culturelles. Le taux de croissance annuel de la population est en effet plus élevé à la périphérie ; il atteint :

- 0,12% dans les villes-centres ;
- 0,42% dans les banlieues ;
- 1,03% dans les couronnes péri-urbaines²⁰.

Le mouvement vers la périphérie s'opère essentiellement de la part des familles quittant le centre saturé pour des logements plus spacieux et plus aptes à accueillir les enfants. Plusieurs facteurs ont encouragé le mouvement :

- le coût du logement en centre ville s'élève constamment ;
- la politique du prêt "à taux zéro", qui a joué surtout en faveur du logement individuel, tend à rejeter les familles les plus modestes vers les zones où la charge foncière est la plus réduite, l'économie apparente se trouvant rapidement annulée par le coût des trajets quotidiens ;

- les familles trouvent difficilement une extension de l'espace du logement dans l'espace public, largement dévolu à la voiture, qu'elle soit en mouvement ou en stationnement.

Ce mouvement tend cependant à se ralentir : alors que les villes-centres perdaient régulièrement des habitants depuis 1975, elles connaissent aujourd'hui une croissance de population parfois au détriment de celle de la banlieue. Pour d'autres aires urbaines, la progression de la banlieue ralentit le développement de la couronne périurbaine comme celui de la ville centre. Le cas de Paris est le plus critique : c'est une des rares aires urbaines qui continue à perdre des habitants.

Le coût énergétique et environnemental de cette dispersion urbaine généralisée doit être évalué, et situé dans l'ensemble des dépenses énergétiques du logement. La comparaison doit s'exercer simultanément :

- entre différents types d'habitat ;
- entre les différentes consommations d'énergie pour un même logement.

L'unité urbaine pertinente et les trois types d'habitat

L'unité urbaine intégrant les infrastructures du logement et de la voirie apparaît comme la plus adéquate pour aborder de front l'ensemble des besoins énergétiques, dont les transports. L'échelle qui est adoptée pour la représentativité de l'organisation des espaces publics et privés (bâtiments, parcelles, espaces verts, équipements, voiries et stationnement) est celle du quartier. Trois cas contrastés sont proposés :

- l'immeuble en centre ancien dense ;
- le grand ensemble de l'urbanisme collectif en première couronne ;
- le pavillonnaire en lotissement périphérique.

La comparaison de trois types de construction et de trois types d'urbanisme est destinée à évaluer les effets de la croissance urbaine, face aux mesures de revitalisation des centres ville et de la banlieue proche. Chaque cas est également représentatif d'une période de construction : le logement ancien, le logement de la construction intensive d'avant 1975, la maison individuelle récente.

Les dépenses énergétiques et les émissions

Les dépenses énergétiques qui seront évaluées pour ces trois ensembles de logements et les voiries qui leur sont associées, intégreront les phases de construction et d'entretien des infrastructures, en complément de la phase d'exploitation. Ces dépenses seront reconstituées en quatre postes principaux :

- l'investissement énergétique de construction et les dépenses énergétiques de réhabilitation ;
- les dépenses de chauffage ;
- les dépenses annexes (eau chaude sanitaire, électricité spécifique, etc.) ;
- les déplacements quotidiens.

Sur l'échantillon retenu, qui présente une gamme

étendue de formes architecturales et de techniques constructives, est considérée la variation de différents critères environnementaux : ponctions de matières premières, consommations d'énergie, émissions de CO₂, tout au long du cycle de vie des bâtiments.

En résumé, l'approche proposée se caractérise par :

- une limitation des indicateurs aux consommations de matériaux de construction, d'énergie, et aux émissions de dioxyde de carbone ;
- une échelle intermédiaire entre le logement et la ville, permettant la mesure de l'impact des choix d'aménagement sur l'environnement, en traitant simultanément les questions de logement et de transport ;
- une reconstitution des dépenses énergétiques du logement liées à la morphologie urbaine.

Afin d'établir des comparaisons dans des conditions climatiques données, l'échantillon a été limité à la région parisienne. Les indicateurs sont évalués sous la forme de ratios :

- par mètre carré de surface habitable de manière à réduire l'effet d'échelle ;
- par habitant, pour refléter le taux d'occupation des logements.

La représentativité des trois ensembles urbains

Les trois âges du logement

Trois périodes de construction partagent le parc résidentiel en parts sensiblement égales :

- les logements d'avant 1949 ;
- les logements de la période de "reconstruction" intensive (1949-1975) ;
- les logements construits après 1975, donc répondant à la première réglementation thermique effective.

Chacune de ces périodes est représentée par un type de logement (figure 30) :

- un appartement d'un immeuble haussmannien à Paris intra muros ;
- un appartement d'un immeuble collectif construit dans les années 1960 et non encore rénové
- une maison individuelle de construction récente, en lotissement.

En réalité, les deux types de programme, maison individuelle et logement en immeuble, se rencontrent à des degrés divers en toute période : pour la première, les programmes de cités jardins de l'entre-deux guerres proposent des solutions

mixtes (collectifs et individuels) en proche banlieue, alors que l'urbanisme des années 1960 privilégie le collectif. Cette situation pourra être simulée en affectant au logement individuel de 1990 des modes constructifs plus anciens, et, à l'inverse, en appliquant aux immeubles d'habitation des solutions d'enveloppe contemporaines.

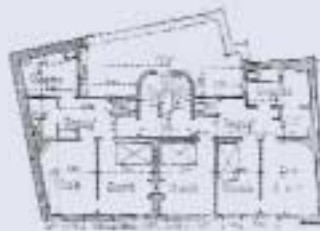
Les conditions d'occupation

Si la suprématie de la maison individuelle semble ralentie dans la construction neuve, en nombre de logements, ce type de résidence contribue néanmoins, en complément de la fusion de logements anciens, à l'augmentation de la surface habitable moyenne. Celle-ci passe de 72 m² en 1973 à 88 m² en 1994 (figure 31).

La diminution de la taille des ménages se traduit conjointement par un accroissement de la surface disponible par personne, donc par une amélioration des conditions de confort :

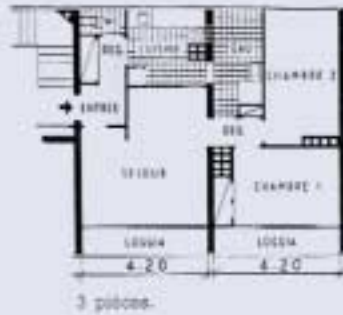
- dans la maison individuelle, elle a augmenté de 18% en huit ans, passant de 33 m² en 1984 à 39 m² en 1996 ;

Figure 30
plans, élévations



Avenue de Versailles, Paris
Habitations ouvrières 1900

Rez-de-ch. + 5 étages + 1 (toit)
Etage courant : 2p + 3p,
104 m² habitables, 4 personnes



Collectif HLM 1960
de type " barre "

Rez-de-ch. + 4 étages + cave
Partie courante : 2p + 3p,
112,4 m² habitables, 4 personnes



Pavillon REX HQE
logement social 1996-97

86 m² sur deux niveaux
+ garage
4 personnes

- dans le logement en immeuble collectif, elle stagne dans la même période à 30 m².

En moyenne pour le parc, la surface habitable par personne croît de 25 m² en 1973 à 31 m² en 1984, puis à 35 m² en 1996.

La situation de Paris est particulière, compte-tenu de la diminution de la taille des ménages, accentuée par le vieillissement de la population. Bien que la quasi totalité des logements se situe en immeubles collectifs, la ville de Paris se place au-dessus de la moyenne nationale pour la surface disponible par personne : celle-ci était pour Paris de 32,1 m² dès 1968, valeur qui ne s'est généralisée à l'ensemble du parc qu'en 1988.

Les données d'occupation des logements pour les trois études de cas (tableau 21) sont issues des chiffres clé de trois ensembles urbains de l'Île de France²¹. La surface habitable par personne est proche de la moyenne nationale pour la maison individuelle. Compte-tenu de la taille plus élevée des ménages, le logement de l'urbanisme collectif, avec ses 25,5 m² par personne, se situe en-dessous de la moyenne nationale.

Pour se rapprocher des moyennes nationales, les surfaces affectées par personne seront de 39 m² pour le pavillon, de 28 m² pour le grand ensemble et de 33 m² pour l'immeuble parisien. Les programmes de logements s'adressent, au

moment de leur construction, sensiblement à la même population : habitations ouvrières de 1900 à Paris, logements sociaux en grand ensemble ou pour l'ensemble périurbain. Dans ce dernier cas, toutefois, les surfaces de logements ont été agrandies pour atteindre 105 m² (ainsi que les surfaces de parcelles), soit la surface de l'unité prise en compte dans les immeubles collectifs (l'étage à Paris, la cage d'escalier pour le grand ensemble).

Les trois zones urbaines

Chaque bâtiment est replacé dans un ensemble urbain ou périurbain donné²² :

- le quartier de Montholon, du 9^{ème} arrondissement à Paris, dans lequel sera situé l'immeuble des "habitations ouvrières" de 1900, car les morphologies, assez proches, sont caractéristiques des quartiers "haussmanniens" ou "post-haussmanniens" ; le bâti est compact, bien desservi par les transports collectifs (figure 32) ;
- le "grand ensemble" de la Ferme du Temple, à Ris Orangis (Essonne), pour l'immeuble des années 1960 ; la densité d'habitants est sensiblement inférieure à la moyenne des grands ensembles de la région parisienne, plus proche de 300 habitants à l'hectare (figure 33) ;
- le lotissement pavillonnaire du Parc de Sénart

Tableau 21

Conditions d'occupation des trois études de cas

	Maison individuelle neuve	Immeuble collectif (Paris)	Bâtiment HLM années 60
Surface habitable moyenne de l'ensemble (m ² /personne)	37,8	39,4	25,5
Moyennes nationales (m ² /personne)	39	30	30
Surfaces adoptées (m ² /personne)	39	33	28

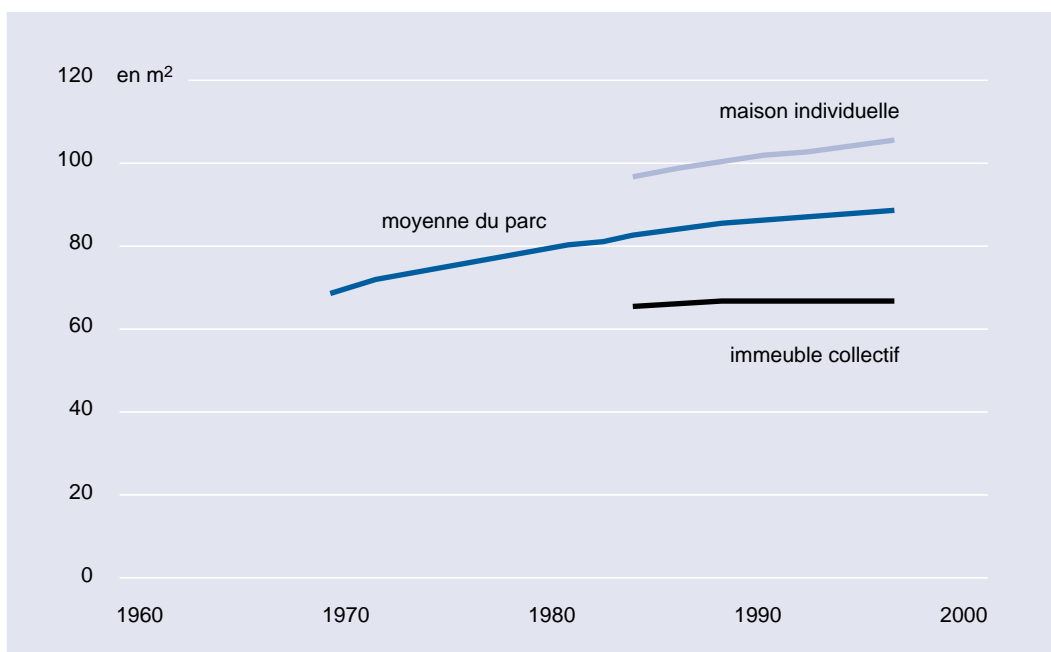


Figure 31

Evolution des surfaces moyennes du parc (en m²)

(Essonne), pour la maison individuelle récente ; représentatif des périphéries de ville, peu desservies par les transports en commun, cette ensemble est très dépendant de l'automobile (figure 34).

Chaque zone ainsi définie connaît aujourd'hui un type de développement spécifique :

- les centres anciens jouissent d'une relative stabilité, grâce notamment aux immeubles d'habitation d'une grande durée de vie, de moins en moins menacés par la rénovation lourde ;

- la banlieue est en chantier, les travaux de réhabilitation s'accompagnant d'une densification des grands ensembles ;

- la périphérie s'étend à mesure de la dilution de la tache urbaine, au bénéfice de la maison individuelle, de qualité constructive souvent médiocre. La consommation de territoire, indicateur environnemental qui devrait être mieux apprécié, accompagne la dilution de la tache urbaine : en Ile de France, 12.740 hectares ont été urbanisés entre 1982 et 1990 soit 1% de l'espace régional.

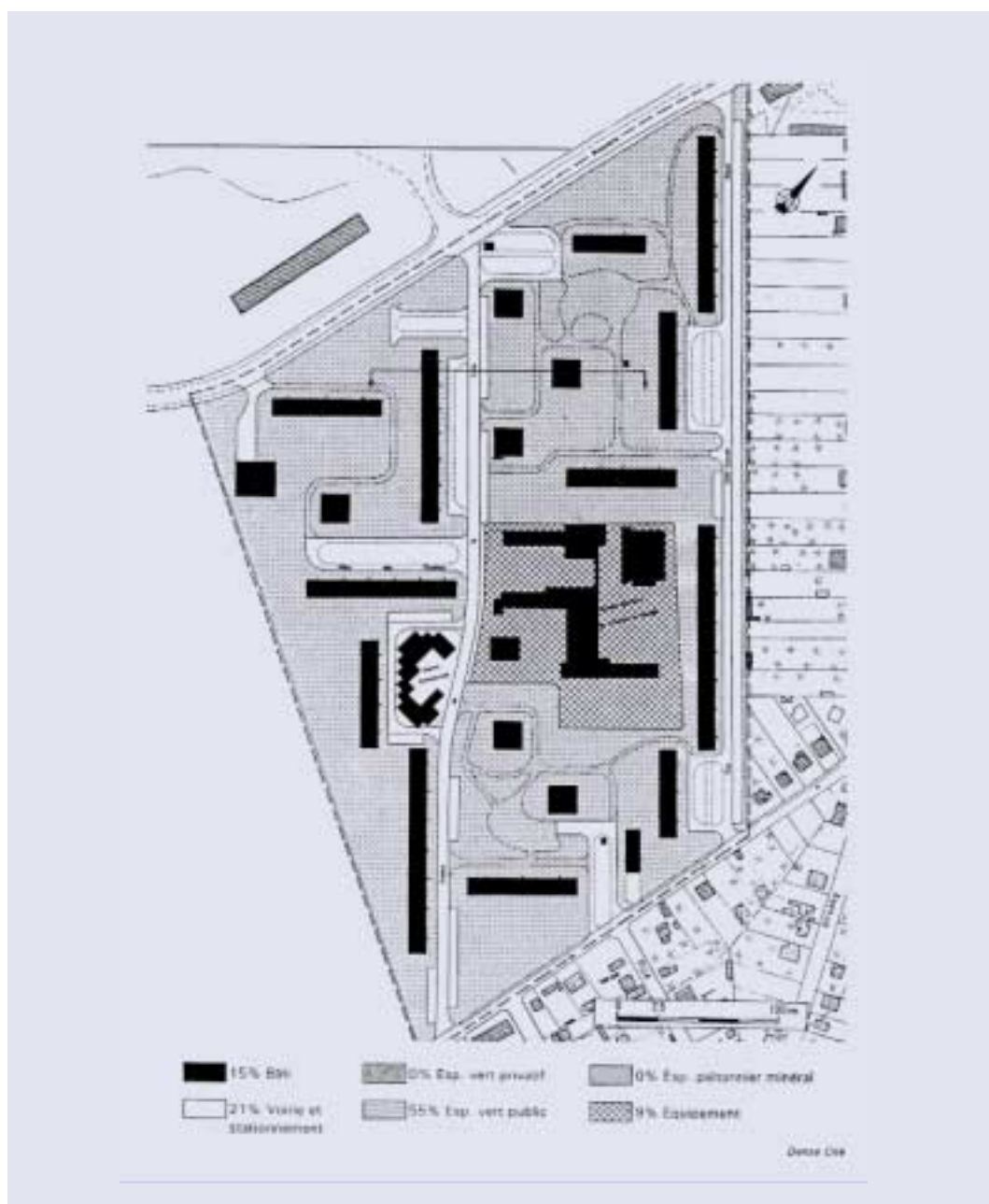


Figure 32
 QUARTIER PARISIEN,
 Montholon (9^{ème}
 arrondissement). Emprises
 au sol

L'habitat ne représente que 54% des espaces urbains nouveaux, à une écrasante majorité consacrée à la maison individuelle (50%, contre 4% pour l'habitat collectif.). Les surfaces d'infrastructures nécessaires à ces nouveaux territoires urbanisés s'élèvent à 1.360 hectares (soit une consommation d'espace supplémentaire de 10%). Au cours de l'opération, 2.740 hectares d'espaces naturels (bois, forêts, terres labourées, vergers), ont été transformés.

Les techniques constructives et les matériaux

A l'échelle de chaque opération, sont analysés les solutions constructives, les paramètres morphologiques ainsi que quelques stratégies élémentaires d'amélioration énergétique de



l'enveloppe. Plusieurs évolutions constructives se conjuguent :

- l'amélioration des performances de l'industrie des matériaux et des composants ;
- l'allègement de la construction, le plus souvent lié à un renforcement de l'industrialisation.

L'évolution de l'immeuble urbain : gain de place et légèreté

L'évolution des techniques de construction des immeubles urbains obéit en premier lieu à la

logique du gain de place. Celle-ci s'illustre dès les premiers temps de la construction métallique, dans le Paris haussmannien : les pans de fer de 15 cm occupent 1/20^{ème} de la surface hors oeuvre, contre 1/8^{ème} pour des murs de 50 cm d'épaisseur. Cependant les modes constructifs de l'immeuble urbain type ne subissent pas d'évolution importante dans l'architecture post-haussmannienne, où dominent les murs porteurs, en pierre et en briques, notamment en refend et en mitoyen.

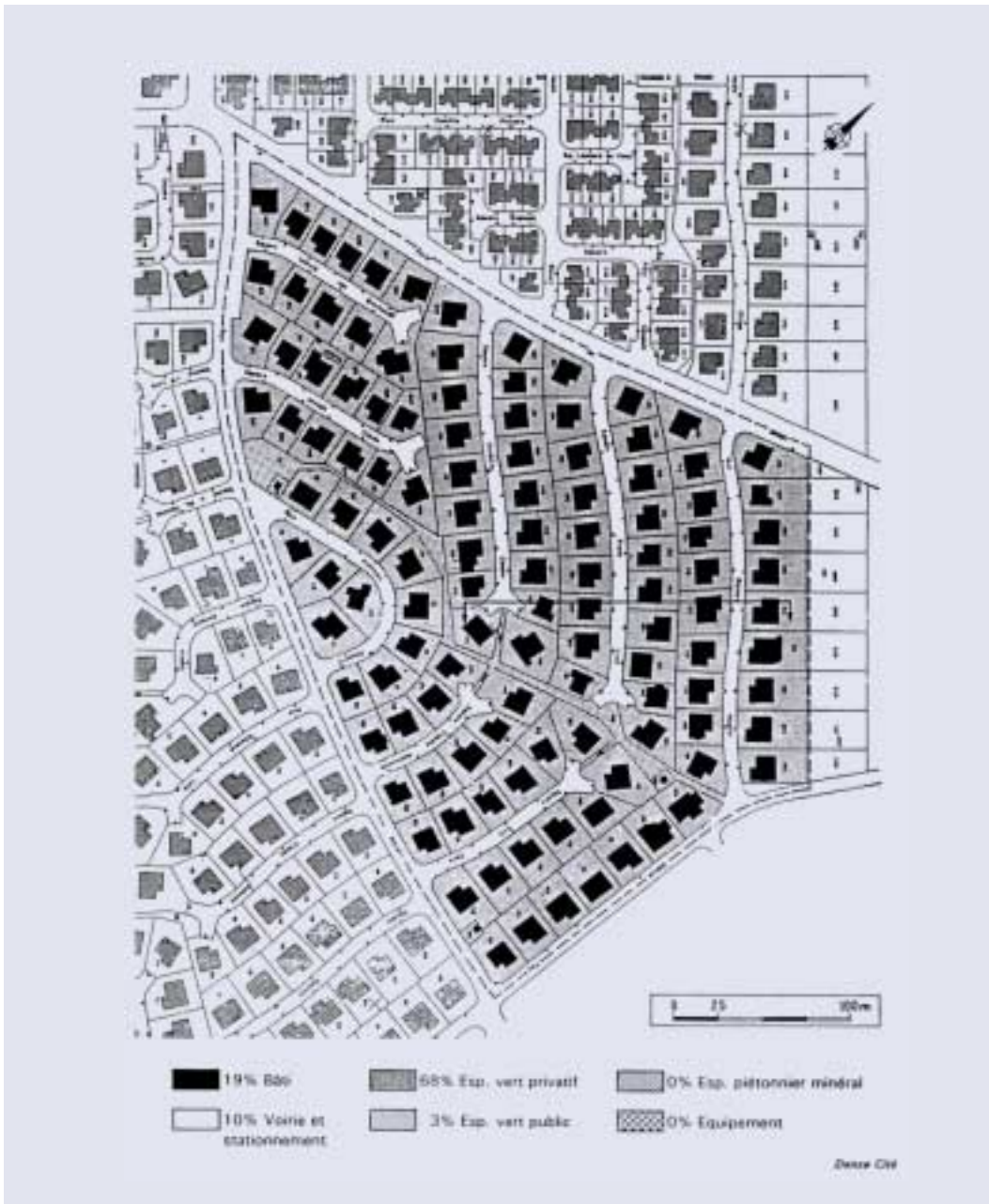


Figure 34
LOTISSEMENT PAVILLONNAIRE, Parc de Sénart (Essonne), Emprises au sol

Le gain de place, moins important pour les premiers planchers en fer, semble néanmoins suffisant pour que le métal s'impose dans la réalisation des planchers. Ceux-ci font fréquemment appel au fer (profils de type IPN) avec entrevous en céramique : un fer en I de 120 mm équivalait, par sa résistance, à une poutre de sapin de 13 x 18 cm pour une portée de 4 mètres et une charge répartie de 200 daN/ml. Il faut attendre les années 1930 et le mouvement moderne pour que se multiplient les systèmes à ossature de béton armé et remplissage de maçonnerie. La façade légère à base de panneaux préfabriqués ne représente, au cours des années 1950, qu'une part négligeable du marché des logements. Les isolants apparaissent largement dans le logement collectif, avant même les premières mesures d'économie d'énergie qui accompagnent la réglementation thermique de 1975 : doubles murs, panneaux de liège, laines minérales, fibres de verre (exemple du double vitrage Thermolux), blocs de béton cellulaire, briques creuses.

Les systèmes constructifs dans le pavillonnaire

Le cas des maisons individuelles (tableau 22) est sensiblement différent, bien que le recours à l'industrialisation s'impose également dans la recherche d'un meilleur rendement spatial. La tendance à l'allègement de la construction n'est pas absolue, et semble plus prononcée dans la maison individuelle que dans l'immeuble collectif (tableau 23). Les procédés d'industrialisation des années 1960 ont en effet privilégié la filière lourde en béton pour la structure, murs et

planchers, comme pour les panneaux de remplissage des façades. Les solutions d'isolation phonique ont également privilégié les matériaux lourds.

L'investissement énergétique : construction versus chauffage

L'économie d'espace se traduit le plus souvent par l'emploi de matériaux de performance structurelle plus élevée, principalement l'acier, associé ou non au béton, mais de coût énergétique également supérieur. Le remplissage s'effectue alors au moyen de matériaux fournis par l'industrie. Le bois est sans doute le seul matériau échappant à cette logique, grâce à un bon rapport performance/poids propre, et à un plus faible coût énergétique.

Si les changements technologiques qui marquent les années 1970-1990 font apparaître une part croissante des matériaux transformés par l'industrie, dans la même période d'importants gains d'efficacité énergétique sont réalisés par l'industrie. Alors que la sidérurgie naissante consommait cinq tonnes de coke par tonne de fonte produite au début du 19^{ème} siècle, deux tonnes suffisaient vers 1900, puis moins d'une tonne depuis les années 1970. La fabrication de l'acier à béton a connu une réduction de 30% de la consommation d'énergie entre 1975 et 1990, comme les tuiles et les briques, le gain étant légèrement plus faible pour le béton (-23% entre 1950 et 1990). La réduction des consommations d'énergie de l'industrie des matériaux devrait s'accélérer dans la période actuelle, sous la pression des critères environnementaux (contribution à l'effet de serre, gestion des déchets,

	1930	1950	1970	1990	HQE / RT2000
Plancher	IPN acier+ entrevous terre cuite	Dalle Béton Armé 0,15 m	Poutrelles+ hourdis béton	Poutrelles hourdis PSE	Entrevous terre cuite
Murs extérieurs	Briques Linteaux acier	Blocs ciment Linteaux ciment	Blocs ciment	Blocs ciment	Briques
Cloisons	Briques plâtrières	Briques plâtrières	Carreaux de plâtre	Plaques de plâtre alvéolé	
Menuiseries - Extérieures	Bois	Bois	Acier/Alu	PVC	(PVC) / Bois
Vitrages + protections	Simple + persiennes bois	Simple + volets roulants lames bois	Double + volets roulants lames alu	Double + volets PVC	Double peu émissif (U =1,8) + volets bois
Charpente	Traditionnelle	Traditionnelle	Fermettes	Fermettes	Fermettes
Couverture	Tuiles	Tuiles	Tuiles	Tuiles béton	Tuiles
Isolation des murs	Double mur	Blocs creux	PSE 0,04 doublage intérieur	PSE 0,10 doublage intérieur	Rupture ponts thermiques (isolation ext.)
Isolation de la toiture	Comble	Comble	Laine de verre 0,09 m	Laine de verre 0,18 m	Laine minérale/0,20 m
Accessoires de couverture	Zinc	Zinc	Zinc	PVC	Zinc
Energie de chauffage	Charbon	Fioul	Fioul gaz/électricité	Gaz/électricité	Thermodynamique réversible+ ECS solaire

Tableau 22

Exemple d'évolution des systèmes constructifs dans le pavillonnaire

PSE : polystyrène expansé
U coefficient de transmission thermique de la paroi, exprimé en W/(m²K).

intégrité écologique des sites) : les fabricants français se préparent à publier des indicateurs du développement durable.

L'énergie nécessaire à la construction d'un pavillon décroît ainsi de 12% de 1950 à 1990 (tableau 24). Les gains d'efficacité des matériaux de structure sont en grande partie couverts par les matériaux industriels de substitution, plus couramment employés, notamment dans le second oeuvre. Mais l'impact de l'évolution technologique des matériaux d'enveloppe est beaucoup plus significatif pour les consommations de chauffage : deux saisons de chauffage suffisent pour doubler la consommation d'énergie totale (I + nC) du pavillon de 1950, alors que six années sont nécessaires pour une maison individuelle récente.

L'exemple de l'immeuble parisien

L'immeuble parisien emprunte aux bâtiments utilitaires (ateliers, usines) et aux logements ouvriers le matériau de la construction économique, la brique. Contrairement aux immeubles de plus grand standing, qui exposent la pierre de taille dans la totalité de leur façade principale, l'immeuble d'habitations ouvrières de 1900 limite la pierre à l'étage noble et aux encadrements de fenêtres, tandis que le moellon est employé dans la construction des murs mitoyens. Au total, la structure (briques, pierres, béton, acier des planchers, enduits) hors toiture représente 90% de la masse de la construction et 86% de l'énergie de construction ainsi que des émissions de CO₂, matériaux, chantier et transports compris (figures 35, 36, 37).

	Masse en kg/m2
Immeuble/parisien 1900	1412
HLM 1960//solution lourde	1763
HLM 1960//solution//moyenne	1295
HLM 1960//solution légère	855
Pavillon 1950	1030
Pavillon 1990	853

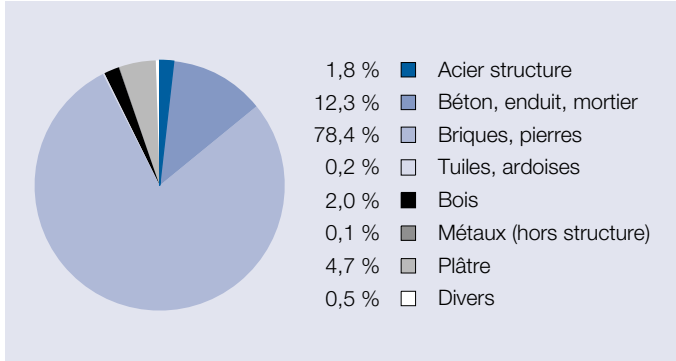


Tableau 23

Masses de différentes constructions (hors terrassement/voirie)
Sources (HLM) : Ch. NOEL, "Etude des quantités et des prix de matériaux entrant dans la construction d'un logement", Cahiers du CSTB 46/367, octobre 1960.

Sources (Pavillon 1950-90) : J.P. LEPOIVRE, CERIB, B. DESSUS, Long term trend of overall energy used in residential buildings : an exploratory case study, décembre 1989 (non publié).

