

Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050

Olivier Teissier, Laurent Meunier (CGDD/SEEIDD)

Comment réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre (GES) en France à l'horizon de 2050 ? L'objet de l'étude¹ est de s'assurer que les mesures aujourd'hui envisageables et réalistes d'un point de vue technico-économique permettent de diviser par 3 ou 4 les émissions d'ici à 2050 ; il n'est pas de trouver le chemin optimal pour atteindre cet objectif, ni d'identifier les instruments précis des politiques publiques. L'approche consiste à sélectionner les mesures ou les leviers d'action ayant de forts potentiels de réduction, à en simuler l'impact et à le comparer à un scénario dit « tendanciel ». Elle concerne les secteurs des transports et du bâtiment (tertiaire et résidentiel) qui émettent à eux seuls la moitié des GES et sont les seuls à avoir augmenté leurs émissions depuis 1990.

Avec les mesures sélectionnées, le facteur de réduction serait de 3,7 dans les transports et de 3,6 dans les bâtiments. Le « Facteur 4 »² est ambitieux et nécessite une action vigoureuse et de long terme. Le coût en serait élevé surtout dans les transports où la tonne de CO₂ évité ressort à 300 € en 2020 et à 800 € en 2050. Pour les bâtiments, le coût net serait négatif, les investissements de rénovation étant amortis par les économies d'énergie. Les mesures « bâtiment » seraient donc à mobiliser en priorité du point de vue économique.

Dans cette étude sont simulées différentes mesures de politique environnementale dans les transports et le bâtiment à l'échelle de la France. Dans un premier temps, les mesures pouvant entraîner une diminution des émissions de GES ont été passées en revue puis leur potentiel de réduction des émissions et leur coût de mise en œuvre expertisés. Elles ont ensuite été hiérarchisées afin de ne retenir que celles dont le gisement de réduction d'émissions est significatif et exploitable (économiquement et techniquement). Dans un second temps, l'impact des actions ainsi sélectionnées a été simulé à l'aide de différents modèles adaptés aux secteurs et périodes temporelles ; les résultats obtenus sont comparés à ceux du scénario tendanciel calibré préalablement, et à un scénario « facteur 4 ».

Les résultats sont très sensibles aux hypothèses retenues. Dans le secteur bâtiment en particulier, les hypothèses sont optimistes, notamment celles relatives aux coûts de rénovation et à l'évolution des prix des énergies. Dans les transports, les mesures incitatives requises pour rendre effectives les actions à partir de 2020 ne sont pas identifiées.

Deux approches successives dans le secteur des transports

La simulation est effectuée sur deux périodes successives, 2008-2020 et 2020-2050, en utilisant deux approches différentes (*encadré 1*).

¹ Étude réalisée par le groupement Axenne-TML-Ecofys « Scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 » pour le compte du Meeddat, référence 1.

² L'objectif facteur 4 est le rapport entre les émissions de GES en 1990 et celles de 2050 qui devront être divisées par 4 au cours de la période.

Le cadre de la modélisation dans le secteur des transports

Le scénario tendanciel est calibré à partir des scénarios prospectifs du CGPC (*figure 1* et référence 2). Les volumes de transport sont empruntés au scénario prospectif 3 : la croissance du transport est de 1,3 %/an en moyenne pour les marchandises et de 1,04 % pour les passagers terrestres, avec un PIB qui croît de 2 %/an. Pour les émissions unitaires des véhicules particuliers, c'est le scénario 2 qui est retenu qui prévoit une décroissance lente des émissions, pour atteindre 120 gCO₂/km en moyenne pour le parc en 2050 (à partir de 2020 où les émissions moyennes des véhicules neufs sont fixées à 130 g CO₂/km, les émissions unitaires décroissent de manière linéaire de telle sorte que la moyenne du parc soit de 120 gCO₂/km en 2050). Les hypothèses sont hautes quant au volume de transport, basses quant au progrès technique et à la réduction des émissions unitaires.

Figure 1 - Scénarios « Transports en France en 2050 » du CGPC

	2002	2050			
		Scénario 1 Industrie environnementale	Scénario 2 Déclin européen	Scénario 3 Grande Europe	Scénario 4 Régionalisation
Circulations					
Voitures particulières (en Md véh.km)	401	649	487	724	669
Poids lourds (en Md t.km)	257	444	285	413	398
Consommation énergie (en Mtep)	54	44	47	63	48
Emissions de CO₂ (en Mt)	163	62	132	150	98

Source : CGPC « Les avenir possibles des transports en 2050 », 2006 (référence 3)

Pour évaluer les effets des mesures, le modèle de simulation Tremove³ est utilisé pour la période 2008-2020. À partir d'hypothèses de croissances économique et démographique, la demande globale de service de transport est déterminée à travers une optimisation des comportements des consommateurs et des producteurs, en fonction des mesures appliquées. Le modèle est basé sur des élasticités de demande de transport conformes aux valeurs usuelles (*figure 2*). La plupart des nouvelles infrastructures actuellement en projet sont supposées réalisées conformément au calendrier des-dits projets⁴. De cette demande de transports⁵ découle un stock de véhicules nécessaires. Pour les véhicules particuliers, la demande est déterminée par un modèle de choix discret (de type logit). À partir de là, sont calculées la consommation de carburant et les émissions qui en résultent, en utilisant les équations du modèle COPERT IV⁶. Parallèlement, sont aussi calculées les émissions indirectes liées à la production et au transport des carburants. Dans un dernier module, sont évalués les coûts et les variations de bien-être des entreprises, des ménages et social.

