



LES CAHIERS DU CLUB D'INGÉNIERIE PROSPECTIVE ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

CLIP

NUMÉRO 16 SEPTEMBRE 2004

Habitat et développement durable

LES PERSPECTIVES OFFERTES PAR LE SOLAIRE
THERMIQUE

Emissions de particules

ETUDE PROSPECTIVE SUR LES ÉMISSIONS
DE PARTICULES PRIMAIRES EN FRANCE
À L'HORIZON 2030

Edition



institut du développement et des relations
durable internationales

Liste des membres :

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

BRGM :
Bureau de Recherches
Géologiques et Minières

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

CNRS :
Centre National de la
Recherche Scientifique

CSTB :
Centre Scientifique et
Technique du Bâtiment

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

CEA :
Commissariat à l'Energie Atomique

EDF :
Electricité de France

GDF :
Gaz de France

GIE R.E. PSA RENAULT

IFP :
Institut Français du Pétrole

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

INRA :
Institut National de la
Recherche Agronomique

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

ONF :
Office National des Forêts

SNCF :
Société Nationale des Chemins
de Fer Français

SNET :
Société Nationale d'Electricité et de
Thermique

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

Habitat et développement durable

LES PERSPECTIVES OFFERTES PAR LE SOLAIRE THERMIQUE

Auteur : Jean-Pierre TRAINSEL (CNRS-LTMU, Institut Français d'urbanisme) avec la participation de Mindjid MAIZIA (LTMU, IFU/ UTC) et David RODITI (Atelier Solaire)

Cette étude et sa publication ont été financées par le Programme EcoDev du CNRS, le GAT Socio-économie du CNRS, l'IDDRI et la Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction.

Synthèse	3
Introduction	5
Le parc en 2000 et son évolution à l'horizon 2050	7
Analyse prospective des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel	11
Prospective des besoins de chauffage	13
Prospective des besoins en eau chaude sanitaire	23
La contribution du solaire au confort thermique d'hiver	26
L'eau chaude sanitaire et le solaire thermique	33
Bilan du solaire thermique dans le parc de résidences principales	38
Conclusion	41
Annexes	44
Notes	46

Emissions de particules

ETUDE PROSPECTIVE SUR LES ÉMISSIONS DE PARTICULES PRIMAIRES EN FRANCE À L'HORIZON 2030

Auteurs : Jean-Marc Brignon (INERIS), Lionel Cauret (INESTENE), Sonia Sambat (CITEPA)

Cette étude a été coordonnée et financée par le CNRS, la FNADE, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, PSA Peugeot-Citroën, et RENAULT.

Synthèse	47
Introduction	49
Inventaire national des émissions de particules primaires de 1990 à 2000	51
Prospective des émissions	63
Déterminants des concentrations en particules en milieu urbain	71
Conclusion	75
Annexes	77
Notes	79

Numéros précédents des Cahiers du CLIP

80

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



Editorial

La première étude de ce numéro s'inscrit dans le courant de réflexions cherchant à préciser les priorités et les modalités d'une stratégie de réduction substantielle des émissions de CO₂ à long terme. Elle fait écho aux travaux récents de type « facteur 4 » à l'horizon 2050, notamment l'étude de Pierre Radanne pour la Mission Interministérielle pour l'Effet de Serre¹ où l'on voit bien l'importance d'engager une mutation profonde de l'ensemble des secteurs de l'économie. Dans le numéro 13 des Cahiers du CLIP, Jean-Pierre Traisnel montrait pourquoi la réhabilitation du parc de logements existants doit devenir dès aujourd'hui une priorité des politiques publiques si l'on souhaite réduire significativement les émissions de CO₂ du secteur résidentiel. Le CLIP a voulu poursuivre la réflexion sur ce secteur en évaluant les réductions d'émissions que pourrait apporter un développement ambitieux du solaire thermique, grâce aux apports solaires passifs, aux planchers solaires directs et aux chauffe-eau solaires.

La seconde étude est consacrée aux sources d'émissions de particules en France. La qualité de l'air, avec ses conséquences possibles sur la santé et l'environnement, est une préoccupation croissante de la population en milieu urbain et des collectivités locales. Le contrôle des concentrations de particules figurent parmi les priorités du programme CAFE (Clean Air For Europe) de la Commission Européenne, qui conduira à un réexamen de la directive européenne relative à la qualité de l'air en 2005. L'étude présentée avait pour objectif premier d'étendre l'inventaire réalisé par le CITEPA sur les sources d'émissions de particules primaires afin de mieux cerner la responsabilité du secteur des transports, le moteur diesel (par ailleurs bien placé sur le terrain des émissions de CO₂) faisant ici figure de principal accusé. Elle montre que la généralisation des filtres à particules sur les véhicules diesel pourrait changer la donne : les émissions diffuses de particules de l'ensemble des transports routiers, mais aussi celles de l'agriculture et du BTP mériteraient à l'avenir plus d'attention de la part des pouvoirs publics.

Les récents travaux de l'IDDRI sur les tendances sectorielles d'émissions de CO₂ en Europe² montrent le retard pris, dans la plupart des pays européens, par les politiques de maîtrise de l'énergie dans les secteurs du bâtiment et des transports. C'est pourtant bien sur ces deux secteurs que les efforts doivent maintenant se concentrer. Les travaux du CLIP apportent sur ces enjeux des éclairages utiles sur les priorités, les trajectoires et les calendriers, mais aussi sur la façon dont les différentes politiques s'articulent, et parfois se neutralisent sur un même secteur : ainsi la modestie des apports solaires (hors ECS) dans le secteur résidentiel tient principalement à la cohérence des hypothèses de départ, qui intègrent une politique rigoureuse d'amélioration de l'efficacité énergétique du patrimoine bâti.

Michel Colombier, Directeur du CLIP

1 Pierre Radanne, « La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050, introduction au débat », rapport pour la MIES, mars 2004.

2 Carine Barbier, Richard Baron, Michel Colombier, « Climate change policies, Analysis of sectoral changes in Europe », IDDRI, juin 2004.

«Habitat et développement durable»

les perspectives offertes par le solaire thermique

Synthèse

Le bilan 2002 du Plan national de lutte contre le changement climatique lancé en 2000 permet d'envisager une évolution nationale vers une société plus sobre en énergie et en carbone. Cependant, deux secteurs tendent à effacer, par la croissance de leurs émissions de gaz à effet de serre, les progrès obtenus entre 1990 et 2000 dans l'industrie, la production énergétique et le traitement des déchets. Les transports et le résidentiel tertiaire montrent en effet des évolutions préoccupantes, malgré les avancées technologiques réelles obtenues dans l'industrie automobile et la construction neuve. L'accroissement des distances parcourues et des surfaces chauffées, dans un tissu urbain diffus de type pavillonnaire, contribue à la dérive des consommations d'énergie. Tandis que la maîtrise des consommations de chauffage semble marquer le pas dans le parc résidentiel, deux postes de consommations d'énergie connaissent une augmentation rapide, l'électricité spécifique et l'eau chaude sanitaire.

Le solaire thermique peut concourir efficacement à réduire les émissions de carbone dans le parc de résidences principales, grâce aux apports solaires passifs, aux planchers solaires directs (PSD) et aux chauffe-eau solaires. La contribution aux besoins de chauffage doit cependant être étudiée dans son contexte : celui des niveaux réglementaires de performance du bâti (RT2000 pour le neuf et directives appliquées au parc existant) qui garantirait une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 75% à l'horizon 2050. La méthode employée pour une telle évaluation consiste à décrire l'évolution du parc de résidences principales, conditionnée par la double croissance de la population et de la surface habitable par personne. Dans les hypothèses retenues, la surface du parc

atteindrait 2.770 millions de mètres carrés, soit le double de 1975. Le niveau de la construction neuve par habitant serait décroissant, de cinq logements (en 2000) à un logement (en 2040) pour 1000 habitants. L'attention au parc existant devient décisive, lorsque le taux de croissance du parc dû à la construction neuve – de 1% environ actuellement, cinq à dix fois supérieur au taux de renouvellement – décroît ainsi progressivement. Dans le scénario de référence, qui applique l'évolution programmée de la RT2000 sans réhabilitation du parc existant, les consommations de chauffage, de 385 TWh en 2000, pourraient atteindre 418 TWh en 2020, sous l'effet de la croissance du parc de logements, de l'évolution de la surface par logement et d'une demande plus forte de confort, notamment dans le parc ancien. En tenant compte de la sévèrisation progressive de la RT, sans intervention sur le parc existant, la consommation atteindrait 407 TWh en 2050. Les émissions dues au chauffage se stabiliseraient au niveau de 60 MtCO₂ à partir de 2015, grâce à la conjugaison :

- de la maîtrise de la demande d'énergie dans un contexte de plus faible croissance du parc ;
- de la disparition progressive du fioul et des combustibles minéraux solides au profit du gaz et de l'électricité.

Le scénario cible est construit dans l'objectif d'une division des émissions de gaz à effet de serre par un facteur 4 en 2050. Considérant que cet objectif est également partagé poste par poste, secteur par secteur, et pour des émissions estimées à 67 MtCO₂ en 2000 pour 33 Mtep d'énergie finale destinée au chauffage, la cible serait donc de 16,8 MtCO₂ en 2050. La division par 4 est appliquée systématiquement aux émissions dues au chauffage électrique

(l'électricité étant produite selon un scénario « sans nucléaire » en 2050) et à l'ensemble des combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz). En revanche, l'énergie bois, à très faible bilan de carbone, est supposée connaître une croissance de 1% par an en moyenne dans l'intervalle. Dans un tel contexte de substitution d'énergies de chauffage, la consommation d'énergie finale en 2050 destinée au chauffage serait réduite d'un facteur 2 environ, à 18 Mtep. Le facteur 4 serait ainsi obtenu par la conjugaison à parts égales d'un effet de structure des équipements de chauffage et d'amélioration thermique du bâti. Le bois et la géothermie détiendraient 60% des parts de marché des énergies de chauffage, contre 36% pour le gaz et 4% pour l'électricité (ici sans considération de l'évolution des pompes à chaleur).

Les efforts d'amélioration du bâti (le niveau moyen à atteindre étant de 75 kWh/m² en 2050) seraient répartis différemment selon les segments du parc. En 2050, les exigences pourraient être de :

- 135 kWh/m² pour le logement antérieur à 1949, dont le bâti peut difficilement être réhabilité, notamment en centre ancien historique (plus de 30% des surfaces de logements en 2050, pour 55% des consommations d'énergie) ;

- 60 kWh/m² pour le logement intermédiaire, de la période 1949-2000 (40% des surfaces de logements en 2050, pour le tiers des consommations d'énergie) ;

- 30 kWh/m² pour le logement neuf de la période 2005-2050 (plus de 25% des surfaces de logements en 2050, pour 11% des consommations d'énergie).

Il convient donc de mener de front des programmes ambitieux de réhabilitation thermique dans le parc existant et d'innovation technologique dans la construction neuve, l'effort dans le neuf devant être très accentué par rapport aux prévisions de la RT2000 (gain rapide de 50% sur les consommations de chauffage, programmes de bâtiments à énergie positive). Pour atteindre la cible recherchée, la réhabilitation thermique devrait toucher plus de 400.000 logements par an jusqu'en 2030.

Les gains solaires par les vitrages peuvent réduire les besoins de chauffage de 15% en moyenne dans la construction neuve du niveau RT2000, sans effort particulier, et de 50% avec véranda en façade sud, couplée à la gestion de l'air neuf. Une première estimation indique que les apports solaires passifs, pour l'ensemble du parc, s'élèveraient à plus de 40 TWh en 2000. Il faut cependant aborder ces solutions avec beaucoup de prudence, en raison des exigences croissantes de confort

d'été qui alimentent le marché de la climatisation électrique, en très forte progression.

Dans le contexte du facteur 4, les planchers solaires directs généralisés au logement neuf (sur la base, respectivement, de 0,06 et 0,17 m² de capteur / m² habitable pour le logement collectif et la maison individuelle) ont une productivité annuelle faible, de l'ordre de 110 kWh par mètre carré de capteur, alors que les gains relatifs aux installations de chauffe-eau solaires sont supérieurs à 500 kWh/m². Pour un bâti très bien isolé, les PSD entrent en concurrence avec les gains directs par les vitrages, dans une saison de chauffage qui se contracte à quelques mois d'hiver. La contribution des 87 millions de mètres carrés de collecteurs installés en 2050 s'élèverait à peine à 10 TWh en énergie finale de chauffage, pour une réduction des émissions de moins de 1 MtCO₂.

En revanche, le chauffe-eau solaire permettrait de réduire la consommation d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire de 40% par rapport au scénario de référence, retrouvant ainsi le niveau des années 1980. Les équipements sont dimensionnés sur la base d'un mètre carré de collecteur par personne, appliqué à toute la construction neuve dès 2005, et à 50% du parc existant en 2050. L'économie d'énergie finale destinée à l'eau chaude sanitaire représenterait ainsi 23 TWh en 2050, pour une réduction des émissions de 3,4 MtCO₂ permise par les 40 millions de mètres carrés installés, soit 620 m² de collecteurs pour 1000 habitants.

Un programme ambitieux de solarisation des logements doit, en conclusion, viser en priorité l'eau chaude sanitaire ainsi que la maîtrise des apports passifs, dans une conception été-hiver très attentive au confort thermique et à la climatisation naturelle (protections solaires, inertie thermique, possibilités de ventilation naturelle). Mais l'avenir du bois et de la géothermie doit être également étudié avec attention, leur contribution, notamment sous forme de réseaux de chaleur, apparaissant décisive face aux objectifs du Plan Climat.

Introduction

Les dispositifs énergétiques destinés au confort thermique et à l'ensemble des équipements dans les bâtiments prélèvent la plus grande part de l'énergie finale consommée en France, soit plus de 42%. Le secteur résidentiel et tertiaire devance ainsi amplement les autres secteurs d'activité. La contribution aux émissions, relativement plus modeste en raison du taux élevé d'équipements électriques, atteignait le tiers des 106 millions de tonnes de carbone émises en 2000.

Afin de tenir les engagements de la France vis à vis de la lutte contre l'effet de serre et parallèlement de réduire les charges dans les logements, de nombreuses actions sont entreprises ou en projet :

- le renforcement progressif de la réglementation thermique dans la construction neuve, un durcissement de 10% des exigences étant planifié à chaque étape ;
- la réversibilité des énergies de chauffage, grâce à l'obligation d'installation d'un conduit de fumée dans toute maison individuelle neuve, et d'emplacement pour chaufferie en immeuble collectif ;
- l'affichage des consommations énergétiques d'un logement qui devra être présenté par les propriétaires à l'occasion d'une vente et d'une mise en location ; cette procédure déterminera un classement des logements selon une échelle qui reste à définir ;
- des opérations programmées d'amélioration thermique des bâtiments (OPATB) ;
- un premier plan de développement du solaire thermique, y compris dans l'habitat social.

Les scénarios présentés dans la première étude « Habitat et développement durable. Etude rétrospective et prospective¹ » ont essentiellement mesuré l'impact d'améliorations énergétiques de l'enveloppe des bâtiments sur la consommation d'énergie de chauffage des résidences principales de la Métropole. Les interventions proposées concernaient la seule construction neuve (évolution de la réglementation thermique) ou la réhabilitation du parc existant. Les technologies visées se limitaient à l'isolation de l'enveloppe et à la généralisation de vitrages à isolation renforcée, couplées à la substitution de sources d'énergie moins émettrices en carbone, en particulier grâce à la progression du chauffage électrique et du gaz.

Les énergies nouvelles peuvent également contribuer à réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ dans le parc de résidences principales. L'objet de cette étude est d'analyser les conditions d'une telle réduction, par la définition de scénarios de diffusion du solaire thermique dans la construction neuve et dans le parc existant. L'approche consiste à intégrer, dans la logique d'augmentation des performances énergétiques globales, la place du solaire thermique face aux besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

Malgré la forte progression de l'électricité spécifique, la consommation d'énergie destinée à ces deux postes de confort thermique (chauffage des locaux, eau chaude sanitaire²) demeure encore la plus importante, même dans le logement neuf. On s'attachera à la réduction de ces besoins, parce qu'ils relèvent de la conception du logement (type, forme, orientation, technologie de l'enveloppe), et parce qu'ils peuvent être satisfaits en partie par le solaire thermique. Cependant, en raison des gains acquis ou rapidement accessibles dans les consommations de chauffage, il conviendrait de prévoir les inflexions qui apparaissent désormais dans les hiérarchies héritées des dernières décennies. En particulier, quand bien même ce poste est encore peu lié, dans les analyses, au type et à la localisation du logement, se posera la question des déplacements et de la dépendance, pour les ménages les plus éloignés des centres urbains, à la voiture individuelle.

L'étude comporte trois volets principaux :

- une analyse prospective du parc de résidences principales, des consommations d'énergie globales et des émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel ;

- une étude prospective des besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire, définissant des scénarios de référence, ainsi qu'un scénario cible de consommation de chauffage, basé sur le « facteur 4 » de réduction des émissions à l'horizon 2050 ;
- une évaluation de la contribution du solaire thermique appliqué au confort d'hiver sous forme de planchers solaires directs et d'apports solaires passifs, et appliqué à l'eau chaude sanitaire, à l'horizon 2050.

La contribution du solaire thermique aux besoins de chauffage sera étudiée dans son contexte : celui des niveaux réglementaires de performance du bâti qui devraient concourir à la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 75% à l'horizon 2050. Il sera donc procédé à une mise en perspective de l'évolution programmée de la RT2000, afin de vérifier la conformité des performances attendues avec les objectifs globaux.

Une analyse de morphologies urbaines est également proposée dans le but de mesurer le potentiel d'intégration de solutions « ENR » dans le parc existant, et ainsi d'estimer les limites morphologiques d'une tentative de solarisation généralisée des toitures.

Le parc en 2000 et son évolution à l'horizon 2050

Procédures d'estimation de la taille du parc et des besoins de chaleur

Afin d'estimer les consommations d'énergie destinées au confort thermique dans le parc de résidences principales (pour le contrôle climatique des logements et la production d'eau chaude sanitaire) à l'horizon 2050, il est nécessaire de dresser les perspectives démographiques, considérant la taille de la population et les données qui pourraient refléter les conditions de vie en 2050 :

- pour le contrôle climatique, il conviendra de tenir compte de la taille des logements, donc de la surface totale du parc, les besoins énergétiques étant estimés par unité de surface (kWh/m²/an) ;
- la production d'eau chaude sanitaire sera évaluée sur la base des besoins unitaires par habitant (kWh/personne/an).

L'évolution de la population est prévisible, moyennant quelques hypothèses. Sur cette base, les besoins énergétiques dus à la production d'eau chaude sanitaire pourront être estimés directement, les autres besoins d'exploitation dépendant de la taille du parc, donc de la surface habitable par personne (figure 1).

L'évolution de la population et des conditions de logement

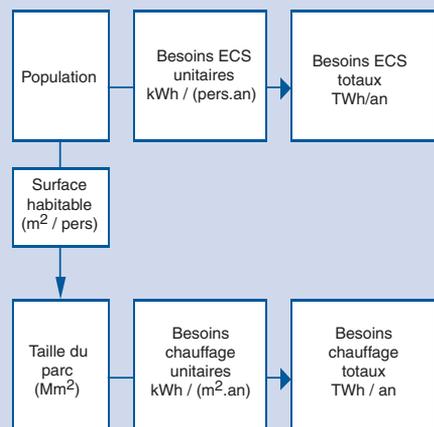
Les projections de population de l'INED indiquent que la population de la France métropolitaine, qui s'élevait à 58,7 millions d'habitants en 2000, compterait 64 millions d'habitants en 2050, soit cinq millions de plus qu'en 2000³, pour un taux de fécondité maintenu à 1,8 enfant par femme, une mortalité tendancielle et un solde migratoire net de +50 000 par an.

Mais quelles seront les conditions de logement des Français, notamment la taille des logements

qui détermine fortement les besoins de chauffage ? En particulier, l'effectif des 75 ans ou plus doublera dans les trente ans à venir, passant de 4,2 à 8,3 millions de personnes⁴. La demande de logements, actuellement majoritairement tournée vers la maison individuelle en périphérie, pourra sans doute évoluer, et comprendre une part notable de petits logements, disposant de commerces et de services de proximité.

Un indicateur témoigne de cette tendance, la taille des ménages, qui décline en dessous de 2,45 personnes par logement en 2002, alors qu'elle était supérieure à 3 avant 1975. Le nombre de personne par logement pourrait décroître à 2,23 en 2050. De nombreuses évolutions doivent être examinées conjointement pour estimer les conditions de logement, tenant compte du nombre de logements qui seront construits, et de leur surface unitaire.

Figure 1 : Estimation des besoins énergétiques



La taille du parc : nombre de logements et surface totale

Le parc de résidences principales, de 24,1 millions de logements en 2000, augmentera de trois millions d'unités⁵ dans les vingt prochaines années (tableau 1). L'augmentation est nettement plus faible que celle qui est constatée sur les vingt années précédentes : le nombre de logements s'est accru d'environ cinq millions d'unités de 1980 à 2000 (figure 2).

En 2020, la moitié du parc de résidences principale aura été construite après 1975. La part des maisons individuelles restera pratiquement constante, à 57 % en 2020, contre 56 % des résidences principales en 2000.

Compte tenu de l'accroissement de la population et de la croissance prévisible de la surface habitable par personne, à un rythme cependant ralenti, la surface totale du parc évoluera en maintenant les

tendances lourdes des dernières décennies jusque 2040 : à cette date, la parc comportera 2.770 millions de mètres carrés, soit le double du niveau de 1975 (figure 3).

La surface moyenne d'un logement pourrait se stabiliser à 97 mètres carrés, alors qu'elle est proche de 90 mètres carrés en 2003. Mais une étude plus fine de l'évolution de la population pourrait conclure à une inversion de la tendance continue à l'accroissement des surfaces, ou à une stagnation plus rapide dans cette évolution.

Les mouvements dans le parc

Le parc de logements de 2050 est en grande partie déjà construit. Il s'accroît annuellement par construction neuve pour l'essentiel, ainsi que par réaffectation et transformation de locaux (figure 4), en provenance du parc tertiaire ou du parc de logements vacants et des résidences secondaires. Les sorties du

Figure 2 : Estimation du nombre de logements en 2050 (résidences principales)

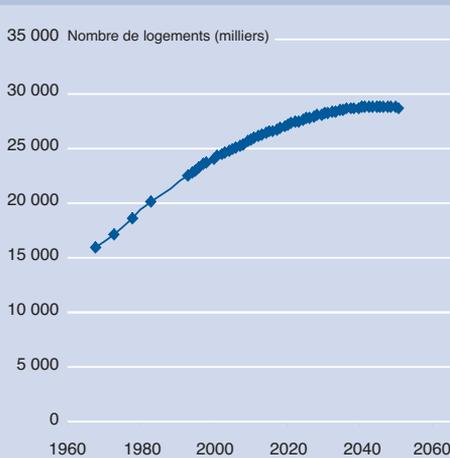


Figure 3 : Estimation de la surface du parc de résidences principales

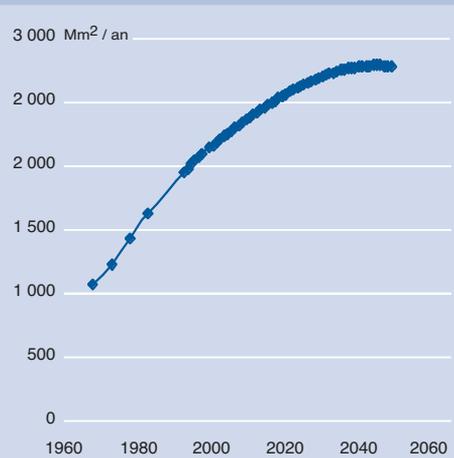


Tableau 1 : Evolution projetée de la population et du parc résidentiel

	Population (millions)	Nombre de Résidences Pales (milliers)	Taille des ménages (Pers/logt)	S moyenne logt (m2)	Taille du parc (Mm2)	Surface habitable (m2/pers)
1968	49,94	15962	3,13	67,00	1069	
1978	53,38	18641	2,86	77,00	1435	26,90
1993	57,25	22460	2,55	86,70	1948	34,04
1996	57,9	23250	2,48	87,80	2040	35,45
2000	58,74	24088	2,44	89,10	2142	36,47
2020	62,74	27099	2,32	94,10	2549	40,63
2050	64,03	28649	2,23	97,10	2781	43,44

parc s'effectuent par destruction ou transformation en locaux à autre destination, en fusion également. Cette dernière catégorie de sortie du parc est assez difficile à prendre en compte, car il s'agit de petits logements qui sont réunis, le nombre statistique de logements diminuant sans affecter la surface totale. Ils contribuent ainsi à l'augmentation moyenne de la surface de logements.

Au cours des années 1990, l'accroissement annuel moyen du parc de résidences principales s'établit à 237.000 logements par an, alors que la construction neuve atteint 290.000 logements environ (tableau 2). Des incertitudes demeurent cependant sur la contribution réelle de la construction neuve, en nombre de logements, à l'accroissement du parc, compte tenu de la multiplicité des sources statistiques. Les mises en chantier ne se traduisent pas systématiquement par de nouveaux logements, au cours de l'année considérée.

Une modélisation simplifiée du parc consiste à rassembler les mouvements opérés au cours de l'année n en trois catégories (figure 5) :

- les entrées par construction neuve (A_n) ;

- les sorties totales (S_n), quelles qu'en soient la nature, par démolition ou par changement d'affectation.

Dans ce schéma, les sorties du parc par changement d'affectation représentent le solde des échanges avec les autres parcs. Pour la part des échanges qui s'effectue à bilan nul (soit le compte des sorties qui équilibre le compte des entrées), on considérera qu'il s'agit d'une contribution à la réhabilitation du parc.

Les sorties annuelles peuvent être estimées, dans la période 1990-2000, à 4,5 millions de mètres carrés (soit 50.000 logements de 90 mètres carrés en moyenne). Il est cependant difficile de prévoir l'évolution des unités urbaines des cinquante prochaines années. Les sorties du parc par démolition, qui sont effectivement en baisse depuis les sommets des années 1970 pourraient être relayées par une ample désaffectation, en raison de l'évolution des bassins d'emplois.

Le débat demeure sur l'accélération des opérations de démolition dans le parc social. Celles-ci variaient autour de 4.000 unités par an depuis la fin

Tableau 2 : Valeurs des mouvements dans le parc de logement (en nombre de logements, moyennes des années 1990)

RP : résidences principales ; RS : résidences secondaires ; LV : logements vacants

A Construction neuve RP	B Démolition RP	C Tertiaire vers RP	D1 RP vers RS/LV	D2 RS/V vers RP	D Solde RP vers RS/LV	D + E - F Croissance RS/LV	A+C-B-D Croissance RP
290 000	49 000	53 000	694 000	637 000	57 000	29 000	237 000

Figure 4 : Entrées-sorties annuelles du parc de résidences principales

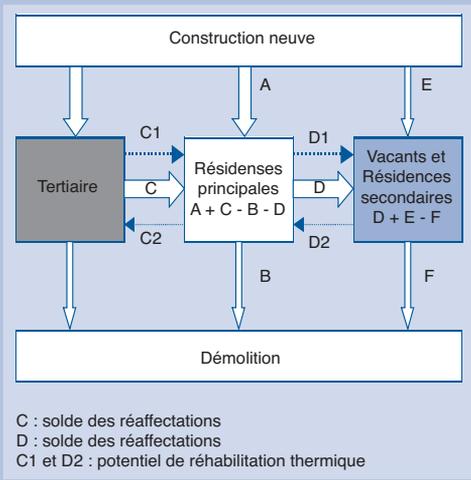
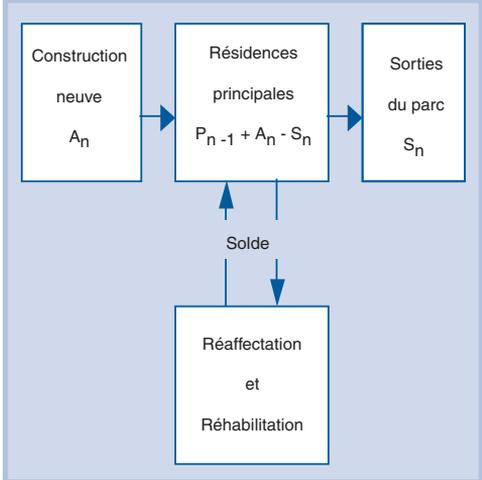


Figure 5 : Procédure simplifiée de reconstitution des mouvements dans le parc

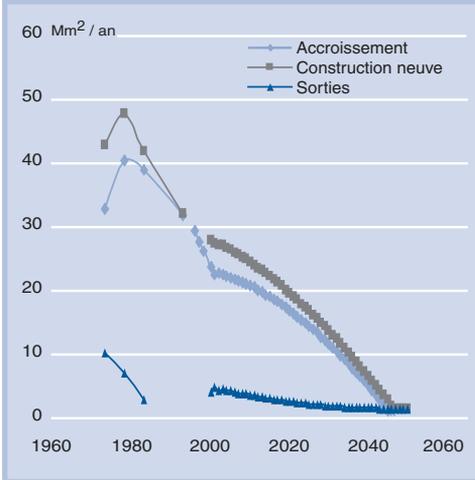


des années 1980. Elles pourraient atteindre 30.000 logements annuels dans les prochaines années, à la faveur d'opération de renouvellement urbain et de « résidentialisation » des grands ensembles. Ceux-ci souffrent en effet de plusieurs maux, dont les difficultés de gestion que rencontrent les organismes HLM pour l'entretien des espaces verts et de la voirie, lorsque ceux-ci ne sont pas

classés dans le domaine public. Par ailleurs, la typologie des barres et des tours ne facilite pas la densification urbaine, ces enclaves constituant des obstacles à l'évolution des tissus urbains, notamment en première couronne. Enfin, si le taux de vacances est généralement assez faible, les logements du « tout collectif » ne jouent plus que partiellement leur rôle « d'intégrateur social », le nombre de familles en difficulté pouvant croître dans des proportions importantes.

Il conviendrait également d'analyser plus finement l'avenir des aires urbaines dynamiques qui seraient appelées à croître tandis que d'autres aires urbaines subiraient une décroissance démographique équivalente. Ces mouvements s'accompagneraient de sorties du parc plus nombreuses, et pourraient contribuer au dynamisme de la construction neuve indépendamment de l'évolution démographique générale. Faute de pouvoir chiffrer de telles évolutions, l'hypothèse adoptée dans l'étude est une décroissance conjointe de la population, des sorties du parc, et de la construction neuve (figure 6). Le niveau de la construction neuve par habitant serait décroissant : de 5,11 logements pour 1000 habitants en 2000, il descendrait à 0,9 en 2040. A titre de comparaison, le niveau de la construction neuve est beaucoup plus faible dans d'autres pays européens : il est actuellement de 2,7 en Italie et de 1,3 en Suède⁶.

Figure 6 : Mouvements dans le parc



Analyse prospective des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel

Situation des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ en 2001

Les usages domestiques de l'énergie ont profondément évolué depuis 1973. En énergie primaire, le chauffage représentait moins de 50% de la consommation d'énergie (hors bois) du résidentiel en 1998, contre 72% en 1973. En données brutes, la consommation du chauffage est restée stable, à 26,5 Mtep en 1998, toutes énergies confondues (tableau 3), contre 26,9 Mtep en 1973 ; cette stabili-

té en énergie finale masque la substitution du fioul par l'électricité et le gaz. L'énergie finale destinée au chauffage est en réalité en baisse, tandis que la consommation d'électricité spécifique connaît une forte progression, qui traduit l'évolution du mode de vie des ménages : en énergie finale, de 380 kWh par an et par habitant en moyenne pour 1973, elle dépassait 1 000 kWh en 1998⁷.

Les estimations de la demande de confort thermique des logements seront exprimées en kWh/m² ou en kWh/personne d'énergie finale. Les données relatives à l'ensemble du parc, disponibles pour 2001 en énergie primaire, sont comparées aux projections effectuées, en énergie finale, à partir des données CEREN/SES qui ne concernent que les résidences principales, hors logements vacants et résidences secondaires (tableau 4).

La contribution du parc de résidences principales aux émissions de carbone a été estimée à partir des données globales du secteur, incluant les résidences secondaires, les logements vacants, et les DOM-

Tableau 3 : Répartition de chaque usage dans la consommation d'énergie primaire en 1998

Usage	Mtep	%
Chauffage	26,5	49,0
Electricité spécifique	14,9	27,5
ECS	9,5	17,5
Cuisson	3,2	6,0
Total	54,1	100,0

Tableau 4 : Répartition de chaque usage dans la consommation d'énergie en 2001

Usage	Energie primaire (1) Résidentiel (2)		Energie finale (3) Résidences principales (4)	
	TWh	kWh / m ² / an	TWh	kWh / m ² / an
Chauffage	456	197	388	179
ECS	94	41	51	24
Cuisson	56	24	30	13
Electricité spécifique	173	75	53	25
Total	779	336	522	241

(1) Hors ENR, notamment hors bois

(2) Estimation à partir des données CEREN et SES

(3) Surface équivalente estimée à 2,32 millions de mètres carrés

(4) Surface estimée à 2,16 millions de mètres carrés

Source : Benoît Lebot, DGUHC, d'après l'Observatoire de l'énergie, DGEMP

Tableau 5 :

Emissions de gaz à effet de serre en France en 2001

En kt éq CO ₂	RP + RS + vacants Métropole + DOM-TOM (1)		Estimation RP Métropole (2)
	Tous GES	CO ₂	CO ₂
Emissions directes	66 700	62 720	58 510
Production d'électricité	8 680	8 680	8 100
Chauffage urbain	4 490	4 490	4 190
Total	79 870	75 890	70 800

RP : résidences principales, RS : résidences secondaires

(1) : Surface équivalente du parc estimée à 2,32 millions de mètres carrés

(2) Estimation sur la base d'une surface de 2,16 millions de mètres carrés, en considérant que les émissions moyennes par mètre carré étaient du même ordre en Métropole et dans les DOM-TOM

Source :

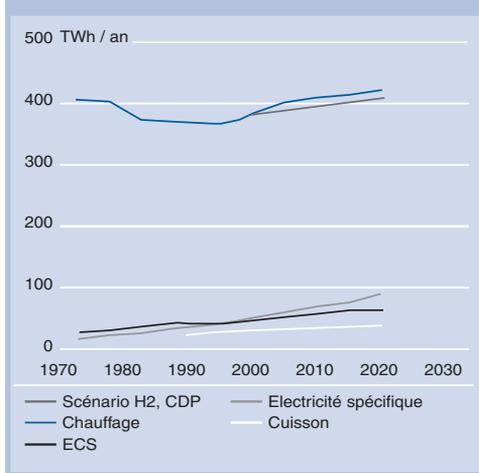
Note de Benoît Lebot, DGUHC, 2003

TOM. Les bilans disponibles considèrent séparément les émissions liées à l'énergie consommée directement dans les logements et les émissions générées par la production d'électricité et par les réseaux de chaleur (Tableau 5). Ceux-ci devront être ensuite agrégés puis ventilés par usage.

Perspectives d'évolution des différents usages de l'énergie

En énergie finale, la consommation de chauffage s'élève à 385 TWh en 2000, à 79 TWh pour l'usage « eau chaude sanitaire et cuisson » et à 51 TWh pour l'électricité spécifique (tableau 6).

Figure 7 : Evolution des consommations d'énergie
Source 2000-2020 : CEREN



Pour les postes autres que le chauffage, qui a connu des consommations en légère baisse, les croissances des vingt-cinq années passées ont été les suivantes :

- Eau chaude sanitaire (ECS) : croissance de 0,82 TWh/an en moyenne de 1973 à 1994, de 1,08 TWh/an de 1994 à 2000 ;
- Cuisson : croissance de 0,42 TWh/an en moyenne de 1973 à 2000 ;
- Electricité spécifique : croissance de 1,10 TWh/an en moyenne de 1973 à 1994, de 1,83 TWh/an de 1994 à 2000.

Les prévisions du CEREN (cf. Notes de synthèse du SES, septembre-octobre 2001) indiquent que l'augmentation des consommations d'énergie s'élèverait entre 2000 à 2020 à +19% (soit 102 TWh). Cette croissance, obtenue en prolongeant les évolutions constatées entre 1980 et 2000, ne prend pas en compte les mesures de maîtrise des consommations préconisées par le programme national de lutte contre le changement climatique.

La répartition des croissances 2000-2020 serait la suivante :

- + 43% pour la cuisson et l'ECS (+ 29 TWh) ;
- + 86% pour l'électricité spécifique (+ 40 TWh) ;
- + 8% pour le chauffage (+ 33 TWh), sans application de la nouvelle réglementation thermique (RT2000)

Après une période de maîtrise des consommations de chauffage, pendant les deux dernières décennies, ce poste rejoindrait le niveau des années 1970-1975 en 2010-2020 (figure 7).

Tableau 6 : Evolution des consommations d'énergie finale
(Estimation d'après : CEREN et Notes de synthèse du SES⁸)

en TWh/an	1973		1994		2000		2020	
	TWh	(%)	TWh	(%)	TWh	(%)	TWh	(%)
Chauffage	406,5	87,0	367,0	77,1	385,0	74,8	418,0	67,8
ECS	26,6	5,7	43,8	9,0	50,3	9,7	69,3	11,2
Cuisson	17,3	3,7	26,2	5,5	28,7	5,6	38,7	6,3
Electricité spécifique	16,8	3,6	40,0	8,4	51,0	9,9	91,0	14,7
TOTAL	467,2	100	476	100	515	100	617	100

Prospective des besoins de chauffage

Scénario de référence « chauffage » 2050

La consommation d'énergie

La consommation d'énergie de chauffage a atteint 385 TWh en 2000. Les projections réalisées par le CEREN indiquent que cette consommation s'élèverait à 418 TWh en 2020⁹. Quatre effets ont été pris en compte dans cette estimation, qui déterminent les variations annuelles de consommation d'énergie de chauffage :

- la croissance du parc de logements,
 - l'évolution de la surface par logement,
 - l'évolution de la consommation unitaire au mètre carré,
 - un effet de structure qui prend en compte la moindre consommation des logements neufs, la distinction maison/appartement, le type d'énergie.
- Les prévisions à 2020 du CEREN sont légèrement supérieures à l'estimation de 411 TWh du scénario « H2 » du rapport Charpin Dessus Pelat¹⁰. Une évaluation basée sur le jeu annuel des entrées sorties du parc, entre 2000 et 2020, en considérant que la construction neuve se conforme aux niveaux réglementaires de 1989, indique une valeur proche, de 412,6 TWh. En revanche, en tenant compte de l'impact de la réglementation thermique 2000 (RT2000), la consommation d'énergie de chauffage s'établirait à 404 TWh. D'où provient la valeur plus élevée du scénario « CEREN » ? Au-delà de la mise à l'écart des effets de la RT2000, les estimations semblent prendre en compte le confort croissant dans le parc ancien¹¹, mais en excluant la poursuite des travaux d'amélioration du bâti.

Afin de mesurer l'impact de plusieurs mesures et en particulier du solaire thermique dans la réduction des consommations liées au confort thermique, il semble plus approprié de prendre le scénario « RT2000 sans réhabilitation de l'ancien » comme scénario de référence (cf scénario RT2000-2050, figure 8).

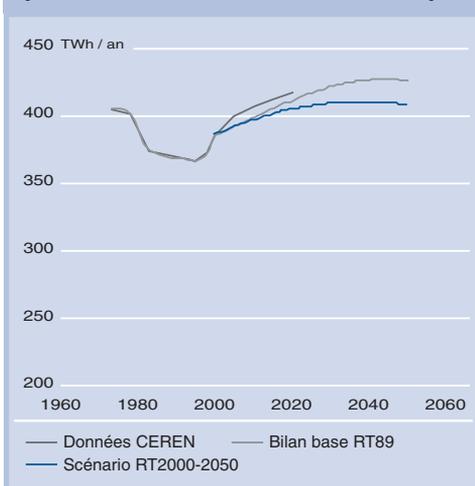
Il n'est pas tenu compte dans les estimations prospectives d'une évolution particulière du poste « électricité spécifique », alors que les consommations des différents postes sont liées : par les apports internes, cette consommation contribue en effet à réduire les besoins de chauffage. L'hypothèse adoptée dans l'étude consiste à maintenir un niveau unitaire d'apports internes (en kWh/m²/an) constant entre 2005-2050. La croissance de la consommation totale est considérée, dans ce cas, comme étant strictement liée à l'augmentation des surfaces habitables.

La construction neuve et la RT2000-2050

Le renforcement programmé de la réglementation thermique contribue à la stabilisation des consommations d'énergie de chauffage, dans un contexte de plus faible croissance du parc de résidences principales.

La consommation moyenne d'un logement neuf construit conformément à la RT2000 peut être

Figure 8 : Scénario de référence de consommation de chauffage



estimée¹² à 82 kWh/m²/an pour le chauffage. En maintenant à l'horizon 2050 l'objectif d'une réduction des consommations de 10% tous les cinq ans, et en l'appliquant de façon progressive, annuellement, la consommation unitaire du neuf construit en 2050 décroîtrait à 30 kWh/m²/an (figure 9).

Mais, compte tenu de l'érosion attendue de la construction neuve, la consommation moyenne des logements construits de 2005 à 2050 s'établirait à près de 60 kWh/m²/an (tableau 7). En estimant la performance moyenne des logements qui sortiraient du parc durant cette période à 200 kWh/m²/an, les consommations moyennes du stock évolueraient de 180 kWh/m²/an en

2000 à 146 kWh/m²/an en 2050, si aucune action n'était entreprise sur le parc existant, antérieure à 2005 et toujours présent en 2050.

Les émissions unitaires

Les contenus en CO₂ du kWh d'énergie finale, par usage, doivent permettre d'estimer les émissions totales dues aux différents besoins de confort thermique du logement, chauffage et ECS principalement (figure 10).

Pour le chauffage, les émissions unitaires, en gCO₂/kWh d'énergie finale, sont basées sur une évolution des parts de marché offrant, en 2050, une place prépondérante au gaz (près de 43%) et au bois

Figure 9 : Evolution des consommations de chauffage unitaires (scénario RT2000-2050)

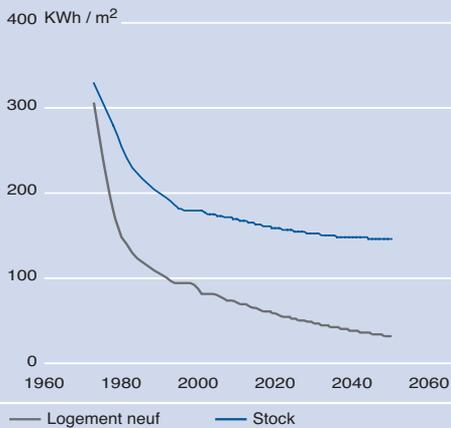
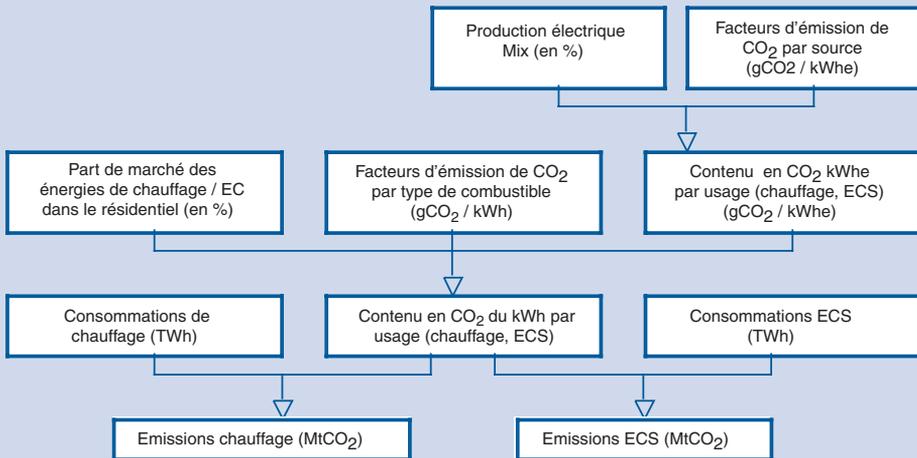


Tableau 7 : Bilan RT2000-2050 (sans réhabilitation du parc existant)

	Parc (Mm2)	Consommation unitaire (kWh/m ² /an)	Consommation totale (TWh)
Situation 2005	2260	173	391
Logements entrés (2005-2050)	620	58,3 (moyenne RT)	36
Logements sortis (2005-2050)	-100	200	-20
Bilan RT 2050	2780	146	407

Figure 10 : Procédure d'estimation des émissions de CO₂ pour l'ensemble du parc



(près de 25%). Les combustibles minéraux solides sont supposés s'effacer complètement dès 2020.

Les émissions par source d'énergie sont considérées constantes dans le temps (tableaux 8 et 9), hormis pour l'électricité, qui fait l'objet d'une estimation particulière, en fonction de l'évolution projetée des moyens de production (cf. ANNEXE 1).

Compte tenu de ces hypothèses, le contenu du kWh d'énergie finale destinée au chauffage serait en légère baisse, depuis la valeur de 168 gCO₂ en 2003 jusqu'à 145 gCO₂ en 2020, avant de se stabiliser autour de cette valeur jusqu'en 2050. En raison de la part du charbon en semi-base (10%) et en pointe (80%), le kWh électrique de chauffage aurait émis en moyenne 223 gCO₂ en 1995 (estimation de 209 gCO₂ en 2010), ce qui introduirait une correction sensible, de + 10% à +13%, dans le contenu en CO₂ du kWh de chauffage, toutes énergies confondues.

Les émissions de CO₂

Dans ce scénario de référence, les émissions se stabilisent au niveau de 60 MtCO₂ à partir de 2015 (figure 11), grâce à la conjugaison :

- de la maîtrise de la demande d'énergie, permise par le renforcement de la réglementation

thermique, dans un contexte de plus faible croissance du parc ;

- de la disparition progressive du fioul et des combustibles minéraux solides au profit du gaz et de l'électricité.

Figure 11 : Emissions de CO₂ dues au chauffage (scénario RT2000-2050)

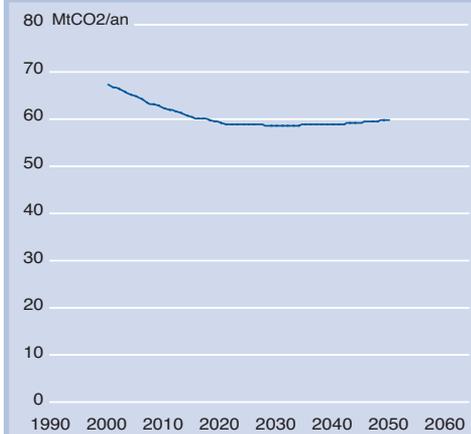


Tableau 8 : Estimation des émissions de CO₂ dues au chauffage en 2000

Sources : GDF, CITEPA et Greet 1.5, citées par Etude « Cogénération », CLIP n°15, 2003.

2000	CMS	Fioul	Gaz	GPL	Electricité	Bois	Total
Parts de marché chauffage (%)	4,9	27,2	34,1	1	10,5	22,3	100
Consommations (Mtep)	1,623	9,007	11,291	0,331	3,477	7,384	33,11 (1)
Emissions (3) (gCO ₂ /kWh finale)	360	276	202	227	84,7	7	174 (moyenne)
Emissions (tC/tep finale)	1,142	0,875	0,641	0,720	0,288	0,022	0,553 (moyenne)
Emissions (MtC)	1,852	7,883	7,233	0,238	0,933	0,164	18,30 (2)

(1) Soit 385 TWh (2) Soit 67,1 MtCO₂

Tableau 9 : Estimation des émissions de CO₂ dues au chauffage en 2050 (référence)

Sources : GDF, CITEPA et Greet 1.5, citées par Etude « Cogénération », CLIP n°15, 2003.

2050, référence	CMS	Fioul	Gaz	GPL	Electricité	Bois	Total
Parts de marché chauffage (%)	0	10	43	3	19	24	100
Consommations (Mtep)	0	3,65	15,03	1,11	6,64	8,58	35,01 (1)
Emissions (3) (gCO ₂ /kWh finale)	360	276	202	227	116	7	146 (moyenne)
Emissions (tC/tep finale)	1,142	0,875	0,641	0,72	0,367	0,022	0,464 (moyenne)
Emissions (MtC)	0	3,197	9,627	0,8	2,444	0,19	16,26 (2)

(1) Soit 407,1 TWh (2) Soit 59,6 MtCO₂

Les scénarios « facteur 4 » en 2050

La cible « Facteur 4 » en 2050 pour les besoins de chauffage

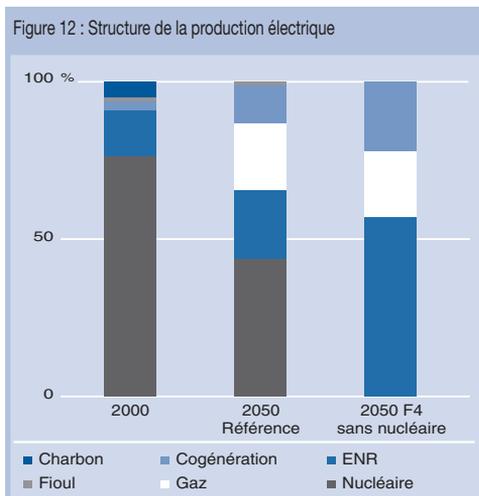
Dans le cadre du Sixième programme d'action européen pour l'environnement, la France s'engage à diviser les émissions de gaz à effet de serre par un facteur 4 en 2050. Prenant comme référence l'année 2000, et considérant que cet objectif est également partagé secteur par secteur, il est possible de tracer un scénario cible pour les émissions relatives au chauffage du parc de résidences principales. Pour des émissions estimées à 67,1 MtCO₂ en 2000, la cible serait donc de 16,8 MtCO₂ en 2050.

La réduction des émissions totales pourrait résulter d'un cumul d'actions sur le parc :

- la maîtrise de la croissance des surfaces habitables (m²/personne) ;
- la réduction des consommations unitaires (kWh/m²), y compris par le solaire thermique ;
- la réduction des émissions unitaires (gCO₂/kWh).

La première catégorie d'action est, dans l'étape actuelle, non prise en compte. La surface habitable par personne a été considérée croissante de 36,5 m² en 2000 à 43,4 m² en 2050 (+19%), croissance qui doit être compensée par un effort supplémentaire sur la consommation d'énergie unitaire. Une étude plus précise de l'évolution des modes de vie et de la pyramide des âges devrait cependant déterminer les conditions d'infléchissement de cette augmentation continue, observée au cours des dernières décennies.

Les émissions unitaires (facteur de conversion en gCO₂/kWh) dépendent de la composition des parts



de marché des différentes énergies. Les hypothèses adoptées dans le scénario de référence, basées sur le Scénario « H2 », ne conduisent pas à des gains importants dans les émissions finales : de 174 à 146 gCO₂/kWh, la réduction serait limitée à 16%. Dans un tel contexte, l'effort devrait essentiellement porter sur la performance du bâti, les niveaux moyens de consommations de chauffage devant alors se situer entre 45 et 50 kWh/m²/an.

Mais la réduction de la demande énergétique, qui accompagnerait l'effort de transformation du bâti (neuf ou existant), modifie considérablement la répartition des parts de marché entre les différentes énergies. En considérant que la division par 4 des émissions dues au chauffage est acquise en 2050, elle s'appuierait essentiellement sur le gaz, l'électricité et le bois, le solaire thermique intervenant en amont sur la réduction des besoins de chauffage.

Afin de démontrer que des objectifs ambitieux de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre dans le parc résidentiel ne justifient pas à eux seuls une relance du programme électronucléaire, le scénario « Facteur 4 » de la production électrique fait appel essentiellement aux ENR, à la cogénération, tel qu'il est défini, dans une de ses variantes (V14), par les travaux prospectifs de la MIES¹³ (figure 12). Le niveau élevé de la production électrique appuyée sur les ENR, à hauteur de 57%¹⁴, conduit à un taux d'émissions du kWh électrique relativement maîtrisé, à moins de 105 gCO₂/kWh (tableau 10).

La méthode adoptée pour l'exercice « facteur 4 » (cf. encadré) consiste à diviser par un facteur proche de 4 les émissions des deux groupes d'énergie :

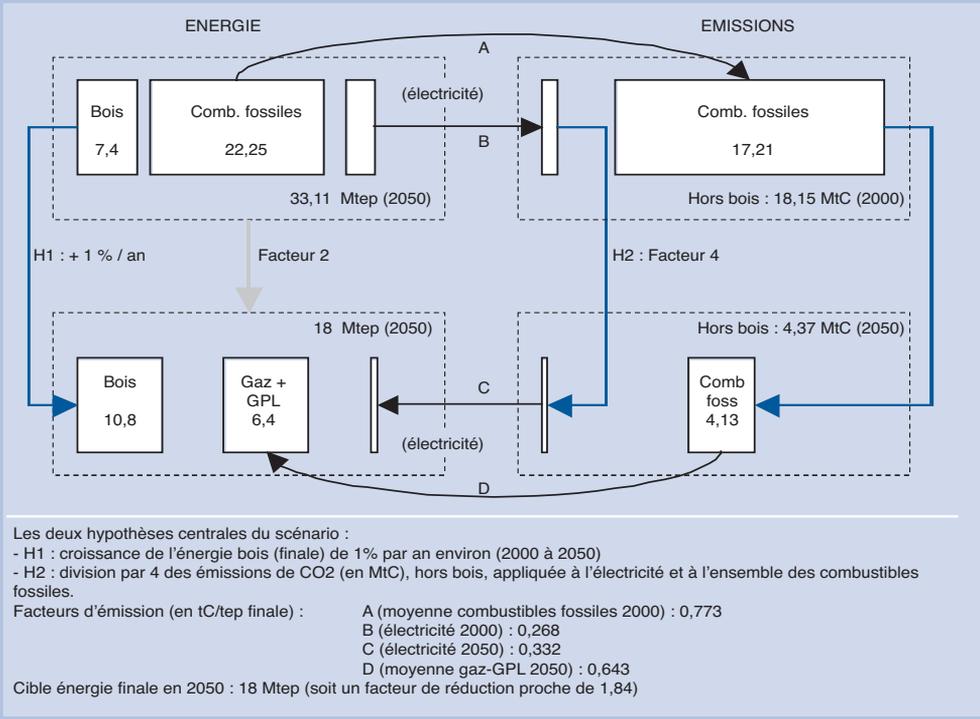
- les combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz), réduits de 17,2 MtC en 2000, à 4,13 MtC en 2050 (facteur 4,2) ;
- l'énergie électrique, qui passerait de 0,93 MtC en 2000, à 0,24 MtC en 2050 (facteur 3,9).

En revanche, la consommation de bois-énergie et la production de la géothermie, faiblement émettrices, seraient en augmentation de près de 50% entre 2000 et 2050 (soit à un taux de croissance

Tableau 10 : Comparaison des niveaux d'émissions de CO₂ en 2050 pour deux scénarios de production d'électricité

	2000	2050 Référence	2050 F4 sans nucléaire
Emissions (gCO ₂ /kWh)	84,7	115,8	104,7
Emissions (tC/Mtep finale)	0,269	0,367	0,332

Encadre 1 : Procédure «facteur 4» : définition de la cible Energie finale en 2050



inférieur à 1% par an), pour approcher 11 Mtep en 2050. Mais, en raison de la maîtrise de la demande globale d'énergie, cette énergie dominerait le marché au niveau de 60%, pour 36% attribué au gaz (seul combustible fossile rescapé de la décarbonisation) et 4% à l'électrique (tableau 11).

Le niveau de 17 MtCO₂ (soit 4,61 MtC) est atteint essentiellement grâce à la progression du bois énergie, dans un contexte de réduction de la demande de chauffage : la consommation de près de 210 TWh serait en recul de près de 50% par rapport à 2000. Le facteur 4 est ainsi obtenu par la conjugaison à parts égales d'un effet de structure des équipements de chauffage (les émissions uni-

taires étant divisées par 2, de 0,553 à 0,257 tC/tep) et d'amélioration thermique du bâti. Il convient alors d'analyser les différents segments du parc, afin de répartir les efforts d'amélioration du bâti entre le parc ancien, la construction récente et le neuf programmé entre 2000 et 2050.

Les consommations unitaires et la réglementation thermique RT2000

Une consommation totale de près de 210 TWh, en 2050, pour près de 2800 Mm² de résidences principales, correspond à une consommation unitaire de 75 kWh/m²/an, en moyenne du parc existant en 2050. La répartition du nombre de logements

Tableau 11 : Estimation des émissions de CO₂ dues au chauffage en 2050 (facteur 4)

2050, sans nucléaire	CMS	Fioul	Gaz	GPL	Electricité	Bois	Total
Parts de marché chauffage (%)	0	0	35	1	4	60	100
Consommations (Mtep)	0	0	6,24	0,18	0,72	10,81	17,96 (1)
Emissions (3) (gCO ₂ /kWh final)	360	276	202	227	105	7	81 (moyenne)
Emissions (3) (tC/tep finale)	1,142	0,875	0,641	0,72	0,332	0,022	0,257 (moyenne)
Emissions (MtC)	0	0	4	0,13	0,24	0,24	4,61 (2)

(1) Soit 208,8 TWh

(2) Soit 16,9 MtCO₂

(3) Les facteurs d'émission énergie/carbone ont été considérés constants entre 2000 et 2050, sauf pour l'électricité.

selon l'année de construction (tableau 12) permet de préciser les exigences en plusieurs classes.

La cible « facteur 4 » recherchée, correspondant à une consommation totale de 18 Mtep en 2050 (soit 209 TWh), pourrait être obtenue grâce à la combinaison des consommations unitaires suivantes (tableau 13) :

- 135 kWh/m² pour le logement antérieur à 1949, dont le bâti peut difficilement être réhabilité, notamment en centre ancien historique ; ce segment de parc représenterait plus de 30% des surfaces de logements en 2050, pour 55% des consommations d'énergie ;
- 60 kWh/m² pour le logement intermédiaire, de la période 1949-2000, dont le bâti peut être réhabilité avec soin, en particulier par des techniques de mur manteau ; ce segment de parc représenterait encore plus de 40% des surfaces de logements en 2050, pour le tiers des consommations d'énergie ;
- 30 kWh/m² pour le logement neuf de la période 2005-2050 ; ce segment de parc représenterait plus du quart des surfaces de logements en 2050, pour 11% des consommations d'énergie.

Tableau 12 : Le parc de logements en 2000

Année de construction	Répartition (%)
Avant 1915	30,9
1915-1948	9,0
1949-1967	17,0
1968-1974	12,5
1975-1981	11,3
1982-1989	9,4
1990 et depuis	9,9
Total	100,0

Il convient donc de mener de front des programmes ambitieux de réhabilitation thermique dans le parc existant et d'innovation technologique dans la construction neuve.

En premier lieu, il serait souhaitable de réduire de moitié la consommation moyenne prévisible du neuf dans l'intervalle 2005 – 2050, ce qui conduirait à une moyenne de 30 kWh/m²/an pour les logements qui seraient construits dans l'intervalle, au lieu des 58,3 estimés.

En complément, le gain qui doit être obtenu sur le parc intermédiaire (1949-2000) serait d'environ 100 kWh/m²/an, toujours dans l'objectif de 60 kWh/m²/an en moyenne de ce segment de parc à l'horizon 2050. Les deux cibles, de 30 et 60 kWh/m² paraissent acceptables, l'effort à produire sur le neuf étant double de ce qui est attendu sur l'existant, comme les niveaux de 2000 semblent également l'indiquer (80 à 85 kWh/m²/an dans le neuf pour 180 kWh/m²/an dans le stock).

Enfin, les performances attendues de l'ancien (antérieur à 1949) le situeraient en 2050 au niveau de la construction neuve des années 1980.

Construction neuve et réhabilitation du parc existant

Comparaisons européennes

Les exigences réglementaires envers le logement neuf en Suède et en Allemagne ont atteint des niveaux comparables aux exigences françaises au cours des années 1990, de l'ordre de 100 kWh/m²/an en énergie finale pour le chauffage (figure 13).

Dans les années récentes, la volonté de réduire fortement les émissions de GES dans le secteur résidentiel a vu apparaître différents labels au côté

Tableau 13 : Objectifs 2050 de consommations unitaires « Facteur 4 »

Année de construction	Ancien	49-74	75-99	Neuf 2000-2050	Total
Situation 2005 (Mm2)	854	631	657	118	2260
Logements entrés 2005-2050 (Mm2)				620	620
Logements sortis 2005-2050 (Mm2)		-80	-20		-100
Bilan 2050 (Mm2)	854	551	637	738	2780
Répartition des surfaces en 2050 (%)	30,7	19,8	22,9	26,5	100
Consommations unitaires Objectif 2050 (kWh/m2)	135	60	60	30	75 (moyenne)
Consommations totales Objectif 2050 (TWh)	115	33	38	22	209
Consommations totales Objectif 2050 (Mtep)	9,91	2,85	3,29	1,9	17,95
Répartition des consommations en 2050 (%)	55	16	18	11	100

de réglementations également plus ambitieuses dans leurs objectifs. Les niveaux de consommation d'énergie primaire incluant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et la ventilation demeurent proches de la fourchette 100-150 kWh/m²/an pour l'Autriche, l'Allemagne, les Pays-Bas et le Royaume Uni (figure 14). La situation française présente des aspects contrastés, puisque chaque bâtiment dispose de sa propre référence, ce qui introduit une double dispersion : entre la maison individuelle et l'appartement en immeuble collectif, ainsi qu'entre le chauffage électrique et les autres modes de chauffage. Deux labels permettent d'atteindre des niveaux compatibles avec la cible 2050 : le label « Passive Haus » en Allemagne et le label Minergie

de la Suisse, soit environ 50 kWh/m²/an d'énergie primaire, tous postes d'exploitation confondus. Le label « Passive Haus » a été appliqué à de nombreuses opérations de logements, sur la base des résultats du projet CEPHEUS (*Cost efficient passive houses as european standards*) élaboré en réponse à un appel à propositions du programme Thermie de la Commission Européenne en 1997.

La figure 14 présente des valeurs minimales et maximales estimées en considérant deux bâtiments : une maison individuelle (compacité minimale) et un petit bâtiment collectif. 1 kWh électrique équivaut à 2,58 kWh primaire. Pour l'éclairage, une consommation forfaitaire de 10 kWh primaire par m² a été considérée pour la RT 2000.

Figure 13 : Niveaux de demande d'énergie dans le logement en Allemagne et en Suède

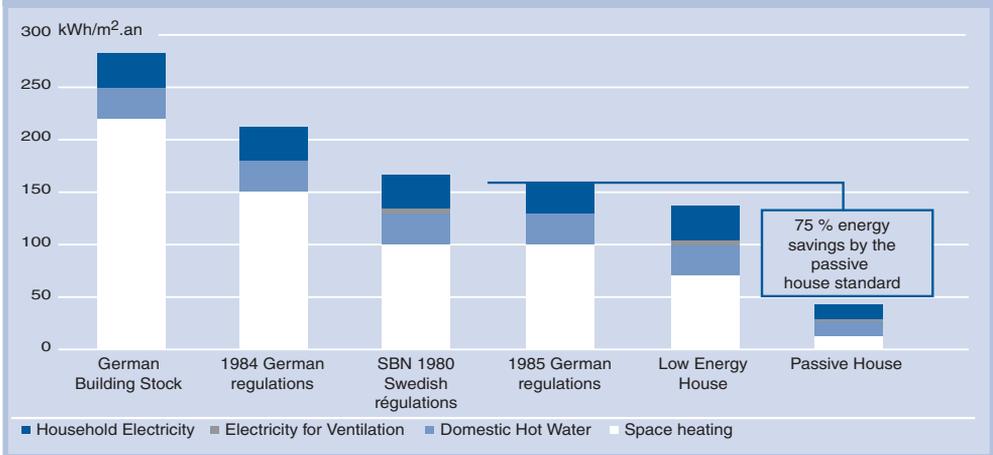
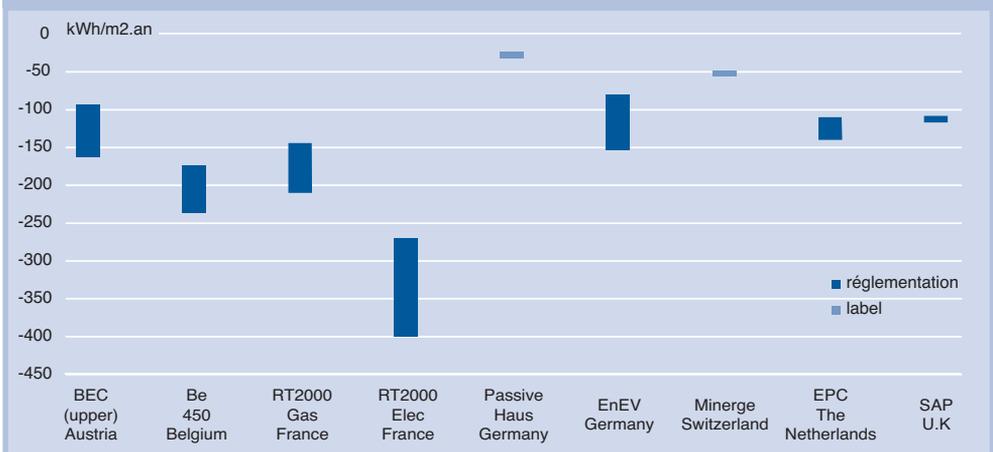


Figure 14 : Consommations d'énergie finale dans le logement neuf dans divers pays européens (réglementations et labels)

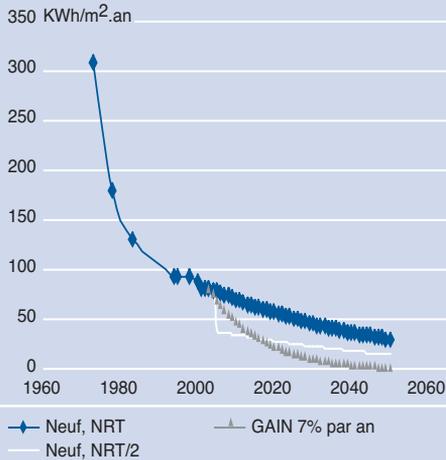


Source : PREDAC, European Actions for Renewable Energies, Groupe de travail n°4 : Label pour des constructions bioclimatiques et solaires.

Scénario de renforcement de la RT2000 à l'horizon 2050

Plusieurs options d'accélération de la RT2000 permettent une réduction d'un facteur 2 des consommations de chauffage des logements neufs, pour atteindre en 2050 la cible moyenne de 30 kWh/m²/an.

Figure 15 : Consommation unitaire de chauffage d'un logement neuf



Performances du neuf en 2050 (kWh/m²) : 30,5 (RT), 15,2 (RT/2), 2,7 (-7% par an)

La première solution consisterait à appliquer dès 2005 une division par 2 des consommations unitaires : progressivement, celles-ci décroîtraient de 40 à 15 kWh/m²/an entre 2005 et 2050.

Une alternative résiderait dans l'accroissement de la progression prévue (gain de 10% tous les 5 ans), au taux de 7% par an (figure 15). Cette solution est écartée dans l'étude, car elle nécessiterait une quasi-autonomie énergétique du logement construit en 2050, la consommation de chauffage devant alors s'établir à 2,7 kWh/m²/an.

Les performances obtenues dans le projet CEPHEUS permettent de dessiner une première représentation des caractéristiques des logements conformes à cet objectif, en performances de l'enveloppe¹⁵. Les maisons individuelles isolées nécessitent des efforts supplémentaires, notamment dans la zone H1. Une référence moins contraignante a été adoptée pour l'ensemble des types de logements, de 17 kWh/m²/an pour les besoins de chauffage, ce qui représente environ 20 kWh/m² de consommation de chauffage compte tenu des rendements moyens des équipements. L'exposition des vitrages sud a été privilégiée, ainsi que l'isolation extérieure des parois opaques qui limite les ponts thermiques. Dans le cas des maisons de ville en bande en

Tableau 14 : Cas types pour des besoins de chauffage de 20 kWh/m²

Cas de la maison individuelle			
Caractéristiques thermiques	Zone H1	Zone H2	Zone H3
U murs et planchers bas [W/(m ² .K)]	0,20	0,25	0,25
U toitures [W/(m ² .K)]	0,10	0,20	0,20
U vitrages [W/(m ² .K)]	1,10	1,30	2,00
Taux de renouvellement d'air équivalent (vol/heure)	0,20	0,20	0,50
Cas de la maison de ville			
Caractéristiques thermiques	Zone H1	Zone H2	Zone H3
U murs et planchers bas [W/(m ² .K)]	0,25	0,25	0,40
U toitures [W/(m ² .K)]	0,20	0,20	0,20
U vitrages [W/(m ² .K)]	1,30	2,00	2,00
Taux de renouvellement d'air équivalent (vol/heure)	0,20	0,30	0,50
Cas de l'immeuble			
Caractéristiques thermiques	Zone H1	Zone H2	Zone H3
U murs et planchers bas [W/(m ² .K)]	0,25	0,25	0,40
U toitures [W/(m ² .K)]	0,25	0,25	0,25
U vitrages [W/(m ² .K)]	1,30	2,00	2,00
Taux de renouvellement d'air équivalent (vol/heure)	0,20	0,30	0,50

RT+1, présentant deux murs mitoyens, les surfaces de murs extérieurs sont réduites de près de 60% : par rapport au pavillon individuel, les résultats équivalent à un glissement d'une zone climatique, notamment entre H1 et H2. La situation est un peu plus favorable pour le logement en immeuble (tableau 14).

La seule prise en compte des actions sur la construction neuve, selon la RT2000 programmée jusqu'en 2050, produit des effets limités sur la consommation d'énergie finale de chauffage du parc de résidences principales projetée en 2050 : 407 TWh au total soit en moyenne 146 kWh/m²/an, ce qui demeure très éloigné des cibles, respectivement de 209 TWh et 75 kWh/m²/an (figures 16 et 17). Le scénario RT/2 permettrait de stabiliser rapidement les consommations, mais c'est au niveau de 20 kWh/m²/an que la construction neuve pourrait amorcer rapidement une décroissance de ces consommations, avant d'entreprendre des efforts particuliers sur l'existant (figure 18).

Le renforcement net d'un facteur 2 appliqué à la RT2000 dès 2005 apporte une amélioration sensible des consommations totales en 2050, dans l'hypothèse d'un statut quo sur l'existant : 389 TWh au total pour des consommations unitaires moyennes à 140 kWh/m²/an, soit une réduction de 4,6% par rapport au scénario RT2000 (tableau 17). Permettant de situer rapidement la construction neuve dans la cible recherchée (hors parc ancien), sous la barre des 50 kWh/m²/an, cette action volontaire sur le neuf contribuerait à créer les conditions favorables à la réhabilitation du parc existant. La consommation totale de chauffage serait alors de 384 TWh en 2050 pour une consommation unitaire moyenne de 138 kWh/m²/an.

La réhabilitation du stock de logements (2005-2050)

Les réalisations allemandes correspondant au label « Passive Haus » à la suite du projet CEPHEUS donnent une image dès aujourd'hui de logements neufs construits en respect de la réglementation thermique « renforcée », visant 15 kWh/m²/an en 2050. L'exercice consistant à dresser la liste des mesures permettant, en 2050, d'atteindre des niveaux moyens de 60 kWh/m²/an dans le parc intermédiaire est en revanche plus délicat, en raison des nombreuses configurations rencontrées (habitat individuel diffus, immeuble collectif de type grand ensemble, centre ville). Il en est de même des obstacles liés à la valeur patrimoniale d'une grande partie du parc antérieur à 1949,

Figure 16 : Evolution des consommations de chauffage

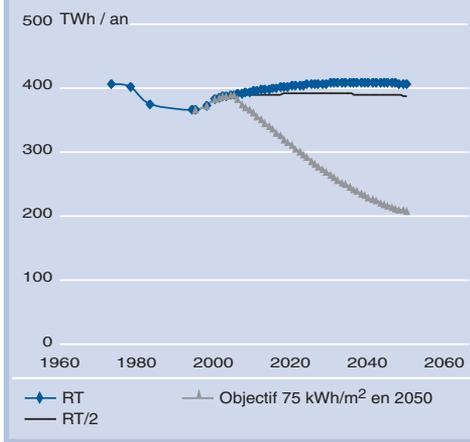


Figure 17 : Consommations unitaires de chauffage (moyenne du parc)

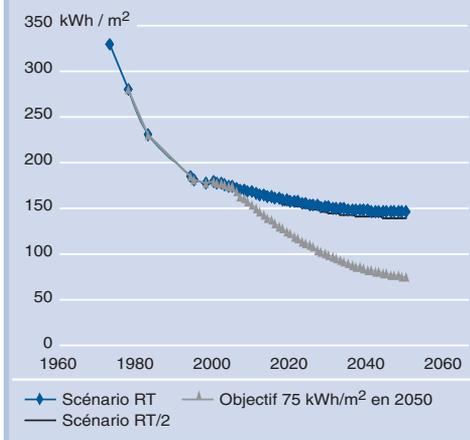
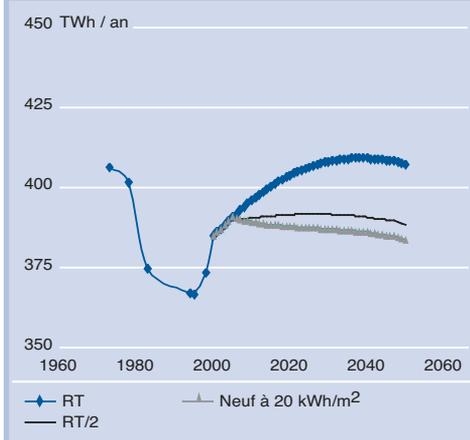


Figure 18 : Consommations totales de chauffage (neuf à 20 kWh/m²)



quand bien même la cible visée, de l'ordre de 135 kWh/m²/an serait moins ambitieuse.

Les surfaces à réhabiliter annuellement peuvent cependant être estimées sur la base de ces objectifs : le parc existant en 2005 étant crédité d'une performance en chauffage de 82 à 220 kWh/m²/an selon la période de construction, la cible de 75 kWh/m²/an serait atteinte pour des gains unitaires de 50 à 130 kWh/m²/an (tableau 15).

Sur la base moyenne d'un gain unitaire moyen de 97 kWh/m²/an, l'écart entre la cible et le scénario

RT/2 est satisfait par une réhabilitation annuelle de plus de 40 millions de mètres carrés jusqu'en 2030 (figure 19), soit environ 400.000 logements de 100 m². Ce taux est équivalent au niveau des transactions annuelles de logements anciens, estimé à 450.000 unités. Ces transactions pourraient être liées à l'application de directives européennes d'efficacité énergétique dans le logement existant, à charge pour l'acquéreur de réaliser les travaux correspondants. Les émissions de CO₂ seraient contenues dans la cible « facteur 4 » en 2050 (figure 20).

Tableau 15 : Niveaux de consommation attendus en fonction de la période de construction

Année de construction	ancien	49-74	75-99	neuf (2000-2005)	Total
Consommations unitaires en 2005 (kWh/m ² /an)	220	190	110	82	172 (moyenne)
Total en 2005 (TWh)	188	120	72	10	390
Consommations unitaires : objectif 2050 (kWh/m ² /an)	135	60	60	30	75 (moyenne)
Réhabilitation : gain à obtenir en 2050 (kWh/m ² /an)	85	130	50	52	84,4
Surfaces estimées (Mm ²)	854	551	637	118	2160
Gain total estimé (TWh)	72,6	71,6	31,9	6,1	182,2

Figure 19 : Surfaces à réhabiliter (gain unitaire : 97 kWh/m²/an)

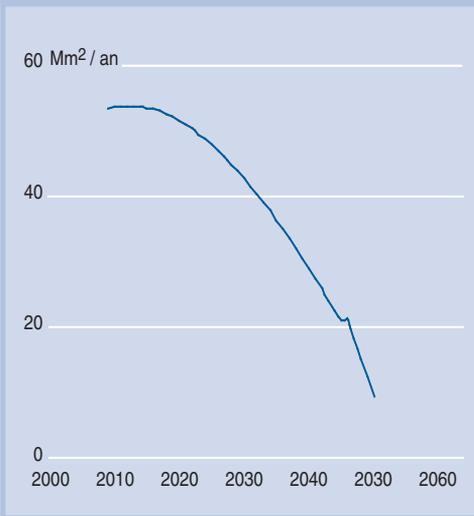
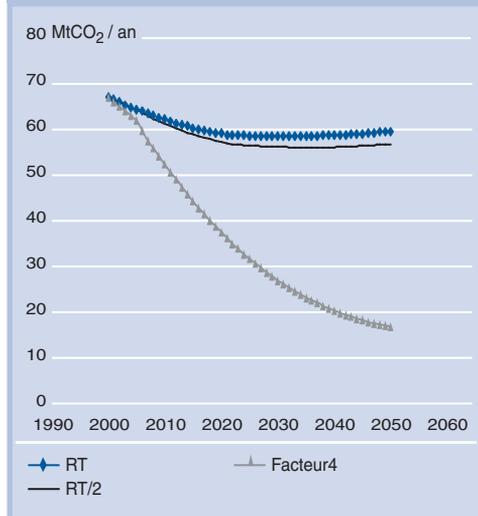


Figure 20 : Emissions de CO₂ dues au chauffage



Prospective des besoins en eau chaude sanitaire

Scénario de référence « eau chaude sanitaire » 2050

Les estimations du CEREN indiquent une croissance de 68% de l'énergie consommée pour l'eau chaude sanitaire entre 1990 (39,7 TWh) et 2020 (67 TWh). Cette croissance forte a été revue à la baisse à la suite des estimations effectuées par ENERDATA. L'ADEME propose l'hypothèse d'une croissance de 48% entre 1990 et 2020. Cela correspondrait à une consommation de 58,75 TWh à cette date, soit un plafonnement à 936 kWh/personne, tandis que le scénario CEREN conduirait à une consommation stabilisée à 1100 kWh/personne dès 2030 (figure 21). Le scénario le plus optimiste, à 58,75 TWh en 2020, sera adopté pour l'étude.

L'évolution du confort des logements

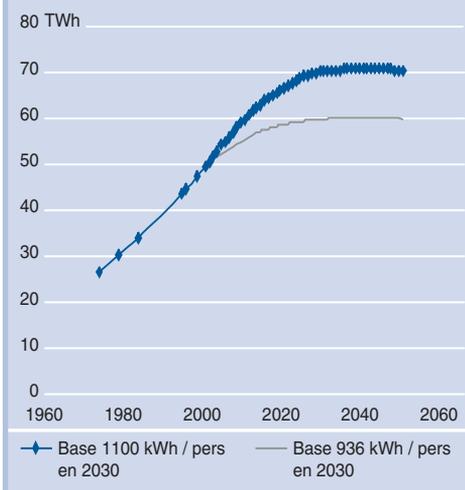
En France métropolitaine, les conditions de logement s'améliorent, en moyenne de la population : les logements sont plus vastes, tandis que la taille des ménages tend à diminuer. L'espace devient un critère de confort, au même titre que les équipements, installations sanitaires, W.-C. à l'intérieur et chauffage central. En mars 1999, plus de quatre logements sur cinq étaient ainsi équipés, alors que le ratio n'était que de trois sur quatre en 1990 et demeurait inférieur à un sur deux en 1975¹⁶.

Le nombre de logements « inconfortables » est ainsi en régression, et serait limité à 7 % du parc en 2020 si la tendance se maintenait.

Pour l'analyse de l'évolution des consommations d'énergie ECS dans le parc résidentiel, il faut se rapporter au recul des catégories « sans con-

fort », c'est-à-dire ne disposant pas des éléments suivants : eau, W-C, et installation sanitaire. Ces catégories sont moins nombreuses et touchent en majorité des petits logements anciens : en 1992, 1,37 million de logements, abritant environ 2,5 millions d'habitants, relevaient de ces catégories. Le nombre de logements « sans confort » diminue rapidement : en 1999, 850.000 personnes vivaient dans des logements qui ne possédaient ni baignoire, ni douche, soit trois fois moins qu'en 1990. La courbe de tendance indique que la quasi totalité de la population métropolitaine pourrait disposer de ces éléments de confort en 2020 (figure 22) : le taux d'équipement croîtrait de 95,6% en 1990, à 98,6% en 1999, et à près de 100% en 2020.

Figure 21 : Scénarios de référence pour l'eau chaude sanitaire

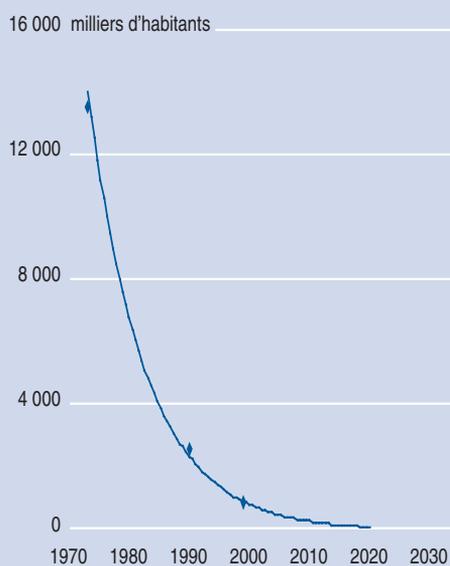


Les besoins d'eau chaude sanitaire : analyse rétrospective

L'augmentation globale de la consommation d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire, telle qu'elle peut être observée de 1973 à 2000 (tableau 16), recouvre plusieurs évolutions. Cette consommation, qui double quasiment dans l'intervalle 1973-2000 (de 26,6 TWh à 50,3 TWh), subit l'influence de la double croissance du parc et de la population, mais aussi de l'augmentation générale des conditions de confort, par logement et par personne. Parmi ces deux dernières, laquelle est la plus significative ? Rapportée à l'unité de surface, comme c'est le cas pour le chauffage, la courbe présente un palier au début des années 1980, après une légère décroissance, due sans doute à une croissance de la taille du parc, plus rapide que celle des consommations.

La consommation par mètre carré habitable ne présente pas d'évolution caractéristique et demeure dans les limites de 21 à 23,5 kWh/an entre 1973 et 2000. En revanche, l'évolution des consommations par personne apparaît plus significative : elle progresse uniformément de 511 à 855 kWh par personne et par an, au cours de la même période. Cette progression semble traduire la généralisation des équipements sanitaires (WC intérieur, douche ou baignoire) à l'ensemble de la population métropolitaine.

Figure 22 : Population « sans confort »



Prospective des besoins

L'hypothèse d'une réduction totale de la population « sans confort » permet de dresser les évolutions de la consommation d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire, à l'horizon 2020.

L'appréciation des besoins par personne, supposés proportionnels à la surface habitable dans la méthode ThC de 1988, apparaît sous dimensionnée au regard des niveaux de 2000 : sur la base de 21 kWh/m², les besoins sont estimés à 675 kWh/an pour la surface habitable moyenne en 1988 (32,1 m²), et de 760 kWh/an pour l'année 2000 (surface habitable 36,2 m²). La méthode SOLO 2000 (ADEME-CSTB) permet une évaluation plus précise des besoins à partir des données météorologiques du site (notamment la température de l'eau) : les besoins peuvent ainsi être évalués en moyenne à 850 kWh/personne/an en métropole. La consommation en énergie finale dépend de l'énergie utilisée (électrique, gaz, fuel, etc.). Le rendement global de conversion dans les chauffe-eau varie de 0,6 pour le fuel à 0,92 pour l'électricité. Les projections du CEREN correspondent à une consommation moyenne, en 2020, de 1100 kWh/personne/an. C'est la valeur moyenne des consommations qui seraient obtenues avec un taux d'équipement de 50% en chaudières gaz et 50% en chauffe eau électrique à accumulation (tableau 17).

Néanmoins, l'augmentation des consommations d'énergie destinée à l'ECS pourrait être moins rapide. Les projections CEREN/ENERDATA/ADEME indiquent une consommation qui s'établirait à 58,75 TWh en 2020 (cf. & 2.5.). Ce scénario résulterait d'une amélioration des performances énergétiques des chauffe-eau et de comportements plus économes de la part des usagers. La consommation annuelle de référence pourrait ainsi être

Tableau 16 : Population et énergie consommée pour l'ECS (1973-2000)

	1973	1994	2000
Population (milliers)	52.045	57.480	58.745
Surface du parc (Mm ²)	1233	1980	2142
Surface moyenne (m ² /personne)	23,7	34,4	36,5
ECS énergie finale (TWh/an)	26,6	43,8	50,3
ECS énergie finale (kWh/m ² .an)	21,6	22,1	23,5
ECS énergie finale (KWh/pers.an)	511	762	855

estimée à 936 kWh/personne (tableau 18). Elle serait généralisée à l'ensemble de la population dès 2020 (figure 23). En résumé, la consommation d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire a crû et

continuerait à croître plus rapidement que la population pour l'ensemble de la période 1970-2020 mais cette double croissance devrait s'estomper ensuite (figure 24).

Tableau 17 : Estimation des consommations d'énergie (ECS) par personne et par an (sur la base de besoins estimés à 850 kWh/personne/an)

Energie	Gaz	Electricité
Rendement de distribution	0,92	0,92
Rendement de stockage	1	1
Rendement de génération	0,72	1
Rendement final	0,66	0,92
Consommation (kWh/an)	1280	920

Tableau 18 : Population et énergie consommée pour l'ECS (2010-2050)

	2010	2020	2050
Population (milliers)	61.060	62.740	64.030
ECS énergie finale (TWh/an)	55,56	58,75	59,96
ECS énergie finale (kWh/m2 .an)	23,5	23,0	21,6
ECS énergie finale (KWh/pers.an)	910	936	936

Figure 23 : Comparaison de deux scénarios de consommation d'énergie pour l'ECS

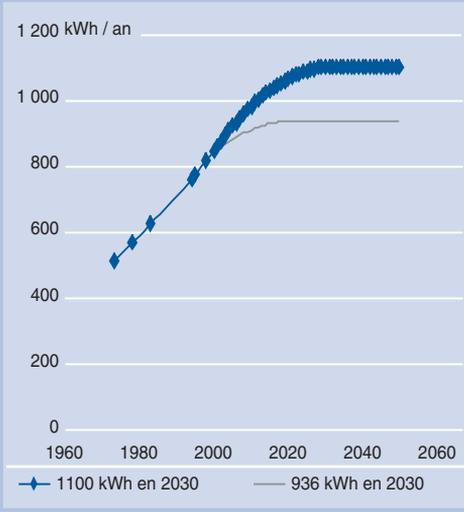
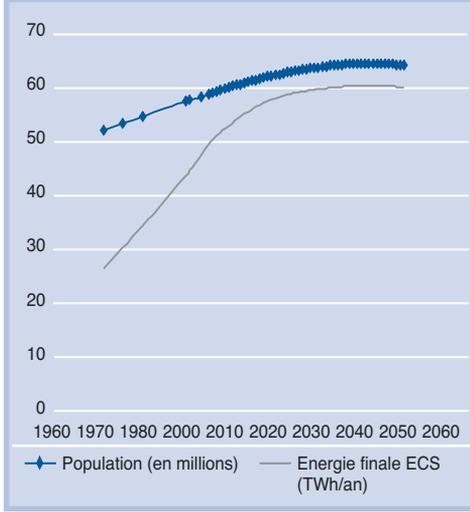


Figure 24 : Scénario de référence pour l'ECS



La contribution du solaire au confort thermique d'hiver

La contribution des ENR et la lutte contre l'effet de serre

Parmi les objectifs de la MIES¹⁷ qui, s'appliquant au secteur des bâtiments, visent à réduire les émissions de GES en 2010 au niveau de 1990, la contribution la plus attendue est celle de la programmation du renforcement de la réglementation thermique, avec un gain escompté de 0,3 MtC en 2010, puis celles de la diffusion des VIR, vitrages à isolation renforcée, et de l'isolation des bâtiments existants (tableau 199).

Le solaire thermique (chauffage et eau chaude sanitaire en individuel ; eau chaude sanitaire en collectif) occupe une place modeste. Le programme de l'ADEME prévoit comme objectif en 2006 :

- 15 à 20 000 chauffe-eau solaires par an,

- 500 à 1000 installations de chauffage+ECS par an,
 - 10 000 à 15 000 m² en collectif par an,
- soit un objectif global en 2006 de 550 000 m² de chauffe-eau solaires pour l'eau chaude sanitaire. L'économie attendue est de 208 GWh, soit 0,018 Mtep¹⁸.

Les perspectives dressées par l'OPECST, dans son rapport de novembre 2001¹⁹, sont bien supérieures, estimant qu'« une quantité de pétrole équivalente de 20 Mtep pourrait être économisée dans la production de chaleur grâce aux énergies renouvelables dans le résidentiel tertiaire ».

Diverses voies sont explorées :

- le développement de l'utilisation du bois dans les chaudières individuelles ou collectives performantes ;
- la climatisation solaire, la réfrigération solaire thermique, la multiplication des réseaux de chaleur ;
- les pompes à chaleur et la géothermie à basse température (soit par l'exploitation des aquifères, soit par l'exploitation de l'inertie thermique du sous-sol ou des masses d'eau insérées dans les sols) ;
- la conception bioclimatique des logements sociaux et des bâtiments publics, associée au renforcement de la performance énergétique des bâtiments ;
- le lancement d'un Plan Face Sud qui comprend un volet solaire thermique et un autre volet thermique-photovoltaïque.

Le plan Mobilisateur « Face Sud pour des bio-toits intelligents » proposé par l'OPECST se donne pour objectif une production d'un million de mètres carrés de capteurs en 2010 pour le volet thermique simple « Face Sud 200.000 chauffe-eau solaires par an pour 2010 » et une production de 50.000 toits thermiques-photovoltaïques par an pour 2010.

Cet objectif de moyens semble insuffisant pour assurer une contribution du solaire thermique significative, en regard de la demande énergétique du

Tableau 19 : Effet attendu de plusieurs mesures appliquées au secteur des bâtiments

Mesure	Effet attendu en 2010 (MtC)
VIR	0,23
Isolation bâtiments existants	0,20
Chaudières individuelles	0,15
Chaudières collectives haute performance	0,04
Systèmes à condensation	0,04
Contrôle chaufferies	0,07
Bois-énergie collectif	0,10
Bois-énergie individuel	0,10
Solaire thermique	0,01
Renforcement programmé RT	0,30
Total Bat/Tertiaire	1,34

Source : Programme national de lutte contre le changement climatique, chapitre 5, p. 5, janvier 2000

secteur. Néanmoins les ambitions doivent apparaître suffisamment fortes pour rattraper la situation catastrophique des énergies renouvelables en France, hydroélectricité exceptée (tableau 20).

La production d'énergies renouvelables a dépassé 27 millions de tonnes équivalent pétrole en 2000 grâce aux 17 Mtep liées à la production d'électricité. L'utilisation thermique directe, 10 Mtep, en quasi totalité basée sur le bois et les déchets solides, représente seulement 4 % de la consommation totale d'énergie primaire (250 Mtep).

Des projections doivent être effectuées pour déceler les secteurs privilégiés (construction neuve, réhabilitation), ainsi que les obstacles physiques, liées notamment aux morphologies urbaines.

La contribution des apports solaires passifs : le parc existant

L'énergie solaire est présente dans le parc existant, sous la forme des apports dits « passifs » transmis aux espaces chauffés par l'ensemble des parois vitrées. En comparant les besoins de chauffage estimés pour le parc à une référence sans apports solaires, pour la construction « standard », il est possible de mesurer la contribution des apports solaires passifs dans le stock (le parc existant). Le projet « SOLGAIN » de la Communauté européenne, s'appuyant sur les contributions de sept pays européens (Allemagne, Belgique, Finlande, Norvège, Grèce, Irlande, Royaume Uni) s'est donné cet objectif : intégrer, dans les statistiques nationales et européennes, la contribution des apports solaires à la demande d'énergie de chauffage des logements, en quantifiant les économies d'énergie et les réductions de CO₂ actuelles²⁰.

L'étude du Centre Scientifique et Technique de la Construction évalue à 11,5% la contribution moyenne des apports solaires passifs dans la demande d'énergie de chauffage en Belgique. En complément, le remplacement de toutes les fenêtres existantes, réparti sur une période de 30 ans, par un vitrage à isolation renforcé (U de 1,1 W/m²K) permettrait de réduire la consommation énergétique pour le chauffage de 15%.

Des contributions du même ordre ont été estimées pour les différents pays engagés dans le projet SOLGAIN (figure 25). Elles s'échelonnent de 10 à 14% (exemple, 13% en Allemagne, d'après les estimations du Fraunhofer Institute).

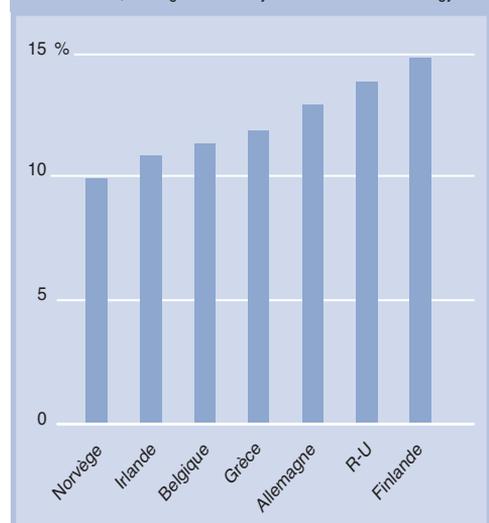
En France, la situation climatique semble plus contrastée que celle des pays du nord de l'Europe. Une première estimation, effectuée par la méthode simplifiée des règles Th-B du CSTB, telle qu'elle accompagnait la réglementation thermique de 1988, donne des résultats sensiblement plus faibles. Il est vrai que cette méthode simplifiée affecte les apports solaires de plusieurs coefficients forfaitaires (voilages, etc.), les facteurs solaires des menuiseries (fenêtres, portes fenêtres) variant de 0,48 à 0,58 pour un double vitrage.

La consommation moyenne du parc, apports solaires compris, est estimée à 180 kWh/m² en 1998, valeur qui monte à 194 kWh/m² lorsque les apports solaires sont nuls. La contribution des apports solaires passifs serait donc inférieure à 7,5%, valeur moyenne qui masque la sensibilité du résultat au

Tableau 20 : Bilan des énergies renouvelables en 2000, production par source - Conversion : 1GWh électrique=222 tep - Source : DGEMP

Métropole + DOM - 2000 estimation	électricité produite (GWh)	chaleur produite (ktep)
hydraulique	73587	-
éolien	94	-
solaire	10	20
géothermie	21	117
déchets urbains solides	1522	661
bois et déchets bois	1437	8948
résidus de récoltes (y compris bagasse)	378	201
biogaz	346	58
biocarburants	0	335
total	77394	10340
total général en tep	27522	

Figure 25 : Contribution des gains solaires passifs
Source : NTNU, Norwegian University of Science and Technology



type de logement, à la situation climatique et à l'âge de la construction : la réduction des besoins de chauffage varie en réalité de 3 à 37%. Pour la construction neuve (RT2000), la contribution des apports solaires s'élèverait à 14% en moyenne. Appliquée à l'évolution rétrospective du parc, la prise en compte des apports solaires passifs reste d'un effet limité : la consommation d'énergie de chauffage représenterait 704 TWh en 1998, contre 662 TWh avec apports solaires, mais en maintenant le niveau de performance de la construction neuve à son niveau de 1973, 492 TWh sans intervention sur l'existant. Les statistiques indiquent que la consommation effective a été de 374 TWh en 1998 (tableau 21).

Les apports solaires et la conception bioclimatique

Les configurations standard des logements peuvent être améliorées en vue d'optimiser la récupération des apports solaires passifs. Trois configurations dominent l'architecture solaire passive :

- les gains directs (grands vitrages sud) ;
- le mur « Trombe » ;
- la véranda.

Cette dernière configuration de base, de la serre accolée au volume habitable, exposée au sud, est retenue dans l'étude. Elle représente le schéma le plus répandu de l'architecture dite bioclimatique, dans sa version « confort d'hiver ». Mais au-delà de la prise en compte des besoins de chauffage, la conception bioclimatique devrait répondre aux nécessaires complémentarités avec le confort d'été et le confort visuel, dans une valorisation large des ressources locales (énergie, matériaux). En cela, l'approche bioclimatique annonce la démarche plus récente de « haute qualité environnementale ».

Pour que la récupération des apports solaires générés par la véranda soit la plus complète, l'air neuf est introduit par cette pièce en façade sud puis traverse les pièces principales avant d'être extrait grâce à la ventilation mécanique contrôlée (VMC), par les pièces de services. La véranda sud a été largement dimensionnée, pour une maison de 105 mètres carrés de surface habitable, et représente une extension de 25 mètres carrés environ. La surface vitrée totale de la véranda est de 63,45 m² (Sud : 22,5 m² ; Est/ouest : 14,2 m² ; Toiture sud inclinée 26,75 m²)

Le niveau de performance de la conception bioclimatique ne peut être évalué par rapport à une référence sans apports solaires, comme cela a été proposé dans le projet « SOLGAIN ». Pour évaluer la contribution des apports solaires dans une conception dite bioclimatique du logement neuf, la référence est fixée par la nouvelle réglementation, proposant par défaut une surface de vitrage égale à 25% de la surface habitable, les aires des baies pour les orientations Nord, Sud, Est et Ouest étant prises alors égales au quart de cette valeur, avec un facteur solaire de 0,40, sans masques proches.

Les besoins annuels de chauffage de la maison individuelle neuve se trouvent réduits dans une proportion croissante, de 47 à 71 %, selon les zones climatiques (tableau 22). En moyenne, les besoins de 84,2 kWh/m², se trouvent réduits à 40,6 kWh/m² grâce à cette conception, soit un gain de 52% par rapport aux normes réglementaires RT2000. Le niveau de consommation d'énergie dépend du rendement du système de chauffage et de la qualité de la régulation ajustée à l'intermittence : on peut estimer que la consommation de chauffage passe de 96,8 kWh/m² à 46,7 kWh/m² si le taux d'équipement de la construction individuelle neuve en chauffage électrique est de l'ordre de 50%.

La configuration de la véranda en façade sud est envisageable dans la réhabilitation des immeubles collectifs des grands ensembles ou des unités urbaines des années 1960-1980, quand elles ont adopté la morphologie des barres : il est en effet possible d'équiper les balcons ou les loggias de parois en verre, la récupération des apports solaires dépendant évidemment de l'orientation des façades. Pour un immeuble répondant à la réglementation thermique dite RT2000, les besoins seraient réduits en moyenne sur les trois zones de 44% grâce à l'adjonction d'une véranda en façade sud et à une gestion de l'air appropriée.

Tableau 21 : Comparaison de différents scénarios rétrospectifs de consommations de chauffage du parc de résidences principales (1968-1998) en TWh

	Témoin	Base 1968	Sans RT	Sans RT Sans AS
1968	361	361	361	385
1973	406	404	404	430
1978	402	433	463	493
1983	375	455	522	555
1988	370	470	574	611
1993	368	481	618	657
1995	367	485	635	676
1998	374	492	662	704

Une telle conception peut donc contribuer à réduire les niveaux de consommations du logement neuf –et d'une part importante du parc existant, qu'il conviendrait d'estimer–, en rapprochant les consommations unitaires de la cible fixée, à des coûts moindres que les planchers solaires directs. Les gains pourraient être estimés sur la base des technologies de vitrages les plus performantes (coefficients U légèrement supérieurs à 1 W/m².K), ce qui élargit le champ d'application des vérandas. Avec de tels niveaux d'isolation de l'enveloppe vitrée, et des modes de gestion de l'air économes, les vérandas pourraient offrir des conditions de confort, sans chauffage, dans des périodes de temps élargies.

Dans l'ensemble des configurations solaires, la question est la même : que faire de l'énergie solaire captée hors saison de chauffage, qui est d'autant plus courte que le logement est bien isolé thermiquement ? Une protection solaire des vérandas efficace et une stratégie de ventilation jour / nuit apparaissent indispensables en confort d'été.

Le solaire thermique et le chauffage : les PSD (planchers solaires directs) dans la construction neuve

Une installation de plancher solaire direct (PSD) met en oeuvre un capteur plan à eau, couplé à un plancher chauffant et à un ballon d'eau chaude sanitaire, le plus souvent avec un appoint intégré. Environ 900 réalisations de plancher solaire direct fonctionnent en France, en grande majorité dans les régions alpines. La surface de capteur peut atteindre 20 mètres carrés pour une maison individuelle, la production annuelle d'énergie solaire variant de 440 à 800 kWh par mètre carré de collecteur quand l'installation so-

laire est destinée au chauffage et à l'eau chaude sanitaire (tableau 22).

Pour le chauffage considéré isolément, la performance attendue des PSD dépend étroitement des conditions climatiques et des performances du bâti. En effet, un degré élevé d'isolation de l'enveloppe peut réduire la saison de chauffage d'appoint, les déperditions en mi-saison pouvant plus facilement être couvertes par les apports internes et les apports solaires directs. Pour les niveaux d'isolation prévus actuellement dans les trois zones climatiques H1, H2 et H3 par la RT2000, la réduction des besoins peut atteindre, pour un pavillon de 105 m² de surface habitable équipé de 18 m² de collecteurs :

- 2200 kWh/an en zone H1 ;
- 2775 kWh/an en zone H2 ;
- 3080 kWh/an en zone H3.

Une surface de 18 m² pour 105 m² de surface habitable, soit 0,17 m²/m² habitable est considérée comme la limite supérieure au-delà de laquelle la productivité décroît notamment en zone H3 (figure 26).

Le gisement « PSD » sera ainsi exploité sur les bases suivantes :

- maison individuelle de 105 m² habitables ;
- 22 m² de capteurs en toiture (18 m² pour le PSD + 4 m² pour l'ECS).

Les PSD seront généralisés :

- à la construction individuelle sur la base de 0,17 m² capteur / m² habitables ;
- à l'immeuble collectif, sur la base de 0,06 m² capteur / m² habitables.

Pour l'immeuble collectif, compte tenu des surfaces constatées dans les tissus urbains de type centres anciens ou grands ensembles, cela représente 1/3 de la surface de toiture. On estime que la part de la maison individuelle dans le neuf reste constante à 70% de la surface totale construite.

Les gains solaires demeurent du même ordre à l'horizon 2050, pour l'évolution programmée de la RT2000 et en particulier dans la zone H1 (ANNEXE 2). Mais il faut tenir compte de l'érosion des gains en moyenne sur les trois zones climatiques, selon la répartition des logements considérés, et

Tableau 22 : Estimation des besoins de chauffage des logements neufs

	Maison individuelle			Immeuble collectif
	H1	H2	H3	-
Coefficient de répartition	0,46	0,44	0,11	-
RT2000 (1) (kWh/m ²)	98,00	77,00	54,50	40,8
RT et bioclimatique (2) (kWh/m ²)	52,30	34,30	16,00	22,8
Gain (1)-(2)	45,7 (-47%)	42,7 (-55%)	38,5 (-71%)	18

Tableau 23 : Performance des planchers solaires directs

- Source : CSTB Magazine n° 130, juillet-août 2000 -

Surface de capteurs requise	1 à 2 m ² de capteur pour 10 m ² de plancher chauffant
Production	chauffage et eau chaude sanitaire 440 - 800 kWh/m ² /an
Economie réalisée	7000-16000 kWh par logement et par an

particulièrement la maison individuelle, qui est la cible principale des PSD²¹. Ces gains doivent être estimés pour des logements devant répondre, dans le système (bâti + équipement solaire), à des exigences plus strictes, de type RT/2, décrites plus haut. En moyenne sur les trois zones climatiques, et pour deux taux d'équipements solaires, les gains dus au PSD croissent sensiblement en fonction de la charge climatique (figure 27).

Cette estimation des gains dus à l'installation solaire en fonction des besoins de chauffage estimés sans PSD permet de dresser les deux types de logements, en considérant que les exigences de la RT sont identiques, par mètre carré habitable, dans

les deux cas. Les gains à assurer par rapport à la RT telle qu'elle est aujourd'hui programmée sont les suivants :

- pour la maison individuelle, la cible RT/2 est atteinte grâce à l'équipement solaire, à condition d'un renforcement de la performance du bâti qui devrait permettre de gagner en consommation 20 kWh/m² en 2005, puis 10 kWh/m² après 2020 (figure 28);
- pour le logement en immeuble collectif, la cible RT/2 est moins aisément atteinte par l'équipement solaire réduit à 0,06 m²/m² habitable, le renforcement de la performance du bâti devant permettre de gagner en consommation plus de 30 kWh/m² en 2005, puis de l'ordre de 20 kWh/m² après 2020 (figure 29).

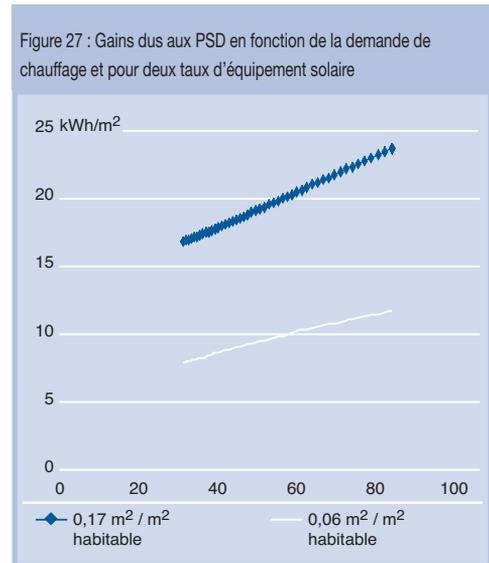
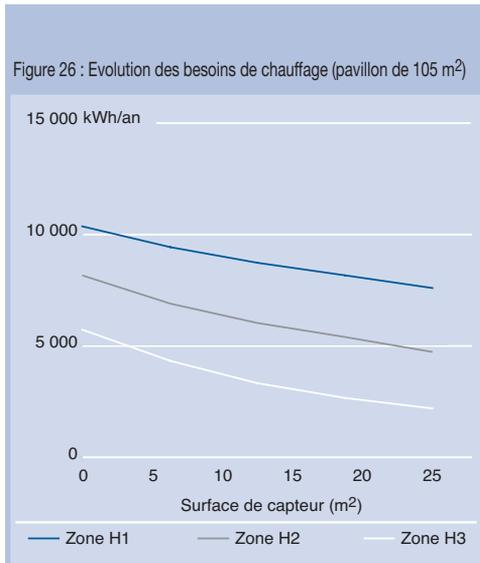


Tableau 24 : Construction neuve et bilan PSD

	Entrées 2005-(Mm2)	Surface installée capteurs (Mm2)	Base RT Gains chauffage (TWh)	RT/2 Gains chauffage (TWh)
Maison individuelle (Surface de capteur, maison individuelle : 0,17 m2/m2 hab.)				
2020 (productivité moyenne capteurs)	256,5	43,60	6,44 (148 kWh/m2)	5,05 (116 kWh/m2)
2050 (productivité moyenne capteurs)	445,6	75,76	10,56 (140 kWh/m2)	8,47 (112 kWh/m2)
Immeuble collectif (Surface de capteur, immeuble collectif : 0,06 m2/m2 hab.)				
2020 (productivité moyenne capteurs)	110,0	6,60	-	0,89 (135 kWh/m2)
2050 (productivité moyenne capteurs)	191,0	11,46	-	1,47 (128 kWh/m2)

L'exigence supérieure sur le bâti envers le logement en immeuble collectif, due à l'équipement solaire réduit dans un facteur 3 à surface habitable identique doit être accessible en raison des taux de contiguïté plus élevé entre logements. Ces chiffres apparaissent par ailleurs tout à fait réalistes, en comparaison du label « Passive Haus » allemand.

Pour les surfaces installées considérées, et les surfaces construites de 2005 à 2050 de ces deux types de logements, les surfaces installées totales seraient très importantes (près de 90 millions de mètres carrés). La productivité moyenne des capteurs apparaît cependant modeste, de l'ordre de 110 à 150 kWh/m², soit environ un quart des gains apportés par les collecteurs des installations destinées à l'eau chaude sanitaire (tableau 24).

La réduction des émissions de CO₂

La réduction totale des émissions de CO₂ obtenue en 2050 doit être estimée par rapport à la référence, et en tenant compte de la distribution des énergies de chauffage. En premier lieu, la contribution des planchers solaires directs, limitée à 10 TWh en 2050, car appliquée à la seule construction neuve, permet néanmoins en association à un bâti de performance élevée (scénario RT/2) de réduire la consommation de chauffage de près de 200 TWh au total, en tenant compte des efforts de réhabilitation de l'existant (figure 30).

La réduction des émissions est un peu plus sensible, en raison de la part occupée par le bois énergie. En supposant une référence à près de 60 MtCO₂, et compte tenu de la répartition des énergies

Figure 28 : Consommations unitaires de chauffage pour une maison individuelle neuve

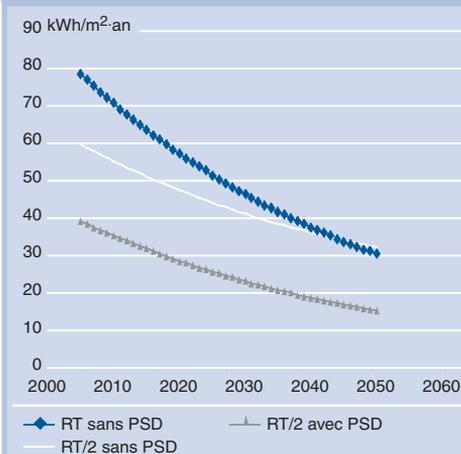
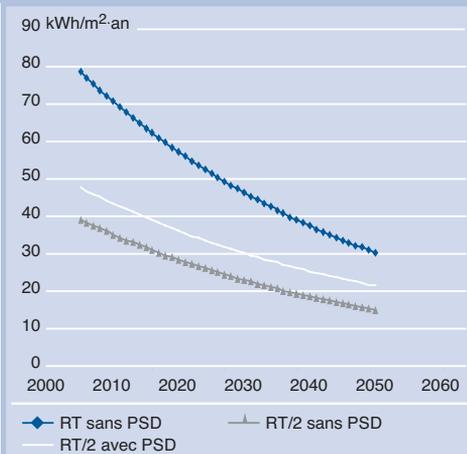


Figure 29 : Consommations unitaires de chauffage pour un immeuble collectif neuf



Encadre 2 : Estimation des contributions au « facteur 4 »

GESref et GESf4 : Niveaux d'émissions des deux scénarios (référence et facteur 4) en 2050, en MtC

EFref et EFf4 : Consommations d'énergie finale pour les deux scénarios (référence et facteur 4) en 2050, en Mtep ;

Cref et Cf4 : Coefficients d'émission pour les deux scénarios (référence et facteur 4) en 2050, en tC/tep ;

Expression de la réduction des émissions dues à la consommation d'énergie de chauffage :

$$GES_{ref} - GES_{f4} = EF_{ref} * C_{ref} - EF_{f4} * C_{f4} = (EF_{ref} - EF_{f4}) * C_{f4} + EF_{ref} * (C_{ref} - C_{f4})$$

La réduction des émissions entre la référence et le scénario « F4 » est ainsi obtenue :

- par une réduction de la consommation d'énergie (action sur le bâti et contribution des PSD) exprimée par le premier terme : $(EF_{ref} - EF_{f4}) * C_{f4}$
- par la substitution d'énergies moins émettrices (ici le bois essentiellement) exprimée par le deuxième terme : $EF_{ref} * (C_{ref} - C_{f4})$

de chauffage projetée en scénario de référence pour 2050, le gain total serait de 42,7 MtCO₂. En déduisant ce qui est dû à la substitution d'énergie (grâce au bois notamment), soit près de 27 MtCO₂ (cf. encadré), le gain complémentaire réparti au

prorata des consommations d'énergie évitées par chacune des deux actions (PSD neuf / action sur le bâti neuf et parc existant), conduit à une réduction des émissions de 0,9 MtCO₂ pour les PSD appliqués au neuf (figure 31).

Figure 30 : Impact énergétique du solaire thermique (PSD dans le logement neuf)

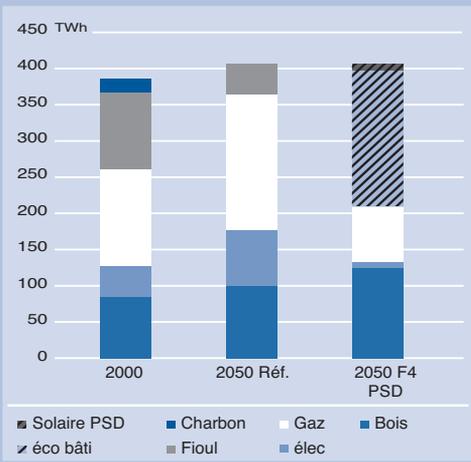
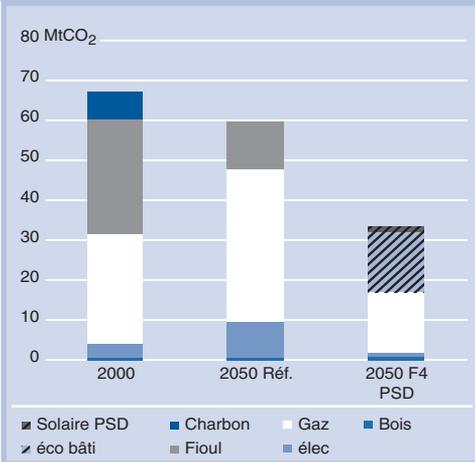


Figure 31 : Impact du solaire thermique (PSD dans le logement neuf) sur les émissions



Dimensionnement des collecteurs solaires par m² habitable : 0,17 m² en maison individuelle, 0,06 m² en immeuble collectif

L'eau chaude sanitaire et le solaire thermique

L'estimation des ressources appliquées à l'ECS

Les technologies appliquées au chauffe eau solaire sont aujourd'hui maîtrisées. Les industriels du secteur semblent parvenir à effacer les traces, dans les mémoires des maîtres d'ouvrage, des dommages subis par une partie des installations au cours des années 1980. Des diminutions de coûts devraient encore accompagner l'extension des marchés. Deux types de capteurs sont proposés par les fabricants :

- les capteurs plans à absorber en cuivre et revêtement sélectif, sous couverture transparente ;
- les capteurs sous vide, constitués de tubes de verre enfermant l'absorber et le fluide caloporteur.

De véritables composants de toiture sont aujourd'hui disponibles, offrant une grande flexibilité dans la répartition des modules (capteurs thermiques, panneaux photovoltaïques, baies vitrées). On peut également citer les toitures solaires sans vitrage, en acier inoxydable à revêtement sélectif jouant à la fois un rôle de couverture et de dispositif de chauffage de l'eau. Ce matériau est utilisé dans des maisons individuelles, des immeubles collectifs, des salles de sport ou des piscines en Suisse, en Allemagne ou en Espagne.

Parmi toutes ces solutions, la technologie retenue pour les estimations du potentiel solaire thermique est celle du capteur plan associé à un ballon de stockage de l'eau chaude, par circulation forcée, avec échangeur. Cette configuration, indispensable

lorsqu'il existe un risque de gel, ou lorsque l'eau est corrosive, est destinée aux installations individuelles ou aux petits collectifs.

La surface de capteur est d'environ un mètre carré par personne, pour obtenir une réduction de 50 à 70% de la consommation énergétique annuelle (tableau 25). Pour une utilisation annuelle, l'angle d'inclinaison est pris égal à la latitude du lieu, augmentée de 10°. Il est conseillé d'accroître l'inclinaison de + 15° pour un emploi essentiellement hivernal. L'orientation préférentielle est le Sud, avec une tolérance d'environ 15 ° vers l'Est ou l'Ouest.

L'ADEME a estimé la quantité de chaleur produite en 1999 par les 500.000 m² de capteurs installés, dont 70% sont destinés à l'eau chaude sanitaire, à 208 GWh, soit 18 ktep, ce qui est un niveau très modeste, en comparaison d'autres pays européens comme la Grèce ou l'Allemagne (figure 32). Une faible part de la surface de capteurs, d'environ 2%, est dédiée au chauffage des locaux, essentiellement par la technique du plancher solaire direct (PSD).

Tableau 25 : Performances de l'eau chaude sanitaire solaire
Source : CSTB Magazine n° 130, juillet-août 2000

Surface de capteurs requise	0,5 à 1,5 m ² de CESI (chauffe-eau solaire individuel)
Production	50 - 60 litres d'ECS par personne et par jour d'eau à 45 °C
Economie réalisée	réduction de 50 à 70 % de la consommation énergétique

Les ressources en solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire ont été évaluées sur les bases suivantes²² :

- un logement de 4 personnes,
- une consommation journalière de 240 litres à 45°C,
- une surface de captation de 4 m², soit 1 m² par personne,
- un stockage par ballon de 250 litres.

La productivité des capteurs solaires est estimée en moyenne à 480 kWh/m² en 2002 (ANNEXE 3). Des gains de performance peuvent être acquis dans les prochaines décennies, qui seront supposés atteindre 20% en 2050 (576 kWh/m²).

Afin de limiter la consommation d'énergie finale à 936 kWh/personne/an, et pour un rendement final d'équipement de chauffage de l'eau estimé à 0,83 (soit 1/1,20), les besoins devraient être réduits à 780 kWh/personne/an. La contribution solaire permettrait alors de réduire la consommation d'énergie finale à 406 kWh/personne/an en 2002 (figure 33). Dans les mêmes conditions, l'énergie d'appoint serait en 2050, pour une contribution solaire de 576 kWh/m², de 300 kWh/personne/an.

Scénario 1 : application à la construction neuve (2000-2050)

Les propositions du plan Hélios, de promouvoir le marché du solaire thermique en France, à hauteur de 50.000 mètres carrés annuels à partir de 2005, apparaissent modestes face aux niveaux atteints chez nos voisins européens. Cependant, un tel programme contribue à créer les conditions d'un décollage réel du marché, comme l'indiquent les chiffres prospectifs de l'ASTIG (*Active Solar Thermal Industry Group*), association des plus grands fabricants de capteurs en Europe. Avec un taux d'installation prévisible de 220.000 mètres carrés par an en 2005, la France rejoindrait les leaders européens, sans considération des diversités des conditions climatiques et des niveaux de population (figure 34). Le marché européen (les Quinze plus la Norvège et la Suisse) dépasserait 3,2 millions de mètres carrés par an en 2005.

Les estimations de l'ASTIG correspondent pour la France aux propositions ENERPLAN, qui consistent à appliquer à la France les cahiers de prescriptions adoptés pour les permis de construire à Barcelone : tous les bâtiments résidentiels (neufs ou en réhabilitation lourde) doivent être équipés de chauffe eau solaires, sur la base de 1 mètre carré par personne (pour le climat de la Catalogne, le taux de couverture solaire des besoins en

eau chaude sanitaire atteint alors 100% en été). Le scénario proposé pour la construction neuve consiste à poursuivre la progression du marché jusqu'en 2007-2008, date à laquelle tout le parc neuf sera concerné.

Le potentiel du solaire thermique dans le logement neuf peut être évalué à partir des prévisions annuelles de la construction neuve, en nombre de logements, et du taux d'occupation. On appliquera ici une autre procédure (figure 35), fondée sur l'évaluation de la croissance annuelle du parc, en millions de mètres carrés, et sur l'estimation de la surface habitable par personne dans le neuf (surface moyenne augmentée d'un mètre carré). Le nombre de personnes hébergées annuellement dans le parc neuf indique la surface de capteur installée, sur la base de 1m²/personne (figure 36). La production totale du solaire thermique dépend de la productivité moyenne des capteurs, supposée croissant régulièrement, de 480 kWh/m² en 2003, à 576 kWh/m² en 2050.

La généralisation de l'équipement solaire pour l'ECS dans le parc résidentiel neuf créerait un marché de plus de 600.000 mètres carrés dès 2005, qui pourrait cependant décliner lentement à moins de 150.000 mètres carrés en 2040, si le rythme de la construction neuve s'essouffait. La surface installée cumulée plafonnerait à 15,4 millions de mètres carrés vers 2040.

Scénario 2 : le potentiel d'équipement du parc existant (2005-2050)

On peut considérer que le taux de solarisation du parc résidentiel est quasi nul en 2000, puisque les 350.000 mètres carrés de capteurs comptabilisés concernent, outre des hôpitaux et hôtels, à peine plus d'une centaine de milliers de logements. L'équipement de la construction neuve à 100% déclinant avec la production de logements, l'industrie du chauffe eau solaire pourrait poursuivre sa croissance en exploitant le marché du parc existant, qui comportait en 1999 plus de 13 millions de maisons individuelles, et plus de 10 millions de logements en immeubles collectifs (tableau 26).

A raison d'un mètre carré de collecteur par personne, le potentiel total en 2003 est de 59,5 millions de mètres carrés. On estime qu'un équipement partiel du parc antérieur à 2005 est réalisé entre 2005 et 2050, à 50%. Cela représenterait un total de 24,3 millions de mètres carrés²³ pour ce parc.

En considérant que le marché total (équipement à 100% du parc construit annuellement et équipement

Figure 32 : La contribution du solaire thermique en utilisation directe dans l'Union européenne en 1999 - Source : AIE/OCDE -

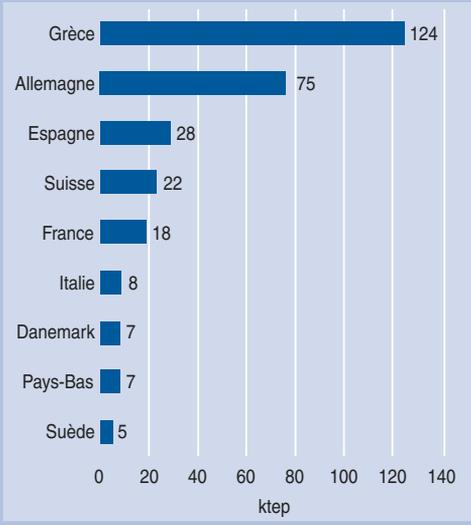


Figure 34 : Prévisions de marché de six pays européens (m²/an) Source : Astig - Tecsol

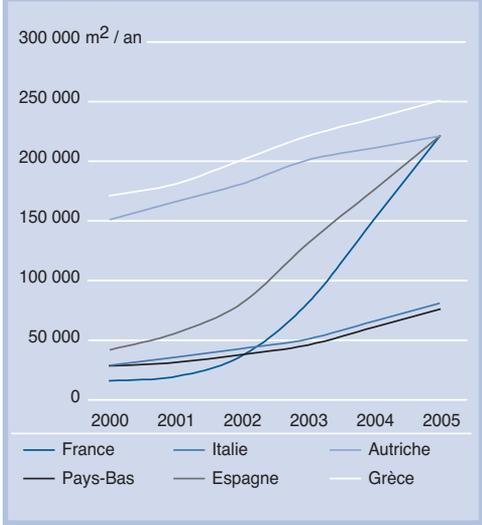


Figure 33. : Contribution solaire et énergie d'appoint pour l'ECS

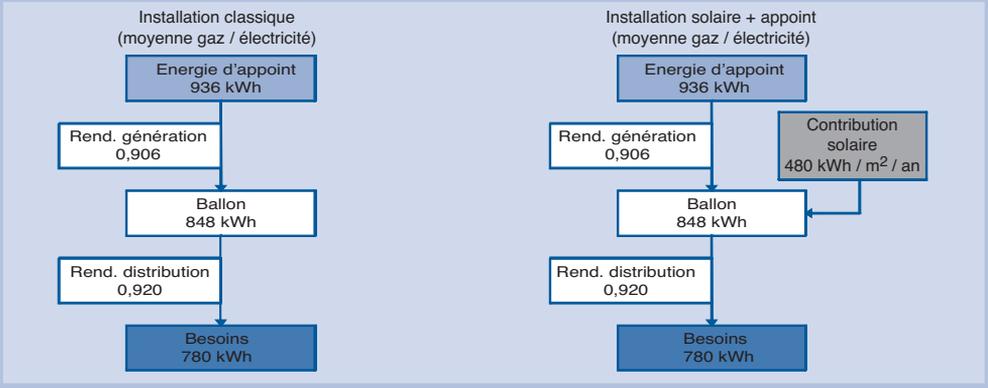


Figure 35 : Procédure d'estimation de la production solaire dans le logement neuf.

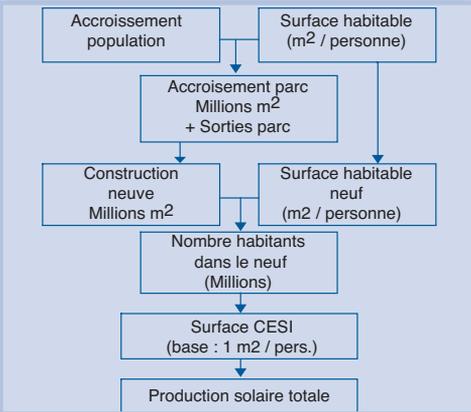
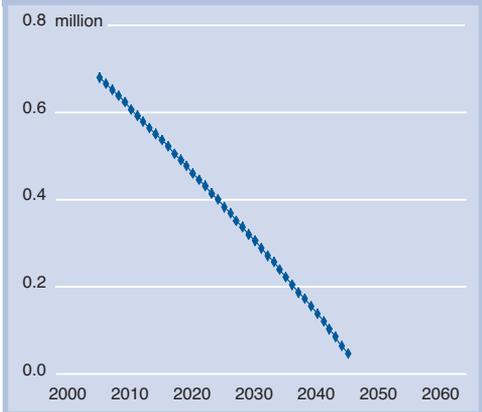


Figure 36 : Perspectives du solaire thermique dans le logement neuf (Base : 1m²/personne)



partiel et progressif du parc existant) pourrait se maintenir entre 2005 et 2050, l'installation de capteurs d'effectuerait à un rythme de plus de 850.000 mètres carrés par an, ce qui est le niveau actuel de la production en Allemagne. La surface installée représenterait près de 40 millions de mètres carrés en 2050 (figure 36).

Bilan des scénarios ECS

La généralisation progressive de l'équipement solaire au logement neuf, qui s'appliquerait à la totalité de la construction de 2005 à 2050, devrait créer une dynamique chez les industriels et les installateurs suffisamment forte pour s'étendre au parc existant. Alors que la France se situait dans les dernières positions européennes pour son taux d'équipement en solaire thermique par habitant, avec moins de 9 mètres

carrés de collecteur pour 1000 habitants (figure 38), le scénario « neuf + 50% existant » permettrait d'atteindre des niveaux plus honorables, de 220 m² en 2020 et de 620 m² en 2050 pour 1000 habitants (figure 38), le premier niveau se rapprochant de l'effort consenti par habitant en Autriche en 2000.

Une mesure volontaire d'équipement de la construction neuve permettrait d'infléchir rapidement la croissance des consommations d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire dans le parc résidentiel (figure 39). Mais un effort complémentaire dans le parc existant apparaît nécessaire pour réduire rapidement cette consommation. Compte tenu des hypothèses énoncées précédemment, la consommation serait réduite de 40% en 2050, par rapport au scénario de référence, retrouvant ainsi le niveau des années 1980.

Tableau 26 : Caractéristiques du parc de résidences principales en 1999 et potentiel d'équipement en solaire thermique

	Maisons individuelles	Logements en immeubles collectifs	Total du parc
Nombre de logements en millions (1)	13,537	10,551	24,088
en %	56,2	43,8	100
Surface moyenne (2) (m ²)	105	66	89
Surface habitable (m ² /personne)	40	30	36
Personnes/logement	2,63	2,23	2,45
Potentiel total de surface de capteurs (1 m ² /pers.) (Mm ²)	35,6	23,5	59,0

1) Sources : Recensement de la population 1999 et Enquête logement 1996

(2) Estimations

Figure 37 : Potentiel d'équipement de la construction neuve et du parc existant (2005-2020)

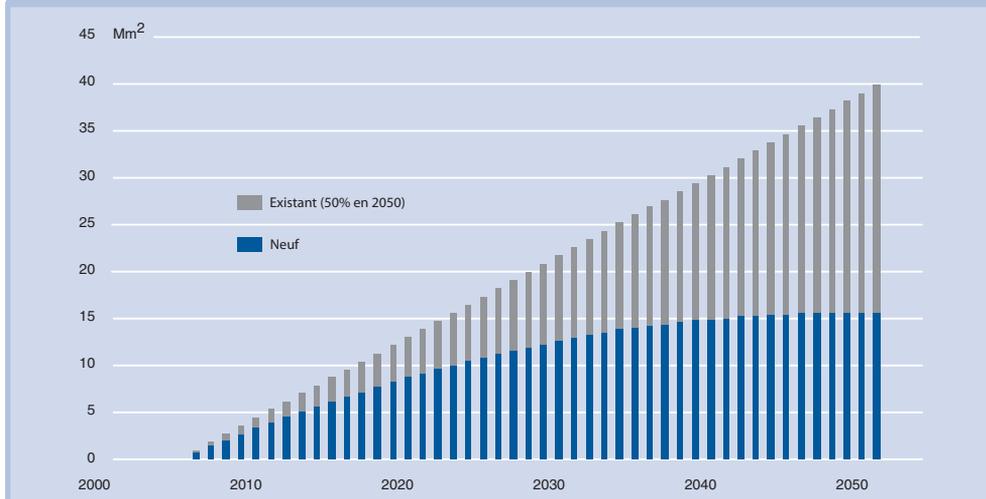
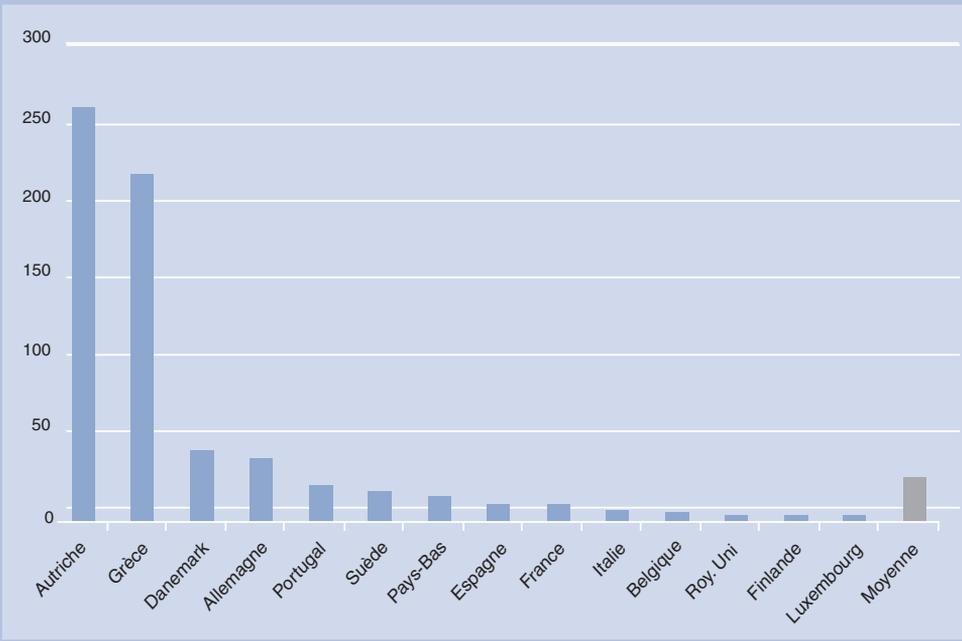


Figure 38 : Parc de capteurs solaires dans l'Union européenne en m² pour 1000 habitants (fin 2000)



Source : statistiques Observ'Er

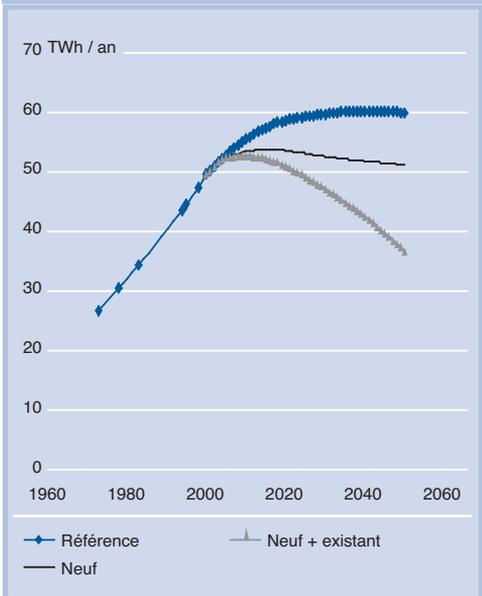
Au rythme proposé, l'économie représenterait 7,70 TWh d'énergie finale en 2020 et 23,3 TWh en 2050. Le potentiel maximum, en considérant tous les logements équipés, sur la base de 1 m²/personne soit plus de 65 millions de mètres carrés en 2050, serait de plus de 40 TWh d'énergie finale. La consommation totale d'énergie destinée à l'eau chaude sanitaire serait alors limitée à 20 TWh environ, valeur qui pourrait être réduite par des mesures supplémentaires :

- augmentation de la surface de capteur par personne ;
- amélioration du rendement de captation (passage aux capteurs sous vide) et de stockage ;
- modification des installations vers des appareils plus économes en eau.

Outre les difficultés techniques soulevées par un programme ambitieux de solarisation généralisé à toute la population, demeurerait la question de l'adéquation entre l'offre et la demande : le taux d'occupation des logements diminue. A titre d'exemple, 42% des ménages des centres-villes sont composés d'une personne. Les équipements collectifs ont sans doute plus de chance de répondre à la demande que les équipements individuels, en raison des possibilités de compensation entre les différentes catégories

de logements : c'est la condition remplie dans la région de Barcelone, où la maison individuelle reste l'exception.

Figure 39 : Réduction de la consommation d'énergie pour l'ECS (scénarios logement neuf + parc existant)



Bilan du solaire thermique dans le parc de résidences principales

Une solarisation ambitieuse du parc de logements

Quel serait l'impact d'une solarisation quasi généralisée des logements sur les émissions de CO₂ du parc de résidences principales ? L'enjeu pourrait-il légitimer un tel effort ? Afin d'apporter des éléments de réponse au débat, l'exercice proposé consiste à cumuler, sous forme de système combiné, les besoins d'ECS et les besoins de chauffage. Par une optimisation des ressources solaires et de la répartition entre les besoins d'ECS et de chauffage, les systèmes combinés offrent une performance globale légèrement supérieure à la somme des deux systèmes.

Le parc concerné dans cette projection est avant tout la construction neuve, qui serait équipée dans son ensemble pour l'ECS et le chauffage –les surfaces des installations solaires étant supérieures dans l'individuel– et une partie du stock de logements existants pour l'ECS, 50% étant

équipés en 2050 (tableau 27). La surface installée totale dépasserait 120 millions de mètres carrés en 2050 (figure 40).

Cumul des scénarios : consommations énergétiques et émissions de CO₂

Malgré le niveau élevé des surfaces installées en PSD, qui représenteraient plus des deux tiers de la surface totale de capteurs en 2050, l'essentiel des gains énergétiques, soit 70%, serait produit par les installations destinées à l'eau chaude sanitaire (Figure 41).

Les gains énergétiques permis par le solaire thermique ne représentent en définitive qu'une partie de la réduction attendue dans la perspective du « facteur 4 » en 2050. Le cumul des deux postes de consommation atteindrait 467 TWh en 2050. Une réduction importante devrait résulter d'améliorations énergétiques du bâti et des équi-

Tableau 27 : Dimensionnement des équipements solaires, construction neuve et parc existant

	ECS Parc concerné en 2050	ECS Dimensionnement	PSD Parc concerné en 2050	Chauffage (PSD) Dimensionnement
Construction neuve MI 2005-2050	100%	1m ² / personne	100% des 445,4 Mm ²	0,17m ² / m ² habitable
Construction neuve IC 2005-2050	100%	1m ² / personne	100% des 191 Mm ²	0,06m ² / m ² habitable
Parc existant en 2050 et antérieur à 2005	50%	1m ² / personne	0% des 2150 Mm ²	0,06m ² / m ² habitable

pements de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire, pour un montant de plus de 188 TWh. La contribution solaire thermique serait, en complément, de plus de 33 TWh à cet horizon (tableau 28), soit 15% de l'effort total à produire (figure 42). Les émissions totales s'élèveraient à plus de 22 MtCO₂ en 2050 (Tableau 29), soit un peu plus du

facteur 4 recherché, puisque l'effet « bois énergie » n'a pas été reporté à la consommation d'eau chaude sanitaire. Les facteurs de conversion d'énergie finale ECS pourraient néanmoins être revus à la baisse, ainsi que les consommations d'énergie d'appoint du solaire thermique, si des procédés efficaces sont adoptés, de type pompes à chaleur sur l'air extrait de la ventilation des logements.

Figure 40 Surfaces installées de collecteurs solaires

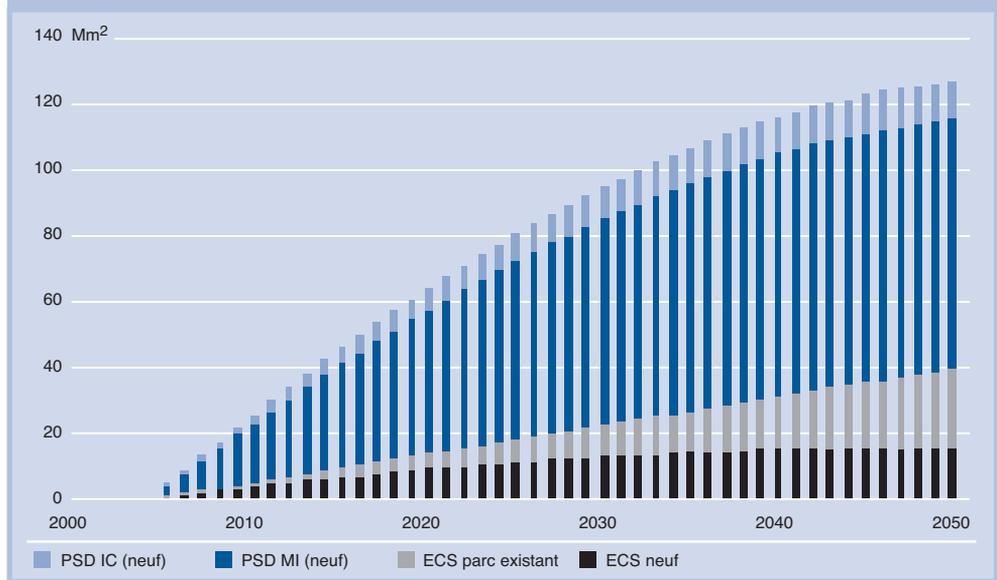


Figure 41 : Bilan énergétique du solaire thermique

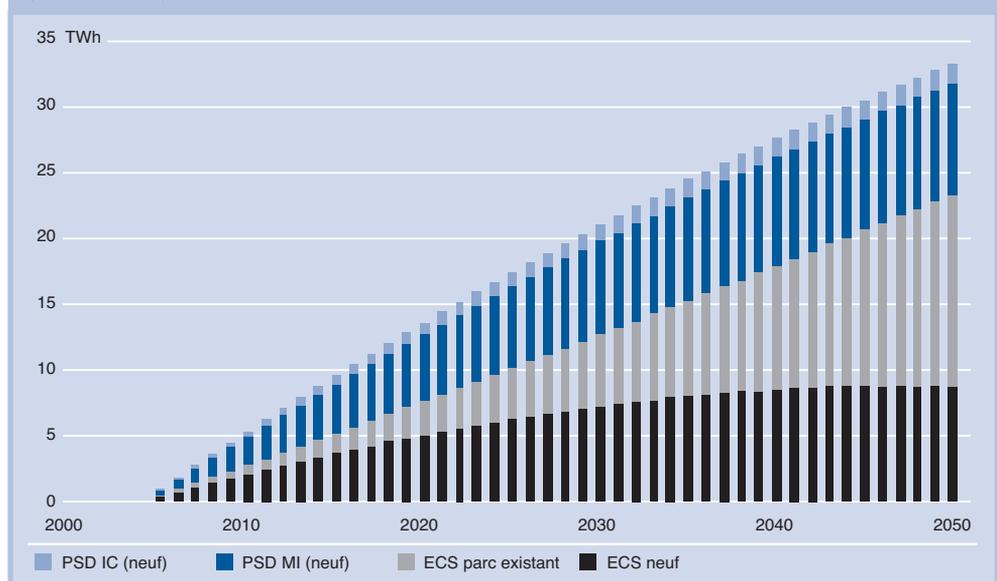


Figure 42 : Consommations totales de chaleur

 Cible chauffage : totalité du parc à 75 kWh/m² en moyenne en 2050

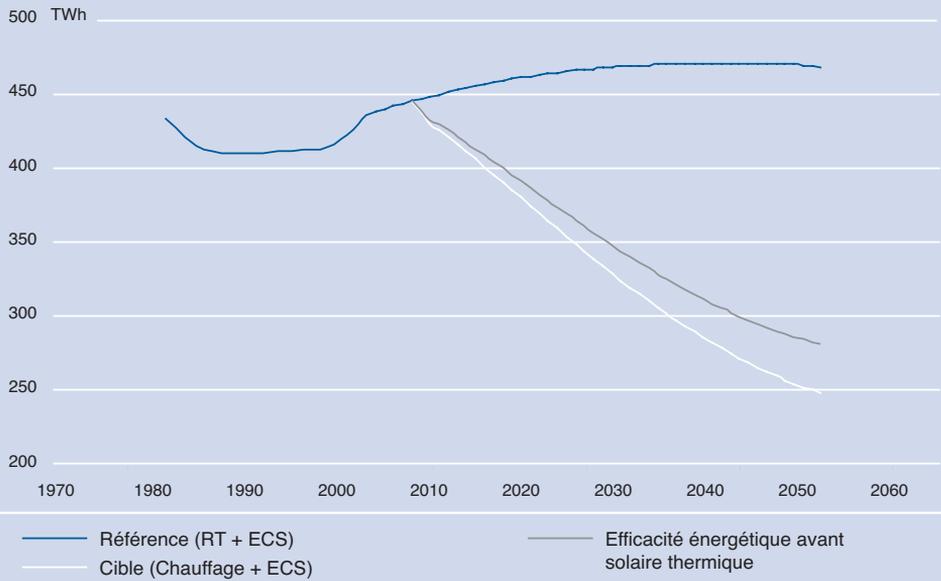
 Cible ECS : scénario solaire 100% neuf + 50% existant (1m²/personne)


Tableau 28 : Cumul des scénarios ECS et PSD : énergie finale

	2000	2050
Référence (TWh/an)		
ECS	49,6	60,0
Chauffage (RT)	385,0	407,1
TOTAL	434,6	467,1
Scénario F4 Solaire thermique (TWh/an)		
ECS	-	36,6
Chauffage (F4)	-	208,8
TOTAL	-	245,4
Mm2 installés		
ECS	0,01	39,7
PSD (MI+IC)	-	87,2
TOTAL	-	126,9
Production solaire (TWh économisés)		
ECS	-	23,30
PSD (MI+IC)	-	9,95
TOTAL	-	33,25

 Tableau 29 : Emissions de CO₂ pour les scénarios ECS et PSD cumulés

	2000	2050
Référence (MtCO₂/an)		
ECS(1)	8,63	8,76
Chauffage (RT)	67,11	59,62
TOTAL	75,74	68,38
Scénario F4 Solaire thermique (MtCO₂/an)		
ECS	-	5,34
Chauffage (F4)	-	16,90
TOTAL	-	22,24
Réduction des émissions dues au ST (MtCO₂/an)		
ECS	-	3,42
PSD (MI+IC)	-	2,15
TOTAL	-	5,57

(1) Bases de conversion énergie finale
ECS en gCO₂/kWh: 165 (2000) à 146 (2050)

Conclusion

L'impact global du solaire thermique

Les deux applications principales du solaire thermique en réponse à la demande d'énergie du parc résidentiel apparaissent contenues dans :

- les installations d'eau chaude sanitaire ;
- les apports solaires passifs.

En effet, les planchers solaires directs donnent des résultats d'autant plus réduits que les performances du bâti sont élevées, car ils entrent en concurrence avec les apports solaires directs et les apports internes, dans une saison de chauffage qui se contracte à quelques mois d'hiver (quand les apports gratuits ne couvrent plus les déperditions par l'enveloppe et par le renouvellement de l'air).

La contribution attendue des chauffe-eau solaires, dans une perspective d'équipement très ambitieuse du parc de logement en 2050 (620 m² de collecteurs pour 1000 habitants), dépasserait 23 TWh d'énergie finale à cet horizon. Il est plus délicat d'estimer la contribution totale du solaire passif, qui dépend de multiples paramètres, notamment du niveau d'isolation de l'enveloppe des logements et de la part des vitrages sud (en surface équivalente) dans les parois verticales. Les apports solaires, en moyenne du parc, pourraient s'élever à plus de 40 TWh en 2000. Dans les réalisations du projet CEPHEUS, les apports solaires passifs couvrent 40% des déperditions par l'enveloppe, ce qui équivaut, rapporté à la surface habitable, à environ 10 kWh/m²/an. Une généralisation à l'ensemble de la construction neuve de 2005 à 2050 pour les 640 millions de mètres carrés à construire donnerait quelques 6,5 TWh supplémentaires.

Dans le parc existant, il conviendrait de chiffrer les possibilités de réhabilitation solaire par des isolants transparents appliqués aux parois opaques, par l'adjonction de vérandas couplées à une gestion de l'air appropriée : les gains par logement seraient sans doute supérieurs à 30 kWh/m²/an, valeur estimée pour le neuf, mais pour un parc difficile à cerner. Des incertitudes demeurent dans l'ensemble des estimations, une évaluation plus précise de la réduction de la consommation d'énergie finale réclamant une analyse morphologique détaillée du parc et une simulation précise des apports solaires utiles.

Les conditions d'un développement ambitieux du solaire thermique dans le parc résidentiel ne se limitent cependant pas à des considérations morphologiques ou technologiques. Le développement du solaire thermique est également tributaire²⁴ :

- des lois de l'économie, les coûts demeurant d'autant plus élevés que le marché est réduit ;
- des réseaux de professionnels assurant la mise en œuvre ;
- des obstacles réglementaires (permis de construire) et des conditions de fiscalité défavorables ;
- du faible prix des énergies conventionnelles, notamment en France.

Dans l'évaluation des coûts, devraient apparaître :

- les économies de substitution apportées par le panneau solaire, thermique comme photovoltaïque, en ce qu'il remplace une surface équivalente de toiture conventionnelle, notamment dans les toitures 100% solarisées, qui se développent rapidement en Allemagne ;
- les complémentarités entre les différents besoins énergétiques liés au confort thermique (été, hiver), visuel (lumière naturelle) et acoustique (exemple des vitrages performants et des façades actives photovoltaïques).

La prise en compte du confort d'été

La perspective du réchauffement climatique, dont la canicule de l'été 2003 donne un aperçu sur fond de catastrophe sanitaire, renforce l'importance qui doit être accordée au confort thermique d'été dans les logements. Dans les villes des régions méditerranéennes et tropicales, les pointes de consommations électriques ont lieu en été, lorsque les climatiseurs sont en marche. En Europe, le taux d'équipement en climatisation, dans le résidentiel, est encore faible : il était inférieur, en moyenne, à 5% en 1997. Le secteur tertiaire est mieux équipé : 18% des 705 millions de mètres carrés étaient climatisés en France en 1995, pour une consommation d'énergie totale destinée à la climatisation de 4 TWh environ²⁵.

La progression de la climatisation individuelle est cependant rapide. Le taux de croissance, qui a connu une forte accélération en 2003, passant à 30%, était de 15% par an en France au terme des années 1990, le marché étant alors de l'ordre de 180.000 climatiseurs individuels par an. Près de 1,5 million de logements étaient équipés en janvier 2000, le taux d'équipement des ménages serait passé à 10% après l'été 2003.

Les atouts de la climatisation sont nombreux, compte tenu de la difficulté de rétablir les conditions de confort thermique, en été, dans des logements le plus souvent conçus pour la seule saison de chauffage : faible inertie thermique, forte isolation de l'enveloppe, porosité à la ventilation naturelle limitée, exposition des vitrages privilégiant l'exposition sud. Outre l'avantage de la déshumidification, qu'offrent la plupart des procédés de climatisation, ceux-ci permettent de supporter les chaleurs estivales toutes fenêtres fermées : il devient en effet de plus en plus difficile de recourir à la ventilation naturelle en raison des nuisances sonores dues à la circulation automobile en milieu urbain ou péri urbain. Le confort d'été mécanisé tend à se généraliser, depuis le lieu de travail, par l'intermédiaire du véhicule particulier, tous deux déjà mieux équipés que le logement : en 2000, le seuil de 50% de véhicules neufs climatisés était atteint, pour un taux de 90% attendu par les constructeurs en 2005.

Le parc intermédiaire (années 1960-2000) apparaît le plus vulnérable au confort d'été : faible inertie thermique, surfaces vitrées généreuses souvent exposées au sud ou à l'ouest, logements mono-orientés, toitures terrasses non isolées et non protégées. Il précède la RT2000 qui a enfin introduit les exigences de confort d'été, et il rompt avec les principes de la construction ancienne, souvent mieux adaptée aux conditions d'été qu'aux rigueurs de l'hiver. Ce parc nécessiterait des mesures particulières, la réhabilitation liée au confort d'hiver (sous exigence d'économies de chauffage) devant également contribuer au confort d'été, afin d'éviter le recours systématique à la climatisation mécanique. Dans l'hypothèse où l'ensemble du parc serait climatisé en 2050, sur la base de 10 kWh/m² d'énergie finale (niveau atteint pour 50% de la surface climatisée), le surcroît de consommation d'énergie se monterait à près de 30 TWh. Cette valeur pourrait être amplement dépassée si le taux d'apports internes dus en particulier aux équipements électriques, continue d'augmenter.

Les gisements ouverts par la ventilation naturelle dépassent le cas du confort d'été. Il conviendrait également de tenir compte des consommations d'énergie pour la ventilation mécanique qui, encouragée par le mode de calcul attaché à la réglementation thermique, est généralisée en France dans le logement neuf. La consommation d'énergie qui en résulte est de l'ordre de 3 kWh par an et par mètre carré de logement²⁶.

Quelques cibles : les trois parcs

Comment parvenir à une moyenne de 75 kWh/m² en consommation de chauffage des résidences principales en 2050 ? L'accélération de la RT2000 apparaît incontournable, un saut quantitatif de Cref - 50% (réduit au chauffage) devant être rapidement appliqué. La question demeure, de parvenir à des niveaux moyens de 50 à 130 kWh/m²/an dans le parc ancien et intermédiaire, compte tenu des nombreuses configurations rencontrées et des obstacles liés à la valeur patrimoniale d'une grande partie du parc ancien.

Des programmes de recherche spécifiques pourraient être entrepris, selon les trois parcs qu'il convient de distinguer :

- la construction neuve, qui, en deçà des 20 ou 25 kWh/m² de référence « chauffage », pourrait viser des labels « énergie plus » ou « décarbonisation » (le bilan carbone pourrait être négatif, durant les premières années de construction, si des quantités suffisantes de bois ont été intégrées en structure, bardage et aménagements intérieurs) ;
- la construction « intermédiaire » des années 1950-2000, qui devrait faire l'objet d'interventions performantes sur le bâti (isolants transparents, solarisation active de l'enveloppe) et sur les équipements énergétiques et parviendrait à des niveaux de performance aujourd'hui réservés à la construction neuve ;

- la construction « patrimoniale » dense, pour laquelle les contraintes architecturales, notamment dans la modénature des façades sur rue, limitent les possibilités d'intervention.

Dans ce dernier cas, les réseaux de chaleur à faible taux d'émissions (alimentés par des ENR, bois, géothermie, solaire) pourraient apporter des solutions intéressantes. La situation du parc ancien diffus reste à l'écart de ces gisements, mais sa part reste faible dans l'ensemble du parc de résidences principales. Les solutions individuelles restent sans doute valables dans ce cas (bois, solaire thermique en particulier).

Les conditions du « facteur 4 » en 2050

A condition que les risques d'explosion de la climatisation individuelle soient écartés, la division par 4 des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans le parc résidentiel repose essentiellement sur la maîtrise des consommations de chauffage et sur la progression du bois-énergie, qui permettrait d'assurer 60% des besoins de chauffage en 2050. L'augmentation de l'énergie finale produite par la combustion du bois, de 7,4 Mtep en 2000 à 10,8 Mtep en 2050, signifie une conquête importante des différents secteurs de marché, alors qu'actuellement le bois représente un peu moins du quart de l'énergie finale destinée au chauffage, réservée à 7% des résidences principales. Cette énergie est donc actuellement contenue dans un secteur du parc parmi les moins performants, sa place pouvant s'éroder à mesure des travaux d'isolation du bâti qui devront être entrepris et du renouvellement des appareils de chauffage par des foyers plus performants. Une estimation de l'impact du bois énergie dans les réseaux de chaleur pourrait permettre d'étayer cette hypothèse de forte croissance de part de marché.

La dimension urbaine

Enfin, existe-t-il un moyen de dépasser les logiques sectorielles, face au problème apparemment insurmontable que pose la consommation d'énergie liée aux déplacements ? L'approche environnementale de l'urbanisme demeure animée de ces deux questions centrales :

- comment contenir l'étalement urbain, et ses corollaires, consommation de territoire, notamment agricoles ou espaces verts, dépendance du tout automobile ;
- comment intégrer les ENR à une problématique globale de développement durable.

L'exemple de certaines villes allemandes apparaît à cet égard significatif, en ce qu'elles proposent des solutions alternatives au nucléaire civil, non pas parce qu'il « porterait la tâche originelle et ineffaçable d'être issu de l'arme atomique » tel qu'en juge l'OPECST²⁷, mais surtout parce que cette énergie centralisée par nature ne facilite pas l'appropriation et la gestion par les collectivités. Tandis que les choix français en matière d'énergie poursuivent la tradition du colbertisme, pour M. Hermann SCHEER, député de la région de Stuttgart, « l'avenir appartient à des modes de production de l'énergie et de l'électricité sur site, décentralisés, voire autonomes, facteurs d'économies de distribution et de fonctionnement ».

Par le concept « d'éco-quartier », une évolution globale des comportements environnementaux des usagers semble pouvoir s'opérer. Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre s'y inscrivent localement, selon les différents axes :

- le tri sélectif des déchets ;
- la production décentralisée d'énergie, rendant visibles les complémentarités chaleur-électricité ;
- la production d'énergie solaire thermique souvent collective (performances affichées par îlot de logements) ;
- le recours limité à la voiture particulière, grâce à une organisation spatiale privilégiant le piéton, le vélo, les transports en commun.

Cependant, il faudrait analyser l'impact possible sur la morphologie urbaine des effets de la mono orientation sud, qui semble la forme d'orientation spatiale la plus appropriée à la recherche des apports solaires, dans l'optique de généralisation des équipements solaires qui pourrait accompagner une réforme de la procédure du permis de construire. Afin de ne pas favoriser un nouvel urbanisme solaire réducteur, et préserver les tissus existants, il serait nécessaire d'indiquer par quels moyens, dans les différentes morphologies urbaines, la multi orientation pourrait être garantie. Il ne faut pas oublier que les façades nord ont pu être recherchées dans le passé pour la qualité de lumière naturelle et la garantie d'un confort d'été.

ANNEXE 1 : CONTENU EN CO₂ DU KWH ELECTRIQUE

Le contenu en CO₂ du kWh électrique a varié, au cours de la décennie passée, de 37 à 94 gCO₂/kWh, selon les données EDF, en fonction des parts des différents modes de production, basées principalement sur le nucléaire, le charbon et l'hydraulique. Le scénario S1 prévoit, pour 2010, des émissions de 29 gC soit 106 gCO₂ par kWh produit (Tableau I).

Les structures du parc de production d'électricité centralisée, de 2000 à 2050, sont basées sur un scénario de référence, qui prolonge le parc actuel sans bouleversement technologique particulier, selon les données du scénario H2 pour la demande d'électricité. Ce scénario H2 est lui-même issu du scénario S2 du Commissariat Général du Plan²⁸, auquel s'ajoutent des hypothèses de pénétration des ENR. Leur contribution s'élèverait à 30 TWh dès 2010 pour respecter la directive européenne sur les énergies renouvelables, et à 96,5 TWh à l'horizon 2050²⁹. Les hypothèses sont rassemblées dans le tableau II.

Les émissions liées à la production et à la distribution d'électricité centralisée sont estimées en tenant compte du cycle de vie du kWh électrique : l'extraction, le traitement et le transport de la matière première vers la centrale électrique, la production et les pertes sur le réseau d'électricité (tableau III).

La structure du parc et ses capacités de production nécessitent de recourir au charbon, selon les niveaux de la demande : pointe à 80% de charbon, semi base à 10%, base à 2%. En tenant compte de cette nouvelle répartition, le contenu en CO₂ du kWh est fortement corrélé à la période de consommation : 76 gCO₂ pour le kWh moyen, contre 223 pour le kWh de chauffage électrique, et 29 pour le kWh destiné à l'eau chaude sanitaire (valeurs 1995, tableau IV). Ces trois valeurs deviendraient respectivement 106, 209 et 103 gCO₂ en 2010.

ANNEXE 2 : PLANCHERS SOLAIRES DIRECTS (PSD)

Deux systèmes solaires répondant aux besoins de chauffage et d'ECS sont intégrés à la RT2000, dès 2003 :

- les « SSC », systèmes solaires combinés, avec stockages distincts pour le chauffage et l'ECS ;
- les installations avec un seul stockage à eau (sous forme de ballon d'eau chaude) pour l'ECS, le PSD, plancher solaire direct assurant la fonction de stockage pour le chauffage.

Les PSD peuvent être équipés d'appoint intégré, généralement à gaz ou électrique.

La demande de chauffage a été estimée selon l'évolution programmée de la RT2000, à l'horizon 2050. La productivité de l'équipement solaire « capteurs+PSD » décroît lentement avec le degré d'isolation de l'enveloppe, mais d'autant plus que le logement se situe dans une zone climatique plus clémente, car le système solaire entre plus rapidement en concurrence avec les apports gratuits (figure I).

ANNEXE 3 : ESTIMATION DES RESSOURCES SOLAIRES THERMIQUES (ECS)

En France, le dimensionnement des surfaces de captation est généralement limité à un mètre carré de collecteur par personne, ce qui représente un compromis acceptable entre le coût d'investissement et l'économie annuelle réalisée sur le chauffage de l'eau. En Allemagne et en Autriche, pays moins ensoleillés, la surface de captation est accrue, qui atteint 1,5 ou 2 mètres carrés par personne, pour atteindre des niveaux de couverture solaire équivalents, entre 50 et 70% des besoins annuels.

Le taux de couverture des besoins varie en France métropolitaine de 50% à 70% (tableau V) l'estimation des besoins et des apports solaires étant effectuée pour les différentes régions par la méthode SOLO 2000 (ADEME-CSTB) sur les bases suivantes : un logement de 4 personnes, une consommation journalière de 240 litres à 45°C, une surface de captation de 4 m², un stockage par ballon de 250 litres.

Compte tenu de la répartition supposée du marché des capteurs en 2000, d'un total de 10.000 mètres carrés, le niveau de production énergétique annuelle affectée au chauffage de l'eau sanitaire est d'environ 500 kWh/m² (tableau VI). La moyenne métropolitaine non pondérée, établie à partir des données du tableau V, est de 478 kWh/m² et de 480 kWh/m² si l'équipement des logements en chauffe eau solaires se conforme à la répartition des logements neufs construits dans la période récente, de 1997 à 2001 (figure II).

TI : Conversion kWh en gCO₂ 2003.

	gCO ₂ /kWh
1991	94
1995	75
2000	48
2001	37
2002	49
2010	106
1991 à 2002 : Données EDF	
Prévision 2010 : Scénario S1	

TII : Hypothèses de base de la production électrique

gCO ₂ / kWh électrique	2000	2050
Nucléaire	26	26
Charbon	994	737
Fioul	938	938
Gaz	574	377
Hydraulique	9	9
ENR	10	10
Grande cogénération	90	90

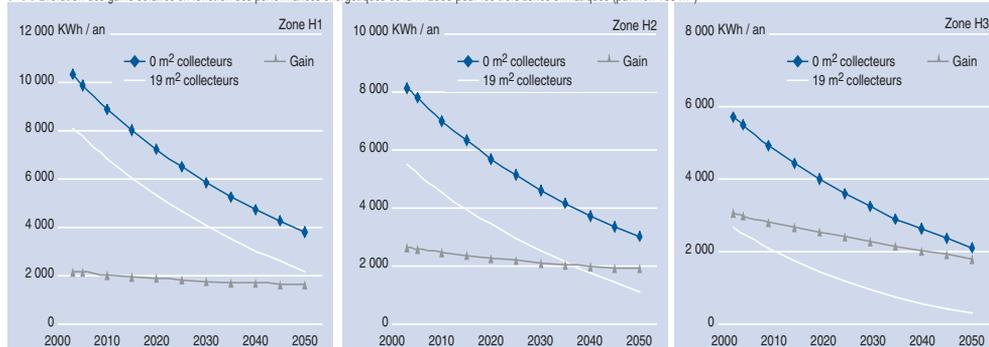
TI III : Emissions moyennes de la production électrique - Source : IFP, EDF, 2002, cf. A. Bonduelle,

Production électrique (%)	2000	2020	2050
Nucléaire	76,40	68,42	43,77
Charbon	4,95	0,73	0,00
Fioul-tac	1,18	1,81	1,26
Gaz	0,00	0,00	21,01
Hydraulique	14,89	13,25	9,31
ENR	0,00	8,53	12,08
Grande cogénération	2,51	7,26	12,58
Total	100,00	100,00	100,00

TI V : Répartition temporelle des kWh selon les postes de consommation

	DONNEES 1995		Moyenne		Chauffage		ECS + froid + ...	
	gC	gCO ₂	TWh	MIT	en %	gC	en %	gC
Pointe (80% charbon)	200	733,0	30	6,0	25	50	0	0
Semibase (10% charb)	25	92,0	77	1,9	35	9	15	375
Base (2% charbon)	5	18,3	365	1,8	40	2	85	425
TOTAL	-	-	472	9,8	100	61	100	8
		gC/kWh		21		61		8
		gCO ₂ /kWh		76		223		29
Projection (S1) 2010				106		209		103

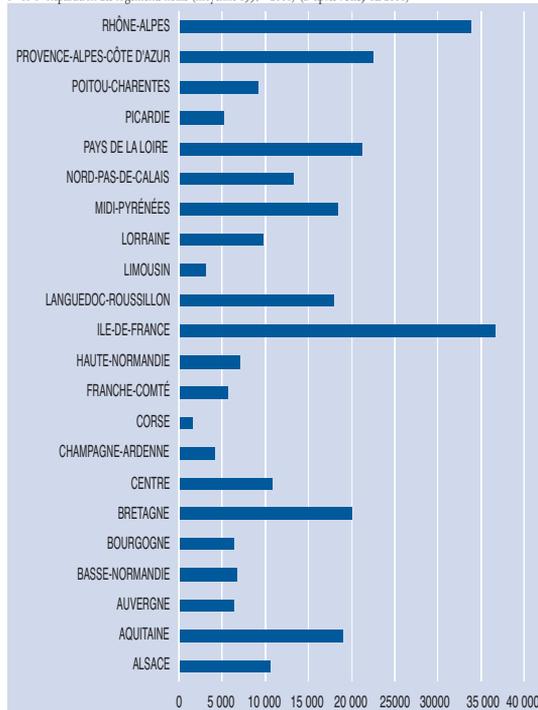
FI : Evolution des gains solaires en fonction des performances énergétiques de la RT2000 pour les trois zones climatiques (pavillon 105 m²)



TI V : Taux de couverture des besoins (ECS)

Régions	Besoins kWh/an	Apports solaires kWh/an	Couverture (%)
Alsace	3590	1820	51
Aquitaine	3300	1980	60
Auvergne	3540	1808	51
Bourgogne	3490	1870	54
Bretagne	3450	1820	53
Centre	3410	1880	55
Champagne-Ardenne	3540	1835	52
Corse	3070	2145	70
Franche-Comté	3525	1940	55
Ile-de-France	3540	1808	51
Languedoc-Roussillon	3160	2125	67
Limousin	3490	1955	56
Lorraine	3570	1790	50
Midi-Pyrénées	3280	2010	61
Nord-Pas-de-Calais	3560	1780	50
Basse-Normandie	3510	1870	53
Haute-Normandie	3510	1870	53
Pays de la Loire	3410	1880	55
Picardie	3570	1790	50
Poitou-Charentes	3275	2000	61
Provence-Alpes-Côte d'Azur	3130	2130	68
Rhône-Alpes	3400	1970	58

FI II : Répartition des logements neufs (moyenne 1997 - 2001) (D'après : SES, 12/2001)



TI VI : Estimation de la production moyenne en 2000

	Surface de coll. (m ²)	Apports solaires (kWh/m ² /an)	Production solaire (GWh/an)
Rhône-Alpes	1400	492,5	0,69
Languedoc-Roussillon	1400	531,3	0,74
Midi-Pyrénées	1200	502,5	0,60
Corse	1000	536,3	0,54
PACA	1400	532,5	0,75
Alsace	1000	455,0	0,46
Aquitaine	1000	495,0	0,50
Auvergne	800	452,0	0,36
Pays de la Loire	800	470,0	0,38
Total	10000	-	5,01
Moyenne	-	501,0	-

Bibliographie

- ADNOT J., Coordinator, *Energy Efficiency of Room Air-Conditioners*, EERAC, Study for the Directorate General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities, Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris, mai 1999
- « Bilan démographique 2000 », *INSEE-Première*, n° 757, février 2001, Division enquêtes et études démographiques.
- BONDUELLE A., *Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur le développement durable*, Les cahiers du CLIP n°15, 2004)
- CHALEIX M., MADINIER C., « Recensement de la population 1999, Des logements plus grands et plus confortables », *Insee première*, N° 750 - NOVEMBRE 2000.
- CSTB Magazine n° 130, juillet-août 2000
- GIRAULT M., LECOUCVEY F., « Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements », *Notes de synthèse du SES*, septembre-octobre 2001.
- MARCHIO D., *Chiffres clés de la climatisation dans le monde, en Europe et en France*, Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- MAZIA M., TRAISNEL J.P., *Paris Case Study, URBACOOOL, Energy Efficient Cooling Systems & Techniques for Urban Buildings*, Contract XVII/4.1031/Z/98-224, European Commission DG XVII FOR ENERGY SAVE II PROGRAMME, Paris, Feb 2000.
- OPECST, Rapport sur « L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables », novembre 2001
- *Guide for a building energy label*, PREDAC, Groupe de travail n°4 : label pour des constructions bioclimatiques et solaires, Document CLER, 2003.
- RADANNE, P., « La division par 4 des émissions de gaz carbonique en France - Introduction au débat », Document MIES, 12/02/04.
- TRAISNEL J.P., Habitat et développement durable, étude rétrospective et prospective, Cahiers du CLIP, n°13, pp. 5-72, programme ECODEV-CNRS, mai 2001.
- VOSS, K., WIENOLD, J., VANDAELE, L., LUND, P., THYHOLT, M., SANTAMOURIS, M., MIHALAKAKOU, G., LEWIS, J., WANGUSI, M. & BURTON, S., SOLGAIN
The contribution of passive solar energy utilization to cover the space heating demand of the European residential building stock. 3rd ISES Europe Solar Congress, Eurosun 2000, Copenhagen, Denmark, June 19-22, 2000.

Notes

- 1 Etude publiée dans les cahiers du CLIP n° 13, mai 2001.
- 2 Les besoins de confort d'été sous forme de climatisation électrique sont rapidement abordés, et devraient faire l'objet d'une investigation plus fine.
- 3 « Bilan démographique 2000 », *INSEE-Première*, n° 757, février 2001, Division enquêtes et études démographiques.
- 4 Chantal Brutel, « La population de la France métropolitaine en 2050 : un vieillissement inéluctable », *ÉCONOMIE ET STATISTIQUE* N° 355-356, 2002.
- 5 Le chiffre de 27,1 millions de logements en 2020, établi à partir de l'évolution de la population et des taux d'occupation des logements, décroissants, est conforme à l'estimation de 27,1 millions, de la note de synthèse du SES (Maurice GIRAULT, François LECOUCVEY, « Projection tendancielle de la consommation d'énergie des logements », *Notes de synthèse du SES*, septembre-octobre 2001.).
- 6 Claudie LOUVOT-RUNAVOT, « Le logement dans l'Union européenne : la propriété prend le pas sur la location », *ÉCONOMIE ET STATISTIQUE* N° 343, 2001 - 3, pp. 29-50.
- 7 L'estimation effectuée à partir des données du CEREN, agrégées ECS et cuisson, est de 866 kWh.
- 8 GIRAULT, LECOUCVEY, 2001.
- 9 GIRAULT, LECOUCVEY, 2001.
- 10 Le scénario H2 est issu du scénario S2 du Commissariat Général du Plan. Cf. « Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire » - MM. Charpin, Dessus et Pellat.
- 11 La croissance de la consommation dans les bâtiments serait imputable pour moitié à l'augmentation des consommations de l'ancien, l'autre moitié à la consommation occasionnée dans les nouveaux bâtiments. Cf. J. Rilling, Débat sur l'énergie, Première table ronde - « Comment se chauffer en consommant moins ? » - Strasbourg - 03 avril 2003.
- 12 Jean-Pierre Traisnel, *Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif*, CLIP n°13, avril 2001.
- 13 « La division par 4 des émissions de gaz carbonique en France - Introduction au débat » - Pierre Radanne, Document MIES, 12/02/04
- 14 Les toiture des bâtiments neufs sont supposés contribuer à la production d'électricité, sur le modèle des labels « énergie plus » existant depuis plusieurs années en Allemagne qui font appel aux panneaux photovoltaïques.
- 15 Ces caractéristiques ne donnent qu'une indication partielle, puisque la réglementation RT2000 permet, dans un système de « garde fous », un jeu de compensation entre les différents postes de déperditions thermiques puis de consommations d'énergie.
- 16 Mylène Chaleix et Chantal Madinier, « Recensement de la population 1999, Des logements plus grands et plus confortables », *Insee première*, N° 750 - NOVEMBRE 2000.
- 17 Les objectifs affichés dans le Plan national de lutte contre le changement climatique sont revus à la hausse dans le cadre du Plan climat, visant une réduction très ambitieuse des émissions de gaz à effet de serre en 2050 (Facteur 4).
- 18 Conversion : 1 tep = 11.650 kWh.
- 19 OPECST, Rapport sur « L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables », novembre 2001
- 20 Voss, K., Wienold, J., Vandaele, L., Lund, P., Thyholt, M., Santamouris, M., Mihalakakou, G., Lewis, J., Wangusi, M. & Burton, S., SOLGAIN - *The contribution of passive solar energy utilization to cover the space heating demand of the European residential building stock*. 3rd ISES Europe Solar Congress, Eurosun 2000, Copenhagen, Denmark, June 19-22, 2000.
- 21 La répartition des maisons individuelles selon les trois zones climatiques (45% en H1, 43,3% en H2, 11,7% en H3) est supposée constante dans l'évaluation des besoins moyens de chauffage.
- 22 La méthode utilisée ne montre pas une réelle sensibilité de la contribution solaire aux caractéristiques de l'installation (distance des collecteurs au ballon de stockage notamment). Pour des conditions non optimales, il pourrait être nécessaire d'augmenter la surface de capteurs. Les résultats présentés ne prennent pas en compte cette correction, encore difficile à apprécier pour l'ensemble des installations.
- 23 En 2050, la population est estimée à 64,03 millions d'habitants, dont 15,4 millions habitent des logements postérieurs à 2005, qui seraient déjà équipés en solaire thermique pour l'ECS. La population restante est donc de 48,58 millions de personnes, habitant des logements construits antérieurement à 2005.
- 24 Y. BOILEAU, CSTB magazine, n°125, septembre-octobre 1999.
- 25 D. MARCHIO, *Chiffres clés de la climatisation dans le monde, en Europe et en France*, Centre d'énergétique, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- 26 Valeur proposée par les règles Th-C, pour un ventilateur de 35 Watts environ.
- 27 OPECST, Rapport sur « L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables », novembre 2001.
- 28 CGP - Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire », Rapport Charpin, Dessus et Pellat.
- 29 A. BONDUELLE, *Impact de la pénétration de la cogénération décentralisée de faible puissance sur le développement durable*. CLIP n° 15, 2004.

Etude prospective sur les émissions de particules en France à l'horizon 2030

Synthèse

L'évaluation des émissions de particules et de leur concentration dans l'air ambiant est utile dans le cadre de l'étude de leurs impacts sur l'environnement, et de leurs impacts sur la santé publique, en termes de morbidité et mortalité.

Le premier inventaire des émissions de particules primaires réalisé en France par le Citepa en 2000 a été révisé. Plusieurs secteurs ont fait l'objet de recherches spécifiques, et un plus grand nombre de sources est renseigné. Les émissions de particules primaires en 2000 sont estimées à plus de 1 600 kt. Les émissions de PM10 et de PM 2.5 représentent respectivement 36% et 20% des émissions totales de particules en 2000. Les émissions de PM1.0, dont les données sont encore incomplètes, représentent 13% des émissions de particules totales en 2000.

Quelque soit la classe granulométrique considérée les quatre sources principales de particules sont l'agriculture, les bâtiments et travaux publics, la combustion du bois dans le secteur résidentiel, et les transports routiers. Les émis-

sions des bâtiments et travaux publics sont cependant nettement inférieures à celles des trois autres secteurs pour les particules les plus fines : PM_{2,5} et les PM_{1,0}.

Ces principaux secteurs émetteurs ont des tendances diverses sur la période 1990-2000. Les émissions du secteur agricole sont stables. Les émissions du BTP ne montrent pas de tendance claire. Les émissions de la combustion du bois sont orientées à la baisse. Les émissions du transport routier augmentent (ou sont stables pour les PM_{2,5}), en raison d'une augmentation des émissions diffuses (usure des routes, des pneus et des freins) qui compense les baisses d'émission à l'échappement.

Plusieurs scénarisations de l'évolution des émissions de particules totales (« TSP ») ont été réalisées pour la France aux horizons 2020 et 2030, fondées sur une prospective des consommations et des productions énergétiques (scénarios S1-Société de marché et S3-Etat protecteur de l'environnement du Groupe Energie 2010-2020 du Commissariat Général au Plan) et des hypothèses en termes de taux de pénétration de techniques de dépoussiérage.

Dans le scénario S1, les émissions totales de poussières augmentent de 3% à l'horizon 2030. Une augmentation des émissions diffuses du transport routier, et dans une moindre mesure de celles de la combustion du bois dans le secteur résidentiel et du BTP, font plus que compenser les baisses d'autres secteurs. Dans le scénario S3, une moindre augmentation de ces mêmes postes (en fait une légère baisse pour la combustion du bois en secteur résidentiel) entraîne une baisse de 6% des émissions totales. Avec les hypothèses adoptées, la prédominance des trois principaux postes émetteurs (Agriculture, BTP et émissions diffuses du transport routier) tend à s'accroître dans le futur. Ces secteurs sont aussi ceux pour lesquels les émissions actuelles et également les possibilités futures de contrôle des émissions sont les plus mal connues.

Une seconde série de résultats illustre la très forte sensibilité des émissions futures à des hypothèses sur les deux secteurs du BTP et de la combustion, du bois en secteur résidentiel (forts impacts de l'activité future dans le BTP, et de filtres à particules dans les conduits des foyers domestiques à bois). Plus que les scénarios énergétiques, ce sont donc des mesures spécifiques visant les principaux secteurs émetteurs qui influencent les émissions futures de TSP.

Deux groupes de secteurs apparaissent à l'issue de cette étude :

- Le premier comprend la combustion du bois dans le secteur résidentiel, l'agriculture le BTP, et les émissions diffuses du transport routier. Ses émissions se révèlent majoritaires, et il n'a pas fait jusqu'à maintenant l'objet de mesures spécifiques qui permettraient d'entrevoir des réductions importantes à l'avenir. L'attention doit être maintenant portée en priorité sur ces secteurs afin d'une part de lever les incertitudes aujourd'hui importantes sur leurs émissions, et d'autre part concevoir et prendre des mesures pour réduire leurs émissions.
- Le second comprend l'industrie et les émissions à l'échappement des transports routiers : il a jusqu'à maintenant focalisé l'attention mais ses émissions sont minoritaires et connaissent une décroissance

significative aux horizons 2020 et 2030. Cette conclusion repose cependant, pour ce qui concerne les émissions à l'échappement du transport routier, sur l'hypothèse forte d'une généralisation future des systèmes de filtres à particules ou équivalents pour les véhicules particuliers.

Le classement des secteurs émetteurs de particules au niveau national ne peut pas se traduire en ordre de priorité pour des mesures de réduction des émissions, étant donnée la complexité de la relation entre émission et exposition de la population (notamment la population urbaine).

On a donc évalué les degrés de responsabilité respectifs des émissions locales (transports, industrie, chauffage) et de la pollution de fond dans les concentrations urbaines en particules observées dans un nombre limité de villes françaises. On constate que les émissions locales sont dominantes (contribution de 35 à 50% aux concentrations de PM_{10}). La contribution des sources locales semble plus importante pour des particules plus fines. Les stratégies de réduction des concentrations urbaines en particules devraient donc viser en priorité les sources locales de combustion, notamment pour les concentrations en $PM_{2.5}$.

L'étude a révélé des besoins en termes de recherches ultérieures :

- Des campagnes de mesures seraient très utiles pour préciser les facteurs d'émission de particules par les chantiers de construction, et par les activités agricoles comme le travail des cultures. Il s'agit en effet de deux des sources les plus importantes au niveau national, et qui sont paradoxalement les moins bien connues.
- Il faudrait améliorer la connaissance sur l'état et les perspectives de l'emploi des techniques de réduction des émissions de particules dans l'industrie, l'agriculture et le BTP.
- Concernant les transports routiers, il faudra mener de recherches pour limiter les émissions hors-échappement (chaussées, pneus, freins, ...). Pour ces émissions diffuses, deux voies d'action sont envisageables : les mesures techniques de réduction, et la maîtrise des distances parcourues.

Introduction

Le contexte de l'étude

Les particules sont des solides, des liquides, ou un mélange de ces deux phases, pouvant rester un certain temps en suspension dans un gaz. Pour l'air dans des conditions normales, la taille des particules peut varier de quelques nanomètres à environ 100 μm .

On distingue :

- Les particules primaires : il s'agit de particules de poussière qui sont émises dans l'air ambiant directement à l'état solide (par exemple particules provenant de l'érosion des sols, particules de suie provenant de la combustion de combustibles fossiles). Dans la suite du rapport, on les nommera plus simplement «particules».
- Les particules secondaires : il s'agit de particules qui se forment dans l'atmosphère à partir de substances gazeuses (principalement SO_2 , NO_x , NH_3 , COV), sous l'action d'un ensemble complexe de mécanismes physiques et chimiques (condensation, réactions photochimiques, ...).

Il y a deux grandes catégories de sources de particules primaires :

- Les activités humaines, pour lesquelles les émissions de particules dépendent fortement des équipements de dépoussiérage, des procédés et des conditions opératoires. Les particules primaires sont principalement émises par des processus mécaniques (frottements, abrasion, usinages, récolte de céréales...) et par les processus de combustion.
- Les sources naturelles, pour lesquelles les émissions de particules sont fortement liées aux conditions climatiques. Ces sources sont très nombreuses, diverses et mal connues (sels marins, sables, sources biologiques, etc.).

Effet sanitaire des particules

Les particules sont suspectées d'être responsables d'impacts sur la santé humaine, en termes de morbidité, et de mortalité, à court terme et à long terme. Ces dernières années, un nombre croissant d'études épidémiologiques ont mis en évidence des associations statistiques entre les concentrations ambiantes en particules, et des indicateurs des effets aigus et chroniques de la pollution atmosphérique sur la santé.

Les particules posent en effet des problèmes spécifiques par rapport aux polluants gazeux, principalement en raison de la sélectivité de l'inhalation et du dépôt dans les voies respiratoires (Figure 1). Les mécanismes d'action des particules sur l'organisme ne sont cependant encore que partiellement élucidés.

La Directive Européenne 1999/30/EC relative à la qualité de l'air a donc fixé des valeurs limites maximales pour la teneur en particules de l'air ambiant (exprimée en termes de PM_{10}^1) :

- à partir de 2005 : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle, la moyenne journalière de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'étant pas dépassée plus de 35 fois par an ;
- à partir de 2010 : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle, la moyenne journalière de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'étant pas dépassée plus de 7 fois par an.

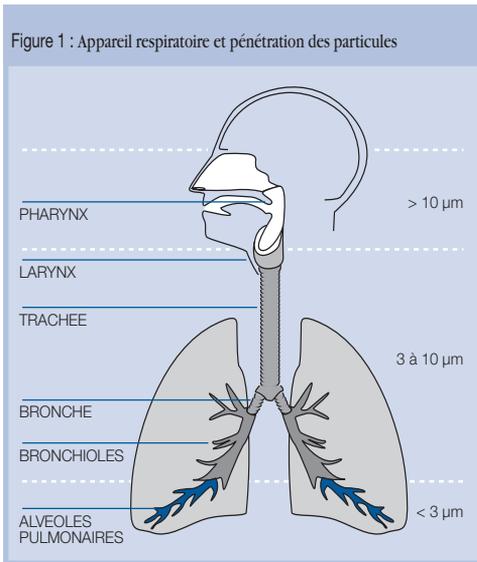
Un réexamen de cette Directive est prévu pour 2005 dans le cadre plus large du programme CAFE (Clean Air For Europe) de la Commission Européenne, qui pourrait prendre en compte l'effet sur la santé humaine des particules plus fines (par exemple $\text{PM}_{2,5}^2$) voire des indicateurs tels que le nombre des particules.

Les valeurs limites fixées par la Directive sont actuellement parfois dépassées dans un certain nombre de villes françaises. Les tendances qui se dégagent des observations des réseaux de surveillance sur les quinze dernières années montrent que le respect des valeurs imposées par la Directive dans les villes françaises pourrait poser dans certains cas un problème difficile de réduction des concentrations de particules en milieu urbain.

Les particules : un des éléments de la pollution globale

Les particules, et spécialement les particules fines peuvent avoir des temps de résidence élevés dans l'atmosphère, et être transportées sur de très longues distances, devenant ainsi un problème de pollution régionale en Europe. En raison de leurs possibles effets sur la santé humaine, de leurs impacts sur l'environnement³, et de leur implication dans l'équilibre radiatif du globe, la communauté internationale en Europe souhaite traiter ce problème, dans le cadre de la Convention de Genève sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance, déjà en place pour traiter les problèmes d'acidification et d'ozone troposphérique.

La stratégie qui sera à terme retenue pour maîtriser le problème des particules et décider des efforts de réduction des émissions à entreprendre reposera pour une part importante sur des inventaires d'émissions de particules. La France doit donc, dans le cadre de la préparation des futures négociations concernant ce protocole, disposer des inventaires les plus fiables possibles, en termes de quantités totales émises et de contributions respectives de l'ensemble des secteurs émetteurs.

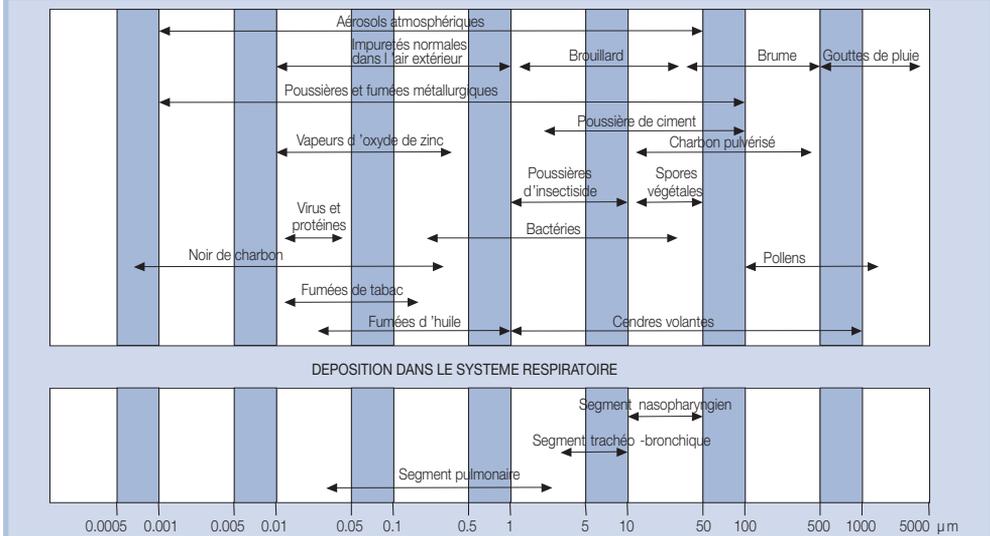


Il est important de disposer, en parallèle d'un inventaire de la situation présente, d'une estimation des évolutions des émissions sectorielles de particules primaires pour l'avenir. Ceci afin d'établir une photographie d'un futur possible et d'acquérir une série d'éléments susceptibles de permettre aujourd'hui une première hiérarchisation des priorités sectorielles de réduction d'émissions.

L'étude présentée ici comprend trois parties :

- un inventaire de particules primaires par le CITEPA, en faisant porter le travail plus particulièrement sur l'intégration dans cet inventaire de secteurs émetteurs de particules auparavant peu documentés.
- une prospective de ces émissions de particules primaires aux horizons 2020 et 2030 selon deux scénarios énergétiques, par le bureau d'études INESTENE.
- une étude du lien entre les émissions de particules et les concentrations en milieu urbain, par l'INERIS.

Figure 2 : Diamètre de divers types de particules atmosphériques



Inventaire national des émissions de particules primaires de 1990 à 2000

Prise en compte de nouvelles sources de particules primaires

Le CITEPA a réalisé, en août 2000, un premier inventaire des émissions de particules primaires au niveau national [1]. Les résultats obtenus présentaient de grandes incertitudes et cet inventaire était incomplet à la fois quant aux sources prises en compte et aux données granulométriques par manque de connaissances.

Dans le cadre du présent travail, le CITEPA a mené une étude bibliographique sur certains secteurs émetteurs de particules, non ou imparfaitement pris en compte dans le précédent inventaire. Les secteurs retenus sont ceux dont la contribution aux émissions de particules est jugée relativement importante mais dont les données sont imprécises ou incomplètes.

Ce rapport couvre donc un plus grand nombre de sources (tableau 1) que les précédents inventaires du CITEPA et que certains inventaires réalisés par des organismes européens ou internationaux (TNO [3], IIASA [4]). En particulier, les émissions diffuses de particules pour certaines sources sont rarement prises en compte dans les inventaires car elles sont mal connues et elles font encore l'objet, à l'heure actuelle, de recherches en vue d'une validation des résultats d'émissions.

Les secteurs qui ont fait l'objet de recherches spécifiques dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- l'usure des routes
- la combustion du bois
- l'usure des pneus et des freins
- les chantiers de BTP

- les mines et carrières
- les sources naturelles
- l'agriculture (notamment les cultures)
- la mise en œuvre de polyester
- les feux ouverts de déchets agricoles (dont les émissions ont été incluses, pour des raisons de nomenclature, dans la rubrique « Traitement et élimination des déchets », et non dans la rubrique « agriculture »)
- les feux de forêts

Les sources naturelles (pollens, océans) n'ont pu être estimées du fait du manque de données.

Les émissions ont été rapportées en kilotonnes de particules totales (TSP dans le rapport, pour *Total Suspended Particulate matter*) mais également, en fractions granulométriques : PM₁₀ (diamètre < 10 µm), PM_{2,5} (diamètre < 2.5 µm) et PM_{1,0} (diamètre < 1.0 µm), pour les secteurs dont les profils granulométriques étaient disponibles.

Les résultats (décembre 2001) pour ces secteurs nouvellement pris en compte ou ayant fait l'objet

Tableau 1 : Les secteurs pris en compte dans l'étude

Combustion – sources fixes
Procédés industriels
Extraction et 1er traitement des combustibles minéraux solides
Utilisations de solvants et autres produits
Transport routier
Combustion – sources mobiles autres que transport routier
Traitement et élimination des déchets
Agriculture
Nature
Feux de forêts

de nouvelles investigations sont présentés dans le tableau 2.

Les sources d'information utilisées pour construire ces résultats sont des données d'activité et des facteurs d'émission provenant de l'industrie, de publications et le plus souvent d'études réalisées par des organismes étrangers qui sont plus en avance sur le sujet. Des facteurs d'émission plus adaptés ont ainsi pu être utilisés comme par exemple pour la production de ciment et chaux, le BTP ou le labourage, et la granulométrie a pu être complétée de façon importante et certaines données d'activités ont été mises à jour.

Ces nouvelles estimations des émissions de particules en France restent toutefois encore sujettes à d'importantes incertitudes (voir pages 146-147 du rapport CITEPA [5]). En particulier, l'utilisation d'un grand nombre de données provenant d'études étrangères pose la question de la transposition à la situation française de ces données. Dans ce contexte, il serait utile de lancer des campagnes de mesures à l'échelle française, principalement dans des secteurs où il est difficile à ce jour de quantifier les émissions de particules. C'est le cas de la combustion du bois dans le résidentiel, des secteurs de l'agriculture et du BTP pour lesquels le niveau d'incertitudes est le plus important, alors même que le niveau des émissions de particules est très élevé.

Résultats pour l'ensemble des sources

Les résultats pour l'ensemble des sources (anciennes et nouvellement prises en compte), selon les 11 groupes CORINAIR, des émissions de particules primaires totales sont présentés dans la figure 2 (page 54 données tableau 2 en annexe).

L'augmentation significative des émissions du transport routier (+ 11.9 %), sur la période 1990-2000, provient essentiellement d'une augmentation des émissions diffuses que sont l'usure des routes, des pneus et des freins. Cette augmentation (environ + 20 % pour les TSP) est due à l'augmentation des distances totales parcourues en 10 ans (augmentation globale d'environ 20% en véhicules.km entre 1990 et 2000⁴) et au fait qu'il n'y a pas eu de mesures mises en œuvre pour limiter ces émissions. Par contre, les émissions à l'échappement connaissent une diminution significative (- 9 %) passant de 61.7 kt en 1990 à 56.1 kt en 2000.

Les feux ouverts de déchets agricoles représentent l'essentiel (entre 76 et 99% selon la classe granulométrique) des particules comptabilisées dans la rubrique « *traitement des déchets* ». Leurs émissions en 1999 sont égales, respectivement pour les TSP, les PM₁₀ et les PM_{2.5}, à 5.5, 3.3, et 140 fois celles d'une rubrique virtuelle « *traitement et élimination des déchets hors feux de déchets agricoles* ». L'augmentation de l'activité dans le secteur des feux ouverts de déchets agricoles de 1990 à 2000 induit donc également une croissance des émissions du secteur « *traitement et élimination des déchets* » sur la période 1990-2000. Par contre, les émissions du traitement et de l'élimination des déchets, hors feux de déchets agricoles, connaissent une décroissance durant cette période.

Les diminutions importantes observées pour l'extraction et la distribution de combustibles fossiles (-73.1 %) ainsi que dans les émissions des feux de forêts (-70.9 %; inclus dans la catégorie « *autres* ») sont liées à une forte baisse de l'activité dans ces secteurs. Dans le premier cas, il s'agit d'une baisse de la production de combustibles minéraux solides (déclin du charbon en France) et dans le

Tableau 2 : Emissions (en kt) et contribution au total des émissions (en %) Source CITEPA/CORALIE

Secteurs	TSP	%	PM10	%	PM2.5	%	PM 1.0	%
Usure des routes	98	6.0 %	49	8.2 %	26	7.7 %	/	/
Combustion du bois	113	6.8 %	108	18.0 %	105	31.5 %	104	47.0 %
Usure des pneus et freins	102	6.1 %	11	1.8 %	2	0.6 %	/	/
Chantiers BTP	456	27.5 %	71	11.8 %	24	7.2 %	14	6.3 %
Mines	0.044	0.0 %	0.022	0.0 %	0.002	0.0 %	/	/
Carrières	84	5.1 %	31	5.2 %	/	/	/	/
Agriculture (cultures)	465	28.0 %	103	17.2 %	25	7.5 %	/	/
Mise en œuvre du polyester	0.672	0.04 %	0.672	0.11%	/	/	/	/
Feux ouverts de déchets agricoles	23	1.40 %	16	2.7 %	14	4.2 %	/	/
Feux de forêts	17	1.00 %	11	1.8 %	11	3.3 %	/	/

second d'une baisse importante du nombre de feux de forêts.

Comme cela est illustré par la Figure 2, trois sources représentent, en moyenne sur la période 1990-2000, plus de 80% des émissions totales de particules : les chantiers de BTP (inclus dans les procédés de production), l'agriculture, et les transports routiers. Les BTP apportent une contribution sensiblement égale à celle de l'agriculture. Cependant de grandes incertitudes demeurent concernant ces sources, ce qui doit conduire à de la prudence concernant ces observations.

Les résultats pour les émissions de PM_{10} sont présentés dans la figure 3 (tableau III en annexe). Ils ont été obtenus en appliquant des profils granulométriques aux secteurs pris en compte pour les TSP. Les PM_{10} représentent 587 kt de particules en 2000, soit environ 36 % des émissions totales de TSP.

Les évolutions temporelles entre 1990 et 2000 sont similaires à celles précédemment observées pour les TSP, avec toutefois une plus faible augmentation dans le cas des transports routiers, de 4.6% contre 11.9% pour les TSP (au sein du transport routier, les émissions diffuses de PM_{10} ont tendance à augmenter, de 20% environ sur la période, à l'inverse des émissions à l'échappement).

Les contributions sont un peu plus dispersées que pour les TSP : la combustion du bois dans le secteur résidentiel, le BTP et le secteur routier, les trois premiers contributeurs, représentent un peu plus de la moitié des émissions totales de PM_{10} . L'agriculture voit sa contribution relative en 2000 baisser dans cette tranche granulométrique (par rapport au cas des TSP) et se situer à des niveaux du même ordre que celles des BTP et de la combustion du bois.

Les $PM_{2.5}$ représentent 324 kt de particules en 2000, soit environ 20 % des émissions totales de TSP (Figure 4, tableau IV en annexe). Les évolutions temporelles entre 1990 et 2000 sont similaires à celles précédemment observées pour les TSP et les PM_{10} , avec toutefois une stabilité des émissions dans le cas des transports routiers.

En termes de contributions relatives, il apparaît que pour cette classe granulométrique des « particules fines », la contribution de la combustion du bois dans le secteur résidentiel est très élevée (environ un tiers des émissions totales). La contribution du transport routier demeure importante (24%), et celle des activités de construction vient en troisième position (6% environ⁵).

L'application de profils granulométriques conduit aux résultats présentés dans la figure 5 (tableau V en annexe) pour les émissions de $PM_{1.0}$. Ces résultats

sont à manier avec précaution, car pour certaines sources d'émission, aucune donnée n'étant disponible pour cette classe granulométrique, aucune émission n'a été comptabilisée (cas par exemple de certaines industries chimiques, de l'usure des routes dues au transport routier, de l'agriculture). Dans la rubrique « *traitement et élimination des déchets* », seule l'incinération des déchets est prise en compte (absence de données pour les feux ouverts de déchets agricoles et la crémation).

Les $PM_{1.0}$ représentent 206 kt de particules en 2000, soit environ 13 % des émissions totales TSP. Les trois principales contributions proviennent de la combustion du bois dans le secteur résidentiel (environ la moitié des émissions), du transport routier (23%), et du BTP (9%). Cependant, les sources agricoles et certaines autres sources (émissions diffuses du transport routier) ne sont pas évaluées dans cette classe granulométrique, par manque d'information.

Résultats plus précis et compléments méthodologiques pour certaines catégories de sources **Combustion – sources fixes.**

L'essentiel des émissions de cette catégorie provient de la combustion du bois dans le secteur résidentiel (voir Figure 6).

Ces émissions liées à la baisse, en raison de la diffusion de systèmes de combustion plus efficaces.

La méthode utilisée pour estimer le facteur d'émission TSP du bois pour la combustion dans le secteur résidentiel consiste à prendre en compte les différents types d'équipements selon le pourcentage du parc installé et des facteurs d'émission pris dans la littérature spécifiques à chaque type d'équipement.

Dans un premier temps, on définit un coefficient de consommation de bois pour chaque type d'équipement à partir du pourcentage de bois consommé par chacun d'eux.

Puis, à partir de données connues sur le parc en milliers d'équipements en 1984, 1988 et 1990 et des coefficients de consommation de bois déterminés auparavant, on évalue l'évolution annuelle, en pourcentage, du parc avant 1984 et après 1990.

Un facteur d'émission TSP global (en kg/t ensuite converti en g/GJ avec un facteur de conversion de 18.2 MJ d'énergie consommé par kg de bois brûlé) est obtenu à partir de la somme des facteurs d'émission de chaque type d'équipement et d'essence pris dans la littérature, et pondérés

par le parc en milliers d'équipements (déterminé précédemment) et par les coefficients de consommation des essences correspondantes. Les facteurs d'émission suivants, accompagnés de leur écart à la moyenne afin d'évaluer leur dispersion, ont été retenus par type d'équipement. Ils résultent d'une moyenne entre les sources bibliographiques les plus pertinentes (tableau 3).

On a alors obtenu un facteur d'émission global par année pour les TSP qui varie de 393 g/GJ en 1990 à 353 g/GJ en 1999 avec une moyenne vers 370 g/GJ. La granulométrie, PM10, PM2.5 et PM1.0 est prise dans la littérature après comparaison de plusieurs sources (tableau 4). Les particules issues de la combustion du bois sont donc en très grande partie dans la fraction des ultrafines.

Figure 2 : Répartition des émissions TSP des sources sur les 11 groupes CORINAIR (1) sur la période 1990-2000

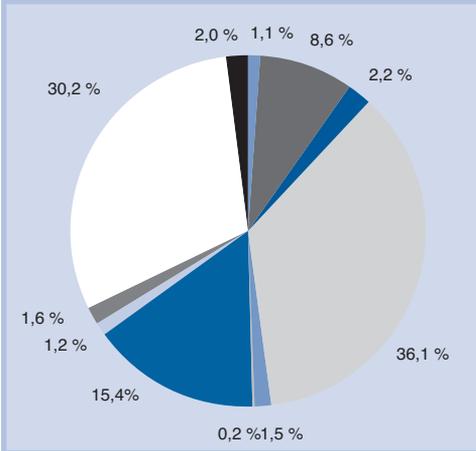


Figure 3 : Répartition des émissions PM10 des sources sur les 11 groupes CORINAIR (1) sur la période 1990-2000

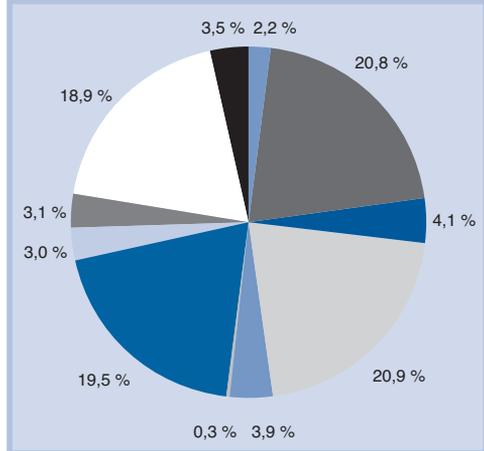


Figure 4 : Répartition des émissions PM2.5 des sources sur les 11 groupes CORINAIR (1) sur la période 1990-2000

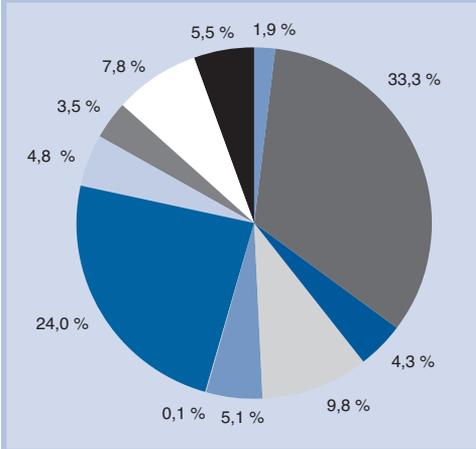
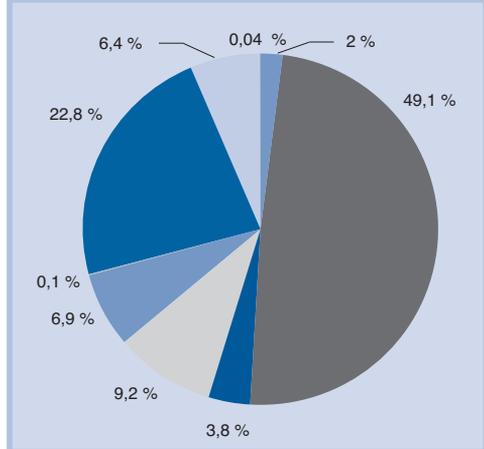


Figure 5 : Répartition des émissions PM1.0 des sources sur les 11 groupes CORINAIR (1) sur la période 1990-2000



- Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie
- Extraction et distribution de combustibles fossiles/énergie géothermique
- Combustion hors industrie (bois dans le secteur résidentiel)
- Combustion dans l'industrie manufacturière
- Procédés de production (dont BTP)
- Utilisation de solvants et autres produits
- Transport routier
- Autres sources mobiles et machines
- Traitement et élimination des déchets
- Agriculture et sylviculture
- Autres sources et puits

Source CITEPA/Coralie (1) : avec prise en compte des sources supplémentaires propres aux particules primaires

En 1990, les émissions de TSP dues à la combustion du bois dans le résidentiel représentent 7% des émissions totales de TSP (132 kt), 18% des PM10 (125 kt), 28% des PM2.5 (122 kt) et 46% des PM1.0 (121 kt) et en 1999 ces contributions sont respectivement de 7% (113 kt), 18% (108 kt), 32% (105 kt) et 47% (104 kt).

Si on examine la hiérarchie des sources émettrices dans cette catégorie en dehors du bois résidentiel, on constate la prédominance de deux sources : la combustion pour la production d'électricité, et la combustion dans l'industrie (Figure 7).

Au sein de la production d'électricité, la principale contribution est celle des centrales à charbon. Comme la Figure 8 – qui porte sur les TSP –

permet de la constater, cette contribution est très fluctuante en raison de la variabilité du recours aux centrales à charbon en période de consommation de pointe, qui est notamment fonction de la météorologie et des taux de disponibilité des autres types de centrales.

Pour ce qui est de la seconde contribution, c'est à dire la combustion dans l'industrie, la prédominance du charbon sur les autres combustibles - représentée sur la Figure 9 – est moins marquée que la production d'électricité.

On observe également une baisse tendancielle des émissions liées aux trois principaux combustibles (charbon, fioul, bois) et un rapprochement de leurs contributions respectives.

Figure 6 : Granulométrie des émissions des sources fixes de combustion pour l'année 2000

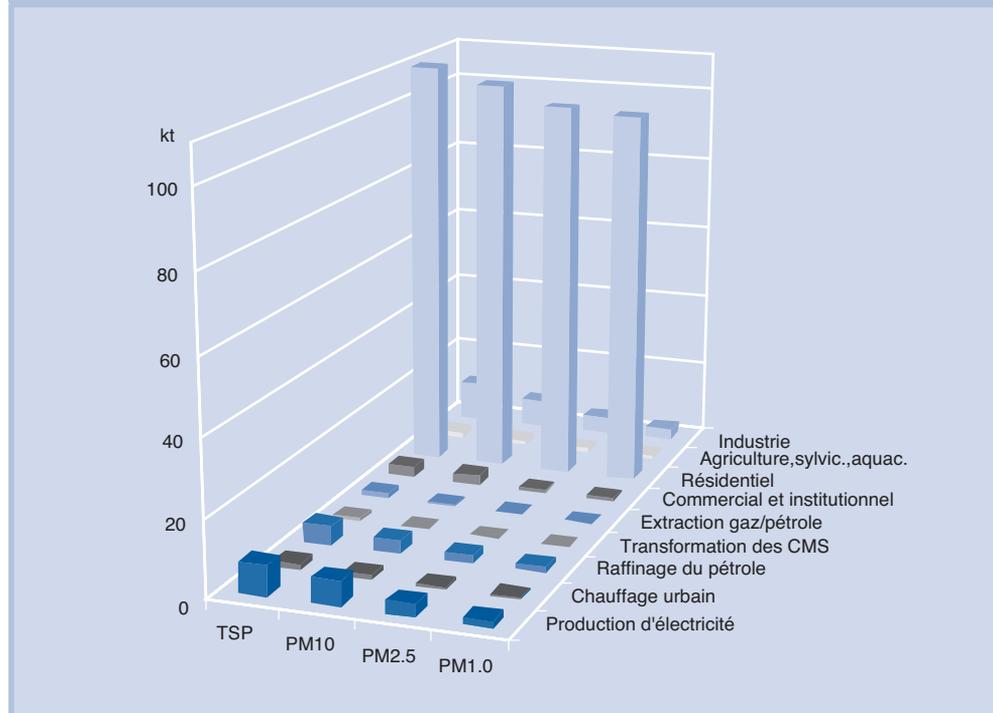


Tableau 3 : Facteurs d'émissions de particules des équipements à bois

	FE TSP(g/GJ)
Cheminée ouverte	753 ± 200
Poêle et cuisinière	310 ± 260
Foyer fermé et insert	310 ± 260
Chaudière	
ancienne	150 < 625 < 1500
nouvelle	34 ± 16

Tableau 4 : Part des particules selon leur granulométrie

	% en masse des TSP représentés par cette tranche granulométrique
PM10	95
PM2.5	93
PM1.0	92

Procédés industriels - Les chantiers de BTP

La contribution des procédés industriels est dominée par les émissions du secteur des bâtiments et des travaux publics.

Les émissions dues aux BTP sont difficiles à quantifier car elles sont diffuses, contrairement à celles de l'industrie où il s'agit d'émissions canalisées (ce

qui a permis une mise en place de mesures de réductions nécessaires il y a déjà plusieurs années car on sait plus facilement à quel niveau intervenir pour limiter ces émissions). Il se pose également un problème de définition de la source, pour déterminer celles qui doivent être prises en compte, comme par exemple dans le cas des émissions dues aux camions de chantier, à l'envol de particules lors

Figure 7 : Granulométrie des émissions des sources fixes de combustion hors résidentiel pour l'année 2000

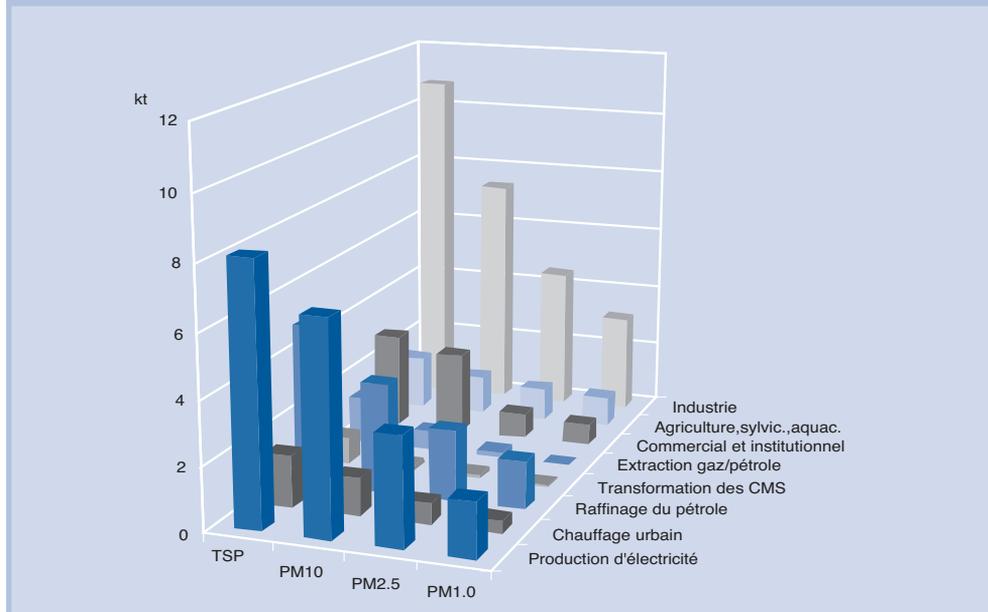


Figure 8 : Evolution des émissions de la production d'électricité pour différents combustibles

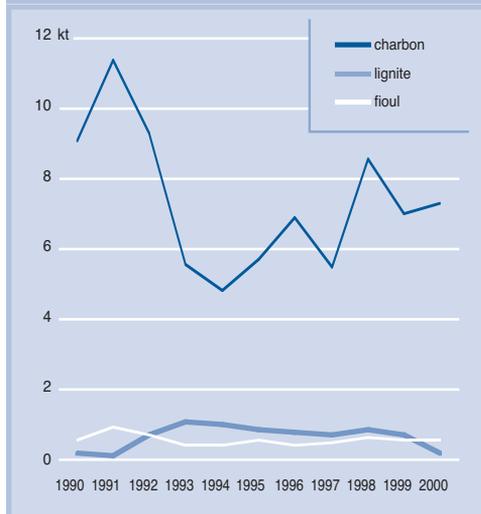
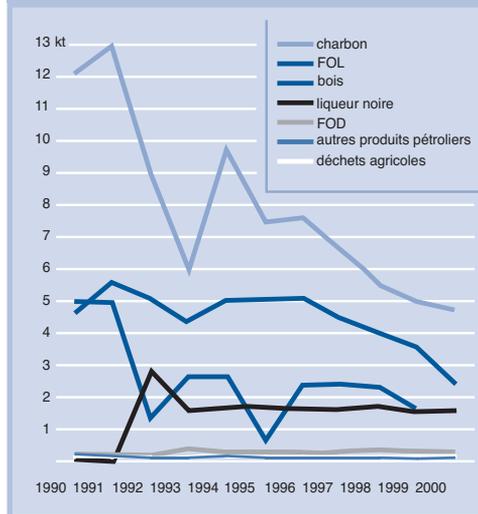


Figure 9 : Evolution des émissions dues à la combustion dans l'industrie pour différents combustibles



du transport de matériaux ou lors des chantiers de construction et de démolition ou encore l'usure des routes dues à ces camions de chantiers.

Cependant cette source ayant une contribution importante dans le total des émissions, il est nécessaire de la prendre en compte malgré de grandes incertitudes. Les émissions liées aux envois de matériaux liés à l'activité de construction (transport, chargement/déchargement, entreposage,...) n'ont cependant pas pu être prises en compte totalement dans le cadre de cette étude, en raison d'un manque de données.

Les données d'activités utilisées sont celles de l'Agreste sur l'utilisation du territoire (en ha) occupée par les chantiers, l'hypothèse est faite qu'il y a entre 1 à 6 mois d'activité dans l'année soit en moyenne 3,5 mois.

Les estimations des émissions se font en prenant un facteur d'émission moyen obtenu à partir de 3 valeurs disponibles dans la bibliographie. Ce facteur d'émission étant exprimé en t/ha/mois, on le ramène à l'année en considérant 3,5 mois d'activité en moyenne.

Pour les émissions de PM_{2,5} et PM_{1,0}, deux sources de données sont disponibles. On prend pour facteur d'émission la moyenne entre les deux facteurs d'émission que l'on obtient en appliquant les 2 données granulométriques disponibles aux facteurs d'émission TSP ou PM₁₀ déterminés auparavant.

Procédés industriels hors chantiers de BTP

Si on extrait le BTP de la catégorie « procédés industriels », la hiérarchie des sources au sein de cette catégorie est donnée par la Figure 10.

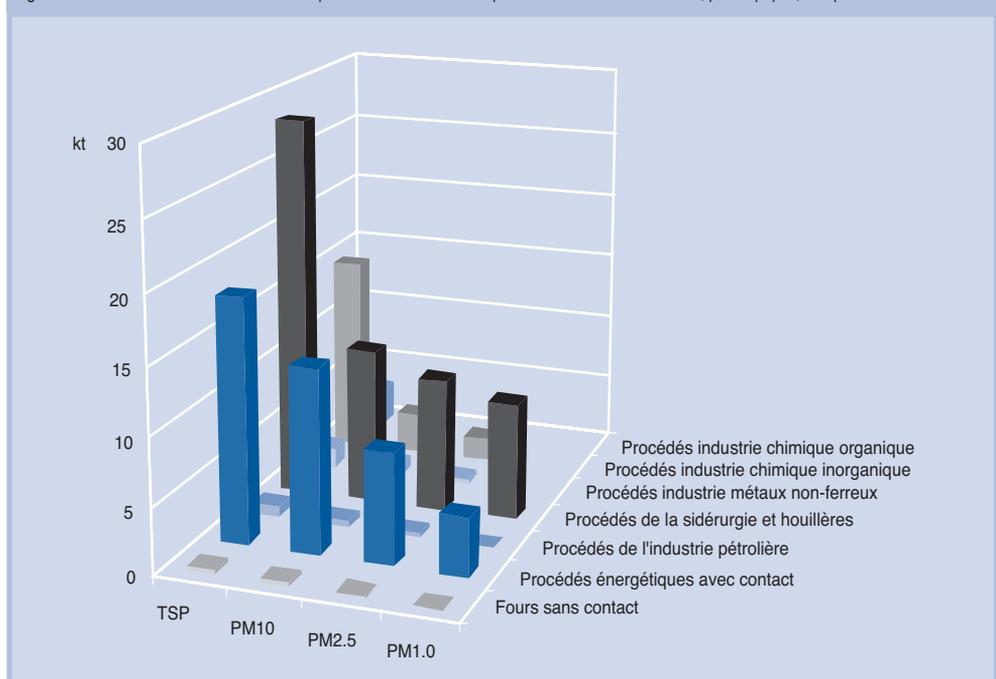
Les deux secteurs principalement contributeurs sont la sidérurgie (notamment pour les particules les plus fines), puis les procédés énergétiques avec contact. Pour ce qui est de la sidérurgie, la principale source est constituée par les fours électriques pour l'acier, notamment pour les particules les plus fines, loin devant la chaîne d'agglomération du minerai (Figure 11).

Pour ce qui est des « procédés énergétiques avec contact », cette dénomination regroupe les productions suivantes :

- Production de ciment
- Production de verre
- Production de produits de recouvrement des routes
- Aluminium de 2^{nde} fusion
- Production de plomb, de cuivre et de zinc
- Production de tuiles, briques et céramiques fines
- Fonderies de fonte grise
- Production de magnésium

Les facteurs d'émission de cette catégorie proviennent fréquemment de la bibliographie, et les facteurs disponibles sont souvent limités aux TSP.

Figure 10 : Granulométrie des émissions des procédés industriels hors procédés de l'industrie du bois, pâte à papier, etc. pour l'année 2000



Transports routiers

Le transport routier (sources diffuses incluses) est le 3^{ème} émetteur de TSP et de PM₁₀ derrière les procédés industriels et l'agriculture en 2000 et en moyenne sur la période 1990-2000. En termes de PM_{2,5} et PM_{1,0}, il se trouve en 2^{ème} position derrière la combustion hors industrie.

En effet, la contribution des émissions du transport

routier, toutes catégories de sources confondues, est présentée dans le tableau 5.

Cependant, la majorité des émissions de ce secteur est imputable aux émissions diffuses que sont l'usure des pneus, des plaquettes de freins et des routes. Celles-ci représentent environ 78% des émissions TSP du transport routier, 52% des PM₁₀ et 36% des PM_{2,5} (les PM_{1,0} ne sont pas considérées par man-

Figure 11 : Sidérurgie (hors cokerie sidérurgiques) Répartition des émissions TSP pour l'année 2000

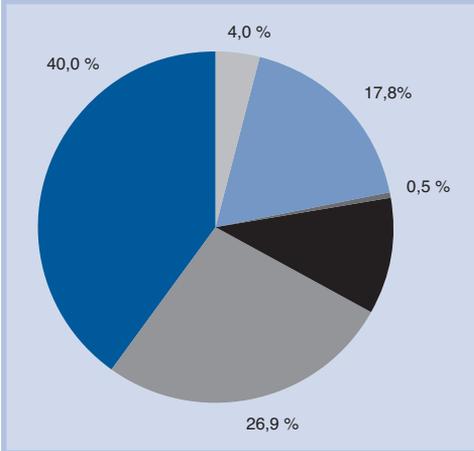


Figure 12 : Sidérurgie (hors cokerie sidérurgiques) Répartition des émissions PM10 pour l'année 2000

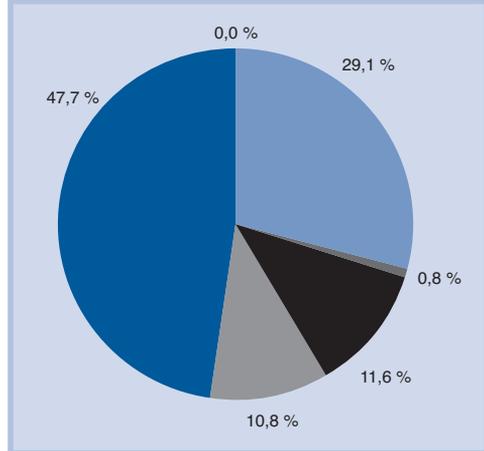


Figure 13 : Sidérurgie (hors cokerie sidérurgiques) Répartition des émissions PM2,5 pour l'année 2000

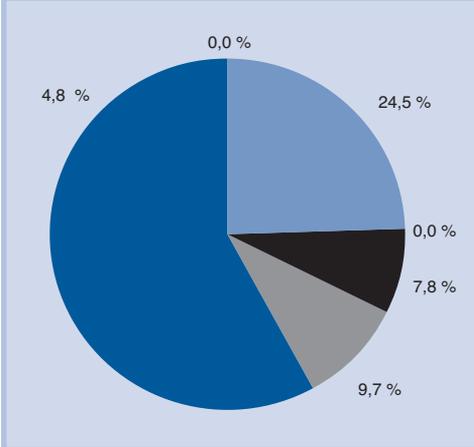
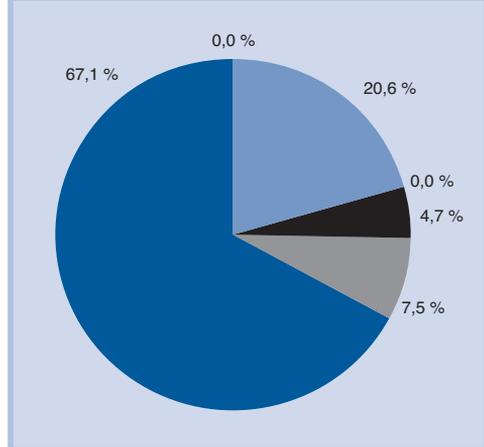


Figure 14 : Sidérurgie (hors cokerie sidérurgiques) Répartition des émissions PM1,0 pour l'année 2000



■ Chaîne d'agglomération de minéral

■ Fours de réchauffage pour l'acier et minéraux ferreux

■ Coulée de la fonte

■ Fours à l'oxygène pour l'acier

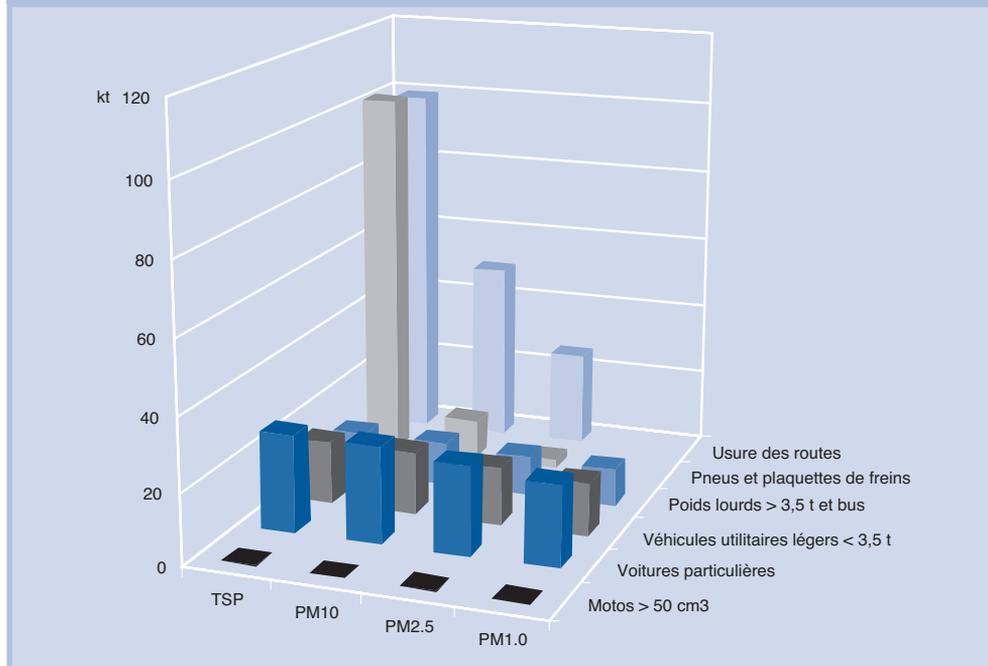
■ Fours électriques pour l'acier

■ Laminaires

Tableau 5 : Contribution du transport routier (sources diffuses incluses) aux émissions totales de particules

TSP		PM10		PM2.5		PM1.0	
1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
13 %	16 %	16 %	20 %	18 %	25 %	19 %	23 %

Figure 12 : Granulométrie des émissions du transport routier pour l'année 2000



que de données). Les émissions dues uniquement à l'échappement ont donc une contribution bien moindre au total des émissions (toutes sources confondues) puisqu'elles ne représentent alors que 3% des TSP (56 kt), 10% des PM₁₀ (56 kt), 16% des PM_{2,5} (51 kt) et 23% des PM_{1,0} (47 kt).

Une décomposition des émissions par type de véhicules fournit les résultats reportés dans la figure 12.

Cette analyse met en évidence la prédominance des voitures particulières puis des véhicules utilitaires légers, ainsi que l'importance nettement supérieure de l'usure des routes, des pneus, des freins et des embrayages pour les TSP.

Les PM_{1,0} n'ont pas été chiffrées pour l'usure des routes, des pneus et des freins, par manque de données.

On peut ainsi identifier trois sources majeures au sein des transports routiers : l'usure des routes, des pneus, et les émissions à l'échappement des véhicules fonctionnant au gazole, pour toutes les

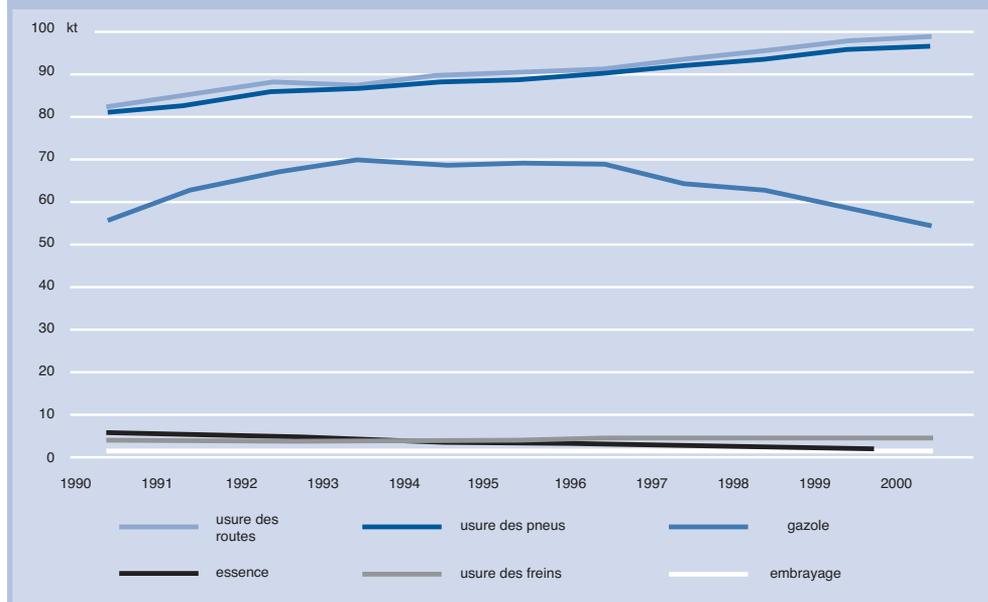
classes granulométriques considérées (les courbes reproduites Figure 13 concernent les TSP, mais les résultats sont analogues pour les autres classes granulométriques)

Les émissions de particules à l'échappement du trafic routier diesel au niveau national ont été déterminées pour les véhicules particuliers, utilitaires légers et lourds, au moyen du modèle européen COPERT III (Computer Programme to Estimate Road Traffic emissions).

Ce modèle prend en compte de nombreux paramètres :

- les consommations de carburants et leurs caractéristiques
- le parc de véhicules en différenciant :
 - le type de véhicule,
 - le type de moteur,
 - la cylindrée ou la taille,
 - l'âge,
 - des dispositifs particuliers (équipement de dépollution, etc.).

Figure 13 : Evolution des émissions dues aux transports routiers



- des conditions de circulation, notamment :
 - le kilométrage annuel parcouru,
 - les vitesses moyennes de référence relatives à des voies types (urbain, rural, autoroute)
 - la répartition du trafic selon 3 modes (urbain, rural, autoroute)
 - la longueur du trajet moyen,
 - les conditions climatiques.

Les consommations de carburants de référence utilisées dans le modèle proviennent du Ministère des Transports (CCTN) et tiennent compte du bilan des ventes réelles de carburants sur le territoire français.

Le modèle du CITEPA utilise les équations de COPERT III pour recalculer les consommations de carburants à partir de paramètres relatifs au trafic (cf. liste ci-dessus) et de fonctions de consommation présentes dans le modèle (établies à partir d'une compilation de données européennes). La comparaison des consommations de carburants recalculées

avec les consommations de référence permet de valider, éventuellement après itération, l'ensemble des hypothèses et données introduites dans le modèle. Ensuite, le modèle calcule les émissions au moyen de facteurs d'émission unitaires spécifiques à chaque type de véhicule. Les facteurs d'émission de COPERT III sont utilisés à cette fin.

En l'absence d'informations dans COPERT III relatives aux émissions de particules par les véhicules essence, aux émissions diffuses, et à la granulométrie, les données prises en compte par défaut sont celles qui sont proposées par le CONCAWE [6] (tableau 6).

Les émissions de particules issues des véhicules essence (estimées à partir de données du CONCAWE) sont de l'ordre de 3% des émissions totales de particules liées à l'échappement dans le transport routier, donc les différentes hypothèses prises en compte pour les véhicules à essence n'influent que faiblement sur les résultats globaux.

Les émissions hors échappement ont été estimées en utilisant des travaux du CONCAWE et de CBS [7].

Tableau 6 : Part des émissions de particules par tranche granulométrique

tranche granulométrique	% en masse des TSP dans cette tranche véhicules diesel	% en masse des TSP dans cette tranche véhicules essence
PM10	100	85
PM2.5	92	67
PM1.0	85	50
PM0.1	50	21

Autres sources mobiles non-routières et machines

Il faut noter également la contribution sensible, surtout pour les particules les plus fines, des autres sources mobiles et des machines (tableau 7).

Au sein de cette catégorie, la majorité des émissions est imputable au parc des tracteurs agricoles (Fi-

gure 14), pour lequel des mesures de réduction des émissions (normes sur les émissions des moteurs et les carburants) ne sont pas encore prises aux niveaux européen et international, comme elles ont pu l'être pour les véhicules routiers.

Agriculture

Les émissions du secteur agricole sont importantes. Ce secteur est le 2nd émetteur de TSP, derrière les procédés de production (BTP), avec des émissions TSP estimées à 510 kt en 1990 et 502 kt en 2000.

Concernant les PM₁₀, il occupe la 3^{ème} place en 1990 derrière les procédés de production et la combustion hors industrie, la 4^{ème} place en moyenne sur la période 1990-2000 (derrière les mêmes sources qu'en 1990 plus le transport routier (émissions diffuses incluses)) et la 2^{ème} place en 2000 derrière les procédés de production.

Les émissions de l'agriculture sont dues très principalement au labourage des cultures avec engrais,

et aux émissions dues aux déjections animales (principalement les cochons).

Pour des raisons de nomenclature, les feux ouverts de déchets agricole (hors écobuage) et les engins non routiers agricoles et sylvicoles ne sont pas comptabilisés dans la rubrique « agriculture » de l'inventaire. Cependant, si on les prend en compte avec les sources agricoles de particules fines (PM_{2.5}), le total du secteur « agriculture » passe de 28.9 kt à 52.4 kt, soit de 8.9% à 16.2% des émissions totales de PM_{2.5} en 2000. Il devient ainsi le troisième secteur responsable de l'émission de particules fines en France en 2000.

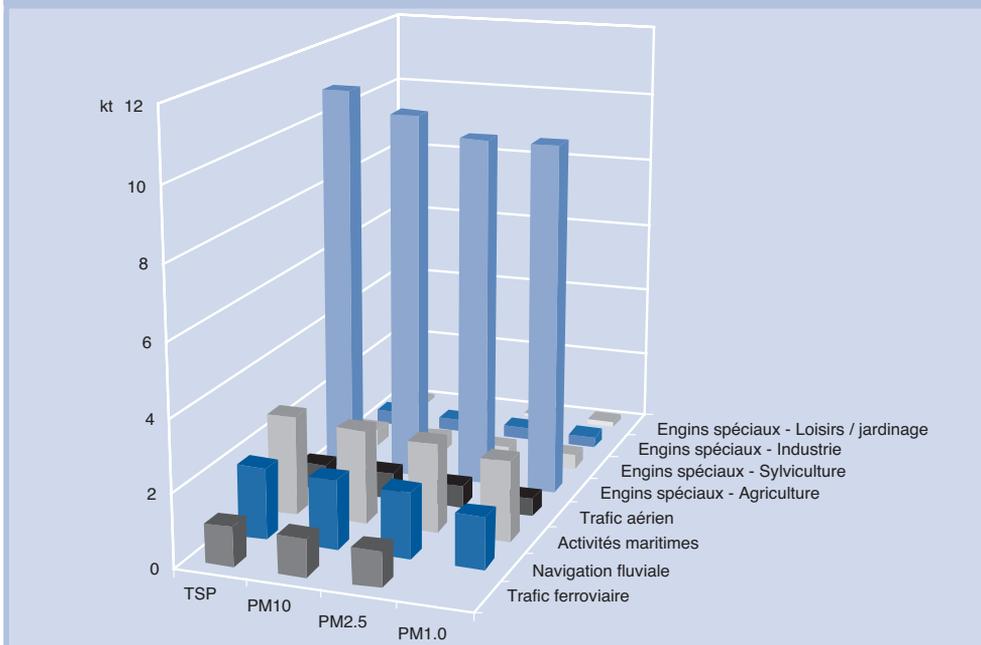
Conclusions sur les émissions

Les émissions de particules primaires dans l'atmosphère en France en 2000 sont estimées à plus de 1 600 kt pour les activités prises en compte. La quasi totalité des émissions a fait l'objet d'une estimation de répartition granulométrique, qui indique que

Tableau 7 : Contribution des autres sources mobiles et machines aux émissions totales de particules

TSP		PM10		PM2.5		PM1.0	
1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
1 %	1 %	3 %	3 %	5 %	5 %	7 %	7 %

Figure 14 : Granulométrie des émissions des autres sources mobiles et machinerie pour l'année 2000



pour les secteurs considérés, les émissions de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ représentent respectivement 36% et 20% des émissions totales de particules en 2000. Les émissions de $PM_{1,0}$, dont les données sont encore incomplètes par manque d'information dans certains secteurs, sont estimées représenter 13% des émissions totales de particules en 2000.

La Figure 15 indique que, quelque soit la classe granulométrique considérée⁶, les quatre sources principales de particules sont les mêmes, à savoir : l'agriculture, les bâtiments et travaux publics, la combustion du bois dans le secteur résidentiel, et les transports routiers.

Cependant, le poids relatif de la contribution de chacune de ces sources au total des émissions est très variable en fonction de la classe granulométrique. Pour les TSP, l'agriculture, les bâtiments et travaux publics sont prédominants. Pour les PM_{10} , les contributions de l'agriculture, des transports routiers et de la combustion du bois sont comparables et supérieures à celles du BTP. La combustion du bois dans le secteur résidentiel et les transports routiers sont nettement prédominants pour les particules les plus fines : $PM_{2,5}$ et les $PM_{1,0}$. - Dans ces deux dernières classes les incertitudes sont, cependant, plus importantes.

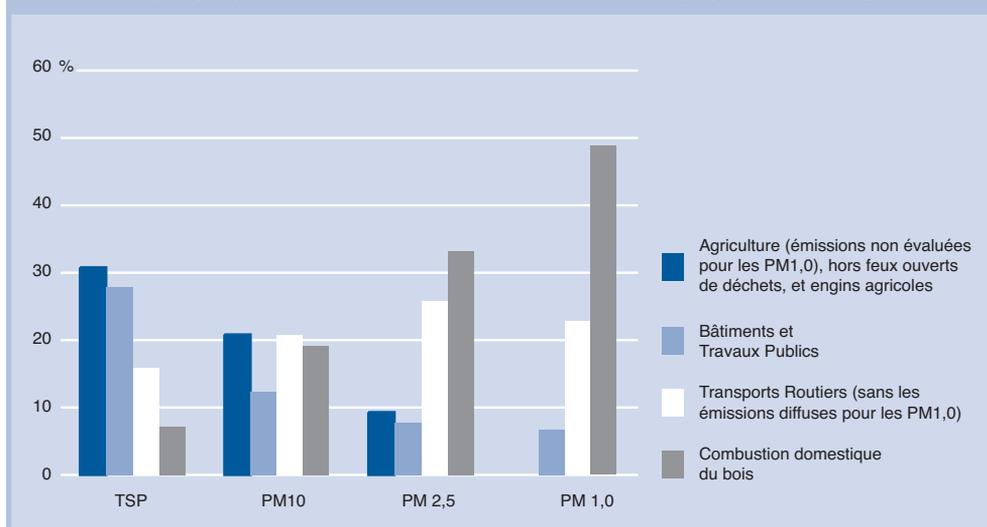
Pour des raisons de nomenclature, les feux ouverts de déchets agricoles (hors écobuage) et les engins non routiers agricoles et sylvicoles ne sont pas comptabilisés dans la rubrique « agriculture » de l'inventaire. Cependant, si on les prend en compte avec les sources agricoles de particules fines

($PM_{2,5}$), le total du secteur « agriculture » passe de 28.9 kt à 52.4 kt, soit de 8.9% à 16.2% des émissions totales de $PM_{2,5}$ en 2000. L'agriculture serait ainsi le troisième secteur responsable de l'émission de particules fines ($PM_{2,5}$) en France en 2000.

Si on s'intéresse à l'évolution des émissions de 1990 à 2000, on constate une baisse de celles-ci entre 1990 et 2000 qui est d'environ 9% (essentiellement due à une diminution des émissions des feux de forêts et des procédés de production) et qui se fait de façon irrégulière au fil des années pour les TSP. Pour les PM_{10} et les $PM_{2,5}$, la baisse des émissions est assez régulière (avec une hausse de 1996 à 1998) avec respectivement 17 % et 25 % d'émissions en moins en 2000 par rapport à 1990 (due essentiellement à une diminution des émissions des feux de forêts, de l'extraction des combustibles fossiles solides et de la combustion hors industrie). Les $PM_{1,0}$ connaissent une diminution de 23% qui se fait quasi régulièrement de 1990 à 2000 (liée à la diminution des émissions de la combustion du bois dans le secteur résidentiel).

Du fait des incertitudes importantes qui subsistent sur les facteurs d'émission mais aussi sur les activités considérées pour certaines sources, les travaux pourraient être améliorés et complétés par l'estimation ou la consolidation, en particulier, des émissions diffuses de particules (érosion des surfaces par le vent, embruns marins, chantiers de construction, usure des routes, agriculture, etc.). Ces investigations complémentaires pourraient nécessiter la mise en œuvre de campagnes de mesures.

Figure 15 : Part des quatre principales sources dans les émissions totales 2000 de particules anthropiques, en fonction de la granulométrie



Prospective des émissions

Cette partie de l'étude, réalisée par l'INESTENE, a consisté à élaborer et présenter les résultats de plusieurs scénarisations de l'évolution des émissions de particules totales (« TSP »), en France aux horizons 2020 et 2030.

Compte-tenu des fortes incertitudes sur les techniques de réduction des émissions des particules fines et leurs évolutions, il a été jugé préférable de s'en tenir pour cette partie à l'étude des particules totales, sans opérer de distinction en fonction de la granulométrie.

Méthodologie

Il faut souligner en préambule que pour certains secteurs, on a manqué d'éléments sur la situation actuelle des émissions par rapport aux normes, et surtout sur le niveau futur des normes, sur les possibilités techniques futures de réduction des émissions, ou encore sur les émissions diffuses et leurs futures techniques de réduction.

Pour ces secteurs, la prospective présentée ici ignore donc les probables futures évolutions techniques et structurelles qui pourraient conduire à des réductions d'émission.

Il est en ainsi notamment dans les secteurs suivants :

- l'agriculture, pour lequel aucune hypothèse particulière n'a été faite, ni en termes de scénario économique et structurel, ni en termes d'introduction de techniques de réduction des émissions (modification des pratiques de labour par exemple).
- le BTP, également sujet à des hypothèses macroéconomiques simples,
- le domaine des procédés industriels, pour lequel les hypothèses ont du être simplifiées en raison de l'insuffisance de l'information.
- le secteur « traitement des déchets », pour lequel des réductions supplémentaires concernant les émissions de particules par d'autres traitements que l'incinération des ordures ménagères n'ont pas été prises en compte.

Il est donc délicat d'interpréter les résultats de la prospective en termes de contributions respectives futures des différents secteurs. En particulier, des évolutions des jeux de contributions respectives par rapport à la situation décrite dans la première partie de l'étude risquent de ne pas être significatives. La prospective obtenue doit

être comprise comme une image de ce qui se passerait si nos connaissances actuelles étaient extrapolées : les déficits de connaissances actuels se traduisent par une déformation de l'image prospective.

Par ailleurs, une méthodologie légèrement différente a été adoptée par le CITEPA et INESTENE, ce qui explique quelques différences entre les chiffres CITEPA 1998 et le point de départ de la prospective pour cette même année pour plusieurs secteurs.

Prospective des consommations et des productions énergétiques

Cette prospective s'est basée sur les travaux du Groupe Energie 2010-2020 du Commissariat Général au Plan, qui dans son exercice de septembre 1998, propose un jeu de trois scénarios énergétiques multisectoriels pour 2020. Dans cette étude, on a utilisé les deux scénarios extrêmes S1 et S3 de l'exercice [8]. Ces deux scénarios peuvent être rapidement caractérisés de la façon suivante :

- le premier scénario (S1) a privilégié une vision du futur laissant une grande autonomie aux mécanismes du marché, sans réelle contrainte sur le marché de l'énergie, que ce soit en terme de sécurité ou en terme d'impacts environnementaux. Il met en lumière une situation future insoutenable sur l'approvisionnement et les engagements internationaux sur le CO₂.
- le troisième scénario (S3) se structure autour de l'intégration prioritaire de la dimension environnementale de la politique publique. Il cherche notamment à déterminer les hypothèses permettant à terme de respecter les engagements de la France à Kyoto en termes de CO₂,

et par ailleurs à réduire la pollution atmosphérique. L'intervention de l'Etat devient forte sur la demande d'énergie. Ce scénario affirme une certaine rupture par rapport à la politique énergétique antérieure de la France, dans le sens où il revendique une action très marquée sur la demande d'énergie et sur les comportements.

Sur la base de ces scénarios, nous avons évalués à l'horizon 2030 les émissions de particules associées à la production d'électricité (Figure 16 pour le cas du scénario S1).

Inventaire des technologies de dépollu-siérage actuellement disponibles

Cet inventaire a été fait sur la base de références bibliographiques internationales (ATEE [9], IIASA, US EPA, UK AEAT, etc.). Cette collecte a permis d'estimer les coefficients d'émissions unitaires actuels de certains secteurs, et leur évolution possible dans le futur. De cette façon ont été abordés les domaines suivants :

- émissions des procédés industriels (dépollu-siérage, électrofiltres, traitement humide, cyclones)
- sources stationnaires et mobiles de combustion, pour lesquelles nous avons complété les prévisions énergétiques ou les hypothèses générales du Commissariat Général au Plan par des éléments plus précis ([10], [11], [12], [13]) nécessaires pour travailler sur les émissions de particules :

- composition des parcs de véhicules par âge et technologie, et pénétration des systèmes de filtre à particules (ou système équivalent)

- diffusion de techniques plus efficaces et moins polluantes pour la combustion du bois en secteur résidentiel

- description fine de la demande et de la fourniture d'électricité

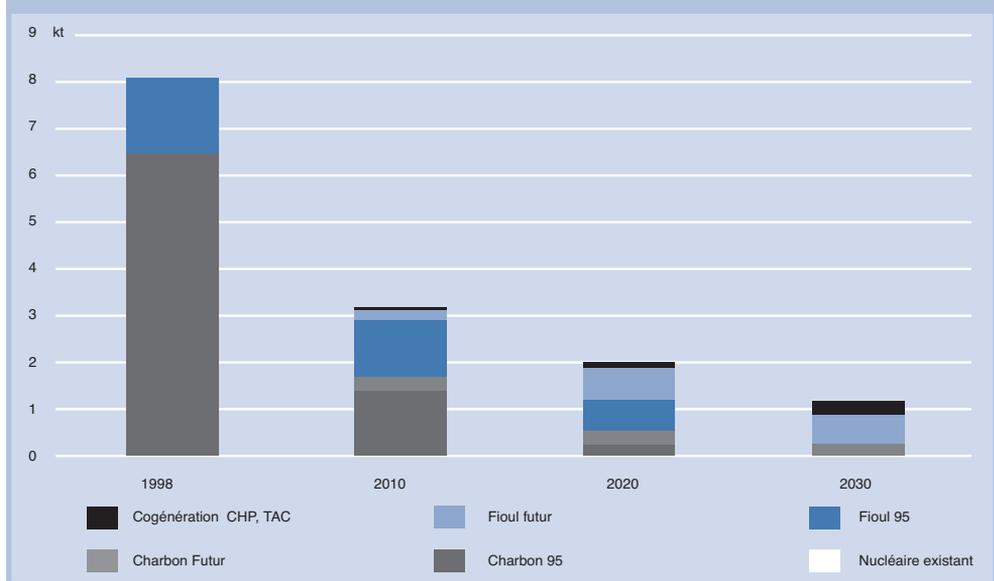
- hypothèses de taux d'évolution annuels des émissions de particules pour chaque grand secteur industriel

Pour le **transport routier**, les compositions prospectives des parcs de véhicules automobiles particuliers retenues pour cette étude, et pour chacun des deux scénarios S1 et S3, sont données dans la Figure 17.

Pour les véhicules Diesel particuliers, la pénétration des véhicules à injection directe ou injection directe avec filtre à particules va jouer un rôle non négligeable sur les émissions de poussières. Dans nos simulations, nous avons retenu deux hypothèses fortes : 1/ tous les véhicules Diesel neuf en vente seront à injection directe en 2005-2006 ; 2/ tous les Diesel seront équipés de filtres à particules (ou système équivalent) en 2010-2012. (Figure 18, relative au scénario S1).

Pour les émissions diffuses du transport routier, les facteurs d'émission du CITEPA ont été utilisés (sans changement sur la période 1998 – 2030). Les émissions diffuses évoluent également pro-

Figure 16 : Emissions de poussières dues à la production électrique S1



portionnellement aux distances parcourues, qui sont plus importantes dans le scénario S1 que dans le scénario S3.

Pour chaque nouvelle génération de chaque type de véhicule, un taux d'émission est affecté pour chaque année, sur la base des seuils réglementaires fixés ou déjà anticipés. L'hypothèse sous-jacente à cette formulation est que pour une année donnée, tous les véhicules neufs mis en vente cette année là respecte ce seuil d'émission.

Les taux de renouvellement du parc des véhicules adoptés sont basés sur des fonctions de survie provenant de travaux [14] utilisés notamment par l'INRETS, dans lesquelles l'âge de survie médian (pour lequel 50% des véhicules survivent) est d'environ dix ans.

L'évolution des normes EURO qui s'appliquent en Europe aux véhicules particuliers diesel est rappelée dans la Figure 19.

Notons que la mise en place d'une norme post-Euro IV n'est pas adoptée. Pour les besoins de

Figure 17 : Structure du parc par type de véhicules particuliers S1 & S3

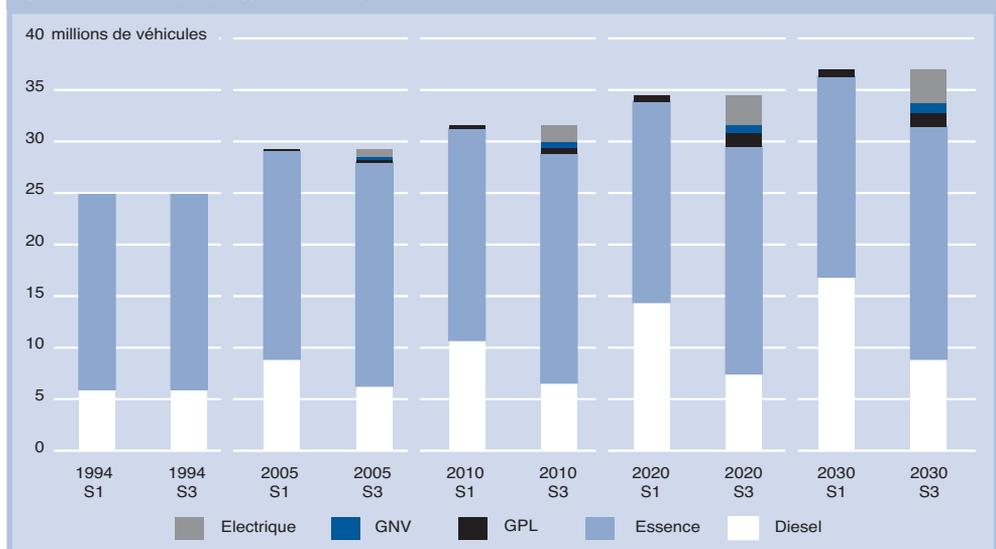
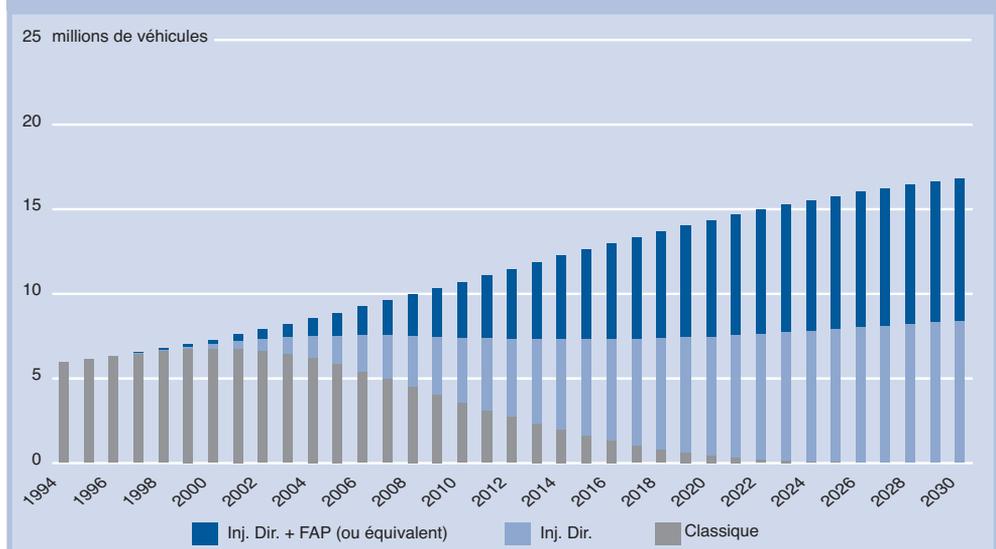


Figure 18 : Evolution du parc des petits véhicules diesel par type de motorisation S1



l'exercice prospectif, nous avons fait l'hypothèse d'un niveau d'émission moyen arbitraire pour les particules, pour les véhicules particuliers diesel, de 0.002 g/km, à partir de 2008/2010, correspondant au niveau Euro IV divisé par 10.

Les normes pour les poids-lourds et leur évolution sont rappelées dans la Figure 20. On a supposé un prolongement jusqu'en 2030 des normes devant s'appliquer à partir de 2008 pour les poids-lourds neufs.

Pour l'**industrie**, ont été retenus des taux moyens d'évolution annuelle pour les émissions de particules totales suivants, par rapport aux taux d'émission unitaires de référence (1998) :

Poste combustion :

- 3 % (S1), - 4 % (S3)

Poste procédés à faibles émissions diffuses :

- 2 % (S1), - 3 % (S3)

Poste procédés à fortes émissions diffuses :

- 1.5 % (S1), - 2.5 % (S3)

Il est à noter toutefois que pour certains secteurs industriels, des taux d'évolution spécifiques ont pu être utilisés lorsque cela était justifié.

Ainsi, dans le cas de la sidérurgie, il a été possible d'affiner la prospective en distinguant quatre grands postes : four à coke, coulée de fonte, four électrique et HF/O₂ (tableau 8). On a ainsi pu prendre

Figure 19 : Evolution des normes d'émissions de particules pour les véhicules personnels diesel IDI & DI

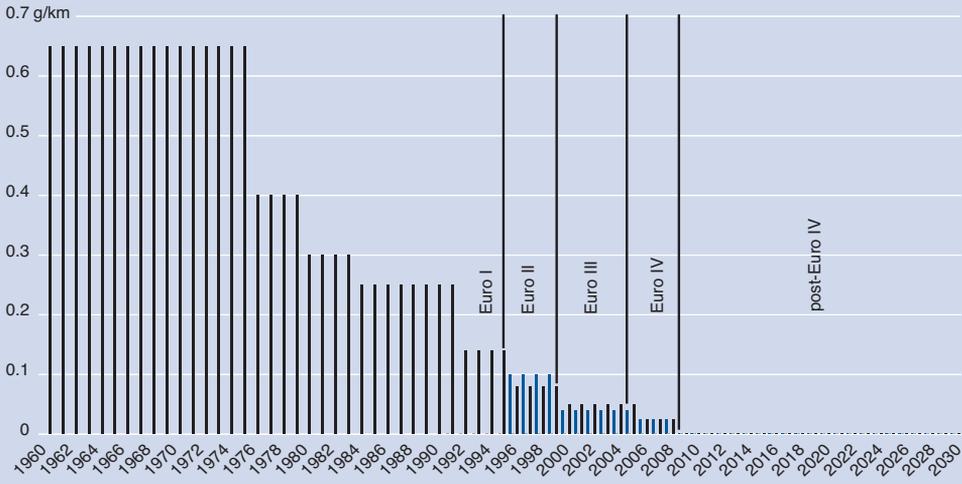


Figure 20 : Evolution des normes d'émissions de particules pour les PL

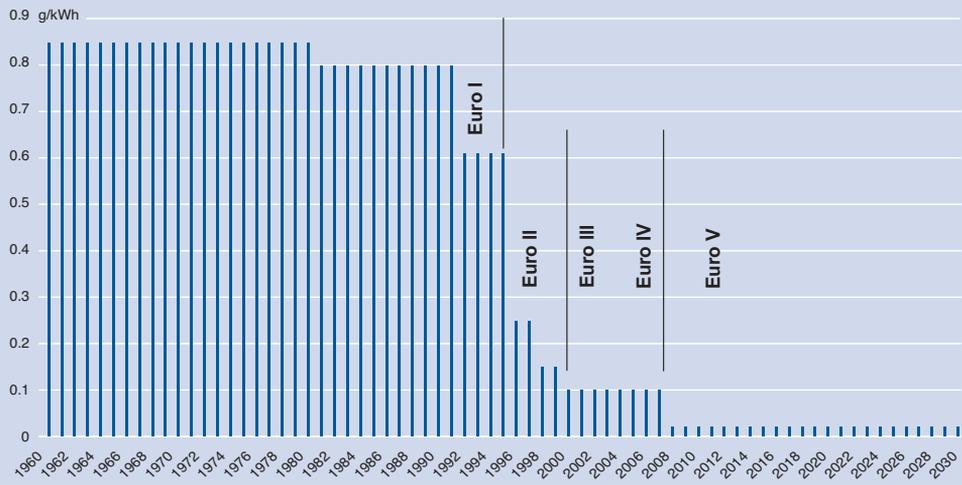


Tableau 8 : Hypothèses d'évolution de la production sidérurgique

S1	Déterminant	1998 Mt	activité tcam	amélioration TPM tcam 1998-2030	TSP 1998 kt	TSP 2020 kt	TSP 2030 kt
Four à coke	coke	5503000	-0,95 %	-1,00 %	3,0	2,0	1,6
Coulée de fonte	fonte	13888000	-0,95 %	-2,00 %	3,3	1,6	1,2
Four électrique	acier	8064000	2,32 %	-2,00 %	8,5	8,5	8,3
HF/O ₂	acier	5503000	0,00 %	-2,00 %	2,9	1,9	1,5
				Total TSP S1	17,8	13,9	12,6
S3							
Four à coke	coke	5503000	-0,95 %	-1,00 %	3,0	2,0	1,6
Coulée de fonte	fonte	13888000	-0,95 %	-3,00 %	3,3	1,5	1,1
Four électrique	acier	8064000	2,32 %	-3,00 %	8,5	6,8	6,0
HF/O ₂	acier	5503000	0,00 %	-3,00 %	2,9	1,3	1,1
				Total TSP S3	17,8	11,5	9,8

en compte une décroissance de la production de fonte et de l'utilisation de fonte sur la période, et en parallèle une augmentation de la production d'acier par la filière « four électrique », et la stabilisation de la filière oxydation (HF/O₂).

Concernant la **combustion du bois dans le secteur résidentiel**, l'approche retenue consiste à formuler des hypothèses sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments (-0.1% par an pour S1, et -0.5% par an pour S3), ainsi que sur l'évolution des parts de marché des différents types d'appareils, tout en considérant que les rendements de chacun de ces types d'appareils, ainsi que les pourcentages de logements chauffés au bois, demeurent constants. Les rendements énergétiques retenus pour les différents types d'appareils sont indiqués dans le tableau 9.

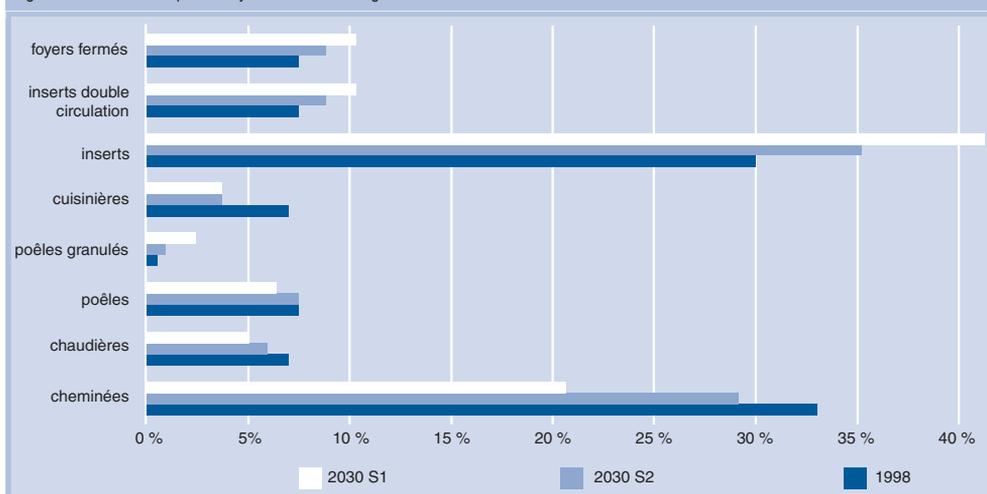
L'évolution des parts de marché des différents types d'appareils est synthétisée dans la Figure 21. Le scénario S3 se distingue du scénario S1 par une plus grande pénétration des systèmes performants, notamment des inserts au détrimment des cheminées.

L'évolution du nombre de logements individuels chauffés au bois, et les conséquences de l'ensemble des hypothèses en termes de consom-

Tableau 9 : Rendements des appareils à bois

Cheminées	15 %
Chaudières	30 %
Poêles	30 %
Poêles granulés	80 %
Inserts	40 %
Inserts double circulation	65 %
Foyers fermés	75 %

Figure 21 : Structure du parc de systèmes de chauffage au bois



mations énergétiques de la filière bois-résidentiel sont résumées dans la Figure 22.

Les émissions de TSP associées sont déduites des consommations à l'aide d'un facteur d'émission constant en g/tep pour S1 et S3 (15,56 g/tep).

Un scénario supplémentaire illustrant les potentialités d'une pénétration progressive de systèmes de chauffage individuels équipés de filtres à particules a été réalisé, et pour lequel on considère une baisse du facteur d'émission de -5,9% par an (de 15,56 g/tep en 1998 à 2,26 g/tep en 2030).

Résultats

Les résultats de la scénarisation des émissions de particules totales et par secteur sont présentés dans les figures 23 à 26 (tableaux VI et VII en annexe). Dans le scénario S1, les émissions totales de poussières augmentent de 3% à l'horizon 2030. Une augmentation des émissions diffuses du transport routier, et dans une moindre mesure de celles de la combustion du bois dans le secteur résidentiel et du BTP, font plus que compenser les baisses d'autres secteurs. Dans le scénario S3, une moindre augmentation de ces mêmes postes (en fait une légère baisse pour la combustion du bois en secteur résidentiel) entraîne, conjuguée à la baisse des autres secteurs,

une baisse de 6% des émissions totales.

Les secteurs du BTP, du bois résidentiel et de l'agriculture évoluent assez peu dans les deux scénarios.

Les résultats qui précèdent montrent qu'avec les hypothèses adoptées, la prédominance des principaux postes émetteurs (dont le BTP et combustion du bois) tend à s'accroître dans le futur. En fait, ces secteurs sont aussi ceux pour lesquels les émissions actuelles et également les possibilités futures de contrôle des émissions sont les plus mal connues. Il a donc paru utile de proposer une seconde série de résultats pour illustrer leur très forte sensibilité à des hypothèses assez fines pouvant être faites sur ces deux secteurs. Ainsi on a simulé les réductions supplémentaires d'émissions résultant, pour le secteur du BTP, d'une hausse d'activité future inférieure de 2% aux précédents scénarios, et en introduisant des mesures supplémentaires de réduction des émissions de la combustion du bois (filtres à particules dans les conduits des foyers).

Les résultats ci-après, illustrent la forte sensibilité de l'image prospective obtenue : les émissions en 2030 tombent en effet à 435 kt dans le S1 et 379 kt dans le S3, soit un gain par rapport au premier bilan national présenté plus haut de 430 kt pour le S1 et de 394 kt dans le S3.

Figure 22 : Evolution des consommations et du parc de logement

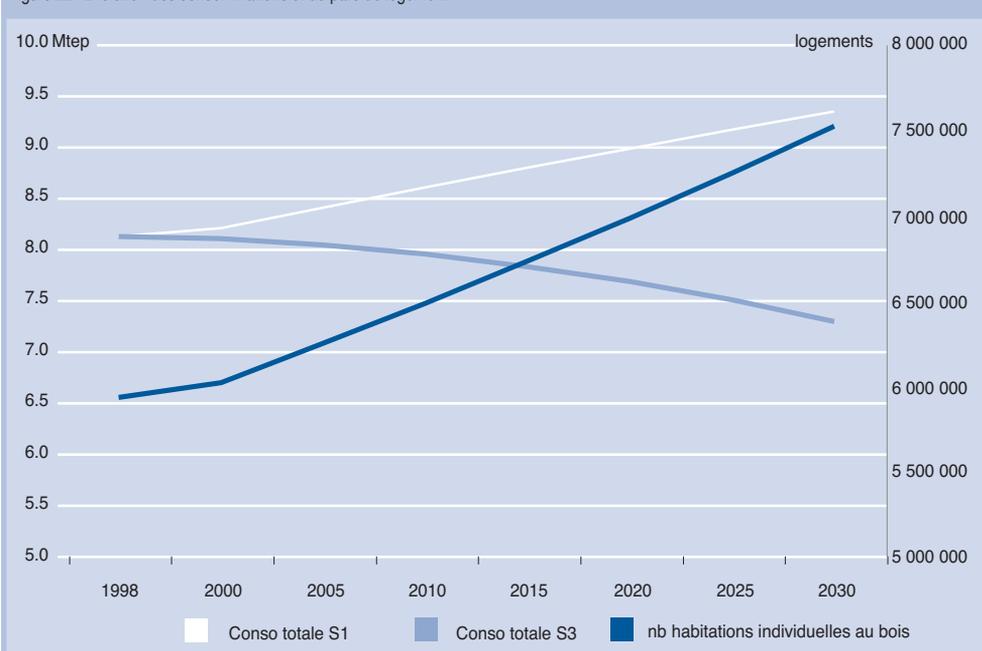


Figure 23 : Evolution des émissions de particules totales (TSP) d'ici 2030 - S1 & S3

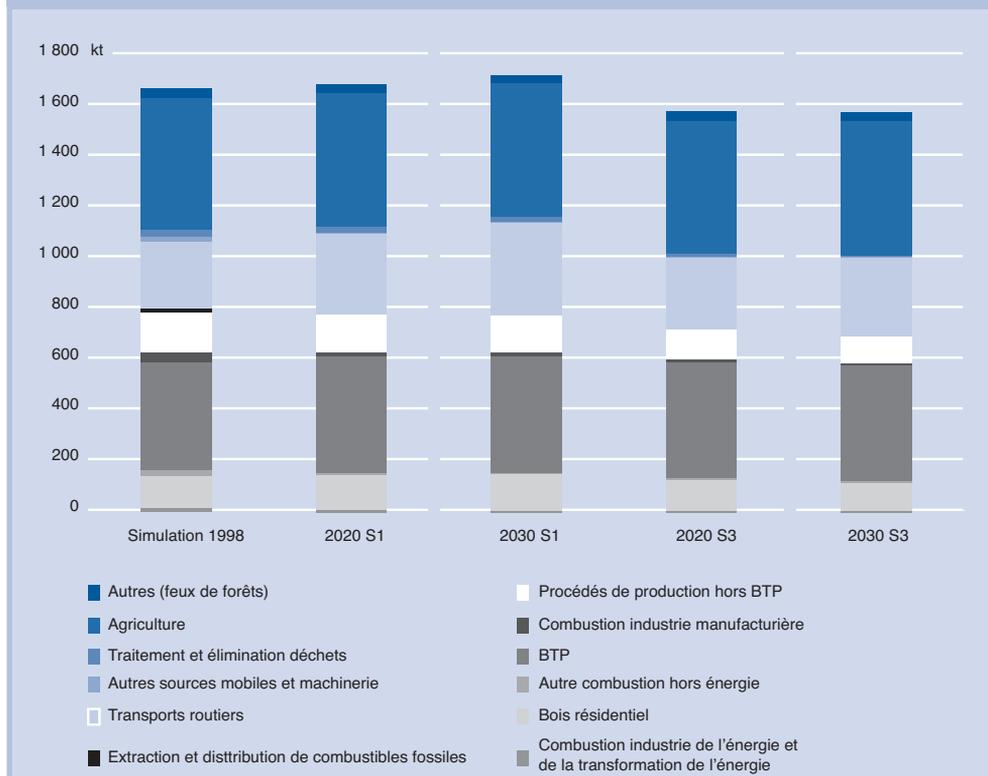


Figure 24 : Evolution des émissions de particules totales (TSP) par branche

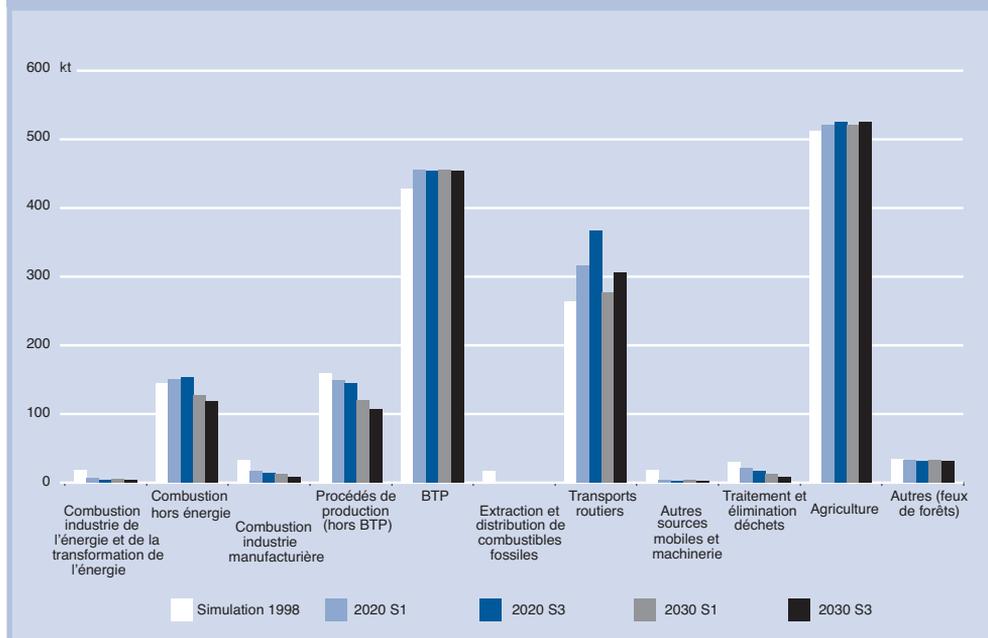


Figure 25 : Evolution des émissions de particules totales d'ici 2030 - S1 & S3

Scénario de baisse d'activité BTP et introduction de filtres pour le bois résidentiel

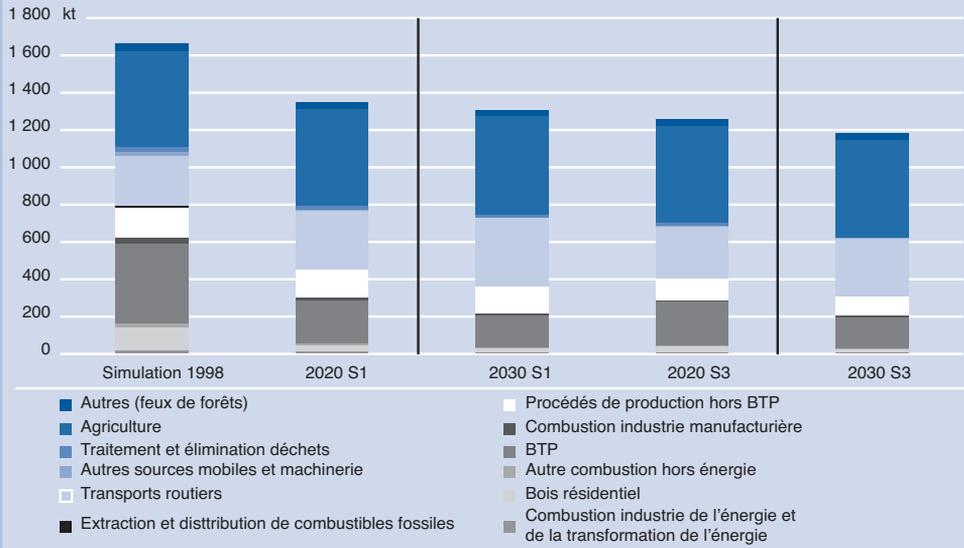
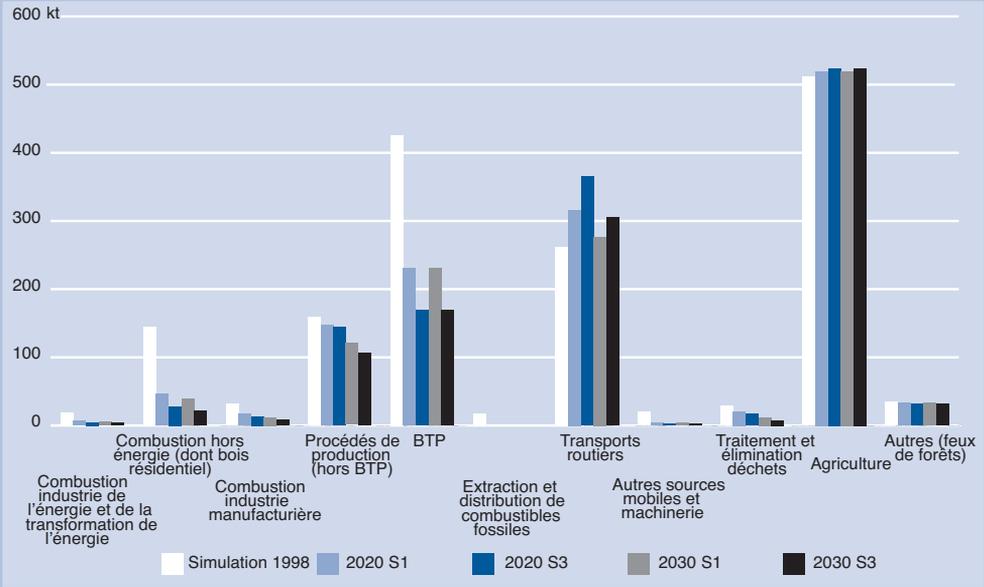


Figure 26 : Evolution des émissions de particules totales (TSP) par branche

Scénario de baisse d'activité BTP et introduction de filtres pour le bois résidentiel



Déterminants des concentrations en particules en milieu urbain

La vision nationale des émissions de particules fournie par l'inventaire et sa prospective n'est pas suffisante pour appréhender les mesures à prendre pour réduire les concentrations ambiantes en particules, notamment en milieu urbain, là où est rassemblée la très grande majorité de la population exposée à ce polluant atmosphérique. En effet, le classement des secteurs émetteurs de particules au niveau national ne peut pas se traduire immédiatement en ordre de priorité pour les mesures de réduction des émissions à prendre, étant donnée la complexité de la relation entre émission et exposition, au sein de laquelle la transformation chimique et la dispersion des polluants interfèrent.

De plus, les concentrations observées en France ne dépendent que partiellement des émissions de particules ayant lieu sur le territoire national car une part des concentrations provient du transport à longue distance des polluants.

Une synthèse de deux études étrangères de référence a permis de mettre en évidence les deux faits suivants :

- Au Royaume-Uni, malgré la part très minoritaire au plan national des émissions de particules primaires de taille inférieure à 10 μm par les sources mobiles, ces émissions peuvent être majoritaires sur une zone urbaine, et contribuer à hauteur d'environ 30% aux concentrations en particules mesurées en ville [15].
- Les émissions locales du secteur des transports ne sont pas seules en cause pour expliquer les niveaux de concentrations urbaines en particules : d'autres sources locales de particules que celles provenant du trafic peuvent contribuer significativement aux concentrations ambiantes, et les concentrations apportées par la pollution de fond (pollution d'origine régionale) ne sont pas négligeables. En témoigne l'absence de corrélation entre la densité des émissions locales de particules primaires et les concentrations en particules, relevée sur un grand échantillon de villes

européennes par l'Agence Européenne de l'Environnement [16] (Figure 27). Le cas des particules contraste avec celui du plomb, typique d'une relation étroite entre émissions locales dues au transport routiers en concentrations ambiantes en ville (Figure 28).

L'INERIS a donc travaillé sur la relation, au niveau des zones urbaines, entre les concentrations totales en particules (particules primaires et secondaires), et les émissions de particules primaires et de gaz précurseurs des particules secondaires, dans le but d'aboutir à une première indication des degrés de responsabilité respectifs des émissions locales et de la pollution de fond dans les concentrations urbaines en particules observées dans un certain nombre de villes françaises.

Des résultats de modélisations statistiques ont été obtenus sur 4 villes françaises, permettant de proposer pour chacune des indications de la part des sources locales et de la pollution de fond dans les concentrations urbaines en particules.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 10 (qui rappelle aussi les résultats obtenus dans une étude analogue sur Londres)⁷.

Le modèle adopté consiste en une relation linéaire entre les concentrations urbaines en particules d'une part, et deux termes représentant respectivement la contribution à ces concentrations des particules primaires et des gaz précurseurs émis par les sources locales, et la contribution des particules primaires et secondaires provenant de la pollution de fond.

Dans ce modèle, la contribution des sources locales est identifiée comme la part des concentrations urbaines en particules qui est corrélée aux concentrations en oxydes d'azote, ce qui ne permet d'appréhender que les sources locales de *combustion*. La contribution de la pollution de fond est la part des concentrations urbaines en particules qui est corrélée aux concentrations en sulfates mesurées en dehors du panache de pollution de la ville. Enfin,

une composante constante représente la part inexplicée par les deux termes précédents. Ce modèle est adapté de travaux anglais [15].

Les données utilisées sont, pour les concentrations en sulfates, celles des stations de mesure du réseau MERA⁸, utilisées notamment dans le cadre du réseau européen EMEP, dont le positionnement ainsi que celui des villes étudiées est reporté sur la Figure 29. Pour les oxydes d'azote, on a recours à des stations de mesure urbaines « de fond ».

Le modèle adopté est résumé par l'équation suivante : $PM_{10} = A * [NOx] + B * [SO_4 \text{ rural}] + C$

Les deux premiers termes de l'équation sont donc interprétés respectivement comme des indicateurs :

- de la contribution des sources de combustion locales (transports, industrie, chauffage) à travers leurs émissions de particules primaires, et leurs émissions de précurseurs des particules secondaires (SO_2 , NOx et COV). Une étude plus poussée sur un site à Vitry-sur-Seine confirme que cette contribution ne comprend probablement pas toutes les émissions locales : n'y figurent pas les émissions de particules primaires plus

grossières par les sources mobiles (usure des pneus, freins, embrayages, usures des chaussées,...), et les autres sources (chantiers de construction,...).

- de la contribution de la pollution par des particules primaires ou secondaires résultant d'émissions en dehors de la zone urbaine.

L'origine de la composante constante ne peut être précisée, sinon en faisant l'hypothèse qu'elle pourrait comprendre les aérosols d'origine naturelle. Le cas de Vitry-sur-Seine indique qu'elle serait composée principalement de particules d'un diamètre compris entre 2.5 et 10 μm , ce qui est cohérent avec cette hypothèse.

La Figure 30 fournit une comparaison entre les résultats du modèle et les observations dans le cas de la Ville de Clermont-Ferrand. La Figure 31 donne la décomposition des concentrations en une composante liée aux sources locales de combustion et une part liée à la pollution de fond (la composante constante de 10 $\mu g/m^3$ n'apparaît pas sur le graphe).

On constate, sur l'ensemble de l'étude, que malgré la diversité des sites et des périodes étudiées les sources locales de particules sont au moins du

Figure 27 : Densités d'émissions et concentrations moyennes annuelles en PM10 dans 200 villes européennes, calculées en 1995

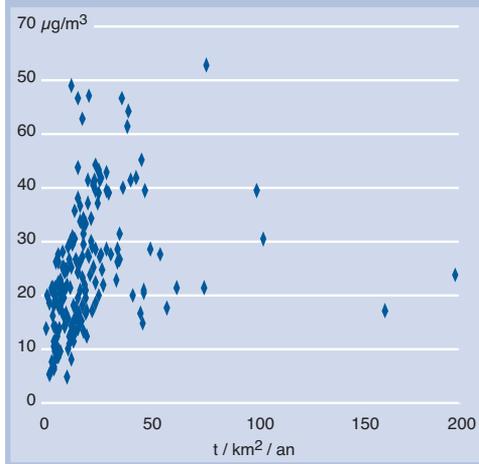


Figure 28 : Densités d'émissions et concentrations moyennes annuelles en Plomb dans 200 villes européennes, calculées en 1995

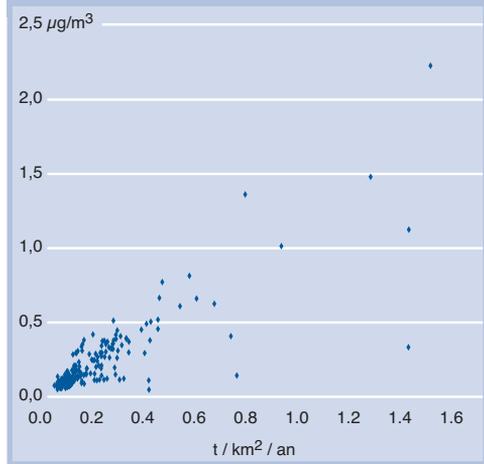


Tableau 10 : Part des sources locales et de la pollution de fond dans les concentrations urbaines en particules

	Londres PM 10	Clermont-Ferrand PM 13	Caen PM 10	Paris 12ème PM 10	Vitry-sur-Seine PM 10	Vitry-sur-Seine PM 2.5
Contribution des sources locales de combustion en %	35	40	50	35	50	70
Contribution de la pollution de fond en %	30	20	20	40	25	20

même ordre, et le plus souvent plus importantes que la pollution particulaire de fond pour expliquer les concentrations en ville.

Dans le cas de l'agglomération parisienne apparaît clairement une saisonnalité (voir Figure 32) : l'indicateur des sources de combustion locales affiche des valeurs plus élevées d'Octobre/Novembre à Avril/Mai, et inversement pour l'indicateur des sources de pollution de fond. Cette constatation admet une explication cohérente avec ce que l'on connaît de la chimie de l'aérosol secondaire, mais peut également être une conséquence du chauffage urbain en hiver. Il en découle notamment que, même à valeur moyenne mensuelle du paramètre PM_{10} sensiblement constante comme à Paris en 1999 et 2000, la composition donc l'impact sanitaire de l'aérosol urbain peut fortement varier en fonction des saisons.

Dans la plupart des cas rencontrés ici, les valeurs moyennes mensuelles les plus élevées de con-

centrations en particules sont dues en premier lieu à des valeurs élevées de la part attribuable aux sources locales de combustion. Le cas inverse (pointe de pollution par les particules attribuable à la pollution de fond) s'est également présenté. Les stratégies de maîtrise des concentrations urbaines en particules devront donc prendre en compte les émissions des sources locales, mais probablement également d'autres émissions et les niveaux régionaux de pollution de fond.

Les observations et conclusions établies à partir de cette première étude doivent encore être considérées avec précaution :

- les indicateurs utilisés sont logiques et révèlent une capacité explicative et prédictive des concentrations en particules intéressantes, mais ils demeurent critiquables (non prise en compte de l'aérosol organique secondaire par exemple).
- les analyses portent sur un nombre encore assez restreint de sites et sur des périodes temporelles peu étendues.

Figure 29 : Stations de mesure du réseau MERA et villes étudiées

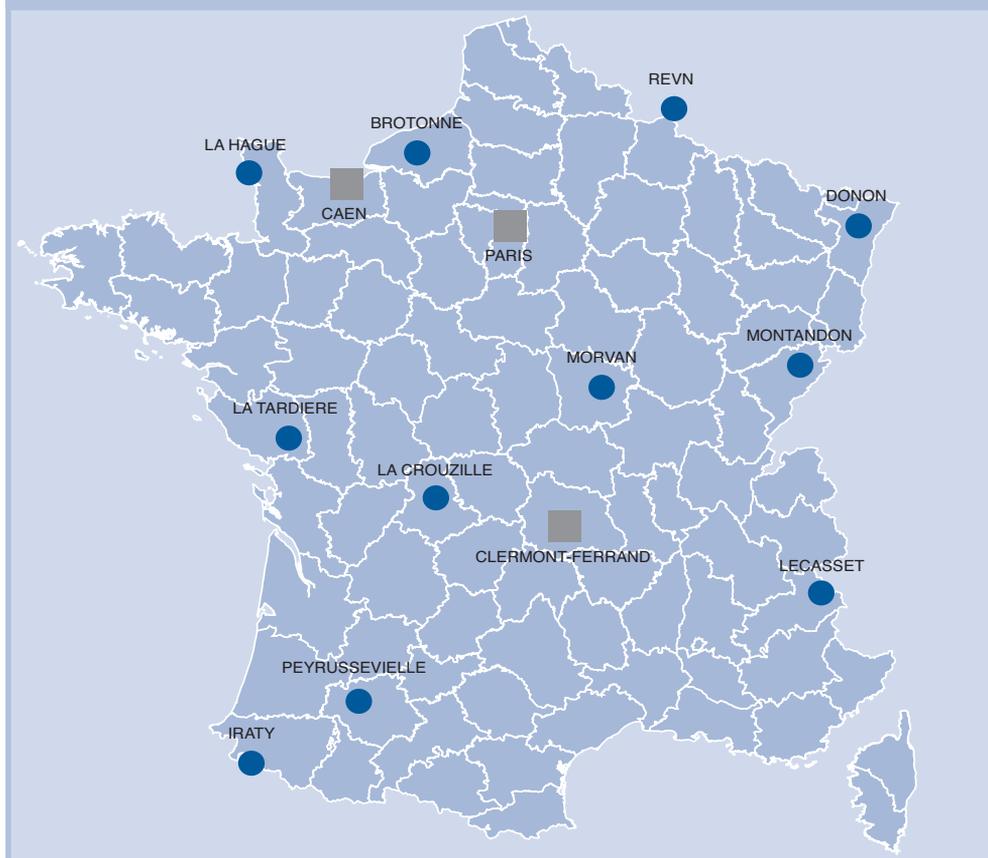


Figure 30 : Clermont-Ferrand : comparaison entre concentrations en particules mesurées et modélisées

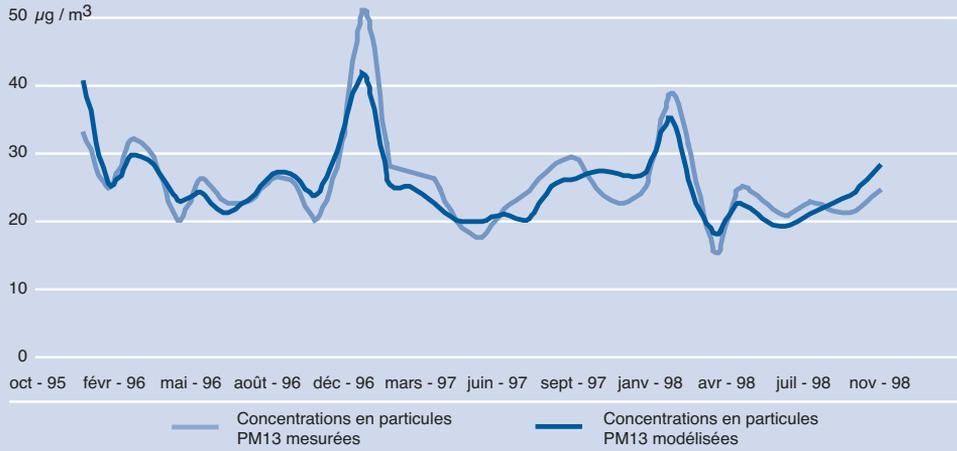


Figure 31 : Clermont-Ferrand : contribution des émissions locales et de la pollution de fond aux concentrations en particules

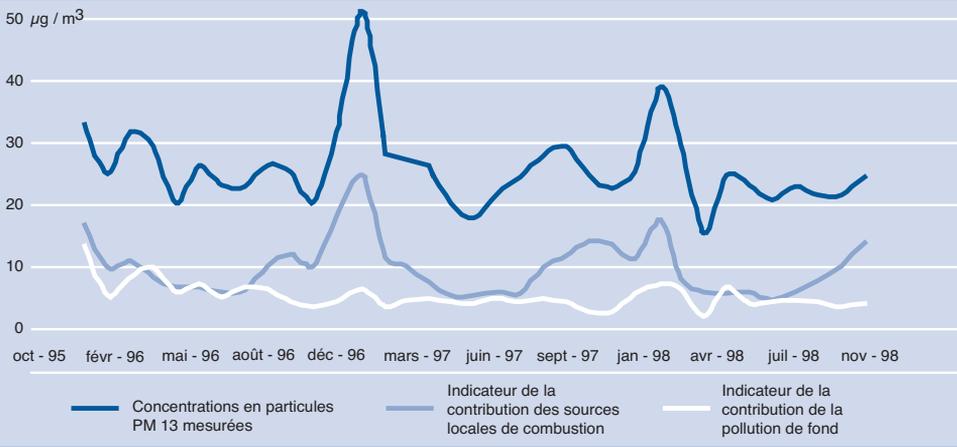
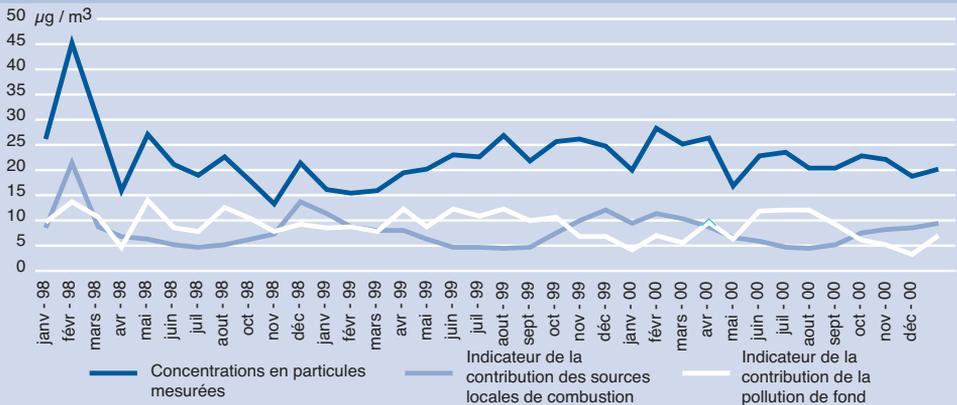


Figure 32 : Paris 12^{ème} : contribution des émissions locales et de la pollution de fond aux concentrations en particules



Conclusion

Malgré les incertitudes que nous avons souligné concernant les inventaires, la prospective ou l'impact des émissions sur les concentrations urbaines, cette étude a mis en relief à la fois certains besoins d'études et de recherche pour la réduction de ces incertitudes mais également un certain nombre de faits qui peuvent déjà nourrir la réflexion préalable à la prise de décision.

Deux groupes de secteurs apparaissent à l'issue de cette étude :

- Le premier comprend la combustion du bois dans le secteur résidentiel, l'agriculture, le BTP, et les émissions diffuses du transport routier. Ses émissions se révèlent majoritaires, et il n'a pas fait jusqu'à maintenant l'objet de mesures spécifiques qui permettraient d'entrevoir des réductions importantes à l'avenir. L'attention doit être maintenant portée en priorité sur ces secteurs afin d'une part de lever les incertitudes aujourd'hui importantes sur leurs émissions, et d'autre part concevoir et prendre des mesures pour réduire leurs émissions.
- Le second comprend l'industrie et les émissions à l'échappement des transports routiers : il a jusqu'à maintenant focalisé l'attention mais ses émissions sont minoritaires et connaissent une décroissance significative aux horizons 2020 et 2030.

Au nombre des enseignements sur des besoins en termes de recherches ultérieures pour réduire les incertitudes on pourra ranger les points suivants :

- Des campagnes de mesures seraient très utiles pour préciser les facteurs d'émission de particules par les chantiers de construction, et par les activités agricoles comme le travail des cultures. Il s'agit en effet de deux des sources les plus importantes au niveau national, et qui sont paradoxalement les moins bien connues.
- Il faudrait améliorer la connaissance sur l'état de l'emploi dans l'industrie des techniques de réduction des émissions de particules, et leurs perspectives. En effet on a pu constater dans ce domaine un déficit de connaissance qui contraste avec d'autres secteurs comme celui des transports routiers, pour lequel on dispose d'une capacité à formuler des hypothèses fines et ambitieuses sur les capacités futures de réduction des émissions.

Ce besoin d'amélioration est également valable pour d'autres secteurs comme le bâtiment et l'agriculture.

- Concernant les transports routiers, il serait intéressant d'examiner la sensibilité des résultats de la prospective aux hypothèses fortes qui ont été faites sur la généralisation de l'emploi des filtres à particules (ou équivalent) pour l'ensemble des véhicules diesel. Il faudrait évaluer le potentiel d'autres filières comme les véhicules hybrides, ou la pile à combustible, dont un développement significatif est envisageable à l'horizon 2030, vis-à-vis de la réduction des émissions de particules. En effet, ces filières ont également des avantages en termes de lutte contre le changement climatique. Pour les véhicules lourds et les engins non-routiers, il serait également intéressant d'examiner si le retrofitting en filtres à particules des véhicules actuellement en service permettrait de réduire sensiblement plus rapidement les émissions de ce secteur.
- Les sources naturelles devraient faire l'objet d'investigations permettant de connaître leur contribution aux émissions pour les différentes classes granulométriques.
- Une meilleure connaissance de l'origine des particules auxquelles est exposée la population suppose un effort de mesure des particules PM_{2.5} sur le territoire.

Quelques faits marquants, déjà porteurs d'information, sont également apparus au cours de cette étude :

- La très grande importance, encore non documentée il y a peu de temps, de la combustion du bois dans le secteur résidentiel, des chantiers de construction et de l'agriculture (principalement le labourage) en termes d'émissions nationales.
- Pour les chantiers de construction et le labourage, cette importance s'estompe très nettement pour les particules plus fines (d'un diamètre inférieur à 10 µm pour l'agriculture, inférieur à 2.5 µm pour la construction)
- Par contre, l'importance relative de la combustion du bois dans le secteur résidentiel est croissante lorsqu'on considère des particules de plus en plus fines, ce qui devrait en faire un des secteurs prioritaires en termes de réduction des émissions.
- Le transport routier est une des sources principales de particules, surtout pour les particules fines. Au sein du transport routier, ces émissions sont dues quasi-exclusivement aux émissions à l'échappement des véhicules diesel, à l'usure des routes, et des pneus et plaquettes de freins de l'ensemble des véhicules. La prospective met en lumière le fait qu'à terme, les émissions liées à l'échappement pourraient devenir minoritaires par rapport aux émissions liées à l'usure des routes, des pneus, plaquettes de freins et embrayages des véhicules. Pour ces émissions diffuses, deux voies d'action sont envisageables : les mesures techniques de réduction, et la maîtrise des distances parcourues. Concernant les mesures techniques, les solutions viables ne sont pas encore pressenties, et un effort de recherche devrait être mené dans les prochaines années.
- En termes d'exposition de la population urbaine aux particules PM10, une importance comparable semble devoir être attribuée en première approche aux sources locales (chauffage urbain, transports routiers,...), et à la pollution régionale.

T I : Secteurs pris en compte dans l'étude

Combustion – sources fixes

Production d'électricité
Chauffage urbain
Raffinage du pétrole
Transformation des combustibles minéraux solides
Extraction gaz/pétrole; station de compression
Commercial et institutionnel
Résidentiel
Agriculture, sylviculture et aquaculture
Industrie

Procédés industriels

Sidérurgie
Production de plâtre
Production de plomb et zinc (1ère et 2e fusion)
Production de cuivre (1ère et 2e fusion)
Production d'aluminium (1ère et 2e fusion)
Production de ciment et chaux
Production de produits de recouvrement des routes et activité de recouvrement
Production de verre
Production de tuiles et briques et de céramiques fines
Production de magnésium
Production de nickel
Production de sulfate d'ammonium
Production de nitrate d'ammonium
Production d'acide sulfurique
Production d'engrais NPK
Production d'urée
Production de noir de carbone
Production de dioxyde de titane
Production d'acide adipique
Production de polychlorure de vinyle
Production de polypropylène
Production d'anhydride phtalique
Production de panneaux agglomérés
Production de pâte à papier
Production de bière
Fabrication de sucre et de farine
Travail du bois
Fabrication de produits explosifs
Manutention de céréales
Fumage de viande
BTP
Fabrication, manutention et stockage de charbon de bois
Exploitation des carrières

Extraction et 1er traitement**des combustibles minéraux solides**

Mines
Stockage des combustibles solides

Utilisations de solvants et autres produits

Mise en œuvre de polyester
Fabrication de savons et détergents
Utilisation de feux d'artifice
Usure des chaussures
Utilisation de tabac

Transport routier

Emissions à l'échappement
Emissions hors échappement (pneus, embrayage, et plaquettes de freins)
Usure des routes

Combustion – sources mobiles**autres que transport routier**

Transport aérien
Autres transports : ferroviaire, maritime, fluviale, machinerie (tous secteurs)

Traitement et élimination des déchets

Incineration d'ordures ménagères
Incineration des déchets industriels, des boues d'épuration et des déchets hospitaliers
Feux ouverts de déchets agricoles
Incineration de cadavres

Agriculture

Elevage de cochons, poulets, autres volailles, moutons, chevaux, vaches laitières et autres bovins, caprins, ânes et mulets.
Labourage
Moissonnage
Séchage de céréales et du fourrage

Nature

Feux de forêts

T II : Emissions de TSP en kt

Intitulés	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Ecart 1990-2000 (en %)
Combustion - industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie	18.6	21.7	19.7	15.9	15.3	15.8	17.6	16.0	18.9	17.4	17.1	-8.1
Combustion hors industrie (bois secteur résidentiel)	148.5	178.6	166.1	159.5	133.0	135.0	143.2	126.5	131.3	125.3	117.4	-20.9
Combustion - industrie manufacturière	45.7	46.0	39.1	33.8	38.6	33.6	34.5	33.4	32.6	30.4	29.4	-35.7
Procédés de production	656.3	650.4	580.7	543.3	542.4	532.6	589.5	598.0	615.6	636.1	622.6	-5.1
Dont BTP	465.0	465.0	401.0	374.0	369.0	358.0	421.0	424.0	439.0	456.0	424.0	
Extraction et distribution de combustibles fossiles	38.6	36.4	33.2	30.8	26.9	25.3	24.4	20.5	16.8	15.3	10.4	-73.1
Utilisation de solvants et autres produits	3.6	3.6	3.6	3.5	3.7	3.7	3.7	3.8	3.9	3.8	3.7	2.8
Transport routier	230.1	240.6	251.9	253.8	255.9	257.3	259.1	258.8	259.6	260.5	257.5	11.9
Autres sources mobiles et machinerie	21.6	21.5	20.4	18.9	18.7	19.7	19.8	19.6	19.1	19.7	18.5	-16.8
Traitement et élimination des déchets	24.9	26.2	25.7	24.4	24.5	24.6	26.6	27.6	28.9	28.3	27.2	9.2
Dont incinération	4.6	4.7	4.9	5.0	5.1	5.0	5.0	4.8	4.8	4.9	4.9	
Agriculture	510.0	510.9	512.0	478.7	474.4	479.6	492.8	508.9	512.1	504.2	502.4	-1.5
Dont labourage	455.0	453.0	449.0	415.0	413.0	420.0	433.0	447.0	447.0	449.0	442.0	
Autres (y compris la nature)	99.5	16.5	21.5	24.2	23.3	34.2	30	39.7	34.7	17.4	29	-70.9
Total	1797.0	1753.0	1674.0	1587.0	1557.0	1561.0	1641.0	1653.0	1673.0	1659.0	1635.0	-9.0

T III : Emissions de PM10 en kt

Intitulés	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Ecart 1990-2000 (en %)
Combustion - industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie	13.0	15.5	14.0	11.0	10.4	11.8	12.2	11.0	13.4	12.1	12.0	-7.7
Combustion hors industrie (bois secteur résidentiel)	136.9	165.5	153.5	148.6	124.0	125.4	133.3	118.1	122.7	117.1	109.8	-19.8
Combustion - industrie manufacturière	33.3	33.4	28.3	24.6	27.6	24.3	24.9	24.1	23.7	22.1	21.3	-36.0
Procédés de production	147.4	144.9	132.4	123.6	123.0	111.8	129.3	132.2	135.6	139.3	137.6	-6.6
Dont BTP	72.0	72.0	62.0	58.0	57.0	55.0	65.0	66.0	68.0	71.0	66.0	
Extraction et distribution de combustibles fossiles	38.5	36.4	33.2	30.8	26.9	25.3	24.4	20.5	16.8	15.3	10.4	-73.0
Utilisation de solvants et autres produits	1.8	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	11.1
Transport routier	111.4	119.0	125.4	127.3	127.3	127.7	131.1	124.7	123.1	120.2	116.5	4.6
Autres sources mobiles et machinerie	20.6	20.5	19.4	18.1	17.8	18.7	19.0	18.7	18.5	18.8	17.6	-14.6
Traitement et élimination des déchets	18.4	19.4	19.1	18.4	18.3	18.4	19.8	20.5	21.4	21.0	20.3	10.3
Dont incinération	4.2	4.3	4.5	4.8	4.8	4.7	4.7	4.5	4.5	4.6	4.6	
Agriculture	119.6	120.5	121.8	123.2	113.7	114.5	117.2	121.2	122.0	120.2	120.0	0.3
Dont labourage	96.0	95.0	94.0	87.0	87.0	88.0	91.0	94.0	94.0	93.0	92.0	
Autres (y compris la nature)	65.8	10.9	14.2	16.0	15.4	22.6	19.8	26.3	23.0	11.5	19.2	-70.8
Total	707.0	688.0	663.0	643.0	606.0	602.0	633.0	619.0	622.0	600.0	587.0	-17.0

T IV : Emissions de PM2.5 en kt

Intitulés	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Ecart 1990-2000 (en %)
Combustion - industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie	7.3	8.5	7.7	6.2	5.8	6.6	6.8	6.2	7.4	6.6	6.6	-9.6
Combustion hors industrie (bois résidentiel)	128.1	155.7	143.8	138.8	115.5	116.4	123.8	109.7	114.2	108.9	102.3	-20.1
Combustion - industrie manufacturière	20.3	20.2	17.4	15.1	16.6	14.4	14.8	14.5	14.3	13.3	12.9	-36.5
Procédés de production	44.4	41.9	36.3	32.4	31.1	30.8	34	35.2	36.3	36.9	36.6	-17.6
Dont BTP	25	25	21	20	20	19	22	22	23	24	22	
Extraction et distribution de combustibles fossiles	32.5	30.7	28	25.9	22.7	2.1	20.5	17.2	14.2	12.9	8.8	-72.9
Utilisation de solvants et autres produits	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0
Transport routier	78.9	85.9	90.3	92.2	91.7	92	91.6	97.4	86.4	83.1	79.6	0.9
Autres sources mobiles et machinerie	19.5	19.3	18.3	17.1	16.8	17.7	18	17.7	17.2	17.9	16.6	-14.9
Traitement et élimination des déchets	12.4	13.1	12.6	11.8	11.7	11.8	13	13.7	14.5	14.1	13.5	8.9
Dont incinération	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.09	0.07	0.08	0.08	0.07	
Agriculture	28.1	28.7	29.8	28.4	27.7	27.5	27.7	28.9	29.1	28.8	28.9	2.8
Dont labourage	19	19	19	17	17	18	18	19	19	19	18.5	
Autres (y compris la nature)	60.7	10.1	13.1	14.8	14.2	20.9	18.3	24.2	21.2	10.6	17.7	-70.8
Total	432	414	397	383	354	340	369	365	355	334	324	-25

TV : Emissions de PM1.0 en kt

Intitulés	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Ecart 1990-2000 (en %)
Combustion - industries de l'énergie et de la transformation de l'énergie	4.0	4.7	4.6	3.5	3.3	3.7	4.0	3.5	4.1	3.7	3.7	-7.5
Combustion hors industrie	125.7	153.0	141.2	137.5	114.5	115.4	122.8	108.8	113.3	108.0	101.0	-19.6
Combustion - industrie manufacturière	13.0	12.9	10.9	9.2	9.1	8.6	8.9	8.7	8.5	7.9	7.5	-42.3
Procédés de production	28.3	26.4	22.9	20.3	19.4	19.4	21.3	22.4	23.1	23.4	23.5	-17.0
Dont BTP	1.6								1.5	1.6		
Extraction et distribution de combustibles fossiles	26.7	25.2	23.0	21.3	18.6	17.5	16.9	14.2	11.6	10.6	7.2	-73.0
Utilisation de solvants et autres produits	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
Transport routier	50.5	55.8	59.6	61.6	60.7	60.8	60.3	56.6	54.4	50.8	47.3	-6.3
Autres sources mobiles et machinerie	17.2	17.1	16.2	15.1	14.9	15.9	16.1	15.9	15.5	16.0	14.9	-13.4
Traitement et élimination des déchets	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-50.0
Agriculture	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Autres (y compris la nature)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	266.0	296.0	279.0	269.0	241.0	242.0	251.0	230.0	231.0	221.0	206.0	-22.6

T VI : Scénarios d'émissions de particules - S1 & S3

	1998 calage	2020 S1	2030 S1	2020 S3	2030 S3
Combustion industrie de l'énergie et de la transformation de l'énergie	18,0	6,6	4,6	5,1	3,2
raffinage	5,1	2,3	1,6	1,7	1,0
autres	3,7	2,2	1,8	1,7	1,2
production électrique	9,3	2,0	1,2	1,8	1,0
Combustion hors énergie	144,6	149,8	152,5	127,2	118,4
agriculture	1,7	1,5	1,5	1,3	1,3
tertiaire	16,7	8,7	5,7	6,4	3,8
bois résid.	126,3	139,7	145,3	119,4	113,3
Combustion industrie manufacturière	32,3	16,7	13,6	12,2	8,6
chaudières, moteurs, turbines	14,2	4,6	3,3	3,8	2,3
procédés énerg. avec contact	18,1	12,1	10,3	8,4	6,3
Procédés de production	586,3	602,3	597,6	574,0	559,4
indus. Pétrolière / raffinage	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6
sidérurgie	27,6	21,6	19,6	17,8	14,8
travail du bois	85,4	82,3	80,9	65,7	58,4
BTP	426,7	454,0	453,1	454,0	453,1
autres	45,7	43,6	43,2	35,8	32,5
Extraction et distribution de combustibles fossiles	16,8	0,3	0,0	0,2	0,0
Transports routiers	262,8	316,5	366,4	276,9	305,8
échappement	68,1	5,6	3,3	4,5	2,6
Emissions diffuses	194,7	310,9	363,1	272,5	303,2
Autres sources mobiles et machinerie	19,1	4,3	2,0	4,0	2,0
train	1,1	0,8	0,6	0,9	0,8
fluvial	4,9	0,8	0,2	0,8	0,2
aérien	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
engins spéciaux	12,4	2,1	0,6	1,7	0,4
Traitement et élimination déchets	28,9	20,8	17,1	12,1	7,4
feux ouverts déchets agricoles	24,1	18,0	15,2	10,3	6,5
incinération déchets UIOM	4,8	2,8	1,9	1,8	1,0
Agriculture	512,1	520,6	525,0	520,6	525,0
labourage terres arables	472,1	472,1	472,1	472,1	472,1
composés organ. déjections animales	40,0	48,5	53,0	48,5	53,0
Autres (feux de forêts)	34,7	32,9	32,1	32,9	32,1
TOTAL	1655,6	1670,8	1711,0	1565,4	1562,0

T VII : Scénarios d'émissions avec baisse d'activité du BTP et filtres pour le bois résidentiel

	1998 calage	2020 S1	2030 S1	2020 S3	2030 S3
Combustion industrie de l'énergie et de la transformation de l'énergie	18,0	6,6	4,6	5,1	3,2
raffinage	5,1	2,3	1,6	1,7	1,0
autres	3,7	2,2	1,8	1,7	1,2
production électrique	9,3	2,0	1,2	1,8	1,0
Combustion hors énergie	144,6	47,2	28,3	39,4	21,6
agriculture	1,7	1,5	1,5	1,3	1,3
tertiaire	16,7	8,7	5,7	6,4	3,8
bois résid.	126,3	37,0	21,1	31,7	16,4
Combustion industrie manufacturière	32,3	16,7	13,6	12,2	8,6
chaudières, moteurs, turbines	14,2	4,6	3,3	3,8	2,3
procédés énerg. avec contact	18,1	12,1	10,3	8,4	6,3
Procédés de production	586,3	378,4	313,8	350,7	275,6
indus. Pétrolière / raffinage	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6
sidérurgie	27,6	21,6	19,6	17,8	14,8
travail du bois	85,4	82,3	80,9	65,7	58,4
BTP	426,7	230,7	169,3	230,7	169,3
autres	45,7	43,6	43,2	35,8	32,5
Extraction et distribution de combustibles fossiles	16,8	0,3	0,0	0,2	0,0
Transports routiers	262,8	316,5	366,4	276,9	305,8
échappement	68,1	5,6	3,3	4,5	2,6
Emissions diffuses	194,7	310,9	363,1	272,5	303,2
Autres sources mobiles et machinerie	19,1	4,3	2,0	4,0	2,0
train	1,1	0,8	0,6	0,9	0,8
fluvial	4,9	0,8	0,2	0,8	0,2
aérien	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
engins spéciaux	12,4	2,1	0,6	1,7	0,4
Traitement et élimination déchets	28,9	20,8	17,1	12,1	7,4
feux ouverts déchets agricoles	24,1	18,0	15,2	10,3	6,5
incinération déchets UIOM	4,8	2,8	1,9	1,8	1,0
Agriculture	512,1	520,6	525,0	520,6	525,0
labourage terres arables	472,1	472,1	472,1	472,1	472,1
composés organ. déjections animales	40,0	48,5	53,0	48,5	53,0
Autres (feux de forêts)	34,7	32,9	32,1	32,9	32,1
TOTAL	1655,6	1 344,9	1 302,9	1 254,3	1 181,3

Quelques Références

- [1] CITEPA - Août 2000
«Développement d'un inventaire des émissions de poussières, 2e étape - Rapport final».
- [2] CITEPA - Juillet 2000
Etude sur les méthodes d'évaluation des quantités émises de particules fines (PM10 et inférieures) primaires et secondaires pour tous les secteurs d'activité en vue des inventaires »,
- [3] TNO - R 96/472 - February 1997
«Particulate matter emissions (PM10 - PM2.5 - PM0.1) in Europe in 1990 and 1993». CEPMEIP - 2001
Co-ordinate European Programme on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and guidance (CEPMEIP) : «Preliminary results of the CEPMEIP Programme»- TNO Delft, Netherlands. Base de données disponible sur le site <http://www.mep.tno.nl/emissions>
- [4] IIASA - 2001
"A framework to estimate the potential and costs for the control of fine particulate emissions in Europe", Interim Report IR-01-023.
- [5] CITEPA - Décembre 2001
«CLIP - Evaluation des émissions actuelles de particules primaires en France».
- [6] CONCAWE - report no. 98/51 - February 1998
«A study of the number size & mass of exhaust particles emitted from european diesel and gasoline vehicles under steady-state and european driving cycle conditions».
- [7] CBS - 1998
Methodiekbeschrijving van de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland, In het kader van het Emissiejaarrapport.
- [8] Commissariat Général au Plan - Septembre 1998
Energie 2010-2020 : trois scénarios énergétique pour la France
- [9] ATEE - Juin 2000
«Risques et maîtrise des émissions de poussières et de particules» - Recueil des exposés des journées ATTE des 15 et 16 juin 2000
- [10] ECODEV & al. - Novembre 2000
Le secteur des transports à l'horizon 2030 selon le scénario S3 du CGP : analyse des mesures à mettre en place, effets sur les émissions de CO₂, coûts et acceptabilité sociale - ECODEV, INESTENE & CURAPP-CNRS
- [11] INRETS - Octobre 1997
Prospective énergie - transports aux horizons 2010 & 2020 -
- [12] PSA - 2001
Environnement et automobile ; rapport 2001
- [13] Renault - 2001
Rapport Développement Durable ; rapport 2001
- [14] GALLEZ - 1994
C. Gallez, « Modèles de projection à long terme de la structure du par cet du marché de l'automobile », Thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université Paris I, 1994
- [15] Stedman et al.- 2001
Receptor modelling of PM10 concentrations at a UK national network monitoring site in central London, Atmos. Env't. (35) 297-304, 2001
- [16] Agence Européenne de l'Environnement, 2001
De Leeuw et al., Air Quality in larger cities in the European Union, a contribution to the Auto-Oil II program, EEA Topic Report 3/2001, Février 2001

Notes

- 1 Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10µm
- 2 Particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5µm
- 3 Ces effets sont variés (effets sur les écosystèmes, impact sur les cultures, impact sur la visibilité,...) et dépendent étroitement des éventuels constituants chimiques associés aux particules (métaux, HAP,...).
- 4 Analyses et Statistiques, Edition 2002, Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
- 5 En effet, dans la rubrique « Procédés de production », en moyenne sur la période 1990-2000, le BTP représente 22kt de PM25 sur un total de 371 kt, soit 6%.
- 6 Pour les PM_{1,0} toutefois, les sources agricoles ne sont pas évaluées, et certaines sources anthropiques ne sont pas prises en compte. Il est vraisemblable que la contribution relative des sources agricoles pour cette classe granulométrique ne soit pas supérieure à sa contribution en terme de PM_{2,5}. Toujours dans le cas des PM_{1,0}, les émissions diffuses du transport routier ne sont pas prises en compte, du fait de l'absence de données.
- 7 Les coefficients de corrélation entre concentrations mesurées et calculées par ces modèles - excepté Londres- se situent, selon les cas, entre 0.67 et 0.88.
- 8 Remerciements à Patrice Coddeville, de l'Ecole des Mines de Douai, pour la communication de l'ensemble des données du réseau MERA ayant été utilisées dans le cadre de ce travail.

Numéros précédents

N°1 - Octobre 1993 - 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 - 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 - 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 - épuisé

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

N°5 - Juillet 1996

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

N°6 - Septembre 1996

Le bois-électricité : Perspectives de développement de la production d'électricité à base de bois en France à l'horizon 2015

Pollution des sols : Contamination des sols par les rejets d'hydrocarbures : analyse du marché de la réhabilitation

N°7 - Janvier 1997

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

N°8 - Janvier 1998 - anglais/français - 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

Biomasse et électricité
Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 - disponible

Le froid domestique : étiquetage et efficacité énergétique

N°12 - Mars 2001 - disponible

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

N°13 - Avril 2001 - disponible

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

N°14 - Octobre 2001 - disponible

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

N°15 - Janvier 2004 - disponible

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

Format électronique (pdf) - **disponible sur le site www.iddri.org**

Pour toute demande d'exemplaire ou renseignement, veuillez contacter : Carine Barbier - IDDRI : carine.barbier@iddri.org