Figure 35

Répartition des masses
Cas de l'immeuble parisien

Figure 36

Répartition des consommations d'énergie de construction

Cas de l'immeuble parisien

Sources : Bases de données TRIBU et EQUER (Valeurs 1990-2000)

Valeurs accrues de 10% pour le chantier, et tenant compte d'un transport routier de 100 km pour tous les matériaux

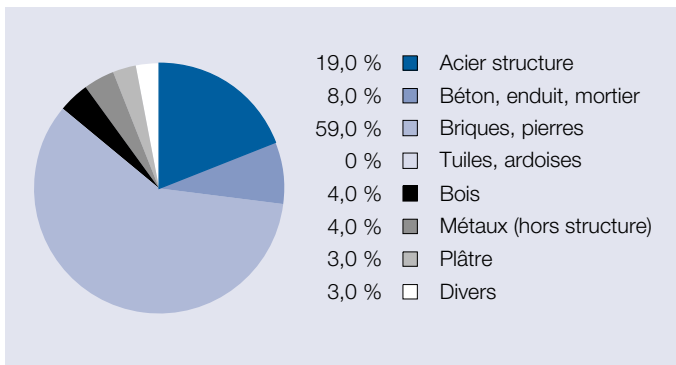
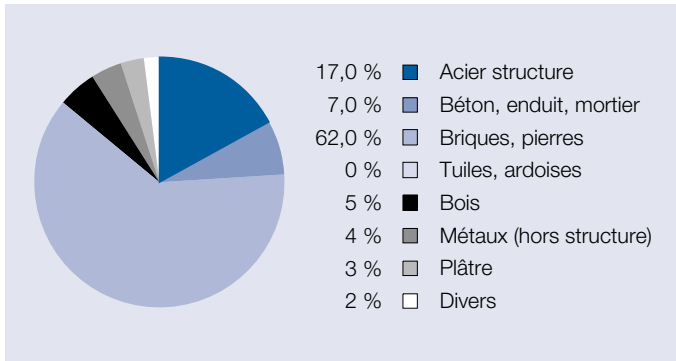
Figure 37

Répartition des émissions de CO₂

Cas de l'immeuble parisien

Sources : Bases de données TRIBU et EQUER (Valeurs 1990-2000)

Valeurs accrues de 10% pour le chantier, et tenant compte d'un transport routier de 100 km pour tous les matériaux



	Immeuble Paris 1900	HLM 1960 solution moyenne	Pavillon 1950	Pavillon 1990
I, Investissement énergétique initial (en GJ/m2)	4,93 (base 1950)	3,53 (base 1950)	3,28 (base 1950)	2,89 (base 1990)
C, Consommation de chauffage (en GJ/m2.an)	1,32 (charbon)	1,51 (fuel)	1,61 (fuel)	0,52 (gaz)
n = I/C (en nombre d'années)	3,73	2,33	2,0	5,6

Tableau 24

Indicateurs énergétiques du logement

(hors terrassement/voirie)

Les consommations de chauffage ont été estimées pour la zone H1.

L'investissement énergétique prend en compte un surcoût forfaitaire de 10% pour le chantier, et le transport des matériaux sur une distance de 100 km.

L'entretien et la rénovation

La comparaison des investissements énergétiques entre les différentes solutions constructives diffère selon le mode de présentation des résultats (tableau 25). L'immeuble parisien, qui contient une masse de briques importante, présente en conséquence un coût énergétique élevé par unité de surface (+ 50% par rapport à la maison individuelle), pourtant légèrement plus faible que celui de la maison individuelle par unité de masse. La diminution de poids total est souvent obtenue au prix d'un contenu énergétique plus important, notamment dans les procédés "ossature et remplissage" qui font appel à l'acier, en structure métallique ou en béton armé.

Les solutions constructives se différencient plus nettement lorsque la rénovation est prise en compte, car le gain de poids se traduit par le recours à des matériaux moins durables, notamment dans l'enveloppe et le second œuvre, qui ont la durée de vie la plus courte (de 20 à 100 ans). En considérant la durée de vie des composants, y compris des matériaux de structure, comme le temps nécessaire à leur renouvellement complet, à la faveur des rénovations et modifications du bâtiment successives, il est possible d'estimer les consommations d'énergie, de maté-

riaux, les émissions de CO₂ (ainsi que la production de déchets et la quantité de produits recyclés). Ainsi, les pièces de bois des charpentes, réparées régulièrement, seraient totalement remplacées au terme de 250 ans (soit 10% tous les 25 ans), tandis que les briques ou les pierres le seraient à un rythme deux ou trois fois plus faible (10% de remplacement tous les 50 ou 75 ans).

La fin de vie (démontage ou démolition) ne concernerait en définitive qu'un nombre réduits de bâtiments. Pour la part la plus nombreuse, les déchets et les matériaux susceptibles d'être recyclés sont produits lors des interventions régulières sur le bâtiment. La durée de vie d'un bâtiment serait donc :

- soit la durée de vie de ses composants les plus durables (le terme de leur remplacement total progressif) ;
- soit le temps nécessaire à une consommation de ressources qui égalerait l'investissement initial.

Différents indicateurs peuvent être pris en compte pour l'estimation de la durée de vie : le coût monétaire, la masse totale en énergie, les émissions de CO₂ (ou la quantité de déchets non recyclables, etc.) La définition d'un "coût global" permettrait de mieux estimer la durée de vie apparente d'un bâtiment du point de vue de la collectivité.

Tableau 25

Comparaison des investissements énergétiques des trois bâtiments

CONSTRUCTION	Paris 1900	HLM 1960 solution moyenne	Pavillon 1990
Investissement énergétique (en MJ/m ²)	4336	3109	2888
Masse (en kg/ m ²)	1412	1295	853
Investissement énergétique (en MJ/kg)	3,1	2,4	3,4

Tableau 26

Immeuble parisien, 1900

	Masses (kg/m ²)	Consommation d'énergie (MJ/m ²)	Emission de CO ₂ (kCO ₂ /m ²)
I, valeur initiale	1412	4336	275
R, rénovation annuelle	3,32	15,13	0,92
Durée de vie = I / R (en nombre d'années)	425	287	300

Tableau 27

Immeuble collectif, solution moyenne, 1960

	Masses (kg/m ²)	Consommation d'énergie (MJ/m ²)	Emission de CO ₂ (kCO ₂ /m ²)
I, valeur initiale	1295	3109	214
R, rénovation annuelle	6,16	36,22	1,77
Durée de vie = I / R (en nombre d'années)	210	85	121

Tableau 28

Maison individuelle, 1990

	Masses (kg/m ²)	Consommation d'énergie (MJ/m ²)	Emission de CO ₂ (kCO ₂ /m ²)
I, valeur initiale	853	2888	193
R, rénovation annuelle	5,33	45,01	2,94
Durée de vie = I / R (en nombre d'années)	160	64	66

Tableau 29

Immeuble parisien, avec isolation (niveau RT 1989)

	Masses (kg/m ²)	Consommation d'énergie (MJ/m ²)	Emission de CO ₂ (kCO ₂ /m ²)
I, valeur initiale	1414	4379	277,6
R, rénovation annuelle	3,43	16,96	1,04
Durée de vie = I / R (en nombre d'années)	412	258	267

La durée de vie de l'immeuble parisien est ainsi estimée à 300 ou 400 ans, temps nécessaire au doublement de l'investissement initial, selon trois critères : la masse totale de matériaux utilisés, la consommation d'énergie correspondante, ou les émissions de CO₂, compte-tenu du chantier et du transport des matériaux (tableau 26). Les deux autres types de construction, plus récents, nécessitant des rythmes de rénovation plus rapides, ont des durées de vie plus courtes, comprises entre 85 et 210 ans pour l'immeuble collectif des années 1960 (tableau 27), et entre 65 et 160 ans pour la maison individuelle (tableau 28).

Les trois logements ont été maintenus à l'identique, sans amélioration thermique de leur état initial. La durée de vie très courte considérée pour les isolants (20 ans dans le cas des laines minérales) réduit la longévité moyenne des constructions les plus récentes, comportant des matériaux isolants (2 kg/m² pour le collectif, et 10 kg/m² pour la maison individuelle). Les valeurs obtenues pour l'immeuble parisien ne sont cependant pas sensiblement modifiées lorsque l'enveloppe comporte des doubles vitrages et des isolants en conformité à la réglementation de 1989 (tableau 29).

En résumé, les matériaux de gros œuvre représentent des masses importantes qui doivent être déplacées à plusieurs reprises (acheminement sur le site, manutention lors de la mise en œuvre), ce qui accroît le contenu énergétique final. Les produits à base de béton nécessitent également une exploitation intensive des ressources en granulats, sur des territoires étendus. À l'inverse, les matériaux d'enveloppe (vitrages et isolation) ont des masses peu élevées, mais la tenue dans le temps des laines minérales et des mousses n'est pas garantie. Le remplacement des isolants des parois verticales peut nécessiter la destruction des doublages à base de plâtre, ce qui avantage les parois à isolants répartis, de plus longue durée de vie.

La comparaison des principaux modes constructifs devrait mieux intégrer le critère de recyclage : celui-ci pourrait favoriser la construction dite "à sec", à ossature et remplissage, car la réutilisation des matériaux est facilitée par le démontage et la séparation des différents constituants. L'enveloppe doit en effet pouvoir évoluer avec la technologie et les performances réglementaires. Il en est de même pour les matériaux utilisés dans les aménagements intérieurs et les équipements, les plus sensibles à la rénovation.

Les besoins énergétiques d'exploitation

Deux siècles d'économies d'énergie

Si elle se généralise progressivement à l'ensemble du parc, la recherche du confort thermique à moindre coût énergétique n'est pas une préoccupation récente. Les premiers procédés de chauffage central à eau chaude et à vapeur ont été expérimentés au terme du 18^{ème} siècle, pour les serres, les couveuses, les filatures, en France et en Angleterre. Les niveaux de température étaient voisins de ceux que nous connaissons aujourd'hui : au milieu du 19^{ème} siècle, dans les logements des ouvriers, les cheminées et foyers devaient pouvoir élever, "avec le moins de combustible possible", la température de l'air intérieur entre 17 et 19°C. Le chauffage artificiel nécessitait une dépense de combustible considérable, les cheminées étant de véritables "tonneaux des Danaïdes", déversant à profusion l'air chaud dans les nuages.

Dès que la thermique s'est affirmée comme discipline, les exigences se sont portées autant sur la composition de l'enceinte que sur la source de chaleur. Les vitrages ont été rapidement identifiés comme étant la source principale de déper-

ditions. Ils ont joué le rôle de véritables condensateurs de la vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur. Mais les fenêtres, ouvertes largement sur la rue, ont été protégées par des persiennes, d'abord en bois, puis dans le dernier tiers du 19^{ème} siècle, en tôle métallique. Au cours du dernier quart du 19^{ème} siècle, le mur de calcaire de 50 cm d'épaisseur est devenu la référence pour établir la résistance thermique des parois de la construction à ossature, d'abord en briques, puis plus complexes - les parois feuilletées des années 1930 -, enfin des pans de verre de la construction actuelle..

Les périodes de construction énergétivore (logements peu ou mal isolés, installations de chauffage et de climatisation mal régulées) ont été en définitive assez limitées dans le temps, mais malencontreusement elles correspondent aux décennies de construction intensive. Dans un contexte de pénurie de logements, des procédés de construction encore mal maîtrisés ont été généralisés hâtivement, basés essentiellement sur l'industrialisation lourde de panneaux de béton. La construction légère, à panneaux de façade

métalliques mieux isolés, est restée marginale dans le logement.

Les réglementations thermiques successives ont rétabli une conception plus consciente des rigueurs du climat. Mais l'exemple des grandes structures de verre transparentes des années 1980-1990 ont bien montré les limites de la réglementation, qui ne sanctionnait pas l'absence de dispositifs de contrôle climatique associés à l'enveloppe.

La performance énergétique de l'enveloppe

L'étude paramétrique des besoins de chauffage est fondée sur la typologie précédente :

- un immeuble urbain compact de construction traditionnelle, en maçonnerie de briques et de pierres, sans isolation ;
- un immeuble de type "barre" de la période des grands ensembles, plus largement vitré ;
- un pavillon de construction récente.

La performance thermique de l'enveloppe de chaque bâtiment est traduite par le coefficient U_{moy} , coefficient moyen de déperditions par les parois et les baies du bâtiment, donc par unité de surface d'enveloppe extérieure. La valeur de ce coefficient varie de 0,7 à plus de 3 $W/m^2.K$ (soit dans un rapport de 1 à 4) entre le pavillon récent, bien isolé, et le logement moyen de l'immeuble collectif construit dans les années 1960, compte tenu notamment des surfaces vitrées – à simple vitrage - plus abondantes dans l'exemple retenu (0,22 m^2 de vitrage par m^2 de surface habitable, tableau 30).

L'influence de la technologie d'enveloppe sur les besoins de chauffage peut être mise en évidence en appliquant, à chaque morphologie de bâtiment, les différentes solutions d'enveloppe, correspondant aux trois états suivants (tableau 31) :

- ancien (U moyen de 1,54 à 3,12 $W/m^2.K$) ;

- réhabilité (U moyen de 1,67 à 1,87 $W/m^2.K$) ;
- neuf (U moyen de 0,71 à 1,08 $W/m^2.K$).

L'estimation des besoins de chauffage, dans ces neuf cas (trois typologies et trois technologies d'enveloppe) et pour les données climatiques de la zone H1, attribue la meilleure performance aux deux logements en immeuble collectif (figure 34) : pour une valeur de U donnée, traduisant le niveau d'isolation moyen de l'enveloppe, les besoins de chauffage de la maison individuelle sont pratiquement deux fois plus élevés que ceux du logement en immeuble collectif de type HLM.

Dans le contexte de la nouvelle réglementation thermique, les besoins unitaires de chauffage de la maison individuelle restent supérieurs de 30 à 40% à ceux des logements collectifs, au prix d'un net renforcement de l'isolation thermique : le coefficient de déperdition moyen de l'enveloppe doit être réduit de 35%. Les besoins comparés du pavillon et des immeubles collectifs divergent très vite pour des solutions d'enveloppe moins performantes. Grâce à un taux de récupération des apports solaires important, la configuration "HLM" apparaît la plus satisfaisante, à condition d'assurer le contrôle solaire d'été.

Les indicateurs morphologiques urbains

Pour les immeubles collectifs, la faible performance thermique de la maçonnerie classique de pierre, de brique, puis de bloc de béton, est en partie compensée par une plus faible surface d'enveloppe extérieure, avantage lié à la morphologie urbaine. Les besoins des deux logements en immeuble collectif, dans la version non isolée thermiquement, sont du même niveau que ceux du pavillon réhabilité sur le plan thermique. L'indicateur morphologique n'est pas ici lié à la compacité, qui traduit la capacité d'une

Tableau 30

Données constructives des trois logements

	Immeuble parisien	Bâtiment HLM	Maison individuelle
Date de construction	1900	1960-70	1990
Svitrage / Shabitable	0,18	0,22	0,15
Description de l'enveloppe	Briques et pierres Menuiseries bois Simple vitrage	Béton Menuiseries bois Simple vitrage	Double mur briques Menuiseries PVC Double vitrage
Niveau d'isolation thermique (U moyen en $W/m^2.K$)	2,36	3,12	0,71 (valeur NRT 2000)

Tableau 31

Caractéristiques des enveloppes des trois bâtiments

U_{moy} ($W/m^2.K$)	Paris	HLM	Pavillon
" ancien "	2,36	3,12	2,33
" réhabilité "	1,87	1,83	1,67
" RT 2000 "	1,05	1,08	0,71

Les valeurs de "U moyen" correspondent aux caractéristiques de l'enveloppe définies en Annexe 8

enveloppe de surface donnée à contenir le volume maximum, la référence de cette économie de matière étant la sphère. Ici aucun des trois bâtiments ne présente de découpe importante. La compacité globale peut être considérée comme équivalente, alors que les surfaces d'enveloppe extérieures, rapportées à l'unité de surface habitable, sont très différentes dans les trois cas.

L'indice morphologique décisif est le taux de contiguïté, part de surfaces d'enveloppe non extérieures sur la surface d'enveloppe totale (plancher non compris). S'il vaut zéro pour un pavillon individuel isolé, le taux de contiguïté est de 0,26 et 0,44 pour les seules parois verticales des immeubles collectifs, et de plus de 0,5 si les surfaces de toitures (ou de planchers supérieurs) sont prises en compte (tableau 32). Par unité de surface habitable, la pavillon présente une surface d'enveloppe extérieure double de celle des immeubles collectifs. La valeur serait encore légèrement supérieure pour un logement individuel sur un seul niveau. Il est vrai cependant que l'effet de la morphologie (compacité, échelle, contiguïté), très sensible quand l'enveloppe est peu isolée, s'estompe avec une isolation performante.

Mais l'investissement énergétique en matériaux reste lié à la surface d'enveloppe totale, plus avantageuse dans le cas du collectif.

Technologie de l'enveloppe et morphologie

Si la qualité thermique de l'enveloppe a une influence décisive sur les performances, le rôle de la morphologie urbaine n'est pas pour autant secondaire. L'impact du premier paramètre peut être illustré par une villa caractéristique du mouvement moderne, la Villa Savoye à Poissy (1929-31, Le Corbusier, architecte). D'une surface habitable généreuse de 285 m² à l'étage, le volume chauffé est de 890 m³. Cette réalisation, quoique ne répondant pas au programme du logement conventionnel, est représentative de la construction à ossature de béton armé, le remplissage étant assuré en partie courante par une double rangée de briques creuses formant lame d'air. La surface de vitrages est également largement développée : le rapport surface vitrée / surface habitable est en effet de 0,37, taux supérieur à la valeur de référence, de 0,20 dans la réglementation thermique de 1989, et de 0,25 dans la nouvelle réglementation²³.

	Paris	HLM	Pavillon
Taux de contiguïté des parois verticales	0,44	0,26	0 (sans garage)
Taux de contiguïté moyen (toiture comprise)	0,58	0,51	0
S enveloppe extérieure / S habitable	1,15	1,08	1,96 (en R + 1)

Tableau 32

Indicateurs de contiguïté
Les surfaces des toitures et planchers extérieurs des immeubles collectifs ont été réparties au prorata des surfaces habitables de l'ensemble des logements.

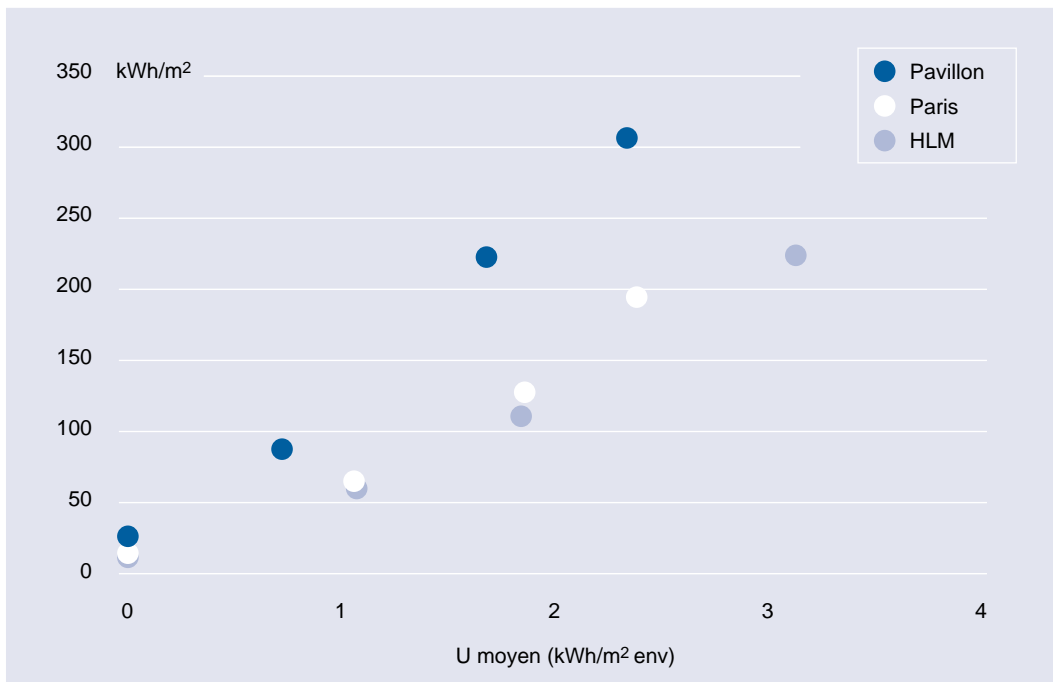


Figure 38

Besoins de chauffage
Pour chaque morphologie, les points représentent les trois niveaux de performance :
"Neuf" : niveau réglementaire 2000, taux de renouvellement d'air de 0,5 volume/heure (ici $U < 1,09$)
"Réhabilité" : double vitrage, isolation thermique, taux de renouvellement d'air de 0,5 volume/heure (ici $1,66 < U < 1,87$)
"Ancien" : simple vitrage, taux de renouvellement d'air de 1 volume/heure (ici $2,32 < U$)
(La valeur $U = 0$ représente le cas théorique de déperditions nulles par l'enveloppe)

Dans la construction de 1930, le taux de déperditions moyen par l'enveloppe, de 2,83 W/m²K, est légèrement meilleur que celui de l'immeuble collectif analysé précédemment. Si la Villa Savoye était construite selon les mêmes principes architecturaux (morphologie, percements, etc.) mais avec des technologies d'enveloppe récentes, l'application des exigences réglementaires de 1989 puis de 2000 se traduiraient par une amélioration très sensible des performances de l'enveloppe : le coefficient moyen de déperditions par les parois opaques et vitrées, par unité de surface d'enveloppe extérieure, serait divisé par 4 pour faire face aux exigences de 1989, et par 5 pour les exigences applicables en 2001 (tableau 33). La réglementation actuelle réduit ainsi d'un facteur voisin de 4 les déperditions par l'enveloppe de constructions non isolées, et dont la référence (ici, les coefficients de déperditions des murs et des planchers de la construction d'origine sont voisins de 2,3 W/m²K) reste le mur de la construction classique, en pierre calcaire de 50 cm d'épaisseur. La prise en compte des déperditions par renouvellement d'air, des apports internes et des apports solaires accroît la portée de la comparaison : les besoins de chauffage devraient être divisés d'un facteur supérieur à 5 pour respecter la réglementation de 2001.

La réduction des besoins de chauffage assignable à la morphologie n'est sans doute pas de même ampleur. A l'échelle de l'habitation individuelle (surface habitable voisine de 110 m²), le facteur de forme, que l'on pourrait définir comme la surface d'enveloppe extérieure par unité de surface habitable, varie assez peu : l'écart dépasse rarement 20% entre une maison en R + 1 et un modèle de plain-pied très découpé (en excluant le plancher de rez-de-chaussée dans les calculs de déperditions). Ce facteur permet aussi d'évaluer la variation de la quantité de matériaux nécessaires à la fermeture d'un espace de volume donné. L'importance de la contiguïté semble plus élevée en milieu urbain : elle permet de réduire notablement la part de parois extérieures d'un logement, grâce à la mitoyenneté. La mitoyenneté d'un logement dépend bien évidemment de sa position dans l'immeuble. Mais considérées globalement, les déperditions totales de l'immeuble, isolé sur sa parcelle, peuvent être comparées à un groupe d'habitations dispersées offrant la même surface habitable totale. Toujours du point de vue des déperditions, l'immeuble a un atout majeur : son échelle. Si, à géométrie équivalente (pavillon, parallélépipède, cube, etc.), l'immeuble renferme un volume habitable équivalent à 10 logements, le facteur de réduction de surface d'enveloppe est de : 10^{1/3} soit 2,15.

Tableau 33

Besoins de chauffage de la Villa Savoye en fonction du niveau d'isolation de l'enveloppe
Technologie 1930 : double mur de briques creuses, planchers à hourdis céramiques, vitrage simple.
Besoins de chauffage RT 1989 et RT 2000 : renouvellement d'air réduit à 0,5 vol/h

	1929-31	RT 1989	RT 2000
Ubât (en W/m ² K)	3,00	0,74	0,58
Besoins de chauffage (en kWh/m ² .an)	500	121	93

Les déperditions thermiques par l'enveloppe d'un bâtiment (toiture, plancher, parois verticales vitrées et opaques) GV_d , en (W/K), se décrivent par l'expression :

$$GV_d = \sum_i [K_{o_i}(1 - v_i) + v_i K_{v_i}] S_i$$

avec :

S_i : surface de la paroi d'indice i

v_i : proportion de vitrage de la paroi

K_{o_i} et K_{v_i} : conductances thermiques globales des parties opaque et vitrée de la paroi, incluant les ponts thermiques (U dans la nouvelle réglementation).

L'expression des déperditions peut aussi s'écrire :

$$GV_d = (1/\sum_i S_i) \times (\sum_i K_i \times S_i) \times (\sum_i S_i)$$

Soit :

$$GV_d = V \times U_{moyen} \times S/V = V \times U_{moyen} \times 1/V^{1/3} \times S/V^{2/3}$$

Les déperditions dues à l'enveloppe par unité de volume sont ainsi proportionnelles à trois termes :

- le coefficient U moyen de l'enveloppe ;
- le coefficient d'échelle 1/V^{1/3} qui avantage les grands volumes ;
- le coefficient de forme ou de compacité, adimensionnel, S/V^{2/3}.

Encadré

Méthode de calcul des déperditions thermiques

C'est en effet le paramètre qui intervient dans l'expression des déperditions par l'enveloppe (encadré).

Pour compenser par la morphologie un rapport de 4, qui exprime le gain de déperditions par l'enveloppe apporté par l'isolation entre la construction ancienne (non isolée, qu'il s'agisse de 1900 ou de 1960) et la construction récente, il faut donc une augmentation de volume d'un facteur de 64. Apports solaires et renouvellements d'air non compris, les besoins de chauffage de centres urbains denses, de technologie ancienne, seraient donc du même ordre que ceux de pavillons individuels répondant à la réglementation récente, dès lors que ces ensembles ont une taille supérieure à 50 logements.

En réalité, le facteur de forme adimensionnel d'immeubles de logements ne peut être aussi élevée que celui du pavillon, compte tenu des limitations imposées aux profondeurs des logements. Mais on peut constater, en définitive, que le passage d'un seuil technologique au suivant pour les trois niveaux d'enveloppe proposés (figure 34), se traduit avec un temps de retard en besoins de chauffage pour le pavillon :

- les besoins unitaires de chauffage du pavillon "réhabilité" équivalent à ceux du logement HLM "ancien", soit 220 kWh/m².an ;

- les besoins unitaires de chauffage du pavillon "neuf 1989" équivalent à ceux du logement HLM "réhabilité", soit environ 105 - 110 kWh/m².an. Les différents indicateurs morphologiques et technologiques sont rassemblés dans le tableau 34.

Les consommations d'énergie : le chauffage et les autres besoins

La dispersion entre les besoins unitaires de chauffage des différentes solutions morphologiques et technologiques s'établit dans un intervalle de 1 à 5 environ, entre le logement neuf en immeuble collectif et l'individuel de construction ancienne (tableau 35). L'intervalle s'élargit encore (échelle de 1 à 7) pour les consommations de chauffage : les immeubles collectifs sont alors le plus souvent pénalisés par le mode de chauffage.

Différentes variables favorisent cette dispersion, qui reste importante lorsque les consommations de chauffage de type différents sont estimées pour un même logement : la consommation varie en effet quasiment du simple au double pour le même logement en immeuble lorsqu'il est équipé soit d'un chauffage électrique individuel avec régulation, soit d'une installation collective au fuel ou au gaz lorsque celle-ci est de rendement médiocre.

Indicateur	Expression
Surface d'enveloppe (en m ²)	S env
Volume chauffé (en m ³)	V
Facteur de forme global, ou compacité	$S \text{ env} / V^{2/3}$
Facteur d'échelle (en m ⁻¹)	$1 / V^{1/3}$
Taux de contiguïté moyen	$(S \text{ env} - S \text{ env extérieure}) / S \text{ env}$
Facteur de forme final	$S \text{ env extérieure} / S \text{ habitable}$
Umoy, coefficient moyen de déperditions de l'enveloppe (en W/m ² K)	$(\sum_i U_i \cdot S_i + S_j \cdot k_j \cdot L_j) / (\sum_i S_i + \sum_j L_j)$

Tableau 34

Indicateurs de performance et déperditions thermiques
 Si : surface d'enveloppe extérieure, ou donnant sur un local non chauffé (affectée d'un coefficient taux)
 Ui : coefficient de déperditions de la surface i, en W/m².K
 Lj : linéaire de liaison
 Kj : coefficient de déperditions de la liaison J, en W/m.K

	Besoins	Consommation (chauffage fuel)	Consommation (chauffage gaz individuel)	Consommation (chauffage élect. individuel)	Consommation moyenne (Gaz/électricité)	Emissions Moyennes (geC/m ² .an)
Paris		(collectif)				
ancien	194	368	260	184	222	9687
réhabilité	127	228	182	127	154,5	6742
neuf RT2000	66	132	104	71	87,5	3818
HLM		(collectif)				
ancien	222	404	290	203	267,5	11673
réhabilité	110	222	160	112	136	5935
neuf RT2000	59	132	94	60	77	3360
Pavillon						
ancien	308	447	377	256	316,5	13811
réhabilité	223	310	270	196	233	10167
neuf RT2000	87	128	122	85	103,5	4516

Tableau 35

Besoins, consommations de chauffage (en kWh/m².an) et émissions (en geC/m².an) pour la zone H1
 Les émissions sont calculées à partir de la consommation moyenne gaz/électrique, pour un taux moyen de 160 gCO₂/kWh (43,6 geC/kWh).

Tableau 36

Autres consommations énergétiques (en kWh/m².an) et émissions (en geC/m².an)

	ECS gaz	VMC Auxiliaires	Autres électricité	Cuisson gaz	Total
Consommation kWh/m ² .an	31,7	6,8	30	6	74,5
MJ/m ² .an	114,12	24,48	108	21,6	268,2
Emissions geC/m ² .an	1729	223	982	327	3261

Les données statistiques²⁴ indiquent qu'à statut identique (locataire ou propriétaire), la consommation unitaire est supérieure pour le collectif, comparée à l'individuel. Le comportement de l'utilisateur est certainement en cause, quand celui-ci ne peut mesurer l'effet de sa propre gestion de l'énergie de chauffage. Le chauffage électrique apparaît plus économe en énergie finale que le chauffage au gaz, de 30% à 35%. Le coût plus élevé de l'électricité pour l'utilisateur l'incite certainement à un comportement plus économe.

L'estimation des consommations est effectuée en référence à la méthode réglementaire (coefficient C), qui établit en fonction des déperditions et du mode de chauffage, les valeurs des paramètres suivants :

- le facteur d'intermittence I ;
- le rendement d'émission Re ;
- le rendement de régulation Rr ;
- le rendement de distribution Rdc ;
- le rendement de génération Rgc.