Figure 2 - Élasticités prix de la demande, selon le mode de transport

Mode	Déplacement professionnel		Déplacement de loisir	
	Littérature	Tremove	Littérature	Tremove
Voiture	-0.06 ; -0.22	-0.11 ; -1,0	-0.10 ; -0.38	-0.10 ; -1.06
Bus	-0.30	-0.40 ; -1.80	-0.30 ; -0.60	-0.34 ; -1.43
Train	-0.50 ; -0.70	-0.81 ; -1.97	-0.30 ; -1.60	-0.16 ; -1.86
Avion	-0.36 ; -1.81	-0.92 ; -2,0	-0.4 ; -1.98	-0.94 ; -2,0

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

Commentaire : Les ordres de grandeur du modèle et de la littérature (référence 1) sont comparables et le jeu d'élasticités de Tremove est conforme aux valeurs usuelles. Dans le cas du modèle, il s'agit de l'élasticité au coût généralisé du transport (incluant donc le coût en temps), tandis que dans la littérature, il s'agit en général de l'élasticité au coût du transport hors coût du temps. Ainsi, une même variation de prix en absolu (Δp) apparaîtra inférieure en terme relatif si le coût du temps est inclus. Pour une même variation de quantité ($\Delta Q/Q$), l'élasticité sera en conséquence plus élevée lorsque le coût du temps est inclus dans le coût total. Or, le coût en temps de la circulation (tous réseaux) représente 80 % du coût généralisé en France en 2005⁷. Ainsi, pour comparer les élasticités dérivées du modèle et celles de la littérature, il faut diviser les premières par 5.

³ Développé par l'université de Louvain pour la Commission européenne, cet outil modélise l'ensemble des transports en Europe.

⁴ Les volumes de transports au niveau européen sont déterminés à partir des données du CIADT du 18 décembre 2003 (référence 7).

⁵ Le trafic aérien intérieur est exclu de l'analyse, au motif qu'il ne compte en 1990 que pour 4 % des émissions de GES. Il devrait être intégré à partir de 2011 dans le système européen de permis d'émission des GES, l'Emission Trading Scheme, ETS. Pour une description complète de ce mécanisme, le lecteur peut se reporter à l'article d'Aurélien Vieillefosse « Permis d'émission de gaz à effet de serre, fonctionnement du système européen », Notes de synthèse du SESP, n° 166, septembre 2007.

⁶ Modèle de référence en Europe quant au calcul des émissions liées au transport.

⁷ Calcul effectué à partir de la valeur du temps donné dans le rapport « Boiteux II » (référence 5) et des vitesses moyennes et kilométrages moyens observés.

À partir de 2020, les comportements ne sont plus modélisés. L'approche est différente et moins fine, elle consiste en l'étude de scénarios possibles d'évolution. Trois scénarios sont envisagés, se distinguant par leur degré de volontarisme quant à l'inflexion de la tendance. Sont considérés les scénarios dits conservateur, intermédiaire et volontariste. Dans le premier, le progrès technique est l'unique canal de réduction des émissions de CO₂. À l'opposé, le scénario volontariste prend en compte les changements radicaux de comportement de la société dans son ensemble. Le deuxième scénario se trouve à mi-chemin entre ces deux alternatives. Les principaux paramètres de calibrage des actions sont déterminés en fonction des scénarios envisagés.

Les mesures « transport » envisagées sur la période 2008-2020

Les trois principaux leviers de réduction des émissions identifiés sur la période 2008-2020 sont l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules, le développement de carburants alternatifs et la maîtrise de la demande, comportant chacun une ou plusieurs mesures retenues⁸ pour la simulation (figure 3).

Figure 3 - Leviers et actions simulés dans les transports entre 2008 et 2020

Leviers	Actions	
Efficacité énergétique	1	VP : 120 gCO ₂ /km (130 g en tendance)
		VUL : 144 gCO ₂ /km
		PL : 529 gCO ₂ /km
Maîtrise de la demande	2	Péage généralisé
	3	TIPP : + 100 %
	4	Subventions au transport public : + 25 %
Carburants alternatifs	5	Part d'agrocarburants : 10 %

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

Les niveaux des émissions sont ceux de la moyenne des véhicules neufs, à l'horizon 2020 ; les progrès de l'efficacité énergétique pourraient être obtenus à l'aide de mesures réglementaires ou d'efforts de recherche et développement. Le péage généralisé⁹ viserait à faire payer à chaque véhicule tous les coûts externes qu'il engendre. Son prix tiendrait compte des externalités environnementales et serait modulé en fonction du type de véhicule, du type de réseau emprunté, ainsi que des date, heure et lieu de passage. La troisième action consiste à doubler la TIPP en 2010 ; la quatrième à augmenter de 25 % les subventions au transport public en 2010, afin de rendre ce dernier plus attractif que les modes de transports individuels. La mesure 5 consiste en une pénétration accrue des agrocarburants, dont la part dans le mix énergétique des véhicules routiers s'élèverait de 3 points, passant de 7 à 10 % en 2020.

Faible réduction des émissions des transports d'ici 2020

À l'horizon 2020, il apparaît extrêmement difficile de réduire les émissions de manière significative. La combinaison des mesures entraîne une diminution de 4 % par rapport à 1990¹⁰, ce qui est loin de l'objectif facteur 4 d'ici à 2050 (figures 4 et 5). Les mesures permettant les réductions les plus importantes sont celles portant sur l'efficacité énergétique et la hausse de TIPP : à elles seules, ces deux actions permettent de réaliser les trois quarts de la baisse des émissions.

⁸ Le choix des mesures ne résulte d'aucun calcul d'optimisation interne au modèle. Ces mesures, évaluées préalablement, sont choisies de manière complètement exogène. Il s'agit donc d'un pur exercice de *simulation* de ces mesures, en aucun cas de leur optimisation. Il ne s'agit pas toujours directement de mesures de politique énergétique (par exemple efficacité énergétique).

⁹ La circulation routière génère des coûts (ex : usage de l'infrastructure) et des nuisances (ex : pollution, bruit) qui ne sont pas toujours payés par l'utilisateur qui en est à l'origine. Un péage généralisé serait un péage mis en place sur chaque portion de route homogène, et qui dépendrait du moment de la circulation (plus cher aux heures de pointe). Outre la question de son acceptabilité sociale, la mise en oeuvre pose des problèmes sur le plan pratique. En particulier, le coût d'administration d'un tel système pourrait être très élevé. Il n'est pas pris en compte dans l'analyse.

¹⁰ Contre une hausse tendancielle annuelle de 6,6 %, faisant passer les émissions de 121 Mt CO₂ en 1990 à 129 Mt en 2020.

Toutefois, la mise en place d'actions visant à réduire les émissions de CO₂ génèrent un coût, mesuré par la variation de bien-être. Ce dernier agrège plusieurs effets. Il est composé : du surplus du consommateur (lié directement à la quantité de transport consommée), du gain environnemental, du gain pécuniaire (lié au coût du transport), du gain en temps (lié à la diminution du trafic) et du surplus du producteur (lié à la quantité de transport de marchandises). Lorsque la variation de bien-être est négative, il s'agit d'un coût social. Les mesures ayant l'impact le plus important en termes d'émissions ressortent aussi avec le coût de la tonne de CO₂ évité le moins élevé.

À l'inverse, le péage généralisé et les subventions aux transports en commun sont très coûteux par rapport au résultat obtenu. Le péage entraîne un coût social positif car, si la baisse de surplus, conséquence d'une baisse sensible des trafics de passagers (- 2,1 %) et de marchandises (- 3,7 %), est prise en compte dans le calcul de la variation de bien-être, les gains liés à la diminution des externalités ne le sont que partiellement. La faible diminution des émissions liée aux subventions des transports publics est le résultat d'une faible diminution du trafic passager par transport privé routier (- 0,5 %) et d'une forte augmentation du trafic passager par transport public (+ 12 %) d'où résulte une augmentation de 1,2 % du trafic passager total. Toutefois, si cette subvention apparaît coûteuse, elle montre qu'il est possible de réduire les émissions de CO₂ (- 0,24 Mt) même quand la mobilité ne diminue pas.

Figure 4 - Résultats des simulations « transports » 2008-2020, en 2020

	Efficacité énergétique	Péage généralisé	TIPP	Subventions TC	Agro-carburants	Total
GES (en Mt CO ₂) (a)	-4,26	-1,00	-4,70	-0,24	-2,38	-12,57
PM (en t)	2	-78	-227	-43	0	-346
NMVOG (en t)	-40	-97	-700	-135	0	-972
Nox (en t)	686	-1 793	-11 112	86	0	-12 133
CO (en t)	-429	-1 019	-6 793	-595	0	-8 836
Gain Environnemental (en M€) (1)	298	438	7 071	-5 194	-110	2 503
Gain monétaire (en M€) (2)	-442	1 372	5 088	921	-64	6 875
Gain de temps (en M€) (3)	89	1 222	5 024	-1 537	0	4 798
Surplus consommateurs (en M€) (4)	-569	-4 352	-10 819	3 943	0	-11 797
Surplus producteurs (en M€) (5)	316	13	-6 671	607	0	-5 735
Bien-être COPF non différencié (en M€) (7)=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)	-308	-1 307	-307	-1 260	-174	-3 356
Recette taxe (en M€) (6)	-446	4 018	17 849	-7 562	-65	13 794
Bien-être COPF différencié (en M€) (8)=(7)+0,49*(6)	-533	676	8 682	-4 965	-206	3 654
Coût de la tCO ₂ (bien-être COPF non-différencié) (en €) (9)=(7)/(a)	72	1 249	66	5 658	73	267
Coût de la tCO ₂ (bien-être COPF différencié) (en €) (10)=(8)/(a)	125	-646	-1 860	22 303	87	-291
Émissions de GES en 2020 (en Mt CO ₂)	124,74	123,75	119,04	118,80	116,43	116,43
Écart à la tendance 2020 (en %)	-3,30	-4,07	-7,72	-7,90	-9,75	-9,75
Écart à 1990 (en %)	3,09	2,27	-1,62	-1,81	-3,78	-3,78

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

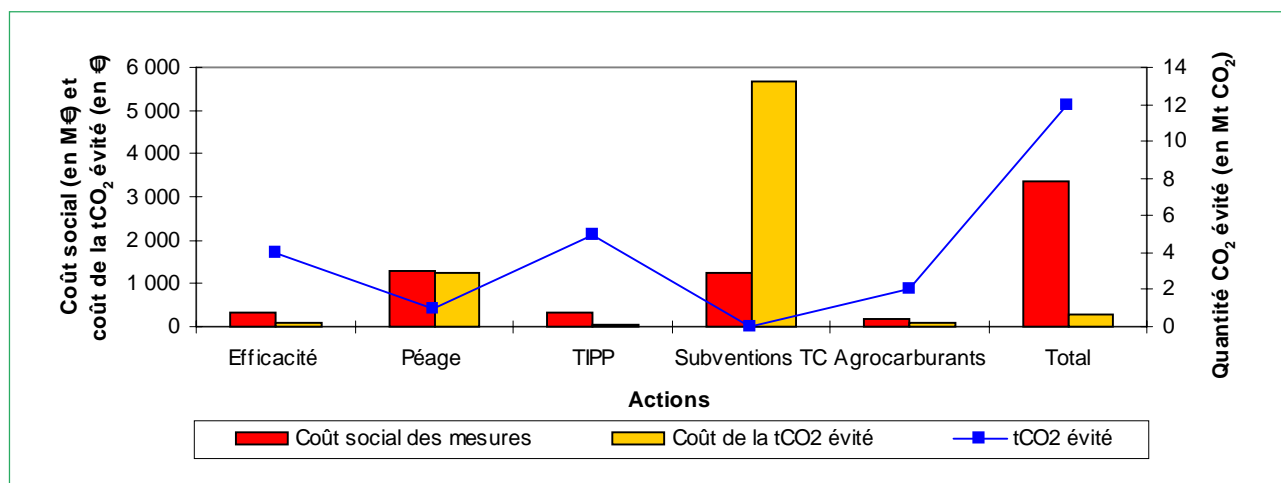
Lecture du tableau : les simulations sont « empilées » en partant de la première mesure simulée (à gauche du tableau). En conséquence, l'effet d'une mesure particulière ne peut pas être isolé, sauf pour la première. L'effet des autres actions n'est pas mesuré par rapport à la situation de référence mais par rapport à la situation de référence à laquelle ont été appliquées les mesures antérieures. Les premières lignes du tableau se lisent comme les effets de la mesure en tête de colonne par rapport à la situation de la colonne précédente (ou de la situation de référence pour la première colonne). Dans le cas de la première action, le gain monétaire est négatif car une voiture plus performante coûte plus cher. Ceci réduit la demande de transport routier, ce qui accroît la vitesse de circulation moyenne, d'où un gain de temps positif. La première mesure entraîne au final une perte de bien-être, comme en témoigne le signe négatif des lignes variation de bien-être (lignes 7 et 8), il s'agit donc d'un coût social.

La variation de bien-être est mesurée de deux manières, avec et sans prise en compte des différences de coût d'opportunité des fonds publics entre secteurs économiques (respectivement COPF différencié et COPF non différencié). Le COPF représente la perte de surplus générée par la taxation : un COPF de 1,5 signifie que le prélèvement de 1 € de taxe génère 0,5 de perte de surplus. L'hétérogénéité de COPF peut être déterminante dans l'évaluation et la comparaison des différentes mesures ; non seulement la valeur, mais parfois aussi le signe de cette dernière et par là même le sens des résultats changent. Le prélèvement d'une taxe sur les transports permet de diminuer la fiscalité sur le travail, plus distorsive, et d'améliorer ainsi l'efficacité de l'économie. Les valeurs retenues dans l'étude sont respectivement de 1,08 et 1,57¹¹ pour les COPF prélevés au sein du secteur des transports et sur le marché du travail. Lorsque 1 € est prélevé sur la consommation de carburant par exemple, 1 € de moins peut l'être sur le marché du travail (pour maintenir constant l'équilibre budgétaire), générant ainsi un gain socio-économique de 0,49 € (égal à la différence entre 1,57 et 1,08). Ceci explique pourquoi, dans le cas du péage généralisé, la réduction de la fiscalité sur le marché du travail équivalente à la recette de ce péage permet

¹¹ Elles correspondent aux valeurs du modèle Tremove et issues d'une étude Kleven et Kleiner, 2003 (référence 10).

d'améliorer le bien-être social (tout en abattant des émissions de CO₂). Le gain social des mesures fiscales est toutefois sans doute surévalué car la valeur du coût d'opportunité des fonds publics sur le marché du travail dans cette étude, *i.e.* 1,57, est sensiblement supérieure à la valeur de 1,3 préconisée par le rapport Lebègue (référence 4).

Figure 5 - Quantité de CO₂ « transport » évité, coût social des actions et coût social de la tonne de CO₂ évité, selon les actions, en 2020



Source : d'après l'étude Axenne-TML-Ecofys

Lecture du graphique : les coûts sont à lire sur l'axe de gauche : en M€ pour le coût social des mesures et en € pour le coût social de la tonne de CO₂ évité. La quantité de CO₂ évité se lit sur l'axe de droite.

Cinq actions supplémentaires de 2020 à 2050 et l'objectif « facteur 4 » atteignable en 2050...

Sur la seconde période, cinq nouvelles actions portant sur les comportements, la demande de transport et les technologies disponibles sont ajoutées à celles déjà mises en place durant la première période. Leur effet est mesuré par rapport au scénario tendanciel infléchi par le maintien des mesures de la période précédente. La référence 2050 sans les nouvelles mesures est proche du niveau de 1990 (122 contre 121 Mt CO₂).

Quel que soit le scénario, la division par quatre des émissions de CO₂ des transports en 2050 n'est pas atteinte. Toutefois, dans le cas du scénario volontariste, le résultat est proche avec un facteur 3,7 (figure 6).

Figure 6 - Résultats* en 2050 des actions « transports » mises en place sur 2020-2050

Actions		Scénario conservateur	Scénario intermédiaire	Scénario volontariste
Gestion de la demande	Comportements (variation de la mobilité des personnes en passagers.km)	0	-5%	-10%
	Logistique (variation du transport de marchandises en tonnes.km)	0	0	-10%
	Émissions évitées (en MtCO₂)	0	5	12
Éco-conduite	Consommation VL	0	-5%	-10%
	Consommation PL	0	-8%	-15%
	Émissions évitées (en MtCO₂)	0	6	12
Progrès Technique sur les moteurs à combustion	gCO ₂ /km en 2050, VP	100	85	65
	gCO ₂ /km en 2050, PL	367	334	300
	Émissions évitées (en MtCO₂)	17	28	39
Agrocarburants de seconde génération	Part d'agrocarburants	10%	10%	10%
	Émissions évitées (en MtCO₂)	4	3	2
Véhicules Hybrides (VP)	Part des véhicules hybrides	40%	60%	90%
	Coût de l'électricité (en c€/kWh)	14	14	14
	Émissions de la production d'électricité (en gCO ₂ /kWh)	40	40	40
	Émissions évitées (en MtCO₂)	21	24	24
Total	Émissions évitées (en MtCO₂)/référence	42	66	89
	Facteur de diminution/1990	1,5	2,2	3,7
	Coût moyen de la tonne de CO₂ évité (en €) (COPF non différencié)	496	595	774

(*) l'effet des actions est mesuré de façon incrémentale

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

... mais des coûts d'évitement élevés

Le coût d'abattement des émissions est élevé, égal à 500 €/tCO₂ dans le cas du scénario conservateur et à 800 € dans le cas du scénario volontariste. La réalisation de l'objectif « facteur 4 » n'est donc pas impossible. Toutefois elle nécessite une action vigoureuse, coûteuse et de long terme car ce sont les actions mises en oeuvre entre 2020 et 2050 qui produisent les effets les plus importants. Les mesures incitatives permettant d'obtenir ces résultats ne sont pas véritablement identifiées ; il est donc difficile de mesurer de façon précise leur coût social et leur acceptabilité sociale.

Il convient de souligner de nouveau la forte contingence des résultats aux hypothèses retenues. En particulier, le contenu en CO₂ du kWh électrique (relatif aux véhicules hybrides) apparaît déterminant. L'hypothèse de 40 gCO₂/kWh électrique est relativement faible au regard de l'actuelle moyenne européenne (340 gCO₂/kWh), ou même de l'actuelle moyenne française (comprise entre 60 et 120 gCO₂/kWh) : elle correspond à la production électrique française « en base »¹² et suppose un développement important du parc de production nucléaire.

Par ailleurs, certains coûts n'ont pas été pris en compte, comme le coût des campagnes de sensibilisation à l'éco-conduite, ni ceux sans doute élevés liés aux mesures dites de gestion de la demande, ni ceux de mise en place et d'administration d'un système de péage généralisé. La probable diminution du trafic consécutive au renchérissement du coût du transport n'est pas prise en compte dans la seconde sous-période, les chiffres de demande de transport n'étant que des valeurs projetées.

Les secteurs résidentiel et tertiaire : normes thermiques et rénovation

Pour le résidentiel-tertiaire, plusieurs scénarios plus ou moins contraignants sont simulés. Ils se différencient d'une part, par l'ampleur du durcissement des normes thermiques sur la construction neuve et d'autre part, par le rythme et l'intensité de rénovation des bâtiments anciens (*encadré 2*).

Encadré 2

Les hypothèses et simulations dans les secteurs résidentiel et tertiaire

Les simulations sont réalisées à l'aide du modèle BEAM¹³, basé sur le parc européen de bâtiments (classés principalement par zone climatique et caractéristiques du bâtiment, dont la date de construction et la qualité thermique) et qui permet de déterminer la demande énergétique du parc et les émissions de CO₂ afférentes.

Dans le scénario de référence, tout bâtiment neuf ou rénové respecte la réglementation thermique (RT) 2005. Le taux de rénovation des bâtiments existants est supposé constant au rythme actuel de 0,6 %/an ; il est accéléré dans les différents scénarios envisagés par rapport à la tendance, il passe à 2 %/an (à ce rythme, la totalité du parc de 2007 est rénovée en 2044). Les performances thermiques des rénovations sont également augmentées et les systèmes de chauffage de plus en plus sobres en CO₂. Pour la construction neuve, deux RT sont appliquées : la RT 2005 et une version plus ambitieuse dans les scénarios 2, 3 et 4.

À partir de ces scénarios, l'étude évalue les coûts engendrés par le durcissement de la réglementation thermique dans le neuf et par la rénovation dans l'existant. Seule la composante « rénovation thermique » du coût a été prise en compte, soit la totalité des coûts dans le cas de travaux purement thermiques, et la seule partie liée à la rénovation thermique lorsqu'il s'agit de travaux plus généraux. Ce point est déterminant quant aux résultats.

L'hypothèse de 0,6 % de taux de rénovation dans le scénario de référence correspond au niveau « naturel » actuel. Dans les autres scénarios, l'accélération de 1,4 point de plus que la tendance correspond à des travaux qui n'auraient pas lieu dans le cadre actuel. Pour ces travaux, seule la partie thermique du coût de l'opération est retenue et non la totalité. En diminuant le coût de façon mécanique, cette hypothèse diminue le temps de retour sur investissement.

Pour calculer les consommations d'énergies, seules sont prises en compte celles du chauffage et de l'eau chaude sanitaire (ECS). En particulier, l'électricité spécifique¹⁴ est exclue de l'analyse. Les mesures concernant le chauffage d'une part, et l'eau chaude d'autre part, sont simulées indépendamment les unes des autres, et les résultats sont ensuite additionnés.

¹² La production en base fait appel aux centrales nucléaires et aux moyens de production « fatals » comme l'éolien, l'hydraulique au fil de l'eau et la cogénération.

¹³ Le modèle BEAM (Built Environment Analysis Model) a été développé sur les dernières années à partir du parc européen de bâtiments (EU des 15 et les 8 nouveaux entrants).

¹⁴ Il s'agit de toute consommation qui n'est pas liée au chauffage ni à la production d'eau chaude sanitaire, mais à l'éclairage, au fonctionnement de tout appareil électro-ménager, ou bien encore des plaques de cuisson, et qui représente un tiers de la facture énergétique des ménages.

Même en agissant très fortement sur les nouvelles constructions, l'effet renouvellement du parc (*encadré 3*) sera insuffisant pour atteindre les objectifs « facteur 4 ». Cet effet ne peut être que marginal dans un premier temps et ne sera sensible qu'à très long terme. Il apparaît donc indispensable de favoriser dans le même temps les opérations de rénovation sur le parc existant.

Quatre axes pour agir sur les bâtiments

Les mesures « bâtiment » s'articulent autour de quatre axes (*figure 7*) : l'accélération du rythme de rénovation du parc, l'amélioration de la qualité thermique de l'isolation, les systèmes de chauffage et le développement de l'eau chaude solaire. Les énergies renouvelables se diffusent dans les scénarios à un rythme plus élevé que dans le scénario tendanciel. Dans tous les scénarios, le développement de l'eau chaude solaire est linéaire pour atteindre 30 % de la production totale d'ECS en 2040. Pour le chauffage, quatre scénarios sont envisagés, différenciés par leur degré de volontarisme quant à l'inflexion de la tendance et aux performances de l'isolation et des systèmes de chauffage.

Figure 7 - Présentation des scénarios « bâtiments »

Scénario	Actions (hors eau chaude solaire)					Systèmes de chauffage
	Taux de rénovation annuel (%)	Coefficients de Transmission Thermique (W/m ² /°C)				
		Fenêtres	Plancher	Murs	Plafond	
Scénario tendanciel	0,60	2,10	0,27	0,36	0,20	
Scénario 1	2,00	2,10	0,27	0,36	0,20	inchangé
Scénario 2	2,00	1,00	0,25	0,20	0,15	inchangé
Scénario 3	2,00	1,00	0,25	0,20	0,15	Pompes à Chaleur (PAC) + Système de Chauffage à Condensation (SCC)
Scénario 4	2,00	1,00	0,25	0,20	0,15	SCC + systèmes bois-énergie (pellets)

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

Les coefficients de transmission thermique sont plus faibles dans les scénarios 2, 3 et 4 qui correspondent à des réglementations thermiques plus ambitieuses¹⁵.

À titre d'exemple, le coût de rénovation d'une maison individuelle de 120 m² s'élève, dans le cas du scénario 1, à 12 000 €, soit 100 €/m², permettant de réduire la consommation d'énergie de chauffage de 208 kWh/m²/an à 22 kWh/m²/an. La perte monétaire liée à la perte de surface consécutive à l'isolation par l'intérieur s'élèverait à 18 400 € ; elle n'est pas prise en compte.

Pour la valorisation des gains en termes de dépense énergétique, les prix des différentes énergies sont supposés croître de façon monotone au rythme de 1,5 %/an (*figure 8*). Le niveau de 2050 de ces projections a déjà été atteint à l'été 2008 pour les combustibles fossiles et rend les conclusions de l'étude d'autant plus réalistes.

Figure 8 - Prix des énergies de chauffage

en c€/kWh constants

Année	2006	2020	2050
Gaz	6,13	7,55	11,80
Fioul domestique	5,59	6,89	10,77
Électricité	10,61	13,07	20,43
Chauffage urbain	6,45	7,95	12,43
Bois	3,83	4,72	7,38

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

¹⁵ Les coefficients de transmission sont une mesure de la qualité thermique des bâtiments ou des éléments de ces derniers : ils mesurent la transmission de « chaleur » de l'intérieur vers l'extérieur. Ainsi, plus ces coefficients sont élevés, moins la qualité thermique du bâtiment en question est élevée. Un renforcement des normes de qualité thermique s'accompagne donc d'une diminution de la valeur des coefficients.

Forte baisse des consommations d'énergie et rentabilisation de l'investissement

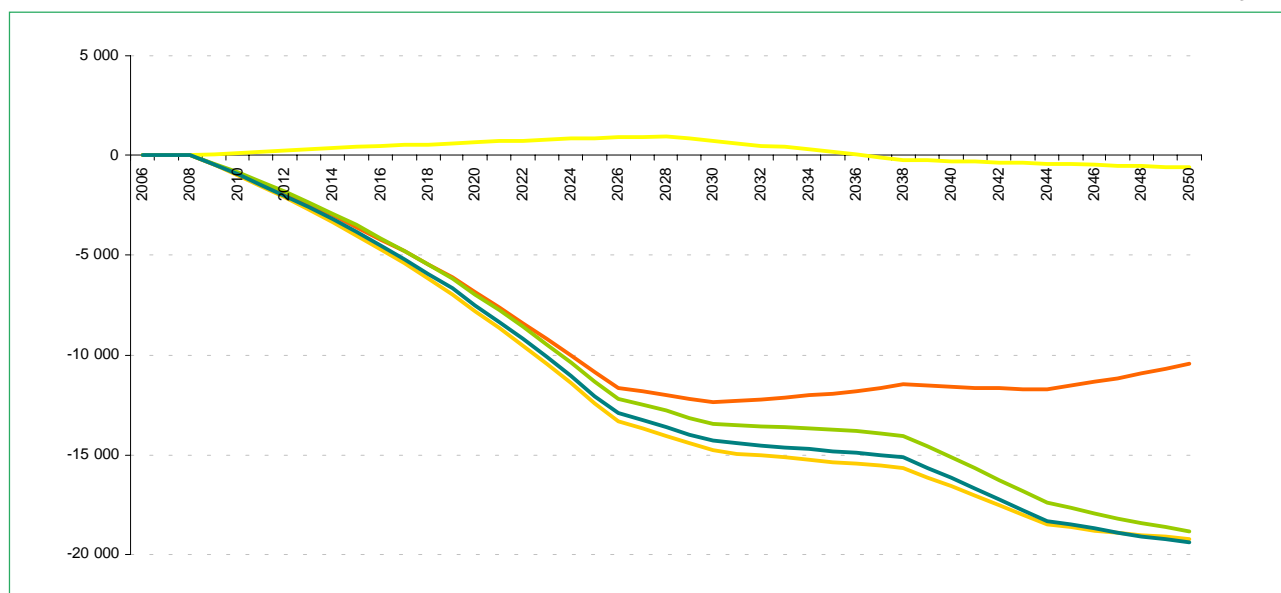
La mise en place de ces mesures permettrait de faire baisser les consommations d'énergie à l'horizon 2050 et pour l'ensemble du parc, d'un niveau tendanciel de 75 kWh/m²/an à une fourchette de 30 à 55 kWh/m²/an.

La facture de chauffage serait aussi diminuée de façon drastique avec un gain annuel compris entre 15 et 30 Md€ à l'horizon 2050. Celle de l'eau chaude va dans le même sens : l'introduction progressive de l'eau chaude solaire permettrait de réduire à cette échéance la facture énergétique annuelle de plus d'un tiers par rapport au scénario tendanciel, soit 3 Md€. Dans le scénario tendanciel, au contraire, le renchérissement supposé du prix de l'énergie surcompense la baisse de la consommation unitaire d'énergie liée au chauffage et à l'eau chaude et la facture énergétique annuelle augmente pour passer de 40 à 50 Md€.

Le coût de l'investissement réalisé, net de la réduction de consommation d'énergie, correspond à la différence entre l'investissement annualisé¹⁶ et le gain annuel en énergie généré par cet investissement. Il devient rapidement négatif, l'économie d'énergie dépassant l'annuité de l'investissement (figure 9).

Figure 9 - Évolution du coût de l'investissement net des gains d'énergie

en M€



Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

Lecture du graphique : la courbe jaune correspond au scénario tendanciel avec installation de panneaux solaires, elle représente le surcoût (par rapport au tendanciel) d'investissement annualisé (crédit sur 30 ans) duquel sont retranchées les économies d'énergie. La courbe orange correspond au scénario 1 ; l'ocre au scénario 2 ; la verte au scénario 3 ; la bleue au scénario 4.

Les investissements de rénovation (isolation et chauffage) sont vite très rentables, *i.e.* les gains annuels de consommation d'énergie dépassent l'annuité de remboursement de l'investissement si bien que le coût net est négatif. Pour l'eau chaude solaire, le temps de retour sur investissement est plus long ; l'investissement réalisé entre 2006 et 2036 est tout juste rentabilisé ; le coût net n'apparaît négatif qu'à partir de 2036. Au final, l'objectif facteur 4 aurait un coût négatif dans le secteur du bâtiment, le coût de la tonne de CO₂ évité serait donc négatif.

Par exemple, pour les ménages, avec un prix de l'énergie de 6 c€/kWh, le temps de retour¹⁷ sur investissement est de onze années ; un investissement sur une durée de 30 ans serait rentable dès que le prix de l'énergie est supérieur à 3 c€/kWh.

¹⁶ Avec un crédit sur 30 ans, qui représente par ailleurs la durée de vie de l'investissement, et un taux d'actualisation de 4 %.

¹⁷ Avec un taux de rentabilité de 4 %.

L'objectif « facteur 4 » accessible dans le secteur du bâtiment...

Les mesures envisagées permettent de réduire substantiellement les émissions de GES. Les gains cumulés sur 2006-2050 par rapport à la tendance sont compris entre 1 et 2 GtCO₂ (soit entre 20 et 50 MtCO₂/an) selon que l'on retient la moyenne française ou européenne du contenu en CO₂ du kWh électrique¹⁸. Dans le cas des scénarios 3 et 4, scénarios très volontaristes en termes de qualité de rénovation et en cela forcément un peu optimistes, le facteur 4 est quasiment atteint puisque les émissions diminuent de 72 % par rapport aux niveaux enregistrés en 1990 (figure 10).

Figure 10 - Bilan des émissions de CO₂ dans les bâtiments en 2050

	Émissions de CO ₂ (en Mt)	Variation par rapport à 1990 (en %)
Année de référence (1990)	109	-
Scénario 1	65	-40
Scénario 2	42	-61
Scénario 3	31	-72
Scénario 4	30	-72

Source : Rapport Axenne-TML-Ecofys

...mais sur la base d'hypothèses relativement favorables qui doivent être confirmées

Les résultats dépendent fortement des hypothèses relativement favorables retenues quant aux coûts unitaires de rénovation¹⁹ et au renchérissement continu des prix de l'énergie²⁰. En particulier, l'hypothèse d'un coût de rénovation incrémental pour passer de 0,6 % à 2 % de logements rénovés est cruciale. Ces résultats doivent aussi être interprétés avec prudence après 2040 car les investissements de renouvellement ne sont pas pris en compte dans l'analyse²¹.

Par ailleurs, des contraintes pesant sur les ménages ou les entreprises peuvent freiner la réalisation des travaux de rénovation alors même qu'ils seraient justifiés économiquement. Par exemple, l'accès au crédit, un horizon temporel relativement court qui ne permet plus de justifier la rentabilité des travaux²². Le faible rythme de rénovation actuel semble d'ailleurs confirmer l'existence de telles limites.

¹⁸ Les valeurs du contenu en CO₂ de l'électricité retenues dans l'étude sont de 180 gCO₂/kWh pour la moyenne française et de 536 gCO₂/kWh pour la moyenne européenne. Ces valeurs sont légèrement différentes de celles données par l'Ademe dans sa « Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh électrique par usage en France » de 2005 (référence 8) qui fait état de 60 à 120 gCO₂/kWh pour la France et 340 gCO₂/kWh pour l'Europe.

¹⁹ Les estimations actuelles de l'Ademe et des comités opérationnels du Grenelle de l'environnement se basent plutôt sur un coût de rénovation de l'ordre de 300 €/m² (système de chauffage inclus) pour une économie d'énergie proche de 300 kWh/m²/an. Cf. <http://www.legrenelle-environnement.fr/grenelle-environnement/spip.php?rubrique193>

²⁰ A l'horizon 2020-2030, les différentes projections de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, www.iea.org), de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC, www.developpement-durable.gouv.fr) ou du Département de l'énergie américain (DOE, www.doe.gov) misent sur une stabilisation du prix du pétrole proche de 100 \$/baril.

²¹ Or, la durée de vie des travaux est, par hypothèse, de 30 ans. À partir de 2040, certains bâtiments devraient donc être rénovés une seconde fois (ceux rénovés en 2010), de même que les nouveaux bâtiments construits en 2010.

²² Toutefois, certains travaux financés par un crédit sur 10 ans, seraient rentables dès la première année.

Le lent renouvellement du parc de bâtiments²³

Un parc vieillissant dont la durée de vie est très longue

Le parc résidentiel français (30 millions de logements²⁴) est âgé (deux tiers ont été construits avant 1975²⁵, c'est-à-dire avant toute obligation de performance énergétique), et il continue à vieillir étant donné son faible taux de renouvellement (environ 400 000 nouveaux logements par an en cycle haut). Ainsi, les logements anciens, construits avant 1975, devraient représenter encore deux cinquièmes du parc en 2050.

Le parc immobilier tertiaire s'élève en 2004 à 850 millions de m² chauffés²⁶ : commerce 22 %, bureaux 21 %, enseignement 20 %, santé 12 %, sports 8 %, cafés-hotels-restaurants 7 %, habitations communautaires 6 % et transports (gares...), 3 %. Un quart du parc a moins de 17 ans. Si ce chiffre indique une « jeunesse » relative, notamment en comparaison au parc résidentiel, il ne permet cependant pas de conclure à un renouvellement complet du parc tertiaire tous les 60 ou 80 ans car sa durée de vie n'est pas connue.

Le taux de renouvellement du parc national est communément²³ fixé à 1 % du parc total existant. Il correspond au taux de construction neuve légèrement supérieur à 1 %, diminué du taux de sortie, considéré comme négligeable.

Les données statistiques permettant d'identifier ces sorties demeurent très limitées et peu précises. Les experts estiment entre 0,1 % et 0,2 % le taux de démolition. En définissant la sortie de parc des logements comme la somme des désaffectations, des destructions et des fusions, l'Insee estime les sorties du parc à 0,3 %. Sur la base d'une définition différente, EDF obtient 0,8 %. Eu égard aux modes de calcul retenus dans ces différentes estimations, il semble raisonnable de retenir un taux de sortie pour les bâtiments résidentiels compris entre 0,3 et 0,4 %. À ce rythme, il faudra probablement plus d'un siècle pour renouveler totalement le parc résidentiel actuel.

Son faible rythme de renouvellement ne permet pas, pour l'heure, de baisser les consommations d'énergie et les émissions de CO₂

Avec les réglementations actuelles, l'effet renouvellement du parc ne permet pas, même sous des hypothèses relativement favorables, de compenser les consommations d'énergie et les émissions des nouvelles constructions :

- pour le résidentiel, sur l'année 2000, les sorties de parc (3 millions de m² à 395 kWh/m²/an) entraînent une baisse des consommations de 1,2 TWh face à une augmentation de consommation de 2,6 TWh issue des constructions neuves (32 millions de m² à 80 kWh/m²/an) ;
- pour le secteur tertiaire, sur l'année 2003 (référence 9), les sorties du parc (2,8 millions de m² à 139 kWh/m²/an) représentent une baisse des consommations de 0,4 TWh et les constructions neuves (13,6 millions de m² à 100 kWh/m²/an) une hausse de 1,4 TWh.

²³ Résultats issus du mémoire du Groupe d'analyse d'action publique (GAAP) « Problématique qualitative et quantitative de sortie du parc de bâtiments », Mastère d'action publique ENPC, de Allaire D, Gaudière G, Majchrzak Y, Massi C, 2008.

²⁴ Soit 3 milliards de m². En 2004, le parc métropolitain comportait 30,2 millions de logements répartis en 25,3 millions de résidences principales (dont 14,2 individuelles et 11,1 collectives), 3 millions de résidences secondaires et 1,9 million de logements vacants.

²⁵ Pour les résidences principales, 31 % des logements sont antérieurs à 1949 (dont les 2/3 antérieurs à 1915), 34 % ont été construits entre 1949 et 1974, 13 % entre 1975 et 1981 et 22 % depuis 1982.

²⁶ « Suivi du parc et de la consommation énergétique du secteur tertiaire en 2003 », Ceren, juillet 2005 (référence 9). Cette étude s'appuie sur un panel relativement réduit d'entreprises et sur 9 000 questionnaires pour l'enquête « consommation » ainsi que sur 5 000 questionnaires complémentaires pour l'étude des flux. Compte tenu de la taille du panel en regard du nombre d'entreprises du secteur, les résultats détaillés de cette étude doivent donc être interprétés avec prudence et mériteraient d'être croisés avec des résultats complémentaires.

Références bibliographiques

- 1 Axenne-TML-Ecofys
S scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.
SESP, 2007
CDAT
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- 2 Conseil général des ponts et chaussées
Démarche prospective transport 2050. Éléments de réflexion.
Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, 2006
- 3 Chapulut JN, Morellet O, Paul-Dubois-Taine O, Vexiau Th, Méteyer JC
Les avenir possibles des transports en 2050.
Notes de synthèse du SESP n° 163, juillet-décembre 2006
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/NS163_3_12_cle72b821.pdf
- 4 Commissariat général du plan
Révision du taux d'actualisation des investissements publics.
Rapport du groupe d'experts présidé par Daniel Lebègue
2005
- 5 Commissariat général du plan
Transports : choix des investissements et coût des nuisances.
Rapport du groupe d'experts présidé par Marcel Boiteux
La Documentation française, 2001
<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/014000434/0000.pdf>
- 6 Ministère de l'écologie
Mobilité, transport et environnement.
Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement
La Documentation française, 2006
Dossier de presse : http://www.environnement.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_de_presse_CCEE_rapport_mobilite.pdf
- 7 **Comité interministériel de l'aménagement et du développement du territoire (CIADT) du 18 décembre 2003.**
http://www.route.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=64
- 8 Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)
Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France.
2005
<http://www.ademe.fr>
- 9 Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie (Ceren)
Suivi du parc et de la consommation énergétique du secteur tertiaire en 2003.
Juillet 2005
- 10 Kleven H.J. and Kreiner C.T.
The Marginal Cost of Public Funds in OECD Countries : Hours of Work versus Labour Force Participation.
CESifo Working Paper n° 935, 2003
http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=404582