

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'Université Paris-Dauphine

École Doctorale de Dauphine — ED 543

Spécialité

COMPOSITION DU JURY :

Soutenue le
par

Dirigée par

Résumé de la thèse

Deux principaux leviers sont disponibles pour réduire les émissions de CO₂ : la substitution et l'efficacité énergétiques. Le premier repose sur l'utilisation de sources d'énergie moins carbonées tandis que le second consiste à réduire la quantité d'énergie mobilisée à service énergétique équivalent. Cette thèse s'intéresse aux contributions passées et futures de ces deux facteurs à la décarbonation de la production de chauffage du parc de logements en France.

Une analyse rétrospective de leur contribution à l'évolution des émissions de CO₂ entre 1990-2010 est d'abord menée sur la base d'analyses de décomposition. Ces travaux révèlent que la relative stabilité des émissions sur la période résulte de la neutralisation de deux types de facteurs : des facteurs sociaux-démographiques d'une part, poussant les émissions à la hausse à travers une augmentation continue de la surface totale à chauffer, et des facteurs technico-économiques d'autre part, tendant à les réduire. A service énergétique constant, l'amélioration de l'efficacité énergétique a ainsi permis de générer une baisse des émissions de 20,3 Mt CO₂. Peu de gains ont en revanche été réalisés grâce à la substitution énergétique.

Le second chapitre est dédié à l'estimation des coûts d'amélioration de l'efficacité énergétique et de la réduction du contenu carbone de la chaleur. A partir d'un large panel de travaux d'isolation et d'options de remplacement des systèmes de chauffage, d'une modélisation technico-économique des besoins de chaleur des bâtiments et du recours à un processus d'optimisation en deux temps, ces coûts sont évalués au niveau de logements-types puis à l'échelle du parc résidentiel. Les résultats mettent en évidence l'existence de coûts marginaux croissants, aussi bien pour l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc que pour la décarbonation des systèmes de production de chaleur. Les résultats suggèrent qu'une stratégie de réduction des émissions de CO₂ visant à atteindre un objectif donné à moindre coût doit nécessairement s'appuyer sur la mobilisation conjointe de ces différents facteurs en privilégiant au démarrage les logements individuels les plus anciens.

Le troisième chapitre s'intéresse à l'évolution de l'efficacité énergétique et du contenu carbone du mix énergétique dans le cadre d'une minimisation du coût global de chauffage de l'intégralité des logements du parc résidentiel. Une analyse statique est effectuée à partir de plusieurs scénarios de déploiement des mesures d'isolation et de remplacement des systèmes de chauffage au sein des différents segments du parc résidentiel suivant une approche coût-efficacité. Les résultats soulignent l'existence d'incompatibilités entre amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des logements et diffusion des technologies efficaces et/ou renouvelables. Par ailleurs, les simulations mettent en évidence l'existence d'un important gisement potentiel de réduction d'émissions de CO₂ à coût négatif, compris entre -28 % et -87 % en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et d'évolution du prix des énergies retenues.

Le dernier chapitre repose sur le développement d'un modèle de simulation bottom-up visant à déterminer les mesures à mettre en œuvre afin d'atteindre à moindre coût différentes cibles de réduction d'émissions de CO₂ à l'horizon 2035 et à évaluer les contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques associées. Cet outil de simulation se fonde sur une représentation très fine du parc résidentiel et des technologies de production de chaleur. Il simule la dynamique de transformation du parc résidentiel, en intégrant le cycle de renouvellement des équipements de chauffage et un plafond annuel de logement pouvant faire l'objet de travaux d'isolation. Le scénario « Business as Usual » conduit à une baisse d'émissions de CO₂ de 31,6 % entre 2015 et 2035, basée sur une contribution équilibrée des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et caractérisée par la prédominance de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et de la pénétration des renouvelables. L'évolution des différents facteurs est ensuite examinée pour des cibles de décarbonation du parc résidentiel allant jusqu'à 90 %. L'atteinte de cibles de décarbonation croissantes est réalisée par une augmentation progressive du recours à la substitution et un investissement décroissant dans l'efficacité. Des analyses de sensibilité, menées sur la valeur du plafond annuel de rénovation et sur la prise en compte de la décarbonation du mix électrique ne modifient que marginalement les résultats.

Mots Clés : Substitution énergétique, Efficacité énergétique, Modélisation prospective, Minimisation des coûts, Parc de logements, Emissions de CO₂.

Abstract

Two major levers can be used to reduce CO₂ emissions: energy substitution and energy efficiency. The former is based on the use of less carbon-intensive energy sources, while the latter consists in reducing the amount of energy used for a given, constant energy service. This dissertation focuses on the past and present contributions of these two factors to the decarbonisation of heat production in the French housing stock.