La consommation de chauffage est ainsi calculée en fonction des besoins Bch qui prennent en compte la part récupérée des pertes des systèmes énergétiques (eau chaude et auxiliaires) :

$$Cch = Bch \times I / (Re \times Rr \times Rdc \times Rgc)$$

Les éléments déterminants de cette comparaison peuvent être ainsi résumés :

- le facteur d'intermittence et le rendement de régulation donnent l'avantage au chauffage électrique, plus souple d'utilisation ;
- le chauffage au gaz est cependant moins consommateur que le chauffage au charbon ou au fuel, en raison d'un rendement plus élevé des appareils ;
- le passage du chauffage collectif au fuel au chauffage individuel au gaz entraîne une réduction des consommations théoriques de 20 à 30%

dans le cas des deux immeubles, sous l'effet de l'amélioration des rendements de régulation et de distribution (et du triplement de la part récupérée des autres systèmes énergétiques) ; en réalité, cette différence est accrue par la responsabilisation des usagers.

Les besoins annuels d'énergie pour l'eau chaude sanitaire sont estimés conventionnellement à 21 kWh/m².an, aux points de puisage. Compte tenu des rendements de distribution et de génération pour le chauffage à gaz en équipement individuel, la consommation est évaluée à 31,7 kWh/m².an. On évalue également l'ensemble des autres consommations d'énergie (tableau 36) :

- des auxiliaires (ventilation mécanique contrôlée, auxiliaires du chauffage à eau chaude, etc.) ;
- des équipements électriques (cuisson, froid, lavage, éclairage et divers) ;
- de la cuisson au gaz.

L'énergie finale consommée atteint ainsi près de 75 kWh/m².an au total (la moyenne nationale était de 77 kWh/m².an en 1998), ce qui dépasse la consommation destinée au chauffage dans la version la plus économe (logement neuf RT2000 en immeuble de type HLM, chauffage électrique individuel). La maîtrise des consommations d'énergie non destinée au chauffage du logement devient ainsi un enjeu prioritaire dans le neuf, compte tenu :

- de l'évolution des performances prévisible du logement neuf, la consommation moyenne destinée au chauffage pour les trois zones étant estimée à 66 kWh/m² en 2010 ;
- de l'augmentation rapide et continue des autres consommations d'énergie finale (+ 38 % de 1973 à 1998, avec doublement de la consommation d'électricité spécifique dans l'intervalle), qui devraient à ce rythme atteindre 85 kWh/m² en 2010.

Comparaison de tissus urbains

La voirie

Les trois ensembles de logements se distinguent sensiblement, par la consommation de territoire, en particulier celle qui est vouée à la circulation et au stationnement des véhicules (tableau 37). Par habitant, le pavillonnaire occupe huit fois

plus de surface au sol que l'ensemble parisien, pour cette même fonction. Il faudrait, pour que la comparaison soit juste, inclure la part des surfaces de stationnement souterraines, et les surfaces employées par les transports en commun. En estimant les besoins de stationnement à 5 m²

par habitant, dont la moitié en surface, le rapport est encore de 1 à 4 entre l'ensemble urbain et le pavillonnaire.

La prise en compte de la voirie dans l'estimation de la consommation de matériaux et d'énergie ne modifie pas sensiblement la comparaison entre les trois morphologies, en ce qui regarde la construction initiale : pour un logement dont le coût énergétique initial est de 3000 ou 4000 MJ, la part de la voirie reste limitée à moins de 3% du total dans le cas de Paris, mais à 13,5% dans le cas le plus défavorable, celui du pavillonnaire. Les valeurs traduisant les émissions de CO₂ donnent des parts attribuables à la voirie légèrement inférieures (tableaux 38 et 39).

Le contenu énergétique s'accroît sensiblement (de l'ordre de 50%) en prenant en compte les matériaux de réseaux (assainissement, adduction d'eau, gaz, etc.), notamment dans le cas de l'acier et de la fonte, à fort contenu énergétique. Les valeurs dépendent sensiblement du COS, bien que l'effet de la densité devienne plus faible pour des COS inférieurs à 1 (la différence est peu significative, entre le pavillonnaire et le grand ensemble).

La durée de vie plus courte des matériaux de voirie renforcerait encore la part attribuable à la

voirie. Comme pour les bâtiments, la durée de vie peut être estimée à partir du temps de rénovation nécessaire pour atteindre la valeur initiale en masse totale de matériaux, en consommation d'énergie ou en émissions de CO₂, liées toutes deux à l'élaboration des matériaux, à leur transport, à leur mise en œuvre. La durée de vie de la voirie varie ainsi de 40 à 77 ans selon le critère et le type d'ensemble urbain, en étant toujours plus courte dans le cas du pavillonnaire. En conséquence, la part de la voirie devient significative dans le coût total (bâtiment + voirie) d'entretien et de réparations, estimé par mètre carré de surface habitable : elle varie de 10% dans le cas parisien à 16 ou 17% dans le cas du pavillonnaire, pour les deux critères d'énergie et d'émissions de CO₂ (tableaux 40 et 41).

Les déplacements

Le développement des aires urbaines périphériques, qui s'est intensifié à partir de la fin des années 1960, est un des principaux facteurs d'augmentation de la mobilité globale. Le renforcement des infrastructures routières a motivé la stratégie d'implantation des activités en périphérie, y compris pour les sites d'enseignement supérieur et de loisirs. Le moindre coût des loge-

	Paris (Montholon, 9ème arrondissement)	Grand ensemble (Ris Orangis, Essonne)	Pavillonnaire (Parc de Sénart, Essonne)
Surface totale (m ²)	120.310	131.000	95.700
dont			
bâti	55%	15%	19%
voirie et stationnement	19%	21%	8%
place/espaces verts/jardins	3%	51%	71%
trottoirs/espaces piétonniers	9%	4%	2%
cours intérieures	8%	0%	-
équipements	6%	9%	-
C.O.S brut	3,2	0,63	0,23
S.H.O.B. total (m ²)	385.000	82.530	22.010
S.H.O.N. résidentiel (estimation)	179.086	61.520	14.306
Nombre d'habitants	5.427	2.197	367
SHON m ² /habitant (°)	33%	28%	39
Surface du résidentiel / surface de planchers totale	60%	85%	100%
Surface de voirie et de stationnement (m ² / m ² SHON)	0,077	0,38	0,535
Surface de voirie et de stationnement (m ² / habitant) (+ parc souterrain)	2,54	10,64	20,86
Taux de motorisation (par ménage)	0,52	0,83	1,1

Tableau 37

Surfaces occupées par les trois ensembles de logements

COS : coefficient d'occupation des sols ; SHOB et SHON : surfaces hors œuvre, brutes et nettes.

(°) Les surfaces adoptées correspondent à des valeurs moyennes, le nombre d'habitants étant estimé sur la base des S.H.O.N,

Données Paris : A.P.U.R.,

Données Ris Orangis et Parc de Sénart : V. Fouchier, EPEVRY.

Source : V. FOUCHIER, *Les mesures de la densité. Application à l'Île-de-France et aux villes nouvelles*, EPEVRY, Septembre 1995

Tableau 38

Parts de la voirie dans la consommation d'énergie (construction initiale)

	Paris	HLM	Pavillon
Voirie (MJ/m2)	123,0	341,6	450,5
Total (MJ/m2)	4459,7	3487,5	3338,9
% voirie	2,8	9,8	13,5

Tableau 39

Parts de la voirie dans les émissions de CO₂ (construction initiale)

	Paris	HLM	Pavillon
Voirie (kCO ₂ /m2)	6	16,2	22,0
Total (kCO ₂ /m2)	280,9	232,7	214,9
% voirie	2,1	7,0	10,3

Tableau 40

Parts de la voirie dans la consommation d'énergie (rénovation, pour 100 ans)

	Paris	HLM	Pavillon
Voirie (MJ/m2)	185,9	580,2	916,5
Total (MJ/m2)	1699,4	4350,4	5417,6
% voirie	10,9	13,3	16,9

Tableau 41

Parts de la voirie dans les émissions de CO₂ (rénovation, pour 100 ans)

	Paris	HLM	Pavillon
Voirie (kCO ₂ /m2)	10,4	33,2	55,1
Total (kCO ₂ /m2)	102,5	219,9	349,3
% voirie	10,2	15,1	15,8

ments à mesure que l'on s'éloigne du centre concourt également à la dispersion des zones urbaines. En périphérie, plusieurs facteurs activent les déplacements, y compris la politique des prix des centres commerciaux. Les besoins de déplacement croissent en définitive à un taux voisin de 1% par an, pour un budget temps et un budget monétaire sensiblement constants. Pour les déplacements de courte distance, en semaine et pour le week-end²⁵, le constat est le suivant :

- la distance moyenne s'allonge (+ 20% entre 1982 et 1994), pour atteindre 21 km par jour et

par personne en 1994 ;

- compte-tenu de l'augmentation de la population, le total a augmenté de 40% ;

- les déplacements s'effectuent le plus fréquemment en voiture particulière.

Les distances parcourues sont de 50% plus longues en périphérie, par rapport au centre, la part estimée de la voiture atteignant 84% en périphérie (tableau 42).

La portée moyenne des déplacements à pied est limitée à 0,5 km. Si on exclut les distances ainsi parcourues, les déplacements motorisés sont évalués (en 2000) à :

Tableau 42

Déplacements par individu, un jour de semaine

(source : JL MADRE, J MAFFRE, "La mobilité régulière et la mobilité locale en 1982 et 1994", *Consommation mode de vie*, n°88-89, Paris, INSEE, 1997)

L'estimation 2000 est basée sur les taux de progression constatés entre 1982 et 1994.

	1994		2000 (estimation)	
	Centre	Périphérie	Centre	Périphérie
Distance moyenne (km)	18	27,6	19,4	33,4
Nombre de déplacements par personne	3,4	3	-	-
Nombre de déplacements par mode				
Marche à pied (%)	31,1	17,2	27,4	13,1
Transports collectifs (%)	11,2	5,6	12,5	5,5
Voiture (%)	54,1	72,6	60,7	84,7
Deux roues (%)	3,6	4,6	2,3	3

Tableau 43

Déplacements hebdomadaires, par personne de plus de six ans non compris la marche à pied (Source, 1994: JL MADRE, J MAFFRE)

L'estimation 2000 est basée sur les taux de progression constatés entre 1982 et 1994.

	1994				2000 (estimation)			
	Centre	Banlieue	Périphérie	Rural	Centre	Banlieue	Périphérie	Rural
Distance moyenne par personne (km)	128	148	185	181	136	162	222	210
Par mode (%)								
Transports collectifs	14,3	12,1	5,5	4,7	15	11	5	5
Automobile	80,6	82,1	88,6	90	82	85	94	91
Autres	5,1	5,8	5,9	5,3	3	4	1	4

- 19 km/jour/personne pour une résidence au centre ;
- 33,2 km/jour/personne pour une résidence en périphérie.

Un découpage plus fin selon l'aire urbaine permet également d'estimer les distances hebdomadaires parcourues par transport motorisé (tableau 43). Le cas de Paris est sans doute légèrement différent de celui des autres villes-centre, par la part plus faible de la voiture particulière (tableau 44). Sur la base des émissions des différents modes

de transport, différentes selon les zones urbaines (tableau 45), il est possible d'estimer les émissions dues au déplacement, selon le lieu de résidence. Comparées au cas de Paris, les émissions annuelles dues aux déplacements sont doublées en banlieue, et triplées en périphérie (tableau 46). Une estimation plus fine des consommations et des émissions dues à la circulation automobile, distinguant les déplacements en centre ville et les trajets périurbains, réduirait sans doute cet écart.²⁶

Les performances comparées des trois morphologies

La consommation d'énergie

Les trois consommations d'énergie annuelles liées directement à la morphologie urbaine sont prises en compte :

- la consommation de chauffage,
- l'entretien régulier des bâtiments et de la voirie,
- les déplacements quotidiens,

ainsi que les autres besoins d'énergie des logements, estimés forfaitairement à un total de 74,5 kWh/m².an, dont 57 % sous forme d'électricité. La consommation d'énergie en éclairage public dépend également de la densité urbaine et du

type de réseau de desserte. Bien qu'elle représente une part non négligeable des dépenses énergétiques des communes, de l'ordre de 20% (en moyenne, 48% de la consommation totale d'électricité d'une commune), cette consommation d'énergie demeure cependant modeste, comparée aux autres besoins énergétiques : un point lumineux consomme annuellement de 200 à 900 kWh, selon sa puissance et sa durée d'utilisation. Pour un budget estimé à 40 francs par habitant et par an²⁷ la consommation annuelle d'énergie de l'éclairage public représente environ 5 MJ par unité de surface habitable, soit cinquante fois moins

	Paris	Banlieue et couronne
Distances parcourues (en voyageur x km)	9,93.10 ⁹	61,76.10 ⁹
Nombre d'habitants (en millions)	2,151	8,152
Taux d'utilisation de la voiture particulière	33 à 56%	70 à 90%

Zone	Taux d'occupation en pers. / véhicule)	Efficacité Energétique (en gep / voyageur.km)	Emissions De CO2 (en geC / voyageur.km)
Voiture particulière Interurbaine	2	29,5	26,1
Voiture particulière Urbaine	1,5	50,1	44,2
Voiture particulière Centre-périphérie (domicile-travail)	1,1	68,3	60,3 (estimation)
Autobus Centre-périphérie	13	25,5	20,9
Transports collectifs Métro + RER Urbaine	-	15,5 à 28,5	1,4 à 2,5 (estimation)

	Paris	Petite couronne	Grande couronne
Transports collectifs (en km / an)	2700	2050	995
Automobile (en km / an)	1800	5550	8965
Total déplacements (en km / an)	4500	7600	9960
Total consommation d'énergie (en MJ/an)	6804	15705	23426
Total émissions (en TeC / an)	0,108	0,291	0,455

Tableau 44

Déplacements annuels en région parisienne (données 1994)

Source : F. LEBRUN, H. PODEVIN, "La mobilité locale selon les aires urbaines, nouveau zonage standard d'observation", *Notes de synthèse du SES*, n° 120, Nov-déc 1998

Tableau 45

Impact environnemental comparé de différents modes de transports

D'après : Carine BARBIER, Lionel CAURET, Chloé VLASSOPOULOU, Novembre 2000.

Tableau 46

Distances parcourues et émissions par personne selon le lieu de résidence (selon l'estimation moyenne : 6.65 geC/km en transports collectifs urbains, 50 geC/km en automobile)

que les besoins autres que le chauffage dans le logement.

Dans le cas d'un logement neuf parisien, la consommation d'énergie annuelle destinée au chauffage reste 50% supérieure à celle qui est requise pour les déplacements : ceux-ci ne comptent que pour 25% environ du total de la consommation d'énergie (Tableau 47). Le cas d'un logement neuf de l'urbanisme collectif est sensiblement différent : la consommation liée aux déplacements, nettement plus élevée qu'à Paris, équivaut à l'ensemble des besoins énergétiques du logement, qui atteignent 545 MJ/m².an. La situation du logement pavillonnaire est similaire : la part des déplacements représente 50% du total. Les consommations d'énergie totales des trois logements de construction ancienne mais réhabilités sont moins contrastées (figure 39).

Les consommations totales d'énergie varient de 800 MJ/m².an pour un logement neuf parisien à 1300 MJ/m².an (+ 60%) pour le pavillonnaire neuf périurbain, et à plus de 2000 MJ/m².an

pour un pavillon de construction ancienne (figure 40). A moins d'agir sur les déplacements, il est quasiment impossible pour un logement en périphérie d'atteindre une performance énergétique similaire à celle du logement en centre ville : il faudrait une isolation parfaite de l'enveloppe (U moyen =0) pour égaler le niveau de consommation totale d'un logement parisien ayant reçu une simple réhabilitation thermique. Rappelons que la réhabilitation de l'enveloppe telle qu'elle est proposée est loin d'être complète : les parois verticales seraient maintenues dans leur état d'origine, le coefficient U moyen restant nettement supérieur à la référence réglementaire de la construction neuve en 2001 (1,86 W/m².K contre 1,05 W/m².K).

Les émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ dues aux déplacements apparaissent préoccupantes, particulièrement en périphérie : elles atteignent alors deux à trois fois le niveau des émissions dues au chauffage

Tableau 47

Consommations d'énergie pour les trois morphologies et pour deux niveaux de performance thermique de l'enveloppe
Consommation d'énergie de chauffage : moyenne gaz / électricité
Rénovation : avec isolation et doubles vitrages

Energie (MJ/m ² .an)	Paris	Grand ensemble	Pavillonnaire
Chauffage (neuf / réhabilité)	315 / 556	277 / 490	373 / 839
Autres consommations	268,2	268,2	268,2
Rénovation Bâtiment + voirie	18,8	43,5	54,2
Déplacements	206	561	601
Total (neuf / réhabilité)	808 / 1049	1150 / 1362	1296 / 1762

Tableau 48

Emissions de CO₂ pour les trois morphologies et pour deux niveaux de performance thermique de l'enveloppe
Emissions dues au chauffage : 12,1 geC / MJ

Emissions (geC/m ² .an)	Paris	Grand ensemble	Pavillonnaire
Chauffage (neuf / réhabilité)	3818 / 6742	3360 / 5935	4516 / 10167
Autres consommations	3261	3261	3261
Rénovation Bâtiment + voirie	312	600	953
Déplacements	3271	10394	11662
Total (neuf / réhabilité)	10662 / 13586	17615 / 20189	20392 / 26043

Tableau 49

Consommation totale d'énergie par personne pour deux niveaux de performance thermique de l'enveloppe

en MJ/pers.an	Paris	Grand ensemble	Pavillonnaire
Total logement (neuf / réhabilité)	19866 / 27826	16490 / 22435	27105 / 45287
Déplacements	6804	15705	23425
Total général (neuf / réhabilité)	26670 / 34630	32195 / 38140	50530 / 68712

Tableau 50

Emissions totales de carbone par personne pour deux niveaux de performance thermique de l'enveloppe

en teC/pers.an	Paris	Grand ensemble	Pavillonnaire
Total logement (neuf / réhabilité)	0,244 / 0,340	0,200 / 0,275	0,340 / 0,560
Déplacements	0,108	0,290	0,455
Total général (neuf / réhabilité)	0,352 / 0,448	0,490 / 0,565	0,795 / 1,015

(tableau 48). Les émissions de CO₂ varient du simple au double (de 10660 à 20390 geC/m².an) entre les deux cas extrêmes, de Paris et de la périphérie (figure 41).

Les bilans par habitant

L'estimation des consommations et des émissions par personne (tableaux 49 et 50) amplifie les écarts entre les extrêmes, et replace le logement de type HLM dans une position médiane, en rai-

son des différences notables dans les surfaces habitables par personne.

Compte tenu d'un taux d'occupation plus élevé du logement collectif de banlieue (28 mètres carrés par personne, contre 33 à Paris et 39 dans le pavillonnaire), le taux d'émission par personne en logement neuf, dans un immeuble collectif en banlieue, dépasse celui de Paris de 40% (+ 20% pour la consommation d'énergie), alors qu'il est 2 fois plus élevé

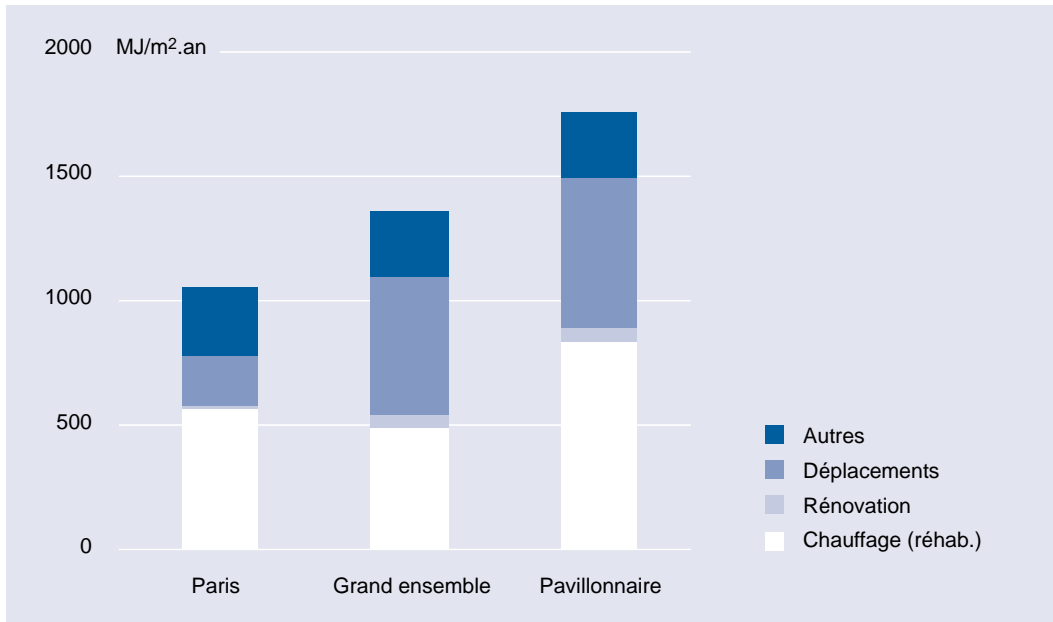


Figure 39
Consommations d'énergie (MJ/m².an)
Cas du logement réhabilité

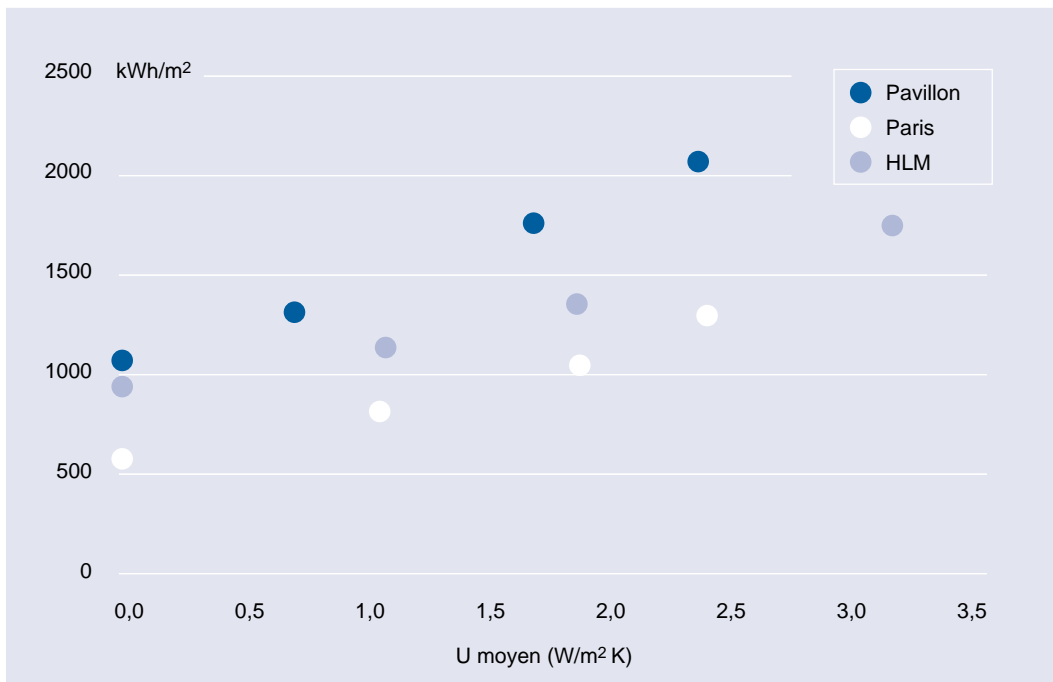


Figure 40
Consommations totales d'énergie en MJ/m².an
Pour chaque morphologie, les points représentent les trois niveaux de performance :
"Neuf" : niveau réglementaire 2000, taux de renouvellement d'air de 0,5 volume/heure (ici U < 1,09)
"Réhabilité" : double vitrage, isolation thermique, taux de renouvellement d'air de 0,5 volume/heure (ici 1,66 < U < 1,87)
"Ancien" : simple vitrage, taux de renouvellement d'air de 1 volume/heure (ici 2,32 < U)
(La valeur U = 0 représente le cas théorique de déperditions nulles par l'enveloppe)

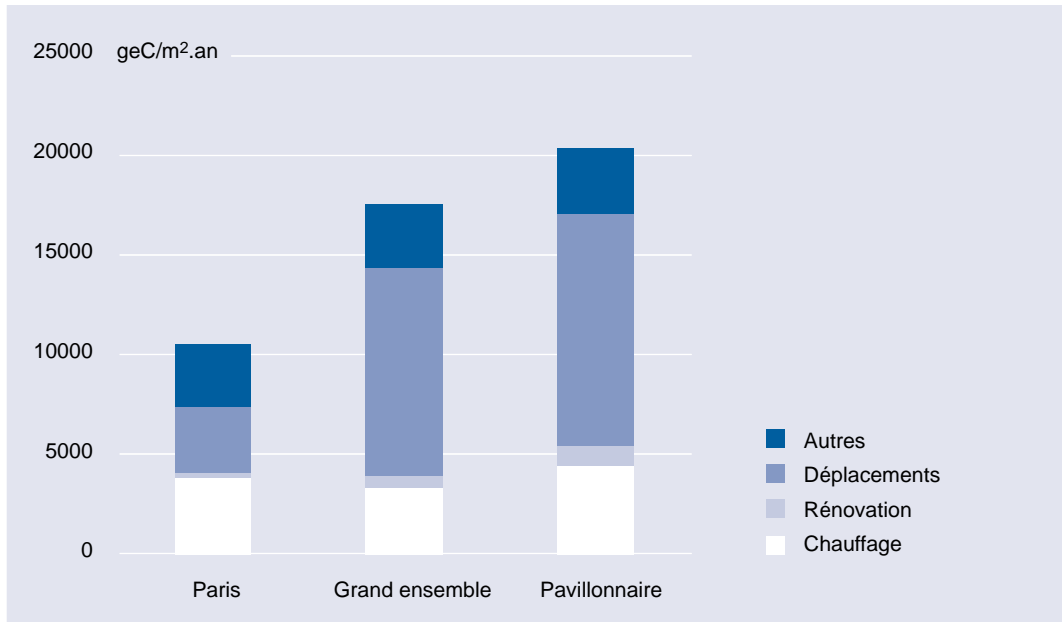


Figure 41
Emissions de CO2
(geC/m².an)
Cas du logement neuf

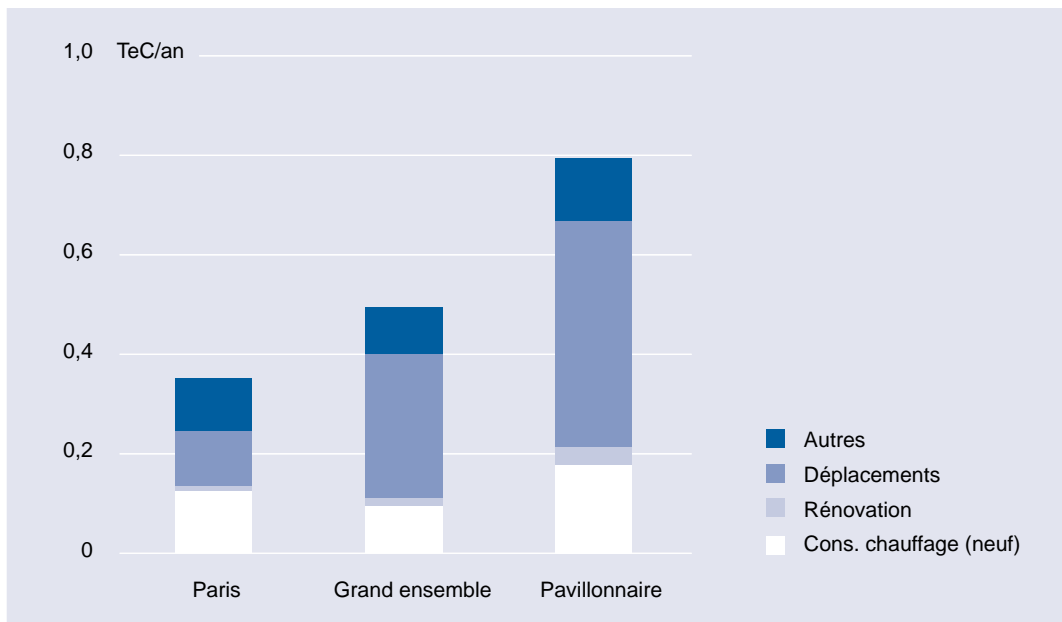


Figure 42
Emissions de CO2 par
personne (en TeC/an)
Cas du logement neuf

à la périphérie, comparativement au centre (figure 42).

Le potentiel de réduction des émissions par habitant n'est donc pas simplement lié aux innovations technologiques, qu'elles s'appliquent aux structures du logement ou qu'elles concernent les voitures particulières : une personne habitant un logement périurbain neuf (réglementation de 2001) émet encore près de

0,8 TeC par an, soit plus du double d'un parisien habitant un logement réhabilité, à un niveau d'isolation thermique bien moins élevé. Le niveau d'émissions moyen du résident en logement neuf urbain (moyenne entre la situation de Paris et celle de la proche banlieue) apparaît équivalent à ce qui peut être atteint en moyenne en France, avec la meilleure technologie²⁸.

Conclusion

Bien que le secteur résidentiel soit parvenu rapidement à une stabilisation des émissions et des consommations d'énergie de chauffage, le potentiel de réduction apparaît élevé, en raison des gisements d'économie d'énergie accessibles dans le parc ancien. Une des conditions d'exploitation de ces ressources réside essentiellement dans la généralisation progressive, à l'ensemble du parc existant, des technologies qui s'appliqueront nécessairement dans la construction neuve, sous la pression de la réglementation thermique.

Les structures urbaines de la ville centre sont sans doute les plus performantes, par leur forte compacité, quoique l'évaluation des besoins de climatisation naissants, écartée ici, risque de pénaliser les logements déjà soumis à l'îlot de chaleur urbain. L'ensemble des autres besoins énergétiques, en croissance continue, tend à devenir la question prioritaire, avant celle du chauffage. Mais, hormis l'éclairage naturel, qui est lié à la forme urbaine et à la conception architecturale, les consommations d'énergie dues aux équipements du logement dépendent fortement des innovations techniques, le taux de renouvellement des appareils étant dès lors beaucoup plus rapide que celui du logement.

La requalification des centres anciens des grandes villes et de leur proche banlieue semble réunir un grand nombre d'atouts :

- les logements équipés de chauffages performants sont moins consommateurs que les logements neufs individuels ;
- les dessertes en transport en commun réduisent la dépendance à la voiture particulière.
- l'investissement énergétique est faible, puisque les infrastructures sont déjà amorties sur une longue durée.

Les actions programmées de réhabilitation de l'habitat ancien, qui contribuent à densifier la ville et sa plus proche périphérie, permettraient de ralentir la périurbanisation telle qu'elle s'est produite à partir des années 1980.

Les tendances ainsi tracées ne sont pas destinées à trancher une fois de plus entre la voiture et les transports en commun, le logement collectif et la maison individuelle. Mais les comparaisons effectuées permettent d'établir les niveaux souhaitables de consommation d'énergie et d'émission pour les interventions sur l'habitat : l'étalement urbain n'est sans doute pas un mal irrémédiable. Sa progression rapide au cours des deux dernières décennies a été encouragée par un contexte politique, économique et institutionnel favorable, ne mesurant pas suffisamment les effets globaux de mesures avant tout sectorielles²⁹. La localisation des commerces, des activités et des logements doit prendre place dans une politique des transports. Les décideurs commencent à entrevoir les possibilités du tramway, et son efficacité en tant qu'instrument d'urbanisme.

L'affichage des performances des logements neufs est un premier pas vers une plus grande clarté :

- des coûts de fonctionnement auxquels les usagers seront confrontés ;
- des coûts énergétiques et des émissions de CO₂ qui engagent également la collectivité.

Une limite semble toutefois apparaître dans la recherche d'une compensation de l'augmentation des impacts liés au transport par un effort supplémentaire dans le secteur du bâtiment (par exemple, le niveau d'isolation thermique). En effet, l'impact environnemental de la mobilité quotidienne (domicile - travail, activités de loisirs, etc.) atteint un niveau équivalent à celui des autres besoins : il est de 45% du total des émissions par personne en périphérie, et de 50 % en banlieue, pour un logement de qualité thermique moyenne. Dans le cas d'un logement neuf, la part des déplacements dans les émissions et dans la consommation totale d'énergie est encore plus aiguë : elle approche 60% pour le CO₂ (50% pour l'énergie) dans le grand ensemble et le pavillonnaire.

Il est donc souhaitable que ces coûts pour l'usager et la collectivité soient également intégrés dans les critères d'implantation de logements neufs : une ville peu dense, avec des périphéries très étalées, résultant de l'urbanisation de la campagne autour des villes, est une source importante de surconsommation d'énergie d'origine fossile, qui se traduit par une aggravation de la pollution de l'air.

Les documents d'urbanisme pourraient, sur la base des indicateurs proposés, évaluer l'impact des

plans de déplacements urbains sur les performances globales (par mètre carré et par personne) des logements, selon leur éloignement du centre. D'autres indicateurs semblent également nécessaires pour apprécier l'impact environnemental d'opérations de logements, telle que la consommation d'espace et de territoire destinés aux ensembles résidentiels ainsi qu'aux infra-

structures de transports, individuels et collectifs. Enfin, la ville centre ne pourra regagner la faveur des usagers qu'à la condition de se concevoir comme univers sensoriel. L'appréciation de la performance devrait donc intégrer les critères propres au confort des espaces intérieurs et extérieurs, dans ses multiples dimensions : la vue, la lumière, le soleil, l'acoustique, les espaces verts.



Annexes

Annexe 1
Consommations d'énergie de chauffage des logements
(moyennes du parc)

Annexe 2
Modèle de parc et consommation d'énergie de chauffage

Annexe 3
Chauffage des logements neufs, 1975-2001

Annexe 4
Caractéristiques d'enveloppe

Annexe 5
Chauffage des logements existants

Annexe 6
Energies de chauffage

Annexe 7
Chauffage et émissions de CO₂

Annexe 8
Caractéristiques des parois des trois études de cas

Annexe 1 Consommations d'énergie de chauffage des logements (moyennes du parc)

Les valeurs adoptées pour les consommations de chauffage (par mètre carré unitaire) en moyenne du parc sont estimées à partir des données CEREN, par logement, et des surfaces moyenne de chaque logement (tableau 1).

La consommation unitaire de chauffage en 1992 s'échelonne (en kWh/m²) de 79 (électricité, en individuel) à 244 (fioul, en immeuble collectif). A statut identique (locataire ou propriétaire), la consommation unitaire est supérieure pour le collectif, comparée à l'individuel.

En 1998, les consommations unitaires sont estimées à 180 kWh/m² en moyenne, et à 200 kWh/m² pour les 67% du parc construits avant 1975.

Tableau 1

Année	Données CEREN kWh/an par logement	consommation unitaire (kWh/an.m2)
1968		338
1973	25.600 (soit 355 x 72 m2)	329,7
1978		260 à 280
1983		230
1984		208
1985	16.700 (soit 204 x 82 m2)	
1988	17.000 (soit 202,4 x 84 m2)	205
1993		190
1995		184
1997	16.000 (soit 181,4 x 88,2m2)	182
1998		180

Annexe 2 Modèle de parc et consommation d'énergie de chauffage

La consommation de chauffage des logements dépend de nombreux paramètres :

- la période de construction, les qualités d'enveloppe évoluant en fonction de la réglementation thermique ;
- le type de logement, en individuel (isolé, en bande) ou en immeuble collectif ;
- le type de chauffage (central individuel, central collectif, par appareils indépendants) ;
- l'énergie ou le combustible utilisés (électricité, gaz, combustible solide, etc.) ;
- la zone climatique (H1,H2,H3).

Compte-tenu de l'importance de la localisation sur les besoins de chauffage, c'est ce dernier paramètre qui est privilégié dans l'étude.

1. Modèle EDF-GDF-CSTB

Un modèle de parc a été établi par EDF, GDF, et le CSTB. La typologie fait intervenir l'âge de la construction, le type de logements, les surfaces et le nombre de pièces, le type de chauffage, le taux de vitrage, le niveau d'isolation, de confort, le mode d'occupation, etc. Une répartition individuel / collectif est proposée, en raison des trois zones climatiques (tableau 1).

2. Modèle de parc simplifié

Une désagrégation plus simple du parc a été opérée, entre les trois zones climatiques H1, H2 et H3 telles qu'elles sont définies dans les règles ThG - CSTB et entre les deux catégories (la maison individuelle MI ou le logement en immeuble collectif IC). La répartition entre les trois zones est déduite des recensements de population (tableau 2).

Sur cette base, le parc est donc désagrégé en six classes, ajustées selon la période de construction (tableaux 3 à 5).

Tableau 1

Zone	Paris	IDF (hors Paris)	H1	H2	H3
Individuel	1%	36%	50%	72%	45%
Collectif	99%	64%	50%	28%	55%
Nb. Pièces	2,49	3,45	3,71	3,97	3,55

(Source : M.C. Faivre, C. François, L. Lapenu, "Résidences principales : vue sur le parc", CSTB Magazine, n°91 Jan-fev 1996, numéro spécial Réhabilitation et maintenance, pp. 39-41)

Tableau 2 : Répartition des logements selon la zone climatique

Zone climatique	H1	H2	H3	Total
Répartition moyenne de la population (1975-2000)	60%	30%	10%	100%
Logements commencés en 1997, (estimation)	140.000	95.000	35.000	270.000
Répartition	52%	35%	13%	100%

Tableau 3 : Logement ancien

	H1	H2	H3	Total
MI 90 m2	0,315	0,2	0,05	0,565
IC 60 m2	0,285	0,1	0,05	0,435
Total (Surface moyenne 77 m2)	0,6	0,3	0,1	1

Tableau 4 : Logement neuf 1975-1982

	H1	H2	H3	Total
MI 105 m2	0,3	0,17	0,05	0,52
IC 66 m2	0,3	0,13	0,05	0,48
Total (Surface moyenne 86,3 m2)	0,6	0,3	0,1	1

Tableau 5 : Logement neuf 1989-2000

	H1	H2	H3	Total
MI 110 m2	0,26	0,25	0,06	0,57
IC 66 m2	0,26	0,1	0,07	0,43
Total (Surface moyenne 91,1 m2)	0,52	0,35	0,13	1

Les caractéristiques morphologiques des logements seront réduites à deux cas, celui de la maison individuelle, et celui du logement collectif. Dans ce dernier cas, les surfaces de toiture et de plancher ont été intégrées, au pro rata des surfaces habitables de l'immeuble. Les bilans sont ensuite ramenés au mètre carré de plancher, ou aux surfaces définies selon la période de construction.

Annexe 3 Chauffage des logements neufs, 1975-2001

1. Réglementation thermique de 1975

L'arrêté du MRU du 17 septembre 1952, qui précède la réglementation thermique de 1975, impose aux immeubles HLM des indices d'isolation volumiques maxima, variant de 1,1 à 2,2 kcal/m³h°C, selon les régions et la position du logement dans la construction. La pratique courante consistait à adopter des solutions types, dans le but de faciliter l'application du règlement de construction. Des valeurs de coefficients de transmission thermique des parois (K, en kcal/m² h °C) et des coefficients de déperditions volumiques (G en kcal/m³ h °C) étaient données à titre d'exemple (tableau 1).

Les seules règles existantes en matière de chauffage sont alors les *Règles de calcul des caractéristiques thermiques des parois de construction et des déperditions de base des bâtiments*. L'arrêté du 10 avril 1974 fixe ensuite des valeurs extrêmes du coefficient G de déperditions volumiques (en W/m³°C) en fonction du type de logement, de sa localisation dans l'immeuble lorsqu'il s'agit de collectif, et de la zone climatique.

Tableau 1 : Ordre de grandeur des coefficients de déperditions volumiques en W/m³K (en 1970)

D'après : M. Croiset, *L'hygrothermique dans le bâtiment*, Paris, Eyrolles, 1972

Type	maisons individuelles	logement intermédiaire	logement en pignon	logement sous toiture
Parois opaques (S SK / V)	1,28	0,35	0,58	0,81
Parois vitrées (S SK / V)	0,47	0,47	0,47	0,47
Renouvellement d'air (0,34.N)	0,47	0,47	0,47	0,47
Total = coefficient G	2,22	1,28	1,51	1,74

Tableau 2

Type	H1	H2	H3
MI	1,45 à 2,15	1,60 à 2,50	1,90 à 2,75
IC	0,85 à 1,60	0,95 à 1,85	1,10 à 2,05

Tableau 3 : Besoins de chauffage (RT 1975)

Neuf 1975	H1	H2	H3	
MI	0,3	0,17	0,05	0,52
105 m ²	20160	18500	15436	
Calcul 1	6048	3145	772	
IC	0,3	0,13	0,05	0,48
66 m ²	7979,4	6831	5407	
Calcul 2	2394	888	270	
TOTAL coeff	0,6	0,3	0,1	1
Total calcul	8442	4033	1042	13517
Surface moyenne (m2)		86,28		
Besoins			(kWh / m2)	156,7
Consommations			(kWh / m2)	de 160 à 253

Les valeurs inférieures de G deviennent applicables au terme d'un période de transition d'un an, en juillet 1975. Les coefficients de transmissions des parois des logements types ont été ajustés pour obtenir les valeurs de déperditions globales précisés par la réglementation (coefficient G en W/m³.C). Les besoins de chauffage annuels sont réduits d'un tiers par rapport à ceux des logements anciens, à 156,7 kWh/m² (tableau 2).

La consommation dépend du type de chauffage. On adoptera une valeur de 180 kWh/m² pour la construction neuve en 1975 (tableau 3).

2. Evolution de la réglementation 1975-2001

L'effet du renforcement de la réglementation thermique sur les niveaux de consommation de la construction neuve est mis en évidence par les données CEREN, distinguant l'individuel et le collectif, ainsi que la source d'énergie (gaz ou électricité) (tableau 4).

Le modèle de parc simplifié donne des résultats moins tranchés en faveur du logement électrique. L'estimation des besoins de chauffage respecte la distinction opérée par la réglementation thermique de 1989 entre les niveaux d'isolation de l'enveloppe des logements à chauffage électrique et les autres types de chauffage : ils sont respectivement de 78,1 kWh/m² et de 86,4 kWh/m² (tableaux 5 et 6).

Les besoins de chauffage du logement moyen sont ainsi estimés à 81,7 kWh/m². La consommation moyenne est estimée à 95 kWh/m² pour la période 1989-1993, suivie d'une réduction régulière de la consommation, à 88 kWh/m² en 1998-2000, pour rendre compte de l'effet "chauffage électrique" indiqué par les données CEREN. A partir de juin 2001, l'application de la nouvelle réglementation se traduit par une réduction des besoins à 71 kWh/m², et des consommations à 81,8 kWh/m² (tableaux 7 et 8).

3. Impact des VIR, vitrages à isolation renforcée

La technologie des vitrages à isolation renforcée apporte une solution efficace au point faible de l'enveloppe, sur le plan des déperditions thermiques. En effet, tandis que l'isolation des surfaces opaques a pu gagner rapidement en performance (en particulier celle des toitures, dont les coefficients surfaciques U peuvent descendre à 0,2 ou 0,25 W/m².K), un double vitrage "norma" dit 4-6-4 demeure aux alentours de U = 3 W/m².K.

Une lame d'air plus épaisse (12 à 16 mm) contenant de l'argon, associée à un revêtement peu émissif sur l'une des faces du verre, permet de réduire les déperditions de moitié (on a considéré ici une valeur moyenne U jour nuit avec menuiserie de 1,65 W/m².K).

Un logement neuf, répondant par ailleurs à la réglementation 2000, pour les autres composants de l'enveloppe, voit sa consommation réduite à 65,7 kWh/m², si l'on garde la même répartition gaz/électricité (soit 43% et 57%), pour des besoins de chauffage de 57,2 kWh/m² (tableau 9).

Tableau 4 : Consommation des logements neufs, en kWh/m2.an - D'après : CEREN, 1998

Période de construction	MI (maison individuelle)		IC (immeuble collectif)		Moyenne
	gaz	électricité	gaz	électricité	(estimation)
Avant 1975	234	117	170	137	240 à 300 (°)
Réglementation 1975	191	69	151	90	180 (°)
Réglementation 1982	145	54	100	79	130 (°)
Réglementation 1985					100
Réglementation 1989	136	51	75	54	85 à 95
Evolution 1974 - 1989	-42%	-56%	-56%	-60%	

(°) Ces valeurs élevées tiennent compte de la part des logements équipés de chauffages au fioul et au charbon, moins performants.

Tableau 5 : Chauffage électrique - (S moyenne 91,08 m2)

Logement à chauffage électrique RT 88	H1	H2	H3	Total
MI	0,26	0,25	0,06	0,57
110 m2	11365	8950	6093	
calcul 1	2955	2238	366	
IC	0,26	0,1	0,07	0,43
66 m2	4200	3200	2103	
calcul 2	1092	320	147	
Total coeff	0,52	0,35	0,13	1
TOTAL CALCUL	4047	2558	513	7117
Besoins (kWh / m2)				78,1

Tableau 6 : Chauffage au gaz - (S moyenne 91,08 m2)

Logement à chauffage non électrique RT 88	H1	H2	H3	Total
MI	0,26	0,25	0,06	0,57
110 m2	11900	9930	7960	
calcul 1	3094	2482	478	
IC	0,26	0,1	0,07	0,43
66 m2	4880	3775	2415	
calcul 2	1269	378	169	
Total coeff.	0,52	0,35	0,13	1
TOTAL CALCUL	4363	2860	647	7869
Besoins (kWh / m2)				86,4

Tableau 7

Période	Besoins kWh/m2	Consommation kWh/m2
1988-1993	81,7	95
1993-1995		92
1995-1998		90
1998-2000		88
2000-2005	71	81,8

Tableau 8 : NRT 2000 - (S moyenne 91,08 m2, valeurs de U identiques pour IC et MI)

NRT 2000	H1	H2	H3	Total
MI	0,26	0,25	0,06	0,57
110	10836	8520	6000	
calcul 1	2817	2130	360	
IC	0,26	0,1	0,07	0,43
66	3200	2200	1520	
calcul 2	832	220	106	
TOTAL coeff	0,52	0,35	0,13	1
Total calcul	3649	2350	466	6466
Besoins par m2				71,0

Tableau 9 : NRT + VIR - (S moyenne 91,08 m2)

NRT + VIR	H1	H2	H3	Total
MI	0,26	0,25	0,06	0,57
110 m2	8360	6405	4015	
calcul 1	2174	1600	241	
IC	0,26	0,1	0,07	0,43
66 m2	3329	2330	1298	
calcul 2	866	233	91	
Total coeff.	0,52	0,35	0,13	1
TOTAL CALCUL	3040	1834	332	5205
Besoins (kWh/m2)				57,2

Annexe 4 Caractéristiques d'enveloppe

Le modèle de parc comporte différentes variantes d'enveloppe, correspondant à quelques périodes de construction : le logement dit ancien (construit avant 1970), le logement neuf de 1975, de 1989 puis de 2001 (NRT) ; on adoptera des valeurs intermédiaires pour les autres étapes réglementaires (tableaux 1 à 5).

Tableau 1 : Toiture (U moyen en W/m2.K)

Type	Zone	Ancien	RT 1975	RT 89	RT 2000
Maison individuelle	H1	1,5	0,50	0,30 / 0,25	0,23 (1) à 0,30 (2)
	H2	1,5	0,65	0,30 / 0,25	0,23 (1) à 0,30 (2)
	H3	1,5	0,8	0,30 / 0,25	0,23 (1) à 0,35 (2)
Immeuble collectif	H1	1 (3) à 1,5 (4)		0,50 / 0,40	
	H2	1 (3) à 1,5 (4)		0,50 / 0,45	
	H3	1 (3) à 1,5 (4)		0,60 / 0,50	

(valeurs en italiques : cas du chauffage électrique) - (1) : plancher sur comble - (2) : toit terrasse - (3) : immeuble ancien - (4) : HLM années 1960

Tableau 2 : Murs (U moyen en W/m2.K)

Type	Zone	Ancien	RT 1975	RT 89	RT 2000
Maison individuelle	H1	1,75	0,70	0,65 / 0,60	0,3 à 0,4
	H2	1,75	0,8	0,70 / 0,60	0,3 à 0,4
	H3	1,75	0,95	0,80 / 0,60	0,3 à 0,4
Immeuble collectif	H1	1,75 (1) à 3 (2)	0,70 (3) à 1,15 (4)	0,80 / 0,65	
	H2	1,75 (1) à 3 (2)	0,8 (3) à 1,15 (4)	0,85 / 0,65	
	H3	1,75 (1) à 3 (2)	0,95 (3) à 1,15 (4)	0,90 / 0,75	

(valeurs en italiques : cas du chauffage électrique) - (1) : immeuble ancien - (2) : HLM années 1960 - (3) : murs pignons - (4) : murs de façade

Tableau 3 : Planchers (U moyen en W/m2.K)

Type	Zone	Ancien	RT 1975	RT 89	RT 2000
Maison individuelle	H1	déperdition. linéique	0,60	0,45 / 0,40	0,30
	H2	id.	0,75	0,50 / 0,40	0,30
	H3	id.	0,95	0,55 / 0,45	0,35
Immeuble collectif	H1	1,5 (1) à 2,8 (2)	0,60	0,50 / 0,40	
	H2	1,5 (1) à 2,8 (2)	0,75	0,50 / 0,45	
	H3	1,5 (1) à 2,8 (2)	0,95	0,60 / 0,50	

(valeurs en italiques : cas du chauffage électrique) - (1) : immeuble ancien - (2) : HLM années 1960

Tableau 4 : Fenêtres - portes fenêtres (U moyen en W/m2.K)

Type	Zone	Ancien	RT 1975	RT 89	RT 2000
Maison individuelle	H1	4,6	4,8	2,45 / 2,25	2,00 (3) à 2,40 (4)
	H2	4,6	4,8	2,45 / 2,25	2,00 (3) à 2,40 (4)
	H3	4,6	4,8	2,45 / 2,25	2,35 (3) à 2,60 (4)
Immeuble collectif	H1	5 (1) à 5,3 (2)		2,45 / 2,25	
	H2	5 (1) à 5,3 (2)		2,45 / 2,45	
	H3	5 (1) à 5,3 (2)		2,45 / 2,45	

(valeurs en italiques : cas du chauffage électrique) - (1) : immeuble ancien - (2) : HLM années 1960 - (3) : avec fermeture - (4) : sans fermeture

Tableau 5 : Portes (U moyen en W/m2.K)

Type	Ancien	RT 1975	RT 89	RT
	3 à 3,5	3,5	3,5 / 1,5	1,5

Annexe 5 Chauffage des logements existants

1. L'ancien non réhabilité

Le mètre carré de logement ancien est basé sur la répartition suivante :

- MI, maison individuelle de 100 m², coefficient 52% en moyenne du parc antérieur à 1975 ;
- IC, appartement en immeuble collectif de 60 m², coefficient 48% en moyenne du parc antérieur à 1975.

Les coefficients affectés à l'individuel et au collectif sont alors répartis selon les trois zones climatiques, en raison de la répartition actuelle de la population. Les besoins de chauffage, calculés pour les trois zones climatiques et pondérés par les différents coefficients, permettent d'établir les besoins puis la consommation moyenne par mètre carré habitable (en adoptant un facteur de rendement de chauffage et d'intermittence moyen de 1,6) (tableau 1).

La valeur de 398 kWh/m² est supérieure à la valeur de référence de 330 kWh/m² constatée en 1968-73 sur l'ensemble du parc : un certain nombre de logements neufs construits dans les années 1960-70 intègrent en effet une isolation thermique dans les parois opaques (béton léger, lame d'air, laine de verre, fibres végétales) ou dans les vitrages ("Thermolux", double vitrage, etc.). Pour cette raison, un logement neuf entré dans le parc avant 1975 sera affecté d'une consommation unitaire de 300 kWh/m² environ, tandis que la valeur proche de 400 kWh/m² qualifiera principalement le logement ancien tel qu'il sera retiré du parc ou réhabilité.

2. Travaux de maîtrise de l'énergie

Les opérations de diagnostic thermique suivies de travaux d'amélioration de l'enveloppe, et de modification des installations de chauffage, ont concerné annuellement plusieurs centaines de milliers de logements anciens depuis 1975. On peut estimer les gains de consommation moyens obtenus par les interventions suivantes :

- isolation des toitures par laine minérale (U réduit de 1,5 à 0,40 W/m².K avec 10 cm d'épaisseur) ;
- remplacement des menuiseries à simple vitrage par des menuiseries à double vitrage "norma" (2 / 4 / 6) ;
- contrôle des infiltrations. (tableau 2).

Tableau 1 : Besoins et consommations du logement ancien - Surface moyenne (77m2)

Base ancien	H1	H2	H3	
MI	0,315	0,2	0,05	0,565
90 m2	27640	22326	15306	
calcul 1	8707	4465	765	
IC	0,285	0,1	0,05	0,435
60 m2	13330	10566	6979	
calcul 2	3799	1057	349	
TOTAL coeff	0,6	0,3	0,1	1
Total calcul	12506	5522	1114	19142
Besoins de chauffage(kWh / m2)				248
Consommations par m2 (coeff. 1,6) (kWh / m2)				398

Tableau 2

	Base	Réhabilitation
Toiture (en W/m2.°C)	1,5	0,4
Paroi vitrée (K J/N en W/m2.°C)	4,6	2,45
Taux de renouvellement d'air (nombre de vol/h)	1	0,5

Tableau 3 : Besoins de chauffage du logement ancien réhabilité - Surface moyenne. 77m2

Réhabilitation de l'ancien	H1	H2	H3	Total
MI	0,315	0,2	0,05	0,565
90 m2	20207	16176	10918	
Calcul 1	6365	3235	546	
IC	0,285	0,1	0,05	0,435
60 m2	6432	4716	2675	
Calcul 2	1833	472	134	
Total coeff	0,6	0,3	0,1	1
TOTAL CALCUL	8198	3707	680	12585
Besoins (kWh / m2)				163,4

L'isolation des parois verticales opaques pourrait également être envisagée, mais posant plus de difficultés (modénatures architecturale, maintien de la surface habitable, traitement des ponts thermiques par exemple), elle est ici écartée. Les gains attendus de cette rénovation limitée en trois points, donc réaliste, sont assez élevés : les besoins sont réduits à 163,4 kWh/m², la consommation moyenne pouvant être estimée à 192 kWh/m² si l'équipement de chauffage est également rénové (50% électrique, 50% gaz avec régulation). Le gain annuel moyen est alors de 200 kWh/m² (tableau 3).

Annexe 6 Energies de chauffage

En 1996, 82% des résidences principales sont équipées de chauffage central (contre 77% en 1988). La source d'énergie du chauffage central (qui comprend les équipements en convecteurs électriques fixes) dépend de l'âge de la construction et du type (collectif ou individuel) :

- l'électricité domine en immeuble collectif neuf ;
- le gaz et l'électricité sont à égalité en maison individuelle ;
- le bois et le charbon sont présents principalement dans les logements construits avant 1949, tandis que le chauffage au fioul équipe essentiellement le parc construit entre 1949 et 1974 (tableau 1).

La part de l'électricité semble plus importante quand l'échantillon ne se limite pas aux logements équipés de chauffage central, mais concerne les 22.131.000 résidences principales en 1992 : cette part dépasse alors 28%, derrière le gaz (plus de 33% avec le GPL), mais devant le fioul (22,1%) (tableau 2).

En revanche, l'électricité domine largement les logements construits entre 1982 et 1990 (tous collectifs et maisons individuelles équipées de chauffage central, soit 2.325.692 logements) (tableau 3 et 4).

En consommation d'énergie finale, les parts des différentes énergies sont différentes, compte tenu des rendements et des régulations des différents équipements de chauffage. L'INESTENE (Septembre 1995) propose une répartition des consommations d'énergie finale dans l'ensemble du parc pour l'année 1990 dans le tableau 5.

On adoptera la répartition suivante en 1998 (tableau 6).

Le scénario 2000-2050 est basé sur les hypothèses suivantes :

- érosion des parts du charbon et du fuel, respectivement de 3% et 28% en 1998, pour atteindre 1,3% et 10,4% en 2050 (au rythme de -7% et -9% tous les 5 ans) ;
- progression du bois (dont la part est de 8% en 1998) au rythme de +5% tous les cinq ans, pour atteindre 13% en 2050 ;
- progression du gaz et de l'électricité, qui se partagent à parts sensiblement égales le reste du marché (60% en 1998, et 75% en 2050) (Figure 1).

Tableau 1 : Part relative (en %) des énergies de chauffage central des résidences principales - Source : CSTB Magazine, n° 91, 1996

	1982	1990	1995
Charbon	3,8	1,5	1,4
Bois	2,0	3,0	3,0
Urbain	3,4	6,0	5,7
Electricité	12,1	24,5	26,6
Fioul	46,6	27,8	26,7
Gaz	32,1	37,2	36,6
TOTAL	100	100	100

Tableau 2 : Part des énergies de chauffage pour l'ensemble du parc en 1992

Type de logement	MI	IC	total
électricité	0,165	0,117	0,282
gaz	0,122	0,188	0,311
GPL	0,02	0,003	0,023
fioul	0,147	0,074	0,221
bois	0,077	0,005	0,082
charbon + bois	0,026	0,008	0,033
urbain	0	0,047	0,047
autre	0,001	0,001	0,001
Ensemble	0,558	0,442	1

Tableau 3 : Part des énergies de chauffage pour les logements construits entre 1982 et 1990 - (données 1992)

Type de logement	MI	IC	total
électricité	0,44	0,188	0,628
gaz + GPL	0,13	0,122	0,252
fioul	0,046	0,009	0,055
charbon + bois	0,04	0,002	0,041
urbain	0	0,023	0,023
Ensemble	0,656	0,344	1

Tableau 4 : Part des énergies de chauffage pour l'ensemble du parc en 1998 - (d'après : ADEME, 1999)

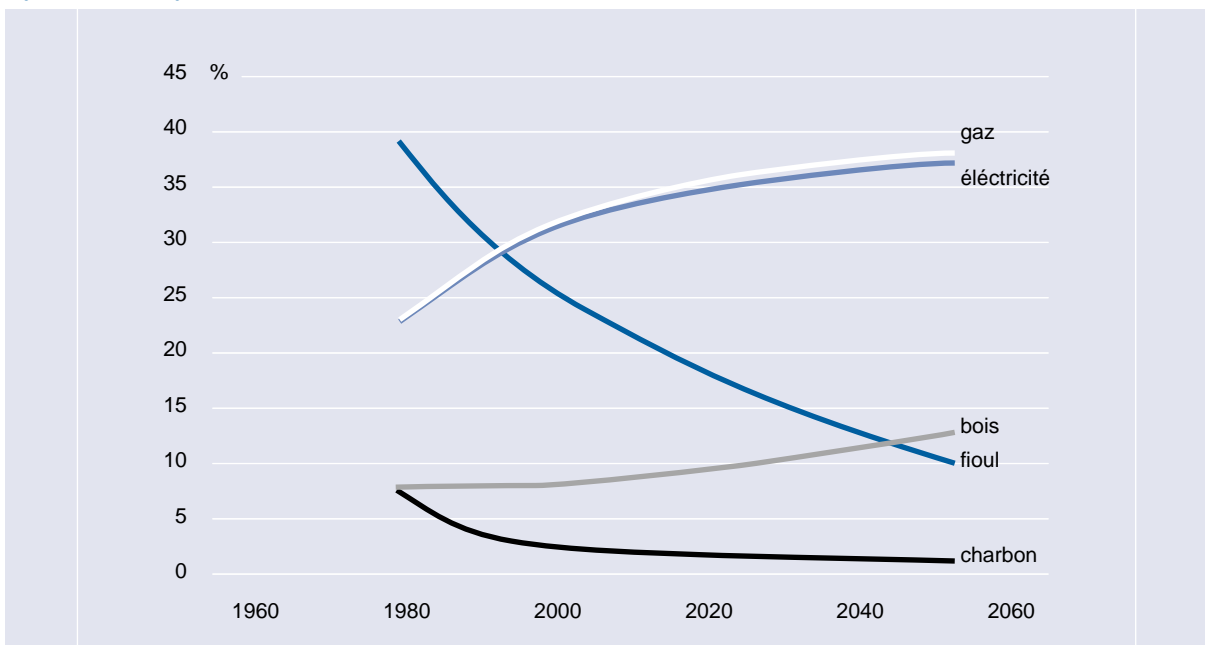
Type de logement	MI	IC	total
Electricité	0,169	0,127	0,296
Gaz + GPL	0,161	0,191	0,352
Fioul	0,157	0,051	0,207
Charbon	0,017	0,013	0,03
Bois	0,059	0,008	0,068
urbain	0	0,047	0,047
Ensemble	0,563	0,437	1

Tableau 5 : Part des consommations d'énergie finale du parc

	1990*	1998**
Electricité	15,58	30
Gaz + GPL	34,29	31
Fioul	31,47	28
Charbon	3,9	3
Bois	13,81	8
divers	0,95	
Ensemble	100	100

* Source : Inestene - ** Parts retenues pour les scénarios (d'après Ademe 99)

Figure 1 : Parts d'énergie finale



Annexe 7 Chauffage et émissions de CO₂

En 1998, la consommation finale d'énergie de chauffage des résidences principales s'élève à 373,73 TWh, soit environ les 2/3 de l'ensemble du secteur résidentiel-tertiaire, qui émet annuellement environ 26 MteC (ou 95 MtCO₂). L'émission unitaire est ainsi estimée à 170 g CO₂/kWh, d'autres sources indiquant des valeurs comprises entre 200 et 210 g CO₂/kWh.

En réalité, l'émission unitaire peut être estimée à partir de la répartition des énergies et combustibles de chauffage, et des émissions de chaque source. Le bilan en CO₂ du bois est considéré comme étant nul (en raison de la fixation de carbone dans la croissance des végétaux). Pour l'électricité, la valeur adoptée est de 120 gCO₂/kWh, légèrement inférieure aux données de la base ökoinventare de l'ETH (140 gCO₂/kWh), afin de traduire la particularité du mix français (tableau 1).

La valeur obtenue est alors de 185 gCO₂ par kWh d'énergie finale de chauffage, en 1998. Les émissions sont donc structurellement en baisse, sous l'effet des transferts des parts du charbon et du fuel vers le bois, l'électricité et le gaz, comme sources d'énergie pour le chauffage : le gain serait donc, par kWh, de près de 20% entre 1993 et 2050 (de 190 gCO₂ par kWh en 1993 à 154,6 en 2050).

Tableau 1 : Emissions de CO₂ par source d'énergie de chauffage

Combustible/ énergie	g/kWh d'énergie finale	Part dans la consommation (en 1998)
gaz / GPL	200	31%
fioul	270	28%
électricité	120	30%
charbon	360	3%
bois	6 à 8	8%

Annexe 8 Caractéristiques des parois des trois études de cas

Tableau 1 : Pavillon

	ancien	réhabilitation	RT2000
toit, (W/m ² K)	1,5	0,3	0,23
murs, (W/m ² K)	1,75	1,75	0,4
plancher, (W/m ² K)	0	0	0
portes, (W/m ² K)	3,5	3,5	1,5
vitrage, (W/m ² K)	4,6	2,45	2,25
ponts kl (W/ml)	1,2	1,2	0,6
Ubât, (W/m ² K)	2,33	1,67	0,71
air (vol/h)	1	0,5	0,5

Tableau 2 : HLM

	ancien	réhabilitation	RT2000
toit, (W/m ² K)	1,5	0,4	0,4
murs, (W/m ² K)	2,5	1,7	0,65
plancher, (W/m ² K)	2	1	0,4
portes, (W/m ² K)	3,5	3,5	1,5
vitrage, (W/m ² K)	5,3	2,45	2,25
ponts kl (W/ml)	0,9	0,9	0,4
Ubât, (W/m ² K)	3,12	1,83	1,08
air (vol/h)	1	0,5	0,5

Tableau 3 : Paris

	ancien	réhabilitation	RT2000
toit, (W/m ² K)	1	0,4	0,4
murs, (W/m ² K)	1,75	1,75	0,65
plancher, (W/m ² K)	1,5	1,5	0,4
portes, (W/m ² K)	3,5	3,5	1,5
vitrage, (W/m ² K)	5	2,45	2,25
ponts kl (W/ml)	0,9	0,9	0,4
Ubât, (W/m ² K)	2,36	1,87	1,05
air (vol/h)	1	0,5	0,5

- 1 Voir en troisième partie l'importance relative de l'investissement initial et de la consommation annuelle d'énergie destinée au chauffage.
- 2 Ministère de l'environnement et du cadre de vie, Direction de la construction, *Enquête réhabilitation du parc immobilier*, 1979.
- 3 F. POINAT, *Le BTP en 1996*, INSEE PREMIERE, Juillet 1997.
A. LAFERRERE, Les ménages et leurs logements, INSEE PREMIERE, décembre 1997.
- 4 L'INSEE indique que les démolitions se sont ralenties au rythme de 25.000 logements par an, cf. E. EDOU, *Le logement en France*, Economica, Paris, 1996.
- 5 Cf. ANNEXE 1 :, Consommations d'énergie de chauffage des logements, moyennes du parc.
- 6 Cf. P. MERLIN, "L'évolution du parc de logements (1945-1986)", in : BONVALET, C., MERLIN, P (éd.) *Transformation de la famille et habitat*, INED, DREIF, IDEF, Presses universitaires de France, 1988.
- 7 Cf. ANNEXE 1.
- 8 Cf. ANNEXE 2, MODELE DE PARC ET CONSOMMATION D'ENERGIE DE CHAUFFAGE.
- 9 Cf. ANNEXE 3 : CHAUFFAGE DES LOGEMENTS NEUFS, 1975-2000.
- 10 Cf. ANNEXE 4 : CARACTERISTIQUES D'ENVELOPPE
- 11 Cf. ANNEXE 5, CHAUFFAGE DES LOGEMENTS EXISTANTS.
- 12 Cf. ANNEXE 3.
- 13 Cf. ANNEXE 5.
- 14 Cf. L. OMALEK, D. LE BLANC, *Les conditions de logement fin 1996*, INSEE PREMIERE, janvier 1998.
- 15 Paris, La Documentation française, 1975-76.
- 16 CSTB Magazine, n°91.
- 17 LTI-Research Group, éd., Long-term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System, Physica-Verlag Heidelberg 1998.
- 18 Cf. ANNEXE 6 : ENERGIES DE CHAUFFAGE.
- 19 Cf. ANNEXE 7 : CHAUFFAGE ET EMISSIONS DE CO₂
- 20 P. BESSY-PIETRI, "Recensement de la population 1999, Les formes de la croissance urbaine", *INSEE Première*, n°701, mars 2000.
- 21 V. FOUCHIER, *Les mesures de la densité. Application à l'Ile-de-France et aux villes nouvelles*, EPEVRY, Rapport de recherche, Programme d'écologie urbaine, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme, Ministère de l'environnement, Septembre 1995.
- 22 Ces ensembles ont été analysés et comparés à d'autres quartiers de la région parisienne par l'équipe DENSE Cité, EPEVRY (FOUCHIER, op. cité, septembre 1995).
- 23 Ces taux de vitrage des parois verticales représentent les seuils au-delà desquels les surfaces vitrées sont "sanctionnées", puisque la valeur réglementaire de référence assigne aux surfaces de vitrage excédant ce seuil, des conductances égales à celles des murs opaques.
- 24 Cf. ANNEXE 3, données CEREN 1998.
- 25 F. LEBRUN, H. PODEVIN, "La mobilité locale selon les aires urbaines, nouveau zonage standard d'observation", *Notes de synthèse du SES*, n° 120, Nov-déc 1998.
- 26 Les émissions de CO₂ par individu et par jour en Ile de France (en 1991) ont ainsi été estimées à 1000 g/ind/jour pour les habitants du centre et à près de 3000 g/ind/jour pour les résidents du péri-urbain, cf. J.P. ORFEUIL, *Stratégies de localisation, Ménages et services dans l'espace urbain*, Paris, La Documentation française, 2000.
- 27 Donnée INESTENE, janvier 1994.
- 28 B. DESSUS a estimé le niveau moyen d'émissions en France par habitant, en 1995, à 0,765 teC/an, qui peut être réduit à 0,400 teC/an avec la meilleure technologie, cf. B. DESSUS, "Effet de serre : les marges de manœuvre", in : *La jaune et la rouge*, n° 555, mai 2000, pp. 52-61.
- 29 Cf. J.P. ORFEUIL, *Stratégies de localisation, Ménages et services dans l'espace urbain*, Paris, La Documentation française, 2000.

Bibliographie

- ▶ ADEME, *Les chiffres clés du bâtiment, Données et références*, Edition 1999.
- ▶ BARBIER C., CAURET L., VLASSOPOULOU C., *Le secteur des transports à l'horizon 2030 selon le scénario "Etat protecteur de l'environnement" du Commissariat Général du Plan - Analyse des mesures à mettre en place, effet sur les émissions de CO2, coût et acceptabilité sociale*. Rapport CNRS – ECODEV, Meudon, Novembre 2000.
- ▶ Base "ökoinventare für Energiesysteme", ETH-ENET, Bern, 1995.
- ▶ Base EQUER, CENERG, ENSMP : B. POLSTER, *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*, Thèse de doctorat en énergétique, Ecole des mines de Paris, décembre 1995.
- ▶ BESSY-PIETRI, P., "Recensement de la population 1999, Les formes de la croissance urbaine", *INSEE Première*, n°701, mars 2000.
- ▶ BERTELO, L., DELAUNAY, D., DORMEAU, J.P., NIBEL, S., ZIRNGIBL, J., "Contribution à l'évaluation des dépenses énergétiques des logements", *Cahiers du CSTB*, 2884, livr. 369, mai 1996.
- ▶ *Les cahiers du CLIP*, n°5, Juillet 1996.
- ▶ *CSTB Magazine*, n°91 Janvier-février 1996, numéro spécial *Réhabilitation et maintenance*, pp. 39-41.
- ▶ DAEI, DHC, *Le compte du logement, Rapport à la Commission des comptes du logement*, Ministère du logement, février 1994
- ▶ DAEI, DGHUC, *Le compte du logement en 1998, Rapport 2000 à la Commission des comptes du logement*, Ministère du logement, 2000.
- ▶ DEHAUSSE, R., *Energétique des bâtiments*, Paris, PYC Edition, 1989.
- ▶ *Economie et statistique*, revue mensuelle de l'INSEE, n° 288-289, 1995
- ▶ EDOU E., *Le logement en France*, Economica, Paris, 1996.
- ▶ FAIVRE, M.C., FRANÇOIS C., LAPENU L., "Résidences principales : vue sur le parc", *CSTB Magazine*, n°91, 1996, pp. 39-41.
- ▶ FOUCHIER, V., *Les mesures de la densité. Application à l'Île-de-France et aux villes nouvelles*, EPEVRY, Rapport de recherche, Programme d'écologie urbaine, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme, Ministère de l'environnement, Septembre 1995.
- ▶ HAEHNEL, I., "Confort thermique et facture énergétique", in INSEE n°288-289, 1995 8/9, *Les ménages et leurs logements au début des années quatre-vingt-dix*, pp. 115-127.
- ▶ IAURIF, INSEE, *Les conditions de logement en Ile-de-France en 1992*, Paris, 1996.
- ▶ INESTENE, *Recensement et exploitation des enquêtes réalisées en secteur résidentiel et tertiaire*, Rapport de recherche ADEME, Paris, janvier 1994.
- ▶ INESTENE, *Habitat et pollution atmosphérique*, Paris, Plan urbanisme construction architecture, Septembre 1995.
- ▶ LAFERRERE A., *Les ménages et leurs logements*, INSEE PREMIERE, décembre 1997).
- ▶ LEBRUN, F., PODEVIN, H., "La mobilité locale selon les aires urbaines, nouveau zonage standard d'observation", *Notes de synthèse du SES*, n° 120, Nov-déc 1998
- ▶ LEPOIVRE, J.P., DESSUS, B., *Long term trend of overall energy used in residential buildings : an exploratory case study*, décembre 1989 (non publié).
- ▶ LTI-Research Group, éd., *Long-term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System*, Physica-Verlag Heidelberg 1998.
- ▶ MADRE, J.L., MAFFRE, J., "La mobilité régulière et la mobilité locale en 1982 et 1994", *Consommation mode de vie*, n°88-89, Paris, INSEE, 1997)
- ▶ MERLIN, P., "L'évolution du parc de logements (1945-1986)", in : BONVALET, C., MERLIN, P (éd.) *Transformation de la famille et habitat*, INED, DREIF, IDEF, Presses universitaires de France, 1988.
- ▶ MERLIN, P., TRAISNEL, J.P., *Energie, environnement et urbanisme durable*, PUF, Coll. Que sais-je ?, 1996.
- ▶ MERLIN, P., *Les transports en région parisienne*, La Documentation française, Paris, 1997, 202 p.
- ▶ Ministère de l'environnement et du cadre de vie, Direction de la construction, *Enquête réhabilitation du parc immobilier*, 1979.
- ▶ NOEL, Ch., "Etude des quantités et des prix de matériaux entrant dans la construction d'un logement", *Cahiers du CSTB* 46/367, octobre 1960.
- ▶ OMALEK L., LE BLANC D., *Les conditions de logement fin 1996*, INSEE PREMIERE, janvier 1998.
- ▶ ORFEUIL J.P., *Stratégies de localisation, Ménages et services dans l'espace urbain*, Paris, La Documentation française, 2000. 75 p.
- ▶ POINAT F., *Le BTP en 1996*, INSEE PREMIERE Juillet 1997.
- ▶ POUGET A., "Les réglementations françaises pour l'habitat et le secteur non résidentiel neuf", in : R. Dehausse, coord., *Energétique des bâtiments*, Tome 3, Paris, PYC Edition, 1989.
- ▶ *Statistiques de la construction en 1996*, Données détaillées du SES, MELTT, DAEI, 1997.
- ▶ *Statistique publique*, n°31, octobre 1999, Synthèses, INSEE.

LE VEHICULE ELECTRIQUE A L' HORIZON 2050

*Introduction du véhicule
électrique dans le parc français
des véhicules particuliers
à l'horizon 2050*

Auteurs

Georgia PLOUCHART (CNRS – ECODEV)
Stéphane HIS (IFP)
Cette étude a été financée par EDF et le CNRS-Ecodev

Synthèse

Saviez-vous que les premiers véhicules électriques ont fait leurs débuts il y a déjà plus de cent ans, et qu'ils dominaient alors le marché des voitures motorisées ? À titre anecdotique, le record du monde de vitesse en 1899 a été atteint par un véhicule électrique sur une course de 1 km. Jusqu'aux années 20, ce type de véhicule est resté compétitif face aux véhicules à moteur à combustion interne. Mais depuis plus de 70 ans, il s'est vu remplacé progressivement par ces derniers, de plus en plus performants, et qui composent aujourd'hui l'essentiel des parcs automobiles.

La principale qualité du véhicule électrique est de n'émettre aucun polluant à l'échappement, ce qui permet de diminuer l'intensité des pics de pollution dans les zones urbaines à forte densité de population. Mais, avec une autonomie limitée et un temps de recharge extrêmement long, dans quelles proportions peut-il pénétrer dans le parc automobile ? La production d'électricité en Europe, basée en partie sur des énergies fossiles dont la combustion génère des quantités importantes de CO₂, ne rend-elle pas finalement le véhicule électrique européen plus polluant qu'un véhicule hybride type "Prius" dont la consommation devrait, à terme, atteindre 3 litres aux 100 km ? Dans ce cas, le véhicule électrique français, avec un parc de production essentiellement nucléaire, n'est-il pas beaucoup plus intéressant ? Cependant, à l'heure où l'on envisage la fin de vie des centrales nucléaires vers 2010-2020 et où la France ouvre ses portes à la concurrence, que va-t-il advenir du parc électrique français ? Quel est, enfin, le plus intéressant des véhicules hybrides, le "deux en un" qui implique une recharge sur le réseau électrique ou celui du type "Prius" qui ne le nécessite pas ?

C'est autant de questions qu'aborde ce document. Basé sur la même méthodologie que l'étude "Automobile et Développement durable" éditée dans les cahiers du CLIP n°9, il a pour objectif d'analyser l'impact environnemental lié à l'introduction dans le parc automobile de véhicules à alimentation électrique par rapport à celle de véhicules s'alimentant en carburant.

Les véhicules étudiés dans cette étude sont de

plusieurs types :

- électriques avec un temps de recharge de 1h et une autonomie de 300 km ;
- hybrides dit "2 en 1" munis d'une double motorisation diesel et électrique nécessitant une recharge sur réseau électrique ;
- hybrides dit de type "Prius", avec une double motorisation (diesel et électrique), mais n'impliquant pas de ponction sur le réseau ;
- à pile à combustible à méthanol, produit à partir de gaz naturel ;
- à pile à combustible à hydrogène liquéfié, produit à partir de gaz naturel.

Un scénario d'introduction dans le parc de véhicule particulier a été élaboré pour chacune de ces technologies. Pour les automobiles réclamant une alimentation électrique, deux parcs de production d'électricité, français et européen, ont été pris en compte. Dans les deux cas, la technologie de pointe du cycle combiné appliquée au gaz naturel a été intégrée progressivement jusqu'en 2050. En France, elle remplace un tiers des centrales nucléaires, notamment pour des raisons politiques, cette technologie étant de plus en plus rejetée par le grand public. En Europe, elle remplace la filière du charbon dans sa quasi-totalité parce qu'elle offre un meilleur rendement et une réduction considérable des émissions de CO₂.

En premier lieu, les résultats montrent, dans tous les scénarios, une réduction des polluants locaux de 75 % entre 2015 et 2050, engendrée par l'application de la norme Euro 2005. Il faut souligner que cette nette diminution d'émissions de polluants locaux en moyenne annuelle, n'exclut pas l'apparition de pics de pollution, mais implique seulement une baisse de leur fréquence et de leur intensité.

Ainsi, le défi principal à relever réside dans la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique du parc de voitures particulières. En effet, la croissance du parc (39 % sur la période 1995-2050) dans le cas d'un scénario "laisser-faire" où la composition du parc ne laisse apparaître que des véhicules à moteur à combustion interne à l'horizon 2050, estompe les efforts mis en œuvre pour réduire les consommations de carburant (injection directe, common

rail). Ainsi, en considérant ce dernier scénario, pour 26 Mtep et 78 Mt de CO₂ consommés et émis aujourd'hui, 30 Mtep et 88 Mt de CO₂ seront consommés et émis en 2050 ; soit une augmentation de la consommation d'énergie de 22 % et des émissions de CO₂ de 17 %.

C'est donc sur ce point que l'introduction de nouveaux véhicules à faibles émissions de CO₂ et consommation énergétique joue un rôle important. Dans ce cadre, parmi l'ensemble des technologies étudiées, on peut distinguer quatre catégories :

- le véhicule "très haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un meilleur bilan (par exemple CO₂ ou énergie) en 2050 que celui d'aujourd'hui ;
- le véhicule "haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile permet de maintenir un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) invariant entre les valeurs d'aujourd'hui et celles en 2050 ;
- Le véhicule "moyenne performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) plus performant que celui du scénario "laisser-faire" en 2050, mais ne permet pas de maintenir les valeurs du bilan (par exemple CO₂ ou énergie) d'aujourd'hui ;
- Le véhicule "faible performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) plus mauvais que celui du scénario "laisser-faire" en 2050. Les résultats des scénarios nous montrent qu'en termes d'émissions de CO₂, sont de "très haute performance" les véhicules hybrides et les PAC méthanol, de "haute performance" les véhicules électriques, et de "faible performance" les PAC à hydrogène liquéfié. En terme de consommation énergétique sont de "très haute performance" les véhicules hybrides, de "haute performance" les PAC méthanol et de "moyenne performance" les véhicules électriques et les PAC à hydrogène liquéfié.

Ainsi, parmi les types de voiture étudiés, les véhicules hybrides offriraient la meilleure solution d'amélioration du bilan environnemental. De plus, contrairement au cas des filières pile à combustible dont la mise en œuvre nécessiterait des adaptations industrielles majeures (autant pour la production du carburant que pour celle du groupe moto-propulseurs), les voitures hybrides ne nécessitent pas d'adaptation des structures en place.

En ce qui concerne les voitures dites à "zéro

émission" (émissions de polluants locaux), le scénario d'introduction du véhicule électrique présente les meilleurs résultats à l'horizon 2050. Ce type d'automobile montre aussi une très forte capacité (par rapport aux autres automobiles analysées) à réduire les émissions globales de CO₂ du parc de voitures particulières sur la période 2010-2030, cette propriété est non maintenue par la suite du fait de la limitation de ses parts de marché à une valeur butoir de 26 %. Il reste que ces résultats sont fragiles car tributaires de la filière de production d'électricité et de la valeur limite de son taux de pénétration dans le marché, liée à l'autonomie et au temps de recharge. Par ailleurs, la PAC H₂₁, qui posséderait, à l'inverse du véhicule électrique, l'avantage d'un confort d'utilisation proche de celui d'un véhicule classique, est tributaire du mode de stockage de son carburant. En effet, le seul moyen actuel de lui donner une autonomie raisonnable est de liquéfier l'hydrogène. Mais cette étape pénalise la filière et l'empêche de rivaliser avec les performances environnementales des autres véhicules. Le stockage de l'hydrogène reste donc, aujourd'hui, l'un des points les plus délicats freinant le développement de ce carburant et seule une avancée majeure dans ce domaine pourrait faire basculer les résultats du scénario "PAC H₂₁".

L'impact de la structure du parc de production d'électricité n'est significatif qu'en termes d'émissions globales de CO₂ dans le cas des scénarios véhicule électrique et véhicule hybride type "2 en 1" : 3 % de différence en faveur du parc électrique français en 2050. Dans le cas du scénario PAC H₂₁ (l'usage de l'électricité intervenant dans l'étape de liquéfaction de l'hydrogène), la distinction apparaît principalement au niveau de la consommation énergétique du parc automobile, qui est près de 4 % supérieure en 2050 dans le cas du parc électrique français par rapport au parc européen.

En conclusion, cette étude nous conduit à opter pour une introduction massive de véhicules hybrides dans le marché. Les véhicules électriques à zéro émission peuvent être un bon complément, particulièrement à court terme, pour réduire les émissions locales des zones de trafic denses. Néanmoins, le temps de recharge important et l'autonomie trop faible de ces voitures par rapport à l'automobile thermique limitent leurs applications à des missions et donc des marchés spécifiques.

Introduction

"Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment ou de créer une gêne", Conseil de l'Europe - 14 septembre 1967.

L'ORS (Organisation Régionale de la Santé en Ile-de-France) a démontré dans le cadre de l'étude ERPURS (Évaluation de Risques de la Pollution Urbaine pour la Santé) un lien direct entre les pollutions atmosphériques, locale et régionale, et les problèmes de santé (respiratoires et cardio-vasculaires). À titre indicatif, sur la zone d'étude ERPURS, les transports seraient responsables de 66 %, 50 %, et 67 % des émissions respectives des oxydes d'azote, des composés organiques volatils et du monoxyde de carbone. Ils seraient entre autres responsables de 70 % des pluies acides (transformation des NO_x, du SO₂ et dans une moindre mesure du CO en composés acides au contact de l'humidité) et de 75 % de la pollution photochimique (formation d'Ozone à partir de NO_x et de divers composés organiques tels les COV et le CO).

À cette pollution locale et régionale, il faut ajouter les émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de CO₂, responsables de plus de 50 % du phénomène de renforcement de l'effet de serre, proviennent en France pour 30 % du secteur du transport. Liée aux émissions de CO₂, la consommation énergétique du secteur du transport prend aussi une part importante dans la consommation d'énergie totale en France. Elle s'élève à 21 % dont la moitié est imputable aux véhicules particuliers.

Face à ce constat, de nombreuses actions concernant les véhicules particuliers sont entreprises :

- l'application des normes Euro 2005 réduisant sévèrement les émissions à l'échappement des véhicules ;
- des restrictions de la circulation en cas de pic de pollution ;
- une politique d'expérimentation et d'encoura-

gement à l'utilisation de carburants alternatifs ou de l'électricité (ex : fiscalité "écologique"-loi de Finances 1998) ;

- des incitations exercées sur les constructeurs automobiles pour abaisser les consommations unitaires des véhicules ;
- un investissement important dans la recherche et le développement des véhicules alternatifs.

C'est dans cette optique d'amélioration du bilan environnemental lié au transport, que l'étude publiée dans les cahiers du CLIP n°9 a été réalisée. La troisième partie de cette étude était consacrée à l'analyse prospective de la filière automobile sur la période 1995-2050 avec pour objectif l'examen des solutions techniques permettant de limiter à terme l'impact sur l'environnement de la filière automobile. À cette fin, des scénarios de pénétration de différents types de véhicules ont été élaborés : GNV, GPL et véhicules alternatifs tels que la pile à combustible et l'hybride. Une analyse de cycle de vie des carburants a donc été effectuée pour chaque véhicule afin d'estimer l'impact global sur l'environnement de tels scénarios. Cette étude a pu mettre en évidence deux points :

- une forte efficacité des normes Euro 2005 à réduire la pollution locale ;
- l'importance de l'introduction d'un véhicule alternatif dans le parc automobile afin de réduire les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Le véhicule électrique n'avait pas été pris en compte dans cette étude. En effet, son autonomie très limitée (environ 100 km) et son temps de recharge à domicile de plusieurs heures le condamnent aujourd'hui à une mission de "petits trajets" et donc à rester marginal sur le marché automobile. Cependant, les recherches intenses dans le domaine des batteries entreprises ces dernières années permettent d'envisager une autonomie de 300 km et un temps de recharge d'une heure à l'horizon 2005. Sa mission deviendrait alors moins restrictive.

L'objet de cette étude est donc de compléter celle des cahiers du CLIP n°9 en évaluant les consé-

quences sur le bilan environnemental (pollution atmosphérique, émissions de gaz à effet de serre et consommation d'énergie) de l'introduction dans le parc de voitures particulières, de véhicules nécessitant une ponction électrique sur le réseau. Dans un premier temps, nous rappellerons les scénarios établis pour l'étude des cahiers du

CLIP n°9 et les hypothèses émises pour la modélisation du parc de voitures particulières en France. Les types d'automobiles étudiés et leurs scénarios d'introduction dans le parc automobile sont décrits dans une seconde partie. Enfin, le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats.



Méthodologie

Principe

Le but de l'étude est de compléter la troisième partie intitulée "Analyse prospective de l'évolution du bilan énergie, environnement et matières premières du parc automobile en France (1975-2050)" de l'étude publiée dans les cahiers du

CLIP n°9 réalisée dans le cadre d'ECODEV¹ en introduisant dans le parc automobile français différents véhicules dotés d'une partie plus ou moins importante de propulsion électrique afin d'en analyser l'impact environnemental.

Rappel des scénarios établis lors de la dernière étude

Dans cette étude, trois grandes catégories de scénarios ont été établies :

- Le scénario "Laisser-Faire "

Le parc reste très majoritairement composé de véhicules essence et diesel. On assiste seulement à une faible pénétration des véhicules GPL.

- Le scénario gaz

Le parc essence est invariant par rapport au scé-

nario précédent, en revanche le véhicule GNV remplace totalement le véhicule diesel.

- Le scénario "Véhicule Évolué "

Il est marqué par une forte pénétration du véhicule dit "évolué " (hybride ou pile à combustible) à partir de 2015. Ce dernier remplace une grande partie du parc essence en 2050.

Modélisation du parc de véhicules particuliers

La méthodologie employée pour l'évolution du volume du parc reprend celle développée dans les cahiers du CLIP n°9 :

- le calcul du parc V.P. est basé sur les nouvelles immatriculations introduites chaque année et sur les coefficients de survie des différents types de véhicule ;
- le taux de croissance annuel des immatriculations reste identique à celui utilisé dans l'étude des cahiers du CLIP n°9, et s'élève à 0,07 %. Il correspond à une croissance modérée du parc ;

- les coefficients de survie² n'existant que pour les véhicules diesel et essence, une moyenne a été calculée et affectée aux autres types de véhicule. On supposera, par ailleurs, que ces coefficients sont constants au cours du temps.

Nous obtenons finalement un parc de 26,5 millions de voitures particulières (MVP) (contre 26,8 calculés par le CCFA) en 1998, de 29,9 MVP en 2020 et de 36,8 MVP en 2050, ce qui correspond à un taux d'équipement de 0,563 véhicule par habitant (chiffre actuel des États-Unis).

Construction des scénarios

Principales hypothèses et caractéristiques des scénarios

Caractéristiques des véhicules étudiés

Quatre grandes catégories de véhicules ont été étudiées : celui à propulsion électrique, hybride, à pile à combustible et thermique. Un tableau récapitulatif des caractéristiques de ces différentes automobiles est donné en annexe 1.

Le véhicule électrique

Caractéristiques

Nous avons considéré dans l'étude un véhicule électrique muni d'une batterie Lithium-Ion. Encore peu développée aujourd'hui, elle offre, d'une part, une capacité énergétique importante, avec une efficacité de recharge élevée par rapport aux batteries classiques (annexe n°1). D'autre part, elle ouvre la porte vers un autre système encore plus performant, celui de la batterie LI-SP (Solid Polymer). En prenant en compte cette avancée technologique et un investissement croissant dans ce domaine de recherche, nous pouvons envisager un véhicule électrique en 2005 avec une autonomie de 300 km et un temps de recharge d'une heure.

Consommation

Pour des raisons d'inadéquation du cycle européen (MVEG) aux véhicules électriques, toutes les consommations électriques ont été calculées à partir d'une formule³ (cf. annexe n°2) dépendant de la vitesse, du type de batterie et de la masse du véhicule.

D'après une étude INRETS⁴, décrivant le comportement des véhicules sur les réseaux routiers, 28,2 % du kilométrage annuel d'une voiture par-

ticulière est urbain (avec une vitesse moyenne de 33,6 km/h), le reste du trajet étant parcouru à une vitesse moyenne de 87 km/h. Nous avons utilisé cette répartition pour calculer la vitesse moyenne du véhicule électrique afin d'en déduire sa consommation.

Le véhicule à pile à combustible

L'hydrogène alimentant la PAC H_2 ne provient pas d'une électrolyse, comme il en avait été question dans les cahiers du CLIP n°9. Il est produit à partir du gaz naturel, source primaire la plus employée actuellement pour sa production. Quant aux hypothèses de consommation des véhicules à PAC, nous nous sommes basés sur l'étude des cahiers du CLIP n°9.

Le véhicule hybride

Consommation du véhicule hybride type "Prius" (2005-2015)

Pour la période 2005-2015, sa consommation a été calculée⁵ en considérant une réduction de 40 % en régime urbain, et une réduction de 10 % en régime extra-urbain par rapport à un véhicule dont le moteur à combustion interne est identique à celui pris en compte pour la partie thermique de l'hybride. Dans notre cas, nous nous sommes basés sur la consommation du véhicule diesel à injection directe. La répartition kilométrique utilisée pour obtenir la consommation finale du véhicule, est la même que celle utilisée pour le véhicule électrique : 28 % pour la partie urbaine et 72 % pour la partie extra-urbaine.

Consommation du "2 en 1" (2005-2015)

Dans le cas du véhicule "deux en un", nous avons considéré que la consommation tout électrique comprenait 24 % du kilométrage annuel (à une vitesse moyenne de 31,4 km/h), ce qui correspond à la partie de trajet urbain sur les grands axes avec perturbation de la circulation ou sur les petites rues.

Le reste du parcours (4 % en régime urbain et 72 % en régime extra-urbain) est considéré comme effectué avec le moteur thermique. La consommation thermique est alors calculée de la même façon que celle du véhicule hybride type "Prius".

À partir de 2015

À partir de 2015, la consommation des véhicules hybrides est identique à celle établie dans l'étude des cahiers du CLIP n°9. De l'ordre de 3l équiva-

lent essence / 100 km, elle correspond à l'objectif fixé par les constructeurs. Nous l'avons alors supposé atteint en 2015.

Les véhicules à moteurs à combustion interne

Pour les véhicules à moteur à combustion interne, les hypothèses des cahiers du CLIP n°9 ont été reprises. Les consommations des véhicules essence et diesel classiques ont été calculées à partir de la moyenne de consommation du Panel SECODIP. La technologie de l'injection directe a été prise en compte et permet un gain de consommation de 20 % dans le cas du diesel et de 15 % dans celui de l'essence. En ce qui concerne le GPL, ses consommations (en kep/100 km) en mélange pauvre et stœchiométrique ont été supposées respectivement identiques à celles des véhicules essence classique et à injection directe.

Émissions de polluants

Deux types de polluants ont été étudiés :

- les polluants réglementés (HC, NO_x, CO et les particules) ;
- les SO_x.

HC, CO, NO_x

Les valeurs d'émissions à l'échappement des véhicules ayant un moteur thermique et l'hybride du type Prius, sont basées sur les normes Euro 2005. Il est fort probable que ces normes seront plus restrictives en 2050. Cependant, nous verrons ultérieurement qu'elles suffisent, à elles seules, à diminuer de façon très sensible les émissions globales quels que soient les scénarios.

Les véhicules électriques et ceux à pile à combustible alimentés par de l'hydrogène stocké à bord sont considérés comme étant à "zéro émission". Ceux du type "2 en 1" sont considérés comme des véhicules à "zéro émission" sur la part de leur trajet annuel moyen fonctionnant avec le moteur électrique seul et comme des véhicules thermiques sur le reste du parcours.

En ce qui concerne les voitures à pile à combustible alimentées par de l'hydrogène produit à bord à partir de méthanol, nous avons supposé que leurs émissions étaient nulles. On notera que cette hypothèse est forte dans le sens où la production d'hydrogène devrait générer des polluants, notamment durant la phase de démarrage de l'unité. À ce titre, il est intéressant de relever que les niveaux de rejets annoncés par les équipes de

recherche travaillant sur de tels systèmes ne prennent en général pas en compte ces phases les plus néfastes. Pour comparaison, un moteur thermique peut émettre jusqu'à 90 % des HC lors des 200 premières secondes du cycle normalisé.

Particules

Les normes d'émissions pour les véhicules diesel n'existant qu'à partir de 1992, nous avons pris pour base les valeurs calculées par PSA depuis 1974. Entre 2010 et 2020, nous avons intégré progressivement⁶ le filtre à particule (FP) qui permet de réduire les émissions à l'échappement jusqu'à 0,004 g/km (à titre indicatif, la norme EURO 2005 s'élève à 0,025 g/km). Les évolutions des normes pour les particules sont présentées dans la Figure 1.

SO_x

Les émissions de SO_x à l'échappement des véhicules sont directement proportionnelles à la teneur en soufre dans le carburant. Ces teneurs s'élèvent à 50 ppm en 2005, suivant les spécifications établies. Une demande de 10 ppm a été requise par les constructeurs (l'ACEA). En effet, cette faible concentration leur permettrait de réduire (à l'aide du catalyseur De-NO_x), les émissions de NO_x d'un facteur 3. Cependant, cette nouvelle directive risquerait fortement d'engendrer un surcoût et une augmentation des émissions en CO₂, non négligeables pour les

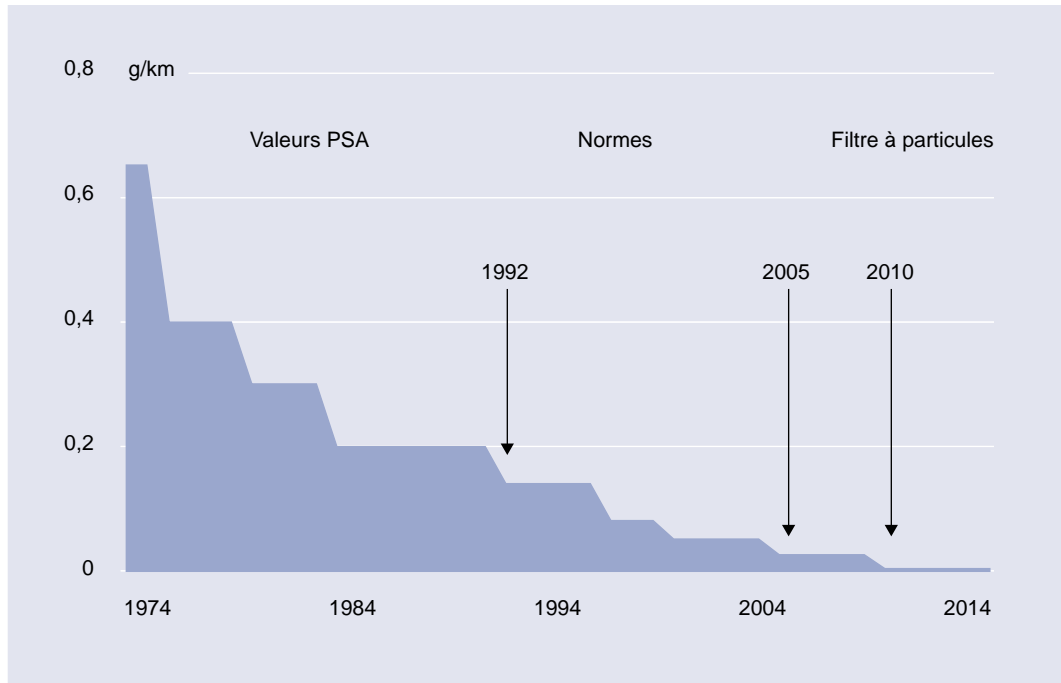


Figure 1
Émissions de particules à
l'échappement des véhicules
diesel

raffineries. L'incertitude de l'application de cette spécification et le manque de données en terme d'émissions de CO₂ supplémentaires (calculs en

cours à l'IFP) ne nous ont pas permis de prendre en considération cette faible teneur en soufre.

Scénarios d'évolution des parcs automobiles

Dans cette étude, nous avons comparé un scénario de référence "laisser-faire" aux différents scénarios dits "véhicule évolué" (PAC, véhicule hybride, véhicule électrique).

Pour chaque scénario :

- nous avons travaillé avec un kilométrage annuel moyen constant de 13 800 km sur l'ensemble du parc de voitures particulières. Cette moyenne sera donc affectée aux véhicules évolués (à l'exception du véhicule électrique). Le véhicule essence garde un kilométrage constant de 11 000 km/an jusqu'en 2050. Le véhicule diesel, remplaçant progressivement une partie du parc essence, a un kilométrage annuel qui diminue en conséquence. Il passe de 19 000 km/an en 1997 à 17 400 km/an en 2050 ;
- la technologie de l'injection directe ou du mélange stœchiométrique dans le cas du GPL, a été introduite progressivement jusqu'à un remplacement total de l'ancienne technologie en 2008 pour le diesel, 2015 pour le véhicule essence, et 2010 pour le GPL.

Le scénario "laisser - faire "

Pour ce scénario, les parts de marché du diesel évoluent jusqu'à 50 % en 2010, puis restent stables. On remarquera que ce taux permet de satisfaire l'engagement de l'ACEA en 2008 : limitation à 140 g/km de CO₂ en moyenne pour les véhicules neufs. Bien évidemment, ce n'est pas l'unique façon d'atteindre cet objectif (voir Figure 2).

Les scénarios "Véhicule Evolué "

Trois types de scénarios, intégrant chacun une technologie particulière, ont été établis :

- un scénario "véhicule PAC ", caractérisé par l'introduction de cette nouvelle technologie à partir de 2015, jusqu'à un pourcentage de 43 % dans le parc de voitures particulières en 2050 (voir Figure 3).
- un scénario "véhicule hybride " marqué par la pénétration de ce type de véhicule à partir de 2005. En 2050, le parc des véhicules hybrides représente 51 % du parc total (voir Figure 4).

• un scénario "véhicule électrique" avec une pénétration du véhicule électrique identique au scénario "véhicule hybride", à la seule différence que les parts de marché restent limitées à 26 % (pourcentage atteint en 2028). Ce scénario, est très favorable aux véhicules électriques, puisqu'ils atteindraient le nombre de 9,5 millions en 2050 (voir Figure 5).

Pour les différents scénarios "véhicule évolué", les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

- seul le véhicule électrique est doté d'une mission spécifique (cf. §1) ;
- la substitution du véhicule dit "évolué" aux véhicules essence et diesel se fait de manière indifférenciée ;

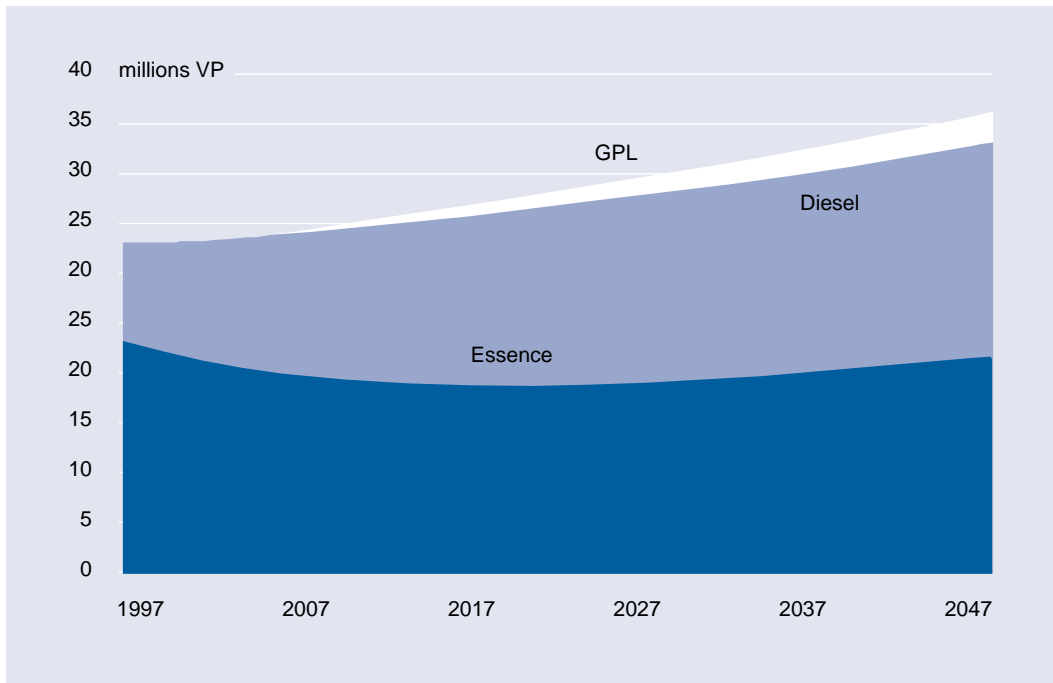


Figure 2
Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "laisser faire"

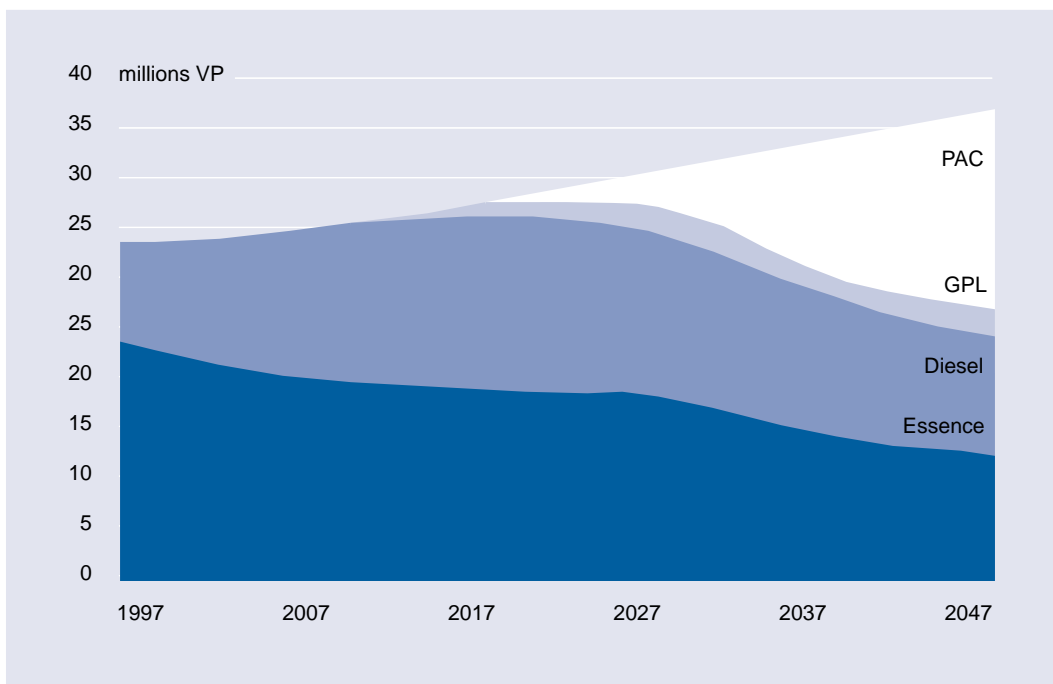


Figure 3
Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule PAC"

- en supposant les problèmes de coût de production et de technologie résolus, ces voitures seront introduites de façon analogue à la pénétration du véhicule diesel sur la période 1975-1998 (correspondant à une augmentation des parts de marché de 14 % par an en moyenne) ;
- tous les véhicules existants déjà sur le marché ont été introduits à partir de 2005. Seuls les véhicules à pile à combustible pénètrent dans le parc à partir de 2015. En effet, cette technologie nécessite encore aujourd'hui des efforts de recherche importants.

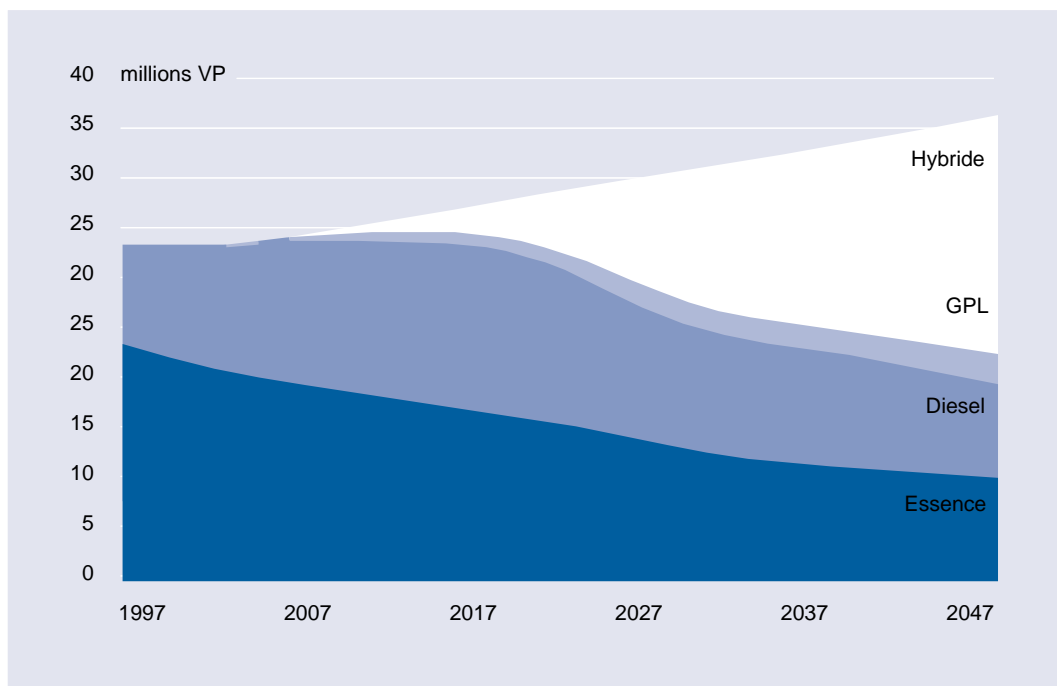


Figure 4

Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule hybride"

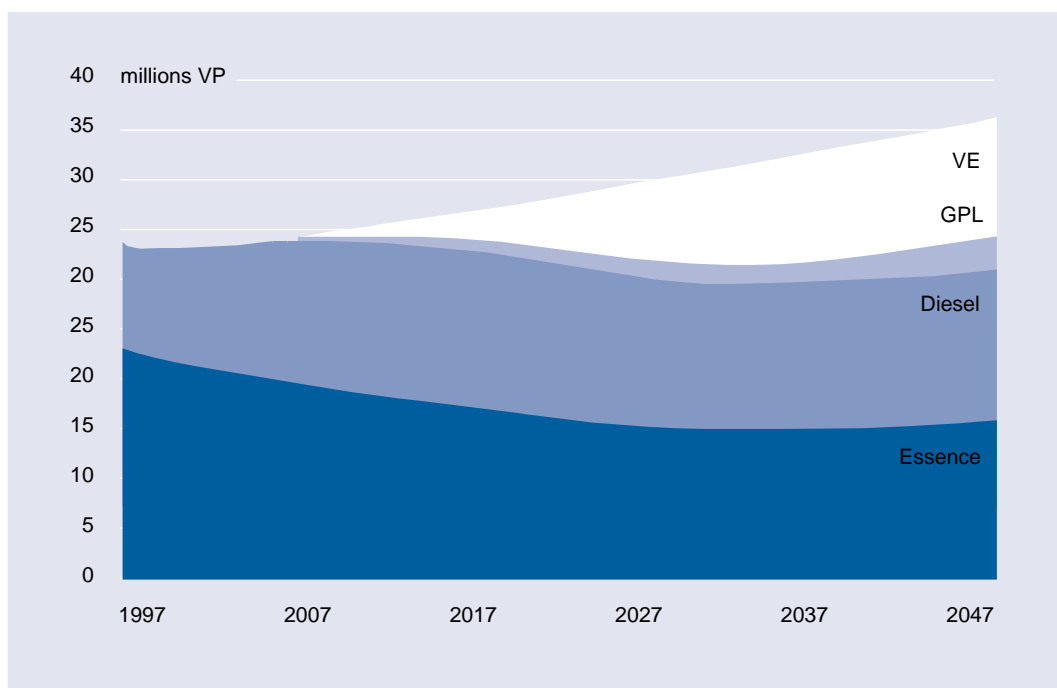


Figure 5

Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule électrique"

Dans le cas du véhicule électrique, il n'est pas envisageable d'émettre l'hypothèse d'une rupture technologique lui permettant d'être utilisé au même titre qu'un véhicule classique à moteur thermique. En effet, l'autonomie de la batterie et le temps de recharge restent un facteur limitant pour l'utilisateur.

Dans cette optique, le véhicule tout-électrique ne peut être viable que pour une mission de "petits trajets". Dans le cas idéal, son taux maximal de pénétration dans le marché aurait dû être déterminé par le pourcentage de véhicules uniquement utilisés pour des trajets inférieurs à 300 km. Cette étude, trop spécifique, n'a pas pu être effectuée. Nous avons alors repris les résultats de l'enquête Transport de 1993/1994⁷ dont l'objectif était de définir la proportion de véhicules faiblement utilisés par

les ménages. Les résultats ont montré que parmi les véhicules recensés (322), 26 % n'ont jamais parcouru plus de 150 km par jour au cours de l'année de l'étude. La moyenne kilométrique annuelle correspondant à cette catégorie est de 8 500 km.

La base de 150 km de l'étude INSEE est faible par rapport à l'autonomie de 300 km du véhicule électrique que nous considérons dans l'étude. Cependant, une autonomie deux fois plus grande que nécessaire permet de laisser une marge de sécurité à l'utilisateur. De plus, l'observation des déplacements des voitures particulières étant stable au cours des cinq dernières années⁸, nous avons utilisé et considéré comme constants sur la période 2005-2050 les résultats qui découlent de l'étude INSEE (kilométrage annuel moyen de 8500 km et 26 % d'utilisateurs).

Les filières carburants et électriques

Les carburants

Les analyses de cycle de vie des filières carburants sont identiques à celles établies dans les cahiers du CLIP n°9, à l'exception de la filière de production d'hydrogène.

Actuellement, il existe principalement 4 procédés de fabrication d'hydrogène : l'électrolyse, le vaporeformage, l'oxydation partielle et l'autotherme. Nous avons retenu, pour cette étude, la technologie du vaporeformage à partir de gaz

naturel (technologie la plus largement répandue actuellement).

À partir du gaz naturel, l'hydrogène liquéfié est produit aujourd'hui avec un rendement (cf. tableau n°1) de 31 % contre 10 % à partir de l'électrolyse (cf. les cahiers du CLIP n°9). Ce résultat, certes plus intéressant que celui de l'électrolyse, n'en reste pas moins faible par rapport aux autres filières carburants. L'étape de liquéfaction en est la principale cause.

Carburants	Rendements énergétiques de la mise à disposition des carburants	Véhicules	Consommations énergétiques globales des véhicules (kep primaires / 100 km)
Essence 96	86 %	Classique	7.3
		Injection directe	6.3
Diesel 96	91 %	Classique	6.4
		Injection directe	5.05
Essence 2005	82 %	Classique	7.7
		Injection directe	6.6
Diesel 2005	83 %	Classique	7
		Injection directe	5.5
		Hybride type Prius (avant 2015)	4.6
		Hybride type Prius (après 2015)	3
GPL	85 %	Mélange pauvre	7.4
		Mélange stœchiométrique	6.3
Hydrogène liquide ¹	31 %	Pile à combustible	7.4
Méthanol ¹	65 %	Pile à combustible	3.9

Tableau 1

Rendements énergétiques des filières carburants

(1) : à partir de gaz naturel

L'électricité

Nous avons pris en considération les parcs électriques français et européen qui se différencient respectivement par leur part importante en nucléaire et en électricité ex-charbon.

Les technologies

Les tendances actuelles s'orientant vers l'utilisation du gaz naturel, nous avons intégré au cours du temps la technologie du gaz à cycle combiné au détriment du nucléaire en France et du charbon en Europe.

En effet, sous la pression du protocole de Kyoto, qui requiert une réduction de 8 % des émissions de CO₂ en Europe, le gaz à cycle combiné devient une filière de plus en plus attractive, devant celle du charbon. Face aux centrales nucléaires, cette nouvelle technologie ne rivalise, certes pas, du point de vue des émissions de CO₂. Cependant, le nucléaire présente d'autres aspects négatifs qui nous ont conduits à le remplacer partiellement par le gaz naturel CC. En effet, son système de sécurité et les procédés de stockage des déchets radioactifs présentent encore aujourd'hui une part d'incertitudes, qui, aussi faible qu'elle soit, est lourde de conséquences et amène l'opinion publique à rejeter cette filière. En ajoutant à ces contraintes, le fait que la fin de vie des centrales nucléaires en France est prévue pour les années 2010-2020 et que le coût d'installation de telles structures est lourd, nous avons estimé un développement important du gaz naturel CC.

Dans le tableau 2, sont comparées les filières de production d'électricité à partir du Cycle Combiné appliqué au gaz naturel, de la turbine à Gaz (TAG), de la Turbine à Vapeur (TAV), du charbon et du charbon propre. Nous pouvons ainsi noter que le gaz naturel CC permet, non seulement, d'améliorer le rendement des TAG de 30 %, mais de réduire les émissions de NO_x à 9 ppm/kWh_e, ainsi que celles liées au soufre qui est, contrairement au charbon, quasi-inexistant dans le gaz naturel. Face à de telles performances, le charbon propre ne peut rivaliser, sur-

tout en termes d'émissions de CO₂. C'est pour-quoi, cette filière disparaît progressivement dans les scénarios pour laisser place à cette nouvelle technologie.

Pour des raisons économiques et de performances, nous n'avons pas tenu compte des TAV (turbines à vapeur) dans les scénarios. En effet, les TAG ont connu ces dernières années des progrès technologiques importants qui les rendent aujourd'hui aussi performantes que les TAV et plus appropriées au gaz naturel. De plus, leur coût d'installation est plus avantageux. A titre indicatif, le coût d'investissement d'un cycle combiné (500 à 700 \$/kW) est le double de celui d'une TAG, mais la moitié de celui d'une centrale à vapeur conventionnelle⁹.

Scénarios d'évolution des parcs électriques

Le scénario européen (cf. figure 6) a été bâti à partir d'un ouvrage de la Commission Européenne¹⁰.

En 1998, le parc européen était principalement composé des filières gaz naturel (11 % dont 4,5 % en CC), charbon (31 %, pas de charbon propre), nucléaire (36 %) et hydraulique (12 %). Sur la période 2000-2030, la part du nucléaire décroît assez rapidement jusqu'à 17 %, puis plus lentement jusqu'en 2050. Le charbon, par contre, ne rencontre pas de phase de stabilisation et est remplacé progressivement par le gaz naturel CC pour finir à une part de 5 % en 2050. À cette date, la nouvelle technologie représente alors 69 % du parc électrique européen.

L'introduction du gaz naturel CC en France a été inspirée des scénarios établis par le Commissariat Général au Plan¹¹, dans l'hypothèse de durée de vie de 40 ans des centrales nucléaires.

En 2020 le parc électrique français¹² (cf. figure 7) est composé principalement des filières gaz naturel CC (6 %), hydraulique (15 %), et nucléaire (73 %, contre 80 % aujourd'hui). À partir de cette date, les centrales atteignant leur fin de vie, deux voies sont envisageables :

soit nous optons pour le scénario dit "société de marché" : le parc nucléaire n'est pas renouvelé

Tableau 2

Émissions et rendements des procédés thermiques de production d'électricité
Source : EDF

(1) General Electric : Turbine à gaz type LM 6000

(2) General Electric : Turbine à gaz naturel CC type 9H

	Rendement (%)	CO2 (g/kWh)	SO2 (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	CO (g/kWh)
Gaz Naturel						
Turbine à Combustion(1)	41	520	0,004	0,2	0,04	0,075
Turbine à Vapeur	42	507	0,004	1,84	0,0786	0,043
Cycle Combiné(2)	60	340	0	0,074	0,04	0,075
Charbon						
Conventionnel	38	927	5,06	3,017	0,015	0,08
Propre	50	682	0,373	0,222	0,011	0,059

et disparaît dans sa quasi-totalité pour laisser place au gaz naturel CC ; soit nous envisageons un scénario dit d " état industriel ", où l'état intervient dans le domaine économique et industriel pour une industrie compétitive et stable à long terme. Le parc nucléaire est alors reconstruit afin d'assurer la consommation de base.

Le scénario "société de marché " se rapprochant du scénario établi pour le parc électrique européen, nous avons retenu pour le parc électrique français, les options du scénario "État industriel ". La hausse de la demande d'électricité étant assurée par une production issue du gaz naturel, le parc nucléaire, dimensionné uniquement pour la consommation de base, décroît

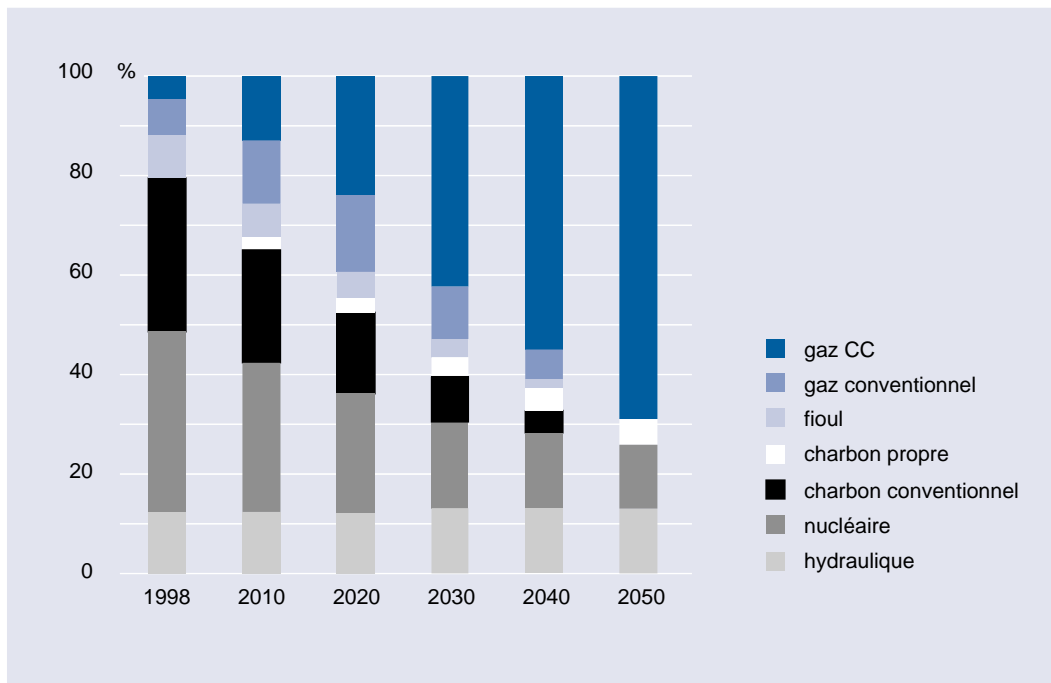


Figure 6
Évolution du parc électrique européen

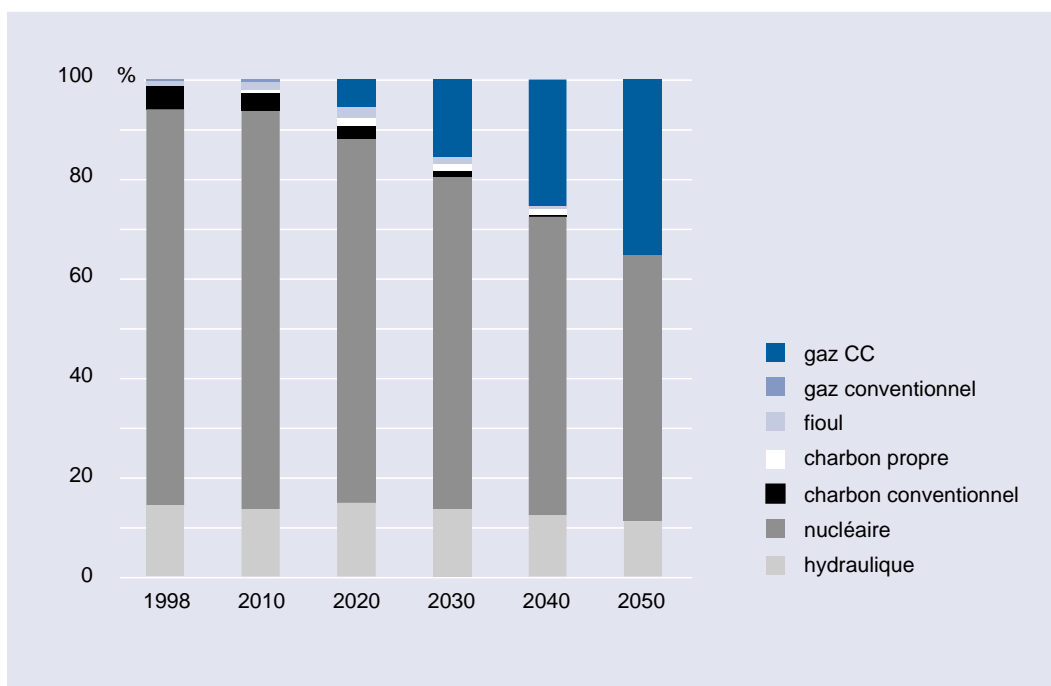


Figure 7
Évolution du parc de production d'électricité en France

progressivement jusqu'à 53 % en 2050, pour une proportion de gaz naturel CC de 35 %, le reste de la répartition (12 %) représentant la filière hydraulique. Le charbon, peu utilisé en 2000 (4,5 %), disparaît complètement en 2050.

Dans chaque scénario, le fuel a été négligé pour des raisons de simplification. Il est évident qu'il sera exploité dans les années à venir, d'autant plus que la production d'électricité par le procédé IGCC dans les raffineries représente une des solutions de reconversion du fuel lourd¹³. Cependant, nous considérons son influence sur le parc électrique comme négligeable.

Émissions de CO₂ et rendements

Les résultats globaux des émissions et des rendements des filières de production d'électricité et de leurs évolutions sont donnés dans le tableau 3 et illustrés par les figures 8 et 9.

Il est important de remarquer que les performances des parcs électriques représentatifs des situations française et européenne (cf. figures 8 et 9 et tableau

3) ont tendance à se rejoindre en termes d'émissions de CO₂. Cette évolution est le résultat de l'hypothèse forte, faite dans les deux situations, d'une utilisation accrue du gaz naturel comme source primaire d'énergie soit aux dépens du nucléaire (pour la France) soit aux dépens du charbon (pour l'Europe). L'introduction de cycle combiné à base du gaz naturel favorise dans les deux cas le rendement énergétique (augmentation de 44 % en Europe et 14 % en France), alors qu'il provoque une augmentation des émissions de CO₂ en France (de 112 %, contre une chute de 30 % pour l'Europe). Impact de la structure du parc de production d'électricité sur la consommation des véhicules électrique et hybride type "2 en 1".

Les figures 10 et 11 fournissent les évolutions des consommations des véhicules électriques alimentés par le réseau français ou européen.

En 2050, les émissions de CO₂ des véhicules électriques français et européen sont respectivement de 83 % et 75 % plus faibles par rapport à celles d'un véhicule essence à injection directe (fig. 9 et 10).

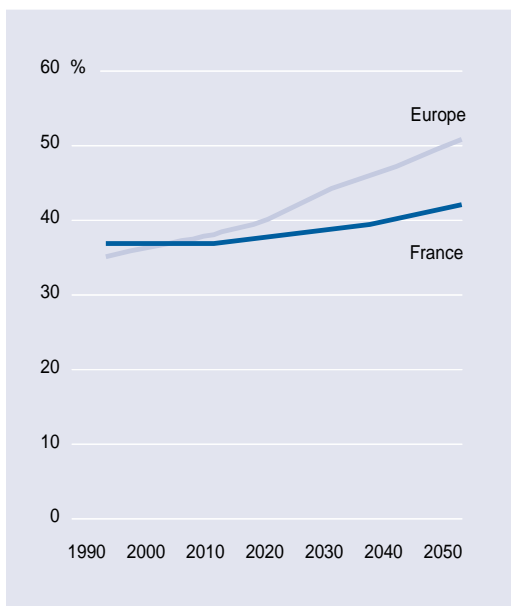


Figure 8

Rendements des parcs électriques

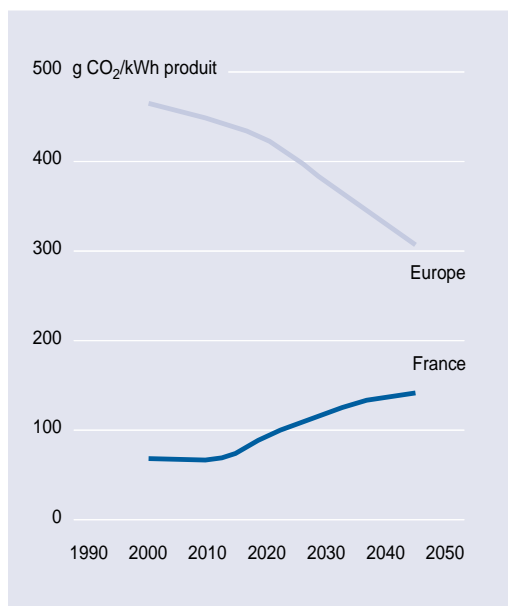


Figure 9

Émissions de CO₂ des parcs électriques

g/kWh	1995		2010		2030		2050	
	Europe	France	Europe	France	Europe	France	Europe	France
CO2	468	67	446	67	384	103	307	141
NOx	1,45	0,21	1,19	0,20	0,66	0,13	0,17	0,09
HC	1,83	0,27	1,59	0,27	1,11	0,30	0,71	0,30
CO	0,14	0,06	0,15	0,06	0,16	0,08	0,16	0,09
SO2	2,23	0,35	1,67	0,32	0,74	0,17	0,06	0,03
CH4	1,57	0,23	1,37	0,21	0,98	0,25	0,67	0,27
Particules	0,42	0,09	0,31	0,08	0,15	0,05	0,04	0,03
Rendement	0,35	0,37	0,38	0,37	0,45	0,40	0,51	0,42

Tableau 3

Émissions et rendements des parcs électriques européen et français (sorties centrales)

Leurs consommations d'énergie sont respectivement de 45 % et 54 % inférieures à celles du même véhicule de référence. Ces résultats s'expliquent autant par la faible consommation choisie pour le véhicule électrique, que par les évolutions des caractéristiques des parcs de production d'électricité (utilisation accrue du gaz naturel en cycle combiné).

Les figures 12 et 13 donnent les évolutions des émissions de CO₂ et des consommations d'énergie primaire des véhicules hybrides "2 en 1" considérés dans l'étude.

Les différences que l'on peut observer entre les véhicules électriques "français" et "européen" sont

moins significatives que lorsque l'on compare les véhicules hybrides "2 en 1" français et européen (fig. 12 et 13). À l'horizon 2050, ces véhicules hybrides sont aussi performants que les en terme de consommation énergétique (gain de 48 % par rapport au véhicule essence à injection directe) mais n'atteignent pas son faible taux d'émissions de CO₂ (seulement 57 % de réduction par rapport au véhicule essence à injection directe). En effet, ces véhicules profitent moins de l'amélioration de la production d'électricité que le véhicule électrique du fait d'une moindre ponction sur le réseau.

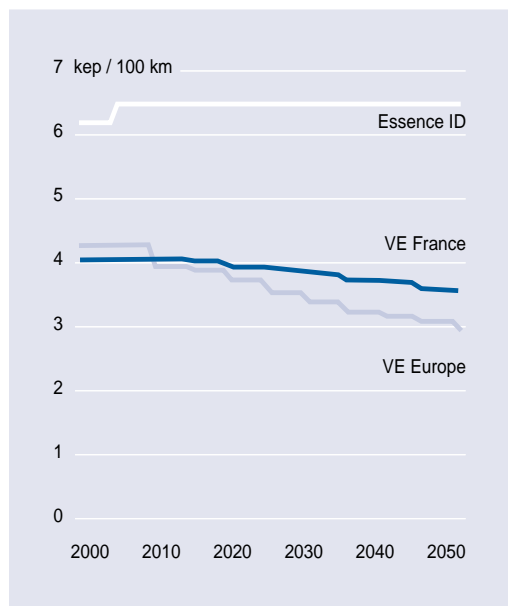
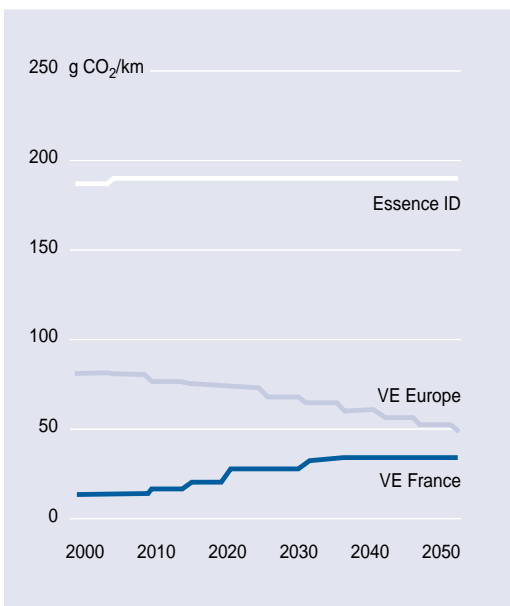


Figure 10
Émissions de CO₂ du véhicule électrique sur l'ensemble de la filière

Figure 11
Consommation d'énergie primaire du véhicule électrique

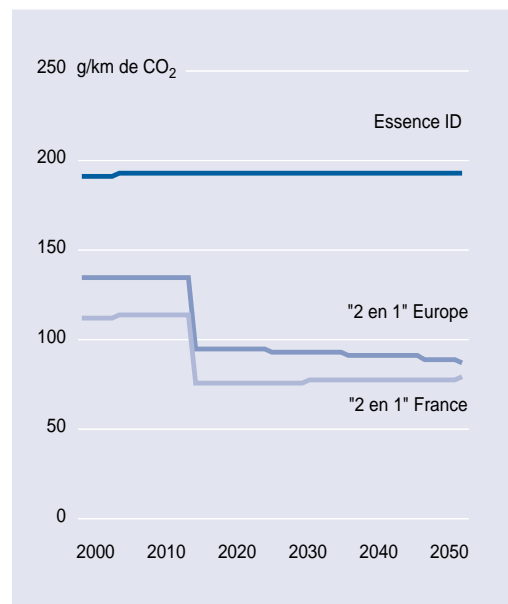
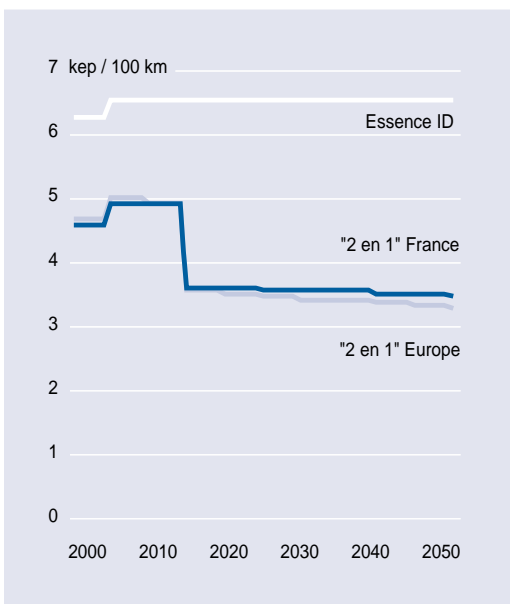


Figure 12
Consommation primaire d'énergie du véhicule hybride "2 en 1" sur l'ensemble de la filière

Figure 13
Émissions de CO₂ du véhicule hybride "2 en 1" sur l'ensemble de la filière

Analyses des résultats

Émissions de CO₂ et consommation d'énergie

Analyse des émissions de CO₂ et des consommations énergétiques des différents scénarios

Le scénario "laisser-faire"

Les figures 14 et 15 fournissent les évolutions des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie du parc automobile Français.

A la lecture de ces graphes, deux remarques peuvent être faites :

- l'apparition de pics en 2000 et 2005 qui s'explique par la mise en distribution progressive de carburants à 50 ppm de soufre (50 % en 2000 et 100 % en 2005). Cette spécification entraîne, en effet, une surconsommation énergétique globale de 6 % et une augmentation des émissions de CO₂ de 3 %.

- les efforts mis en œuvre pour réduire les consommations de véhicules à combustion interne sont observables jusque dans les années 2020, mais ils ne suffisent pas, à l'horizon 2050, à compenser la croissance du parc automobile (39 % sur la période 2000-2050) et les effets négatifs liés à la nouvelle spécification de teneur en soufre dans les carburants.

Ainsi, ces deux facteurs engendrent, dans le cas d'un scénario "laisser-faire", une surconsommation énergétique de 22 % et une augmentation des émissions de CO₂ de 17 % par rapport au parc de voitures particulières actuel. Ces premiers résultats montrent donc l'intérêt de l'introduction de nouvelles technologies de véhicules plus performantes.

Figure 14
Emissions de
CO₂ du
scénario
"laisser-faire"

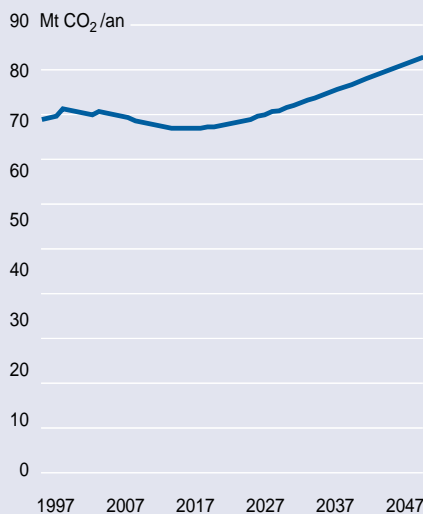


Figure 15
Consommation
d'énergie du
scénario
"laisser-faire"



Les scénarios "véhicule évolué" (parc de production d'électricité français)

Pour mieux visualiser les résultats, les figures 16 et 17 ne comprennent pas les scénarios faisant intervenir le parc électrique européen. Une comparaison des conséquences de la structure du parc de production d'électricité sur les bilans

énergétiques et d'émissions de CO₂ des parcs automobiles fait l'objet du chapitre 3.1.2.

À l'analyse de ces courbes, on peut distinguer quatre catégories dans l'ensemble des technologies étudiées :

- le véhicule "très haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre

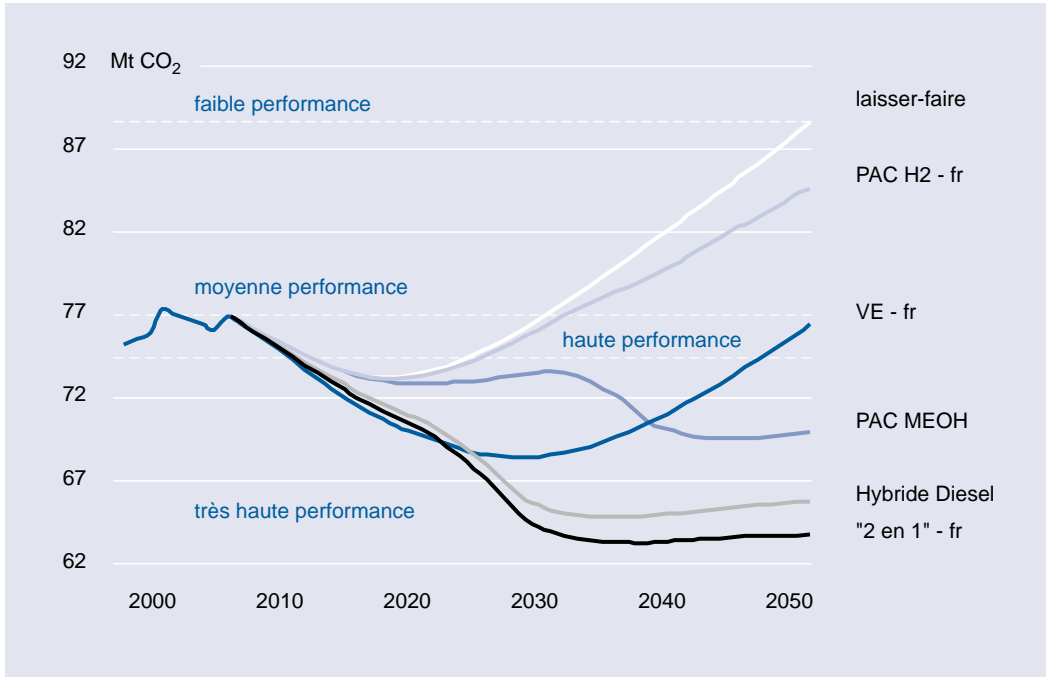


Figure 16
Émissions de CO₂ des différents scénarios

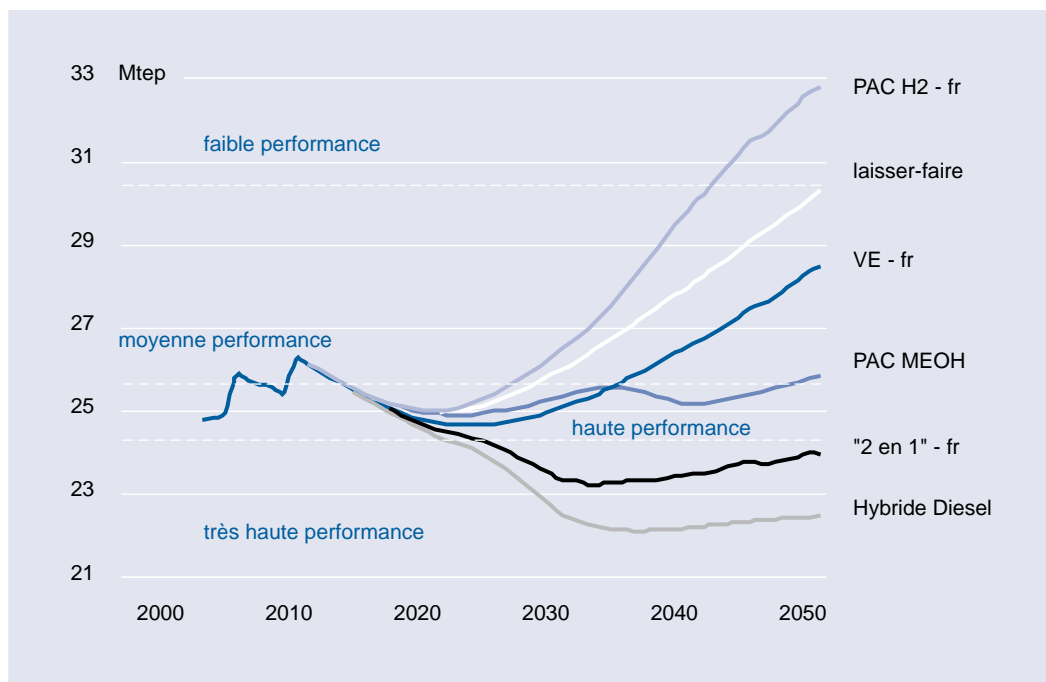


Figure 17
Consommation d'énergie des différents scénarios

de meilleur bilan (CO₂, énergie) en 2050 que celui d'aujourd'hui ;

- le véhicule "haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile permet de maintenir un bilan (CO₂, énergie) invariant entre les valeurs d'aujourd'hui et celles en 2050 ;
- Le véhicule "moyenne performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (CO₂, énergie) plus performant que celui du scénario "laisser-faire" en 2050, mais ne permet pas de maintenir les valeurs du bilan (CO₂, énergie) d'aujourd'hui ;

• Le véhicule "faible performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (CO₂, énergie) plus mauvais que celui du scénario "laisser-faire" en 2050.

D'après ces paramètres, nous obtenons alors le tableau de classification n°4.

L'analyse des résultats révèle l'introduction des véhicules hybrides dans le parc automobile comme la solution la plus efficace pour la réduction simultanée des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie. Ils font, en effet, partie de la catégorie "très haute performance" dans

Figure 18
Conséquences de l'origine de l'électricité sur les bilans d'émissions de CO₂ des parcs automobiles des différents scénarios

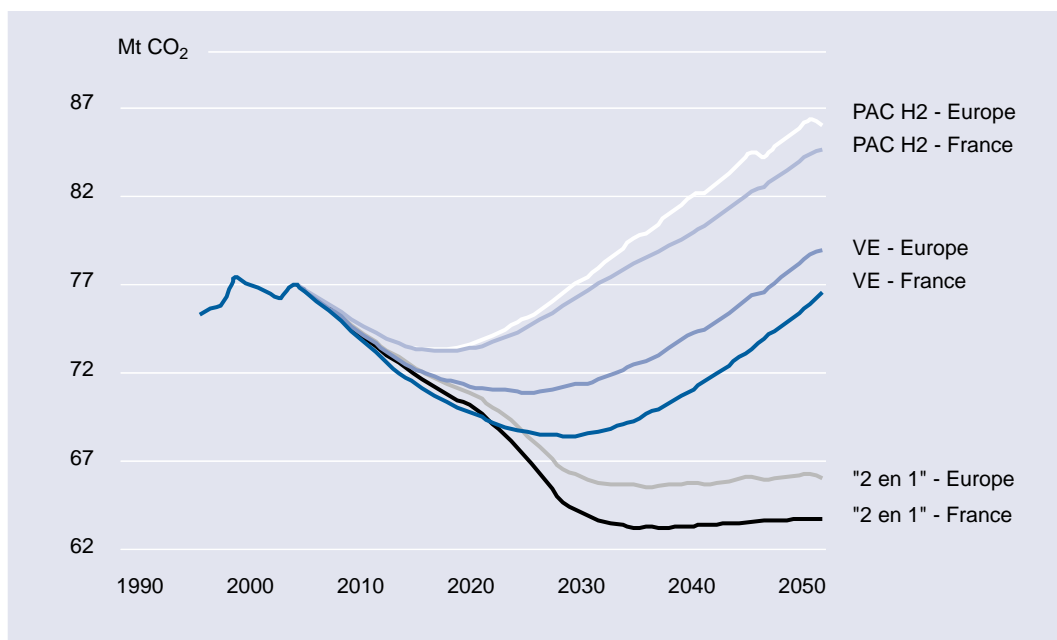
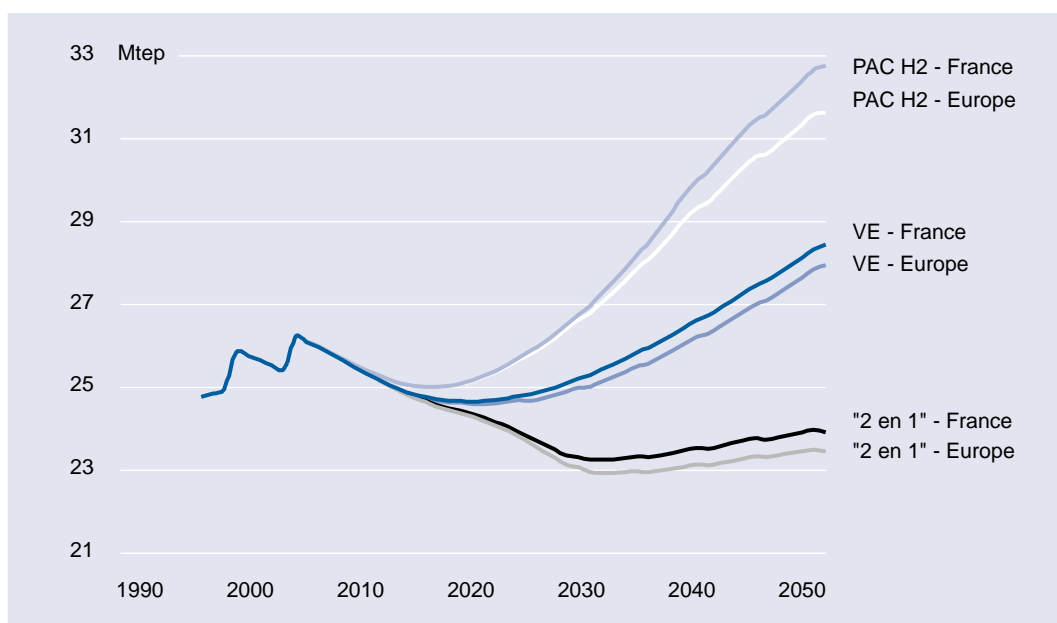


Figure 19
Conséquences de l'origine de l'électricité sur les bilans énergétiques des parcs automobiles des différents scénarios



les deux cas. Leurs gains en énergie, par rapport au scénario "laisser-faire" en 2050, atteignent 26 %, 22 % et 21 %, respectivement pour les hybrides "type Prius", "2 en 1" européen et "2 en 1" français, contre 15 % pour la PAC MeOH. Les gains d'émissions de CO₂ atteignent 28 % ("2 en 1" français) et 25 % (type "Prius", "2 en 1" européen), contre 21 % pour la PAC MEOH, et 13,6 % pour le véhicule électrique "français".

Ces performances s'expliquent par l'avantage que possède le véhicule hybride en bénéficiant à la fois des progrès technologiques des batteries et des moteurs à combustion interne, tout en possédant le confort d'utilisation d'un véhicule essence ou diesel. Il peut donc entrer dans le marché sans contrainte spécifique à partir de 2005.

Malgré une introduction tardive dans le parc automobile, la PAC MeOH parvient au niveau "très haute performance" en termes d'émissions de CO₂ grâce à son rapport C/H favorable par rapport à celui du pétrole. Cet avantage lui permet ainsi de "sauter une classe" lorsqu'on passe du bilan énergétique au bilan CO₂.

Quant aux résultats de la PAC H₂, ils sont considérablement affectés par l'importante quantité d'énergie nécessaire à l'étape de liquéfaction et, dans une moindre mesure, à la production de l'hydrogène qui entraînent, en conséquence, une hausse sensible des émissions de CO₂.

Malgré sa mission restrictive, le véhicule électrique "français" offre la plus forte réduction d'émissions de CO₂ en 2020 (-5 % par rapport au scénario "laisser-faire"). Par la suite, ce niveau n'est plus maintenu du fait de la croissance du parc et de la limitation de ses parts de marché.

En dépit de sa faible consommation électrique, le véhicule électrique ne présente pas d'aussi bons résultats pour le bilan énergétique. Il est, en effet, tributaire des filières électriques dont les rendements sont faibles par rapport aux filières carburants.

Influence de la filière électrique sur les bilans des émissions de CO₂ et des consommations énergétiques des différents scénarios intégrant une partie électrique.

Les figures 18 et 19 mettent en évidence l'influence des filières de production d'électricité sur les bilans d'émissions de CO₂ et de consommations énergétiques des différents scénarios intégrant une partie électrique. Les résultats de ces illustrations sont ensuite répertoriés dans le tableau 5.

Pour les scénarios véhicule électrique et véhicule hybride "2 en 1", l'origine de l'électricité n'est notable qu'en termes d'émissions de CO₂. Cette différence, en effet, s'élève à 3 % en faveur du parc électrique français en 2050. Aussi est-il intéressant de souligner qu'elle s'élève à 4 % en 2030 pour le véhicule électrique. Cette dernière diminue progressivement jusqu'en 2050 parce que ses parts de marché restent figées dans un parc automobile qui ne cesse de croître.

Dans le cas de la PAC H₂, le phénomène inverse est observé. La différence entre les scénarios électriques n'est perceptible qu'en terme de consommation énergétique : elle est de 3,6 % en faveur du parc électrique européen. Ceci s'explique par le fait que la partie électrique n'intervient que lors de l'étape de liquéfaction de l'hydrogène.

	CO2	Consommation d'énergie
Hybride type "Prius"	Très Haute Performance	Très Haute Performance
Hybride "2 en 1" - fr	Très Haute Performance	Très Haute Performance
VE - fr	Haute Performance	Moyenne Performance
PAC MeOH	Très Haute Performance	Moyenne Performance
PAC H2l-fr	Faible performance	Moyenne Performance

Tableau 4

Classification des véhicules selon leurs performances

	2030	2050
CO2		
VE	-3,9 %	-3,1 %
PAC H2l	-1,0 %	-1,6 %
2 en 1	-3,0 %	-3,4 %
Energie		
VE	+1,1 %	+1,8 %
PAC H2l	+0,7 %	+3,6 %
2 en 1	+1,2 %	+2,0 %

Tableau 5

Comparaison entre les scénarios français et européen en termes d'émissions de CO₂ et de consommation d'énergie

Pollution locale

L'ensemble des émissions de polluants réglementés étudiées se comportant d'une manière similaire, seules sont données ici sur la figure 20 les émissions d'HC. Les courbes correspondant aux autres polluants se trouvent en annexe 3. Elles révèlent toutes une chute très nette des émissions locales à partir de 2015 (réduction de 70 à 80 %), résultant de l'application de la norme Euro 2005.

Les émissions de SO₂ se comportent très différemment car elles proviennent essentiellement des filières de production des carburants. Elles sont, en effet, à l'origine de l'étape de désulfuration des produits pétroliers, ou de la combustion de matières fossiles destinée à la production d'électricité. En revanche, le même comportement que sur la figure 20 est observé lorsqu'on ne prend en compte que les émissions de SO₂ à l'échappement des véhicules.

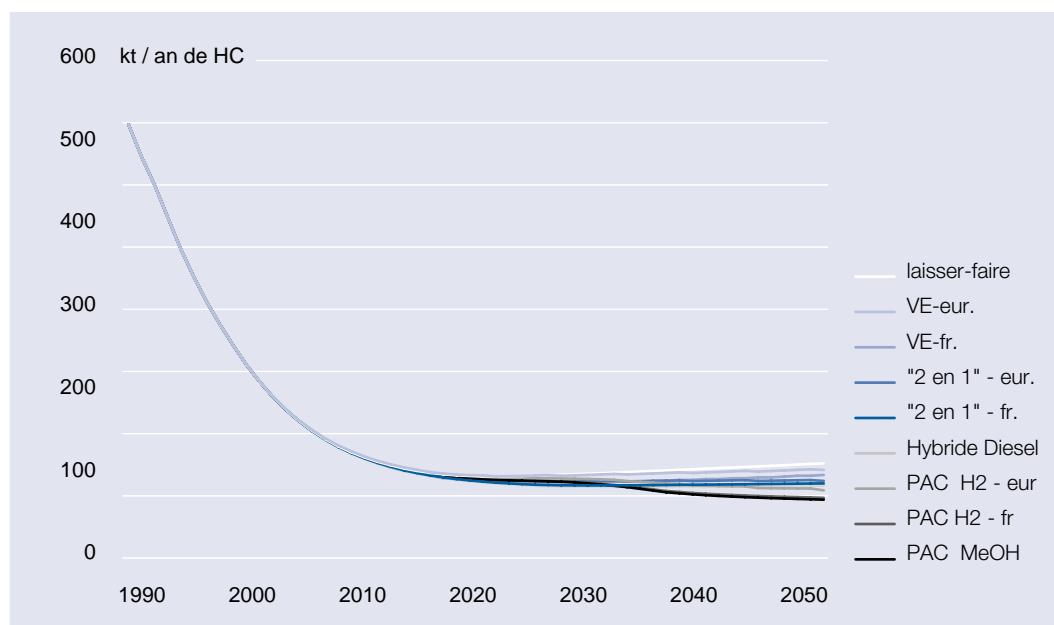


Figure 20
Émissions de HC

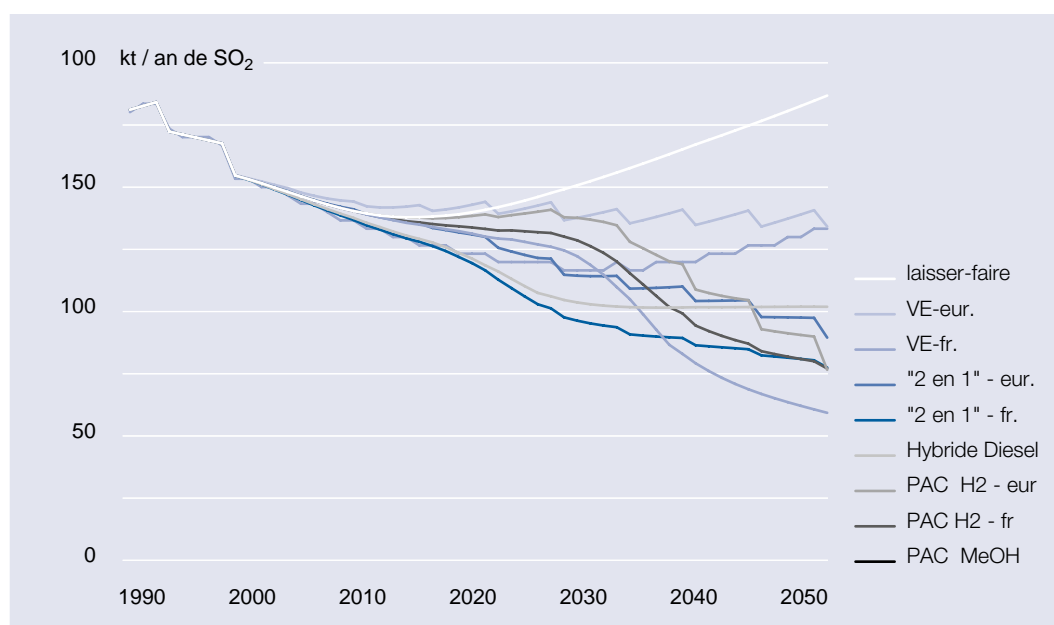


Figure 21
Émissions de SO₂

Conclusion

L'étude montre que la mise en place de la norme Euro 2005 a pour conséquence une nette réduction (75 %) de la pollution locale et régionale à partir de 2015 quels que soient les scénarios établis. Cependant, la méthodologie utilisée ne permettant pas d'analyser les phénomènes régionaux, les résultats indiquent uniquement une baisse sensible des émissions de polluants locaux qui devrait avoir pour conséquence la diminution de l'intensité et de la fréquence des alertes à la pollution dans les centres urbains.

Le défi pour les années à venir repose principalement sur le contrôle des émissions de CO₂ et des dépenses d'énergie. C'est à ce niveau que les scénarios établis se différencient.

D'après les résultats, nous avons pu constater que le véhicule électrique français offre un fort potentiel de réduction des émissions de CO₂. En dépit de son faible kilométrage annuel, il permet à court terme de très bonnes performances. Jusqu'en 2020, le scénario véhicule électrique présente, en effet, le meilleur gain en termes d'émissions de CO₂ par rapport au scénario "laisser-faire". À long terme, ses parts de marché étant limitées, il parvient tout juste à faire face à la croissance du parc et engendre ainsi un gain de 13,6 % par rapport au bilan CO₂ du scénario "laisser-faire". Il reste à remarquer que ces derniers résultats sont tributaires du mode d'introduction dans le parc qui peut paraître optimiste avec une part de marché plafonnée à 26 % à partir de 2028. Cependant en 2020, les véhicules électriques représentent dans le scénario établi un pourcentage de 10 % dans le parc automobile. Ce chiffre n'est pas excessif comparé aux exigences du CARB en Californie auprès des grands constructeurs automobiles : 10 % des véhicules vendus en 2003 devront être des "ZEV" (zero emission vehicle).

En ce qui concerne le bilan énergétique, le véhicule électrique "français" (rechargé sur le réseau français) n'offre pas le même potentiel. En effet, sa faible consommation électrique à l'utilisation ne lui permet pas de compenser les rendements des filières électriques. Ainsi, sa pénétration dans le parc de véhicules particuliers ne contrebalance pas la croissance du trafic, mais engendre tout de même un gain énergétique de 8 % par rapport au scénario "laisser-faire" en 2050.

La production d'électricité européenne, basée principalement sur la combustion de matières fossiles, engendre pour le véhicule électrique un taux d'émissions de CO₂ plus élevé que dans le cas du véhicule électrique "français". La différence entre les bilans CO₂ des scénarios véhicule électrique "européen" et "français" est de 3 % en faveur du scénario français. Quant à la différence entre les bilans énergétiques, elle est négligeable (1 % en faveur du scénario européen).

Le problème du véhicule électrique n'est pas tant celui de l'autonomie (même si cette dernière est souvent bien plus faible dans la réalité que celle avancée par les constructeurs), mais celui du temps de recharge. En effet, un utilisateur pourrait très bien parcourir plusieurs centaines de kilomètres avec un véhicule électrique en s'arrêtant tous les 200 km, à condition que le temps d'alimentation de son véhicule soit de l'ordre de la minute. À l'heure actuelle, il ne paraît cependant pas envisageable, dans la limite des connaissances scientifiques, de réduire ces temps de recharge (même à 80 %) à cet ordre de grandeur. Un système basé sur l'échange de batterie serait alors une solution de recours complémentaire aux stations de recharge rapide. Il implique, malgré tout, une infrastructure et une logistique très lourdes à mettre en place.

Quant à l'introduction de la PAC H₂₁ dans le parc de voitures particulières, le faible rendement et les émissions élevées de CO₂ liés à la liquéfaction de l'hydrogène rendent son influence sur le parc quasi-nulle : le scénario PAC H₂₁ est alors pratiquement identique au scénario "laisser-faire". Cette tendance pourrait cependant être renversée par une rupture technologique, notamment sur le système de stockage (nanotubes de carbone ?...).

Dans l'état actuel des recherches, il serait donc préférable, pour une application des piles à combustible au transport, d'envisager un autre carburant facile à stocker, et produire l'hydrogène à bord du véhicule. La voie méthanol permet, par exemple, d'améliorer de façon sensible les émissions de CO₂ et les consommations énergétiques par rapport au scénario "laisser-faire".

Cependant, il ne faut pas oublier que les PAC MeOH présentent aujourd'hui au moins 4 principales difficultés.

En ce qui concerne le méthanol :

- celui de sa toxicité qui est un véritable obstacle pour un développement grand public notamment au vu des problèmes rencontrés par le MTBE en Californie ;
- celui de la réactualisation des filières de production de méthanol en fonction de la demande qu'engendrerait la mise sur le marché des PAC MeOH. En effet, la production actuelle de l'alcool primaire pourrait alimenter moins de 5 % du parc automobile mondiale de véhicules particuliers.

En ce qui concerne le système de production d'hydrogène embarquée :

- le temps de démarrage du procédé de production d'hydrogène qui s'élève aujourd'hui à un ? d'heure ;
- enfin, l'élimination des traces de CO produites en régime transitoire du réformeur. En effet, cette présence chimique dans la pile à combustible détériore le rendement du système.

Au vu des résultats, les véhicules hybrides apparaissent les plus performants aussi bien en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre que d'économie d'énergie. Toutefois, il faut noter que les données actuelles sur ces différents types d'automobiles ne permettent pas de trancher nettement entre les stratégies de couplage des deux moteurs (option "2 en 1" ou type "Prius").

Finalement, une des principales conclusions suggère une introduction massive du véhicule hybride dans le parc de voitures particulières, dès 2005. Trois points encouragent cette voie. Il bénéficie tout d'abord des progrès sur les moteurs thermique et électrique ; il n'implique pas la mise en place d'une distribution de carburant particulière ; et enfin, il ne suppose pas une modification complète de l'appareil industriel de production. Le seul point faible qui subsiste est l'épuisement, à plus long terme, des réserves de pétrole.



Annexes

Annexe 1
Tableaux comparatifs des performances des véhicules et
des batteries

Annexe 2
Calcul des consommations électriques

Annexe 3
Résultats

Annexe 1 Tableaux comparatifs des performances des véhicules et des batteries

	Énergie spécifique (Wh/kg)	Auto-décharge (après 2 jours) (%)	Efficacité de recharge (%)	Temps de recharge (Heures)
Lead Acid	31	5	77	8
Ni-Cd	50	30	72	5
Li-Ion	90	10	80	4
Li-SP (Solid Polymer)	120	?	95	5

Source : Atkin Graham and Storey Jonathan, "Electric Vehicles : Prospects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles", 1998

Type de véhicule	Motorisation
Hybride type PRIUS	Moteur thermique (à injection directe) à assistance électrique (pas de ponction sur le réseau électrique)
"Deux en un"	Double motorisation (moteur thermique à injection directe, batterie au lithium) avec ponction sur le réseau
Tout électrique	Moteur électrique seul. Batterie au Lithium-Ion.
PAC H2I	Pile à combustible
PAC méthanol	Pile à combustible
Diesel ID	Moteur à combustion interne par compression
Diesel classique	Moteur à combustion interne par compression
GPL mélange pauvre	Moteur à combustion interne par allumage
GPL mélange stœchiométrique	Moteur à combustion interne par allumage
Essence ID	Moteur à combustion interne par allumage
Essence classique	Moteur à combustion interne par allumage

Type de véhicule	Carburant	Particularités	Consommations* kep/100 km	2015* kep/100 km
Hybride type PRIUS	diesel		3,8 (a)	2,46 (i)
"Deux en un "	diesel		3,5 (a)	2,46 (i)
Tout électrique		Autonomie de 300 km Temps de recharge de une heure	1,54 (h)	
PAC H2I	H2I fabriqué à partir du gaz naturel et liquéfié.		2,31 (f)	
PAC méthanol	Méthanol fabriqué à partir de gaz naturel		2,53 (f)	
Diesel ID			4,6 (b)	
Diesel classique			5,8 (c)	
GPL mélange pauvre			6,3 (d)	
GPL mélange stœchiométrique			5,4 (e)	
Essence ID			5,4 (g)	
Essence classique			6,3 (c)	

a) cf. calcul §II.1

b) calculé en appliquant un gain de 20 % sur la consommation du véhicule diesel classique

c) moyenne SECODIP

d) identique à la consommation du véhicule essence

e) identique à la consommation du véhicule essence ID

f) Cf. Les cahiers du CLIP n°9

g) calculé en appliquant un gain de 15 % sur la consommation du véhicule essence classique

h) Cf. §II.1 et annexe n°2

i) hypothèses de consommation de l'étude des cahiers du CLIP n°9

Source : Atkin Graham and Storey Jonathan, "Electric Vehicles : Prospects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles", 1998

Annexe 2 Calcul des consommations électriques

Calcul

$$F_{\text{Wh/km}} = K * (F_{\text{Wh/t km, consommation spécifique}} * M_{\text{t, masse moyenne}} / e_{\text{efficacité de recharge}})$$

Avec :

$$F_{\text{Wh/t km, consommation spécifique}} = 0,021V^2 - 2,928V + 178,55$$

$M = 1,5 \text{ t}$, masse moyenne d'un véhicule électrique actuel

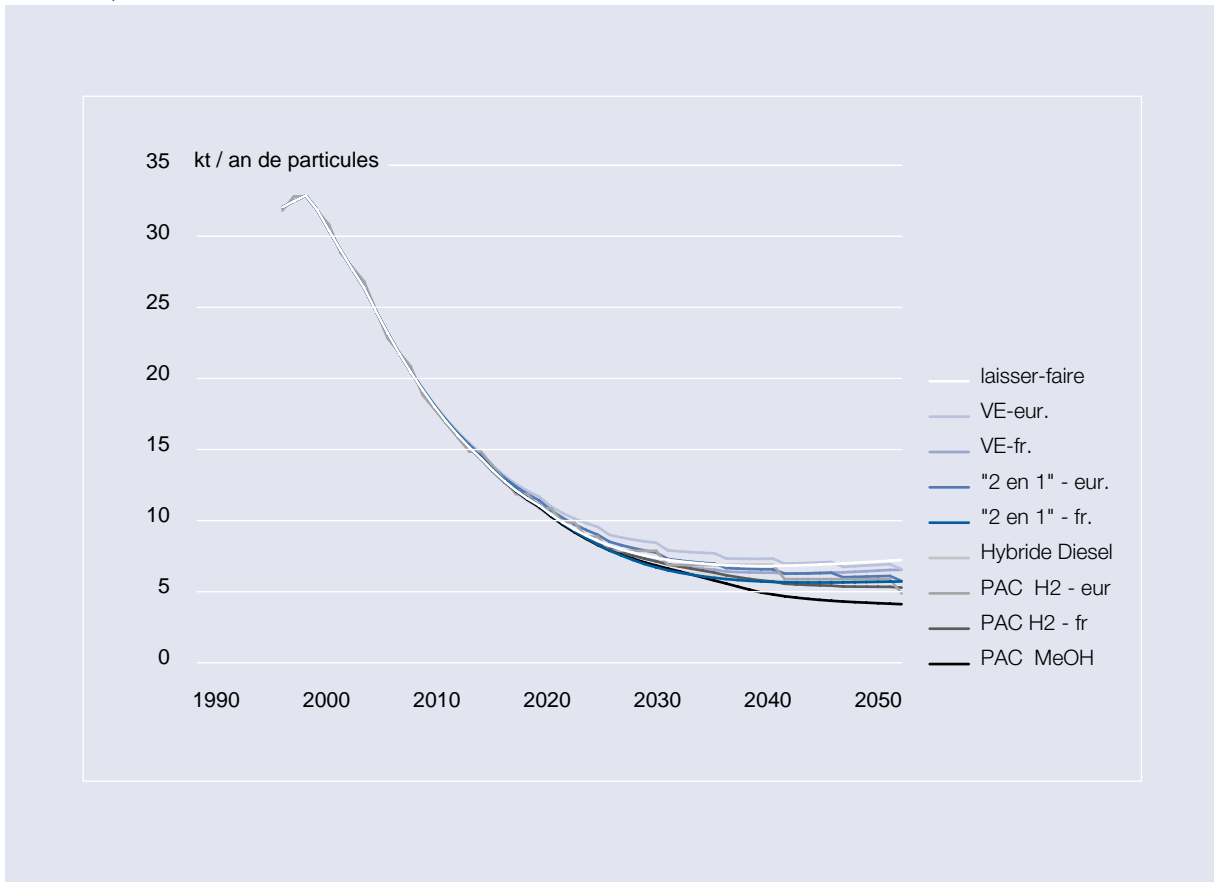
$e = 80 \%$ efficacité de la batterie au Lithium-Ion dans le cas idéal d'utilisation.

$K = 1,07$, facteur de détérioration de la batterie

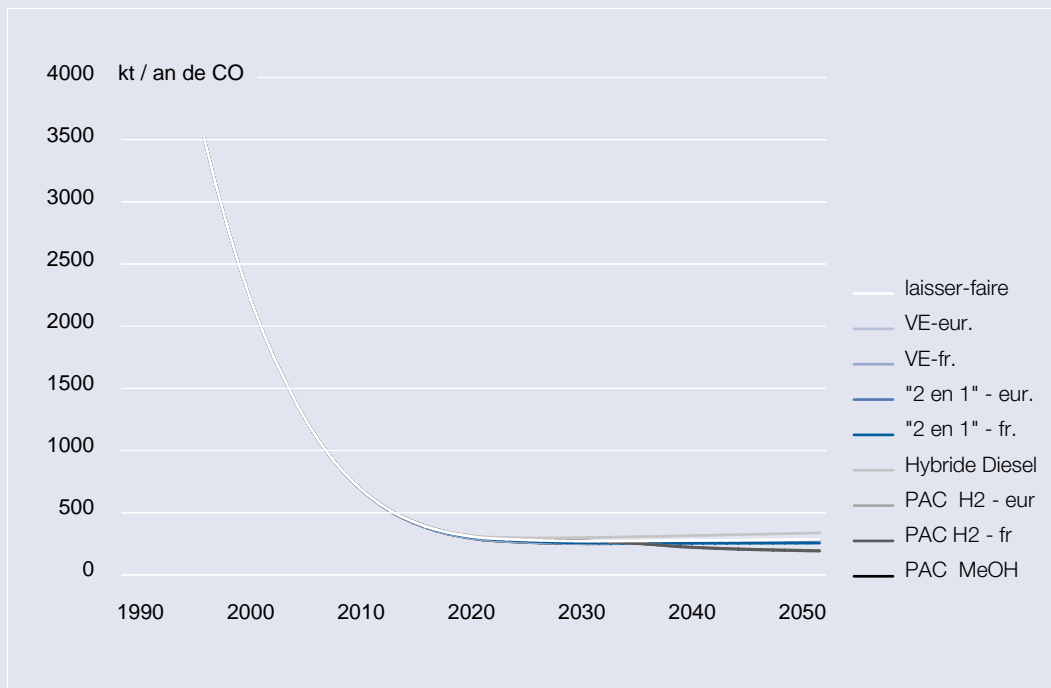
$V =$ vitesse exprimée en km/h

Annexe 3 Résultats

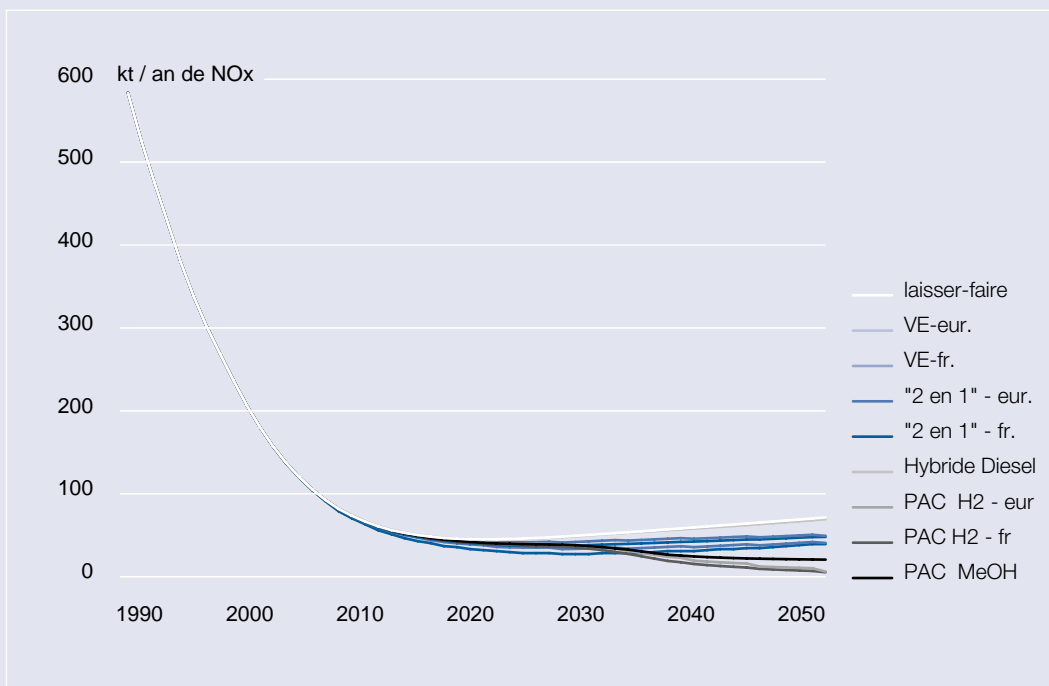
Emissions de particules



Emissions de CO



Emissions de NOx



Notes

- ¹ “Automobile et développement durable – Bilan environnement – Matières premières 1975 – 2050”, Les cahiers du CLIP n°9, 1998. Intitulé de la troisième partie : “Analyse prospective de l’évolution du bilan énergie, environnement et matières premières du parc automobile en France (1975 –2050).
- ² “Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l’automobile” - Caroline GALLEZ - Université de Paris I – Panthéon – Sorbonne – oct.1994
- ³ “Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport – emission Factors for Future Road Vehicles” – Aristotle University Thessaloniki – LAT Rapport n° 9829, Sept. 1998.
- ⁴ “Driving statistics for the assessment of pollutant emissions from road transport, INRETS Report LTE 9906, Michel ANDRE, Feb. 1999
- ⁵ Données de Renault
- ⁶ 10 % en 2010, 50% en 2015 et 100% en 2020.
- ⁷ Rapport INSEE.
- ⁸ ADEME-INRETS, panel "Parc Auto" SOFRES-1994-95-96-98
- ⁹ “Actualité des Hydrocarbures”, Manfred HAFNER, Pétrole et Technique, n°417
- ¹⁰ “ENERGY IN EUROPE – European Energy to 2020”, Directorate General for Energy, European Commission, 1996
- ¹¹ “Énergie 2010-2020, les chemins d’une croissance sobre”, rapport du Groupe Plénier, Commissariat Général au Plan, sept. 1998.
- ¹² Chiffres extraits de l’offre d’électricité (production nette) du scénario S2 “industrie” en 2020.
- ¹³ “Refinery Upgrading Through IGCC Process and Environment Highlights”, Vincenzo Russo, ERG Petroli, SpA – The European Oil Refining Conference & Exhibition

Bibliographie

- ▶ Allemand Nadine, *“Estimation de l'Evolution des Emissions de Polluants du Trafic Routier en France de 1990 à 2020”*, CITEPA, 23 Juillet 1998.
- ▶ André Michel, Ulf Hammarström, Isabelle Reynaud, *“Driving Statistics for the Assessment of Pollutant Emissions from Road Transport”*, INRETS, rapport LTE 9906, Fév. 1999
- ▶ Armengol C., Bensaid B., *“Emissions de Gaz à Effet de Serre Associées aux Véhicules Electriques et Thermiques sur toute la chaîne Energétique”*, IFP, rapport interne 41086, janv. 1994
- ▶ Arquès Phippe, *“La Pollution de l'Air : Causes, Conséquences, Solutions”*, 1998
- ▶ Atkin Graham and Storey Jonathan, *“Electric Vehicles : Porspects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles”*, 1998
- ▶ Boisson Pierre, *“Energie 2010-2020 : Les Chemins d'une Croissance sobre”*, Commissariat Général au Plan, sept. 1998.
- ▶ Bourdeau Béatrice, *“Evolution du Parc Automobile Français entre 1970 et 2020”*, INRETS, rapport LEN n°9801, Janv. 1998
- ▶ Center for transportation Research Argonne National Laboratory, *“Electric and Hybrid Electric Vehicles : A Technology Assesment Based on a Two-Stage Delpbi Study”*, dec. 1997
- ▶ Couderc Jacques, *“Traitement du fichier des Véhicules Particuliers de 1998 – Evolution des consommations et des Caractéristiques Techniques des VON Pondérées par les Immatriculations”*, ADEME / DTT, 11 Oct. 1999
- ▶ Degobert Paul, *“Automobile et Pollution”*, nov. 1992
- ▶ Dessus Benjamin, *“Energie 2010-2020 : Rapport final de l'atelier Les défis du long terme”*, Commissariat Général au Plan, oct. 1997
- ▶ European Commission, *“Energy in europe : European Energy to 2020 – a Scenario Aproach”*, special issue, printemps 1996
- ▶ European Commission, *“Energy in europe : European Union Energy Outlook to 2020”*, special issue, nov. 1999
- ▶ Frina Giovanni Lorenzo, *“Utilization of Residues with Cogeneration”*, The 1999 European Oil Refining Conference & Exhibition
- ▶ Gallez Caroline, *“Modèles de Projection à Long Terme de la structure du Parc et du Marché de l'Automobile”*, Thèse de Doctorat, Oct. 1994
- ▶ Green Sian, *“Combined Cycle Power Plants”*, PEI, Sept. 1999
- ▶ Hafner Manfred, *“Gaz Naturel et Production d'Électricité : Analyse technologique et économique de la Génération d'électricité et du transport de gaz pour les pays du bassin méditerranéen”*, thèse de Doctorat, Juillet 1994
- ▶ Hafner Manfred, *“Une petite révolution dans la production d'électricité : les turbines à gaz, les cycles combinés et la cogénération”*, Pétrole et Techniques, n°417.
- ▶ Henry K. Ng, Anant D. Vyas and Danilo J. Santini, *“The Prospects for Hybrid Vehicles, 2005-2020 : Results of a Delpbi Study”*, Argone National Laboratory, Août 1999
- ▶ IFEN, *“l'Environnement en France”*, 1999
- ▶ IFP, *“Rapport Final sur la Réglementation des Emissions des Véhicules routier : Etats-Unis, Europe et Japon”*, PRIMEQUAL-PREDIT 97, rapport interne 453030, mars 1999
- ▶ Lavy J., Dabadie J.C., Dammeme F., *“New Hybrid Concepts Simulation Tool Development and Evaluation on the Toyota Prius Car”*, EQUIP AUTO 99, 15 Oct. 1999
- ▶ Lewis C.A., *“Fuel and Energy Production Emission Factors”*, R112, 20 Juin 1997
- ▶ Modern Power Systems, *“Combined Cycle Technology” and “Advanced Gaz Turbines”*, Sept. 1999
- ▶ Nedderman John, *“First 701 Gs prepare for commercial operation”*, Modern Power Systems, janv. 1999
- ▶ Russo Vincenzo, *“Refinery Through IGCC Process and Environmental Highlights”*, The 1999 European Oil Refining Conference & Exhibition
- ▶ Samaras Zissis and Andrias Apostolos, *“Road Traffic Emission Forecasts for France (period calculation 1990 to 2010)”*, Aristotle University Thessaloniki, oct.1996
- ▶ Samaras Zissis, Coffey Robert, Kyriakis Nicolas, *“Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport : Emission Factors for Future Road Vehicles”*, Aristotle University Thessaloniki, Déc. 1998
- ▶ Union Routière de France, *“Faits et chiffres 1995 : Statistiques du Transport en France”*, Oct. 1996

Glossaire

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
CC	Cycle combiné
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone
FP	Filtre à particules
H ₂ _l	Hydrogène liquéfié
HC	Hydrocarbures
IGCC	"Integrated Gasification Combined Cycle"
MVEG	"Motor Vehicle Emissions Group"
MeOH	Méthanol
NOx	Oxydes d'azote
PAC	Pile à combustible
SO ₂	Dioxyde de soufre
TAV	Turbine à vapeur
TAG	Turbine à gaz
VE	Véhicule électrique
VH	Véhicule hybride
VP	Véhicule particulier

Anciens numéros

N°1 - Octobre 1993 - 104 pages - épuisé

- ▶ 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 - 64 pages - épuisé

- ▶ 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 - 80 pages - épuisé

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

N°4 - Juin 1995 - 58 pages - épuisé

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

N°5 - Juillet 1996 - 98 pages - épuisé

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

N°6 - Septembre 1996 - 80 pages - format électronique (pdf)

- ▶ 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 - 80 pages - format électronique (pdf)

- ▶ 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 - 112 pages - anglais/français - disponible

- ▶ 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 - disponible

- ▶ 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 - format électronique (pdf)

- ▶ Biomasse et électricité
- ▶ Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 - disponible

- ▶ Le froid domestique

N°12 - Mars 2001 - disponible

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

Pour toute demande ou renseignement, veuillez contacter :

Carine Barbier - CNRS-Ecodev, 1 rue du Cerf, 92195 Meudon - France

Téléphone : (33) 1 45 07 59 34 - Fax : (33) 1 45 07 59 44 - E-mail : carine.barbier@cnrs-dir.fr