First, a retrospective analysis of their contribution to the evolution of CO₂ emissions between 1990 and 2010 is carried out based on decomposition analysis. This study reveals that the relative stability of emissions over the period considered is due to the fact that two types of factors cancelled each other out: sociodemographic factors driving up emissions through a continuous increase in the total area to be heated on the one hand, and technical and economic factors that tended to reduce emissions on the other hand. For a given, constant energy service, energy efficiency gains thus made it possible to lower emissions by 20.3 Mt CO₂. However, few gains were achieved through energy substitution.

The second chapter focuses on assessing the costs associated with improving energy efficiency and reducing the carbon content of heat. Based on a wide range of insulation works and heating system replacement options, a technical and economic model of building heating needs and the use of a two-stage optimisation process, these costs are estimated first for standard dwellings, and then at the scale of the entire housing stock. The results reveal the existence of rising marginal costs, both for improving the energy efficiency of the housing stock and for decarbonising heat production systems. They suggest that any CO₂ emissions reduction strategy aiming to achieve a given objective at a low cost must necessarily rely on the joint use of these different factors and prioritise the oldest single-family dwellings in the beginning.

The third chapter focuses on the evolution of the energy efficiency and carbon content of the energy mix in the context of a minimisation of the global cost of heating for the entire housing stock. A static analysis is conducted based on various scenarios for the rollout of the insulation and heating system replacement measures within the various sectors of the housing stock, using a cost-effectiveness approach. The findings highlight the existence of incompatibilities between enhancing the thermal performance of buildings envelope and the dissemination of efficient and/or renewable technologies. In addition, the simulations reveal the existence of a major potential source of CO₂ emissions reductions at a negative cost, in the range of -28% to -87% depending on the assumptions used in terms of the discount rate and price trends of the selected energy sources.

Finally, the last chapter consists in the development of a bottom-up simulation model aiming to determine which measures to implement in order to achieve various CO₂ emissions reductions targets at a low cost by 2035, as well as to assess the respective contributions of

the related factors of energy efficiency and energy substitution. This simulation tool is based on a very precise representation of the housing stock and heat production technologies. It simulates the dynamic transformation process of the housing stock, including the replacement cycle of heating equipment and an annual limit on the number of dwellings that can undergo insulation work. The “business as usual” scenario leads to a 31.6% reduction in CO₂ emissions between 2015 and 2035, based on a balanced contribution of the factors of energy efficiency and energy substitution and characterised by the predominance of building efficiency and renewable energy penetration. The evolution of the different factors is then examined for housing stock decarbonisation targets of up to 90%. Increasingly high decarbonisation targets are achieved through a gradual increase in energy substitution and decreasing investment in energy efficiency. Sensitivity analyses conducted on the value of the annual renovation limit and taking into account the decarbonisation of the electricity mix only modify the results marginally.

Key Words: Energy Substitution, Energy Efficiency, Prospective Modelling, Cost Minimization, Building Stock, CO₂ Emissions.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Patrick Criqui et Cédric Clastres d'avoir bien voulu prendre de leur temps pour évaluer et rapporter mon travail, ainsi que Patrice Geoffron, Pierre-André Jovet et Olivier Teissier pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je souhaite naturellement exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse, Christian de Perthuis, qui m'a patiemment accompagné tout au long de ce travail. Je le remercie du temps qu'il a pu consacrer à nos échanges, qui ont été pour moi très enrichissants, et du soutien qu'il a pu m'apporter ces dernières années.

Je remercie bien évidemment toutes les personnes que j'ai pu côtoyer à la Chaire Economie du Climat pour les nombreux échanges et moments de bonne humeur partagés durant cette période, avec une mention spéciale pour « les anciens », Raphaël, Boris et Preety, et la « TC », Edouard et Nathaly, sans qui mes années de thèse n'auraient pu être aussi passionnantes et plaisantes.

Je tiens également à remercier mes collègues du CSTB, et plus particulièrement Christophe Morel et Yacine Bennouna, pour leurs encouragements et la souplesse qu'ils m'ont accordée durant les dernières semaines de rédaction.

Je remercie mes proches pour la tolérance et la patience dont ils ont su faire preuve à mon égard ces derniers mois et pour leur soutien constant et leur simple présence tout au long de ces années. Parmi cette joyeuse troupe, j'ai nécessairement une pensée particulière pour Matthieu Quignon, avec qui j'ai partagé des moments mémorables et dont la disparition laissera toujours un grand vide.

Table des matières

Chapitre I : Contribution des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions de CO ₂ du parc de logements en France entre 1990 et 2010 : une analyse <i>ex-post</i>	31
1.1) Introduction	32
1.2) Méthode de décomposition	33
1.3) Données	35
1.4) Décomposition des émissions de CO₂ du parc de bâtiments français par usage	37
1.4.1- Poids et évolution des usages de l'énergie dans les bâtiments	37
1.4.2- Analyse de décomposition des émissions du résidentiel par usage	38
1) Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur résidentiel.....	40
2) Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur résidentiel....	41
1.4.3- Analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire par usage	42
1) Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur tertiaire.....	43
2) Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire.....	44
1.5) Décomposition des émissions de CO₂ du chauffage par type de bâtiments	45
1.5.1- Catégories de logements	45
1.5.2- Facteurs additionnels étudiés	45
1.5.3- Résultats de la décomposition des émissions de CO₂ liées au chauffage par type de logements	47
1.6) Conclusion	49
Chapitre II : Estimation des coûts d'investissement associés à l'amélioration de l'efficacité énergétique et du contenu carbone du chauffage au sein du parc résidentiel	50
2.1) Introduction	51
2.2) Estimation des besoins de chauffage : une approche technico-économique	53
2.2.1- La demande de chauffage : entre déterminants physiques et socio-économiques	53
2.2.2- Présentation du modèle thermique	55

2.2.3-	<i>Application au parc de logements français</i>	58
2.3)	Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des enveloppes au niveau du parc résidentiel français	63
2.3.1-	<i>Type de travaux, matériaux et coûts d'isolation</i>	63
2.3.2-	<i>Coût d'isolation par type de logements</i>	64
2.3.3-	<i>Coût global des mesures d'amélioration de l'efficacité des bâtiments</i>	67
2.4)	Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des systèmes par le remplacement des technologies de chauffage	70
2.4.1-	<i>Les caractéristiques des systèmes de chauffage modélisés</i>	71
2.4.2-	<i>Répartition des systèmes de chauffage au sein du parc résidentiel</i>	75
2.4.3-	<i>Estimation du coût minimum d'amélioration de l'efficacité de production par type de logements</i>	77
1)	Résultats par type de logements	77
2)	Résultats au niveau du parc de logements français	80
2.5)	Estimation du coût minimum d'amélioration de décarbonation du mix énergétique	84
2.5.1-	<i>Résultats par type de logements</i>	84
2.5.2-	<i>Résultats au niveau du parc de logements français</i>	86
2.6)	Conclusion	89
 Chapitre III : L'arbitrage entre efficacité et substitution énergétique dans le cadre de la minimisation du coût global de chauffage		
3.1)	Introduction	92
3.2)	Cadre d'analyse	93
3.2.1-	<i>Détermination du coût global de chauffage</i>	94
3.2.2-	<i>Construction et utilisation des matrices de coûts d'isolation</i>	96
3.2.3-	<i>Hypothèses de modélisation</i>	97
3.3)	Changements de systèmes de chauffage coût-efficace et émissions de CO₂	98
3.3.1-	<i>La compétitivité des systèmes de chauffage : une résultante de l'interaction entre structure des coûts et besoin de chauffage des logements</i>	98
3.3.2-	<i>Les systèmes de chauffage à haut rendement ou décarbonés : des options potentiellement coûts-efficaces dans les logements les plus anciens</i>	104

3.3.3-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces.....</i>	107
3.4)	Mesures d'isolation coûts-efficace et émissions de CO₂.....	110
3.4.1-	<i>Coût d'isolation, coût marginal de production et ampleur des travaux de rénovation coûts-efficaces</i>	110
3.4.2-	<i>Les travaux d'isolation : des mesures potentiellement rentables dans les logements anciens mais d'ampleurs variées en fonction des systèmes de chauffage installés.....</i>	115
3.4.3-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces</i>	116
3.5)	Arbitrage coût-efficacité entre isolation et changement de systèmes de chauffage et potentiel de réduction des émissions de CO₂.....	119
3.5.1-	<i>Les combinaisons de mesures coûts-efficaces pour les logements représentatifs : des couplages variés des deux types d'investissements</i>	119
3.5.2-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas de déploiement des combinaisons de mesures optimales</i>	121
3.6)	Analyse de sensibilité.....	127
3.7)	Conclusion	129
 Chapitre IV : Efficacité et substitution énergétiques et ambition de l'objectif de décarbonation : les enseignements du modèle Zephyr-Chaleur		
4.1)	Introduction.....	133
4.2)	Présentation du modèle Zephyr-Chaleur	134
4.2.1-	<i>Les modèles de simulation prospectifs dans la littérature</i>	134
4.2.2-	<i>Les mécanismes de modélisation.....</i>	136
4.2.3-	<i>Typologie des logements-types et représentation du parc résidentiel.....</i>	142
4.2.4-	<i>Hypothèses de modélisation.....</i>	144
4.3)	Enseignements de la simulation « Business as Usual »	145
4.3.1-	<i>Travaux d'isolation et remplacement des systèmes de chauffage</i>	145
1)	<i>Mise en œuvre des travaux d'isolation entre 2015 et 2035</i>	145
2)	<i>Evolution du parc de systèmes de chauffage entre 2015 et 2035</i>	147
4.3.2-	<i>Evolution des facteurs d'efficacité, des facteurs de substitution et des émissions de CO₂ entre 2015 et 2035</i>	151

4.3.3-	<i>Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution aux réductions d'émissions de la simulation BAU</i>	156
4.4)	Objectif de réduction d'émissions à l'horizon 2035 et contribution des facteurs d'efficacité et de substitution	160
4.4.1-	<i>Accroissement des réductions d'émissions de CO₂ et minimisation du coût</i>	161
4.4.2-	<i>Evolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et objectifs de réduction d'émissions en 2035</i>	162
1)	Efficacité de l'enveloppe	162
2)	Efficacité des systèmes	164
3)	Pénétration des énergies renouvelables	166
4)	Contenu carbone du mix énergétique non renouvelable	167
4.4.3-	<i>Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution dans le cadre de quatre objectifs de réduction d'émissions</i>	169
4.5)	Sensibilité des résultats au plafond annuel de rénovation et à l'évolution du contenu carbone de l'électricité	172
4.5.1-	<i>Sensibilité au plafond annuel de rénovation</i>	172
4.5.2-	<i>Sensibilité à l'évolution du contenu carbone de l'électricité</i>	179
4.6)	Discussion des implications en termes de politique publique	185
4.6.1-	<i>Les dispositifs d'aide à la rénovation énergétiques des logements</i>	186
4.6.2-	<i>Les objectifs de rénovation énergétique</i>	187
4.6.3-	<i>Les voies d'amélioration de la stratégie de décarbonation du parc de logements</i>	190
4.7)	Conclusion	192
5.	Conclusion générale	193
6.	Bibliographie	197
7.	Annexes	206

Liste des Figures

Figure 1.1- Evolution des émissions de CO ₂ des bâtiments résidentiels et tertiaires en fonction de l'usage	38
Figure 1.2- Evolution du mix énergétique fossile du secteur résidentiel entre 1990 et 2010	41
Figure 1.3- Résultats globaux de la décomposition des émissions de CO ₂ du secteur résidentiel entre 1990 et 2010.....	42
Figure 1.4- Evolution du rapport entre la consommation totale d'énergie finale du tertiaire et différents indicateurs d'activité entre 1990 et 2010	43
Figure 1.5- Evolution du mix énergétique fossile du secteur tertiaire entre 1990 et 2010	44
Figure 1.6- Résultats globaux de l'analyse de décomposition pour le secteur tertiaire	44
Figure 1.7- Consommation moyenne d'énergie finale en fonction de la période de construction (en tep/logement).....	46
Figure 1.8- Résultats de l'analyse de décomposition des émissions du chauffage entre 1990 et 2010.....	47
Figure 2.1- Illustration des différentes sources de déperdition thermique en logement individuel et collectif non isolés	54
Figure 2.2- Consommations observées et consommations prédites pour les maisons-types	62
Figure 2.3- Consommations observées et consommations prédites pour les appartements-types	62
Figure 2.4- Coût minimum d'isolation pour les maisons-types en fonction de l'objectif de U _g final.....	65
Figure 2.5- Coût minimum de rénovation pour les appartements-types en fonction de l'objectif de U _g final.....	65
Figure 2.6- Courbe de coût minimum d'isolation du parc de logements français en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique	68
Figure 2.7- Coûts d'isolation du parc de logement et régression linéaire des trois segments de la courbe.....	69
Figure 2.8- Evolution de la part de logements rénovés et du coût moyen de rénovation par logement en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique	70
Figure 2.9- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les maisons-types	78
Figure 2.10- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production du parc résidentiel	81
Figure 2.11- Evolution du nombre de systèmes de chauffage types en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel	82

Figure 2.12- Evolution des économies d'énergie au sein de chaque catégorie de logements en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel	82
Figure 2.13- Evolution des économies d'énergie au sein de type de logements en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel	83
Figure 2.14- Coûts d'amélioration de l'efficacité des systèmes et régression de la courbe ...	84
Figure 2.15- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone pour chaque type de maisons.....	85
Figure 2.16- Coûts minimums d'amélioration du contenu carbone moyen du kWh de chaleur	87
Figure 2.17- Evolution des technologies de chauffage en fonction de l'objectif de contenu carbone.....	87
Figure 2.18- Evolution du contenu carbone moyen des logements par période de construction en fonction du niveau de décarbonation du parc résidentiel	88
Figure 2.19- Evolution du contenu carbone par catégorie de logements en fonction du niveau de décarbonation du parc résidentiel	88
Figure 3.1- Coût de l'énergie et coût d'investissement des systèmes de chauffage.....	99
Figure 3.2- Relation entre contenu carbone du kWh de chaleur et coût d'investissement des systèmes de chauffage	99
Figure 3.3- Relation entre rendement énergétique et coût d'investissement des systèmes de chauffage.....	100
Figure 3.4- Coût global de chauffage des systèmes en fonction du besoin d'énergie utile pour les technologies de production de chaleur individuelles'	102
Figure 3.5- Coût global de chauffage des systèmes en fonction du besoin d'énergie utile pour les technologies de production de chaleur individuelles.....	108
Figure 3.6- CGC associé à une maison construite avant 1967 pour trois systèmes de chauffage en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation	112
Figure 3.7- CGC associé à un appartement-type construit avant 1967 pour trois systèmes de chauffage individuel en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation.....	113
Figure 3.8- BEU résultant de la mise en œuvre de l'isolation coût-efficace en fonction du coût variable du kWh de chaleur pour les différentes catégories de maisons-types.....	114
Figure 3.9- BEU résultant de la mise en œuvre de l'isolation coût-efficace en fonction du coût variable du kWh de chaleur pour les différentes catégories d'appartements-types....	114
Figure 3.10- Réduction du CGC pour les différentes catégories de logements en fonction des mesures mise en œuvre	122
Figure 3.11- Réduction des émissions de CO ₂ pour les différentes catégories de logements en fonction des mesures mises en œuvre (en %)	124

Figure 3.12- Gains en efficacité de l'enveloppe, en efficacité des systèmes et en décarbonation du mix énergétique par catégorie de logements en cas de déploiement des mesures coûts-efficaces (en %)	125
Figure 3.13- Gains en efficacité de l'enveloppe, en efficacité des systèmes et en décarbonation du mix énergétique en fonction des mesures optimales appliquées (en %)	126
Figure 4.1- Représentation du fonctionnement du modèle au niveau d'un logement-type sur une année.....	139
Figure 4.2- Représentation du processus d'optimisation sur une année.....	141
Figure 4.3- Délimitation géographique des zones climatiques H1, H2 et H3	143
Figure 4.4- Répartition annuelle des travaux d'isolation par catégorie de logements	146
Figure 4.5- Répartition des travaux d'isolation par catégorie de logements	146
Figure 4.6- Taux de remplacement annuel des systèmes de chauffage par catégorie de logements et période de construction.....	148
Figure 4.7- Evolution des technologies de chauffage équipant les maisons entre 2015 et 2035	149
Figure 4.8- Evolution des technologies de chauffage équipant les immeubles chauffés individuellement entre 2015 et 2035.....	150
Figure 4.9- Evolution de l'efficacité moyenne des bâtiments par catégorie de logements entre 2015 et 2035.....	152
Figure 4.10- Evolution de l'efficacité moyenne des systèmes par catégorie de logements entre 2015 et 2035.....	154
Figure 4.11- Résultat de l'analyse de décomposition de l'évolution des émissions de CO ₂ sur la période 2015-2035	157
Figure 4.12- Résultat de l'analyse de décomposition de l'évolution des émissions de CO ₂ sur les périodes 2015-2025 et 2025-2035	158
Figure 4.13- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques aux réductions d'émissions de CO ₂ dans le cas des logements individuels	159
Figure 4.14- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques aux réductions d'émissions de CO ₂ dans le cas des logements collectifs chauffés individuellement	159
Figure 4.15- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques aux réductions d'émissions de CO ₂ dans le cas des logements collectifs chauffés individuellement	160
Figure 4.16- Courbes de coût marginal d'abattement issue des résultats de simulations ...	161
Figure 4.17- Besoin d'énergie utile moyen en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂	162

Figure 4.18- Besoin d'énergie utile moyen en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ par catégorie de logements.....	163
Figure 4.19- Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ par catégorie de logements.....	164
Figure 4.20- Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ par catégorie de logements	165
Figure 4.21- Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions	166
Figure 4.22- Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions par catégorie de logements.....	167
Figure 4.23- Contenu carbone moyen du mix énergétique non renouvelable à l'échelle du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émissions	168
Figure 4.24- Contenu carbone moyen du mix énergétique non renouvelable à l'échelle du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émissions	168
Figure 4.25- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution à l'atteinte de différents objectifs de réduction d'émissions en 2035 (en Mt CO ₂)	169
Figure 4.26- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution à l'atteinte de différents objectifs de réduction d'émissions en 2035 (en pourcentage de l'objectif de décarbonation)	170
Figure 4.27- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions	172
Figure 4.28- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émission.....	174
Figure 4.29- Coût global de chauffage total du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émission.....	175
Figure 4.30- Evolution des besoins moyens de chauffage des logements en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ et du plafond annuel de rénovation.....	176
Figure 4.31- Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions et du plafond de rénovation	176
Figure 4.32- Evolution du contenu carbone moyen du kWh de chaleur en fonction de l'objectif de réduction d'émissions et du plafond annuel de rénovation.....	177
Figure 4.33- Contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques à l'atteinte de quatre objectifs de réduction d'émissions de CO ₂	178
Figure 4.34- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions	179
Figure 4.35- Evolution supposée du contenu carbone de l'électricité entre 2015 et 2050 dans le cadre de l'analyse de sensibilité.....	180

Figure 4.36- Contribution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétique aux réductions d'émissions des simulations BAU dans le cadre du scénario DME et du scénario central	181
Figure 4.37- Evolution du besoin de chauffage en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central	182
Figure 4.38- Evolution de la part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central	182
Figure 4.39- Evolution du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO ₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central	183
Figure 4.40- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques à l'atteinte de quatre cibles de réduction d'émissions de CO ₂ dans le cadre du scénario central et du scénario DME	184
Figure 4.41- Contribution de l'efficacité et de la substitution à l'atteinte de quatre scénarios de décarbonation dans le cadre du scénario DME et du scénario central	185
Figure 7.1- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les maisons-types	208
Figure 7.2- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les appartements-types dotés d'un système de chauffage individuel	208
Figure 7.3- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les appartements-types dotés d'un système de chauffage collectif	209
Figure 7.4- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des maisons par période de construction	211
Figure 7.5- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des appartements chauffés individuellement par période de construction	211
Figure 7.6- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des appartements chauffés collectivement par période de construction	212
Figure 7.7- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage décentralisés individuels en fonction du besoin d'énergie utile	214
Figure 7.8- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage centralisés individuels en fonction du besoin d'énergie utile	214
Figure 7.9- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage collectifs en fonction du besoin d'énergie utile	215
Figure 7.10- Evolution des technologies de chauffage équipant les immeubles chauffés collectivement entre 2015 et 2035 dans le cadre de la simulation BAU	228

Figure 7.11- Efficacité moyenne des systèmes des maisons et des immeubles chauffés collectivement en fonction de l'objectif de réduction d'émissions du parc de logements résidentiel..... 228

Liste des tableaux

Tableau 1.1- Part des différents usages dans la consommation énergétique des secteurs résidentiel et tertiaire en 2010	37
Tableau 1.2- Contenu carbone de la chaleur issue du chauffage urbain (en grCO ₂ /kWh)	40
Tableau 1.3- Résultats de la décomposition par usage des émissions de CO ₂ du secteur résidentiel entre 1990 et 2010 pour les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques (en Mt CO ₂).....	40
Tableau 1.4- Résultats de la décomposition par usage des émissions de CO ₂ du secteur tertiaire entre 1990 et 2010 pour les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques (en Mt CO ₂)	43
Tableau 1.5- Variations et émissions associées aux facteurs sociodémographiques	47
Tableau 1.6- Résultats de l'analyse de décomposition par catégorie de logement entre 1990 et 2010 (en Mt CO ₂)	48
Tableau 2.1- Caractéristiques architecturales de la maison-type	59
Tableau 2.2- Caractéristiques architecturales de l'immeuble-type	59
Tableau 2.3- Coefficients moyens de transfert thermique des composants des enveloppes des maisons-types par période de construction (en W·m ⁻² ·K ⁻¹)	60
Tableau 2.4- Coefficients moyen de transfert thermique des composants des enveloppes thermiques des appartements-types par période de construction (en W·m ⁻² ·K ⁻¹)	60
Tableau 2.5- Besoins d'énergie utile et consommations d'énergie finale des maisons-types par période de construction.....	60
Tableau 2.6- Besoins d'énergie utile et consommations d'énergie finale des appartements-types par période de construction	61
Tableau 2.7- Ordre de mérite des opérations de rénovation pour l'amélioration des performances énergétiques des logements en fonction de leur période de construction.....	66
Tableau 2.8- Rendement énergétique et contenu en carbone associés à chaque système de chauffage.....	73
Tableau 2.9- Rendement énergétique et contenu carbone associé à chaque système de chauffage.....	74
Tableau 2.10- Répartition des systèmes de chauffage dans les logements individuels par période de construction	76
Tableau 2.11- Répartition des systèmes de chauffage individuel dans les logements collectifs par période de construction.....	76
Tableau 2.12- Répartition des systèmes de chauffage collectif dans les logements collectifs par période de construction.....	77

Tableau 2.13- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les maisons-types	80
Tableau 2.14- Contenu carbone initial et minimal pour les maisons-types en fonction de la période de construction (en gr de CO ₂ /kWh de chaleur)	86
Tableau 3.1- Matrice de coûts d'isolation des logements individuels en fonction de la date de construction	96
Tableau 3.2- Matrice de coûts d'isolation des logements collectifs en fonction de la date de construction	97
Tableau 3.3- Prix de l'énergie utilisée dans l'analyse (en ct d'euros/kWh).....	98
Tableau 3.4- Prix d'un kWh de chaleur et coût marginal de production de chaleur par système de chauffage (en euros)	103
Tableau 3.5- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage par maison-type	105
Tableau 3.6- Classement des technologies de chauffage par ordre de compétitivité pour les maisons-types.....	105
Tableau 3.7- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces.....	107
Tableau 3.8- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces	109
Tableau 3.9- Besoin d'énergie utile résultant de la minimisation du CGC par bâtiment type/système de chauffage installé (en kWh/(m ² .an)).....	116
Tableau 3.10- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation optimal.....	117
Tableau 3.11- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces	118
Tableau 3.12- Combinaison isolation/système de chauffage optimale pour les logements-types construits avant 1974	120
Tableau 3.13- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage optimale	121
Tableau 3.14- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage optimale	123
Tableau 3.15- Evolution, en %, des émissions de CO ₂ , et des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et de variation des prix des énergies retenues.....	127
Tableau 4.1- Evolution du besoin d'énergie utile par catégorie de logements	147

Tableau 4.2- Parts de marché des technologies de chauffage équipant les logements individuels	150
Tableau 4.3- Parts de marché des technologies de chauffage équipant les logements individuels	151
Tableau 4.4- Evolution de l'efficacité globale moyenne des systèmes par catégorie de logements et période de construction.....	153
Tableau 4.5- Evolution du taux de renouvelables dans la consommation d'énergie finale par catégorie de logements et période de construction.....	155
Tableau 4.6- Evolution du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable par catégorie de logements et période de construction (en grCO ₂ /kWh).....	155
Tableau 4.7- Evolution des émissions de CO ₂ par catégorie de logements et période de construction	156
Tableau 4.8- Réductions d'émission et coût global de chauffage du parc résidentiel pour les différents scénarios	173
Tableau 7.1- Matériaux d'isolation et prix d'achat pour les maisons (en EUR/m ²)	206
Tableau 7.2- Matériaux d'isolation et prix d'achat pour les immeubles (en EUR/m ²).....	207
Tableau 7.3- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les appartements-types chauffés individuellement.....	210
Tableau 7.4- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les appartements-types chauffés collectivement	210
Tableau 7.5- Contenu carbone initial et minimal pour les appartements-types chauffés individuellement (en gr de CO ₂ /kWh de chaleur).....	213
Tableau 7.6- Contenu carbone initial et minimal pour les appartements-types chauffés collectivement (en gr de CO ₂ /kWh de chaleur)	213
Tableau 7.7- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage individuel par appartement-type (en euros).....	216
Tableau 7.8- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage collectif par appartement-type (en euros).....	216
Tableau 7.9- Classement des technologies de chauffage individuel par ordre de compétitivité pour les appartements-types.....	216
Tableau 7.10- Classement des technologies de chauffage collective par ordre de compétitivité pour les appartements-types	217
Tableau 7.11- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces	218
Tableau 7.12- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces.....	219

Tableau 7.13- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces	220
Tableau 7.14- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces	221
Tableau 7.15- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage cout-efficace	222
Tableau 7.16- Evolution des émissions de CO ₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage cout-efficace	223
Tableau 7.17- Evolution, en %, du CGC, des émissions de CO ₂ , et des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et de variation des prix des énergies retenues	224
Tableau 7.18- Répartition des systèmes de chauffage au sein des logements individuels en fonction de la période de construction	225
Tableau 7.19- Répartition des systèmes de chauffage individuels au sein des logements collectifs en fonction de la période de construction	225
Tableau 7.20- Répartition des systèmes de chauffage individuels au sein des logements collectifs en fonction de la période de construction	226
Tableau 7.21- Coûts spécifiques utilisés pour le remplacement des différents systèmes de chauffage en fonction de la technologie employée initialement	227

Liste des abréviations

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

AIE : Agence Internationale de l'Energie

BBC : Bâtiment Basse Consommation

CEREN : Centre d'Etude et de Recherches Economiques sur l'Energie

CGC : Coût global de Chauffage

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

CITE : Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique

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

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

DME : Décarbonation du mix électrique

ECS : Eau Chaude Sanitaire

GES : Gaz à Effet de Serre

ITE : Isolation thermique par l'extérieur

ITI : Isolation thermique par l'intérieur

LTECV : Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte

MI : Maison individuelle

OPEN : Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement

PAC : Pompe à chaleur

SNCU : Syndicat National du Chauffage Urbain et de la Climatisation Urbaine

Introduction générale

Limiter l'ampleur et les conséquences du changement climatique implique des transformations profondes de nos systèmes énergétiques visant à réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (Field *et al.*, 2014). Ces transformations s'avèrent d'autant plus nécessaires qu'elles s'inscrivent dans un double contexte d'augmentation de la demande d'énergie au niveau mondial et de raréfaction progressive des ressources en énergies fossiles. Répondre à ces problématiques et se prémunir contre les risques environnementaux, économiques et sociaux qui leur sont associés implique donc de s'engager dès maintenant dans une phase de transition énergétique.

Celle-ci requiert un développement rapide des énergies plus sobres en carbone parallèlement à un accroissement de l'efficacité énergétique et devra nécessairement être déclinée dans les différents secteurs producteurs et/ou consommateurs d'énergie. Dans les pays industrialisés, le secteur du bâtiment, résidentiel et tertiaire, est l'un des secteurs prédominant dans la consommation totale d'énergie finale et les émissions de CO₂, d'où son rôle clef dans cette révolution énergétique. Ainsi, en 2016, le bâtiment était le premier vecteur de consommation d'énergie en France (47 % de l'énergie finale consommée), devant les transports (31 %), l'industrie (18,5 %) et l'agriculture (3 %)¹. Son rôle dans la transition énergétique est d'autant plus important qu'il est, avec le transport, l'un des deux secteurs à ne pas avoir significativement amorcé sa réduction des émissions depuis 1990 (CITEPA, 2018). Si son caractère diffus et hétérogène tend à complexifier le processus de décarbonation, il est néanmoins généralement considéré comme étant le secteur disposant du potentiel d'efficacité énergétique et de réduction des émissions le plus accessible et le plus rentable (Levine *et al.*, 2007 ; Naucmér et Enkvist, 2009 ; Mills, 2009 ; Üрге-Vorsatz *et al.*, 2011).

En France, le rôle clef de ce secteur dans la réalisation de la transition énergétique s'est traduit par l'adoption et la superposition d'objectifs ambitieux. En termes d'évolution des émissions de CO₂, si aucun objectif n'a été formulé spécifiquement pour le bâtiment, il n'en demeure pas moins que la réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2030 par rapport à 1990 fixé par la Loi de Transition Energétique et pour la Croissance Verte (LTECV, 2015) et l'atteinte du facteur 4 en 2050 ne pourront être réalisées sans une importante contribution du secteur du bâtiment. Dans ce cadre, le pays s'est engagé à

¹ D'après le service de la donnée et des études statistiques (2017).

produire 16,5 Mtep de chaleur renouvelable en 2023² et à porter sa part à 38 % du total de la chaleur produite en 2030³. Parallèlement, l'Etat mise sur d'importants gains en termes d'efficacité énergétique dans le secteur. Il est ainsi prévu une baisse de 38 % des consommations d'énergie finale des bâtiments existants entre 2005 et 2020. De plus, la LTECV s'est fixé pour objectif l'atteinte de 500 000 rénovations lourdes dans le résidentiel à partir de 2017 visant notamment à amener l'intégralité du parc résidentiel au niveau BBC⁴ d'ici 2050. L'objectif de rénovation à grande échelle du parc résidentiel est à nouveau mentionné comme l'une des premières priorités du Plan Climat de juillet 2017, qui affiche l'ambition d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 (MTES, 2017a).

La coexistence de ces objectifs sectoriels, de pénétration des énergies renouvelables d'une part, et d'économie d'énergie d'autre part, met en évidence la possibilité de mobiliser différents leviers dans la perspective de réduire les émissions de CO₂ du bâtiment. En effet, si la décarbonation du mix énergétique et l'amélioration de l'efficacité énergétique peuvent constituer des fins en soi (pour réduire la dépendance énergétique et améliorer la balance commerciale par exemple), ils sont aussi deux moyens distincts d'atteinte des objectifs de réduction d'émissions. Assurer la bonne complémentarité entre ces deux leviers est certainement l'une des clefs pour engager le secteur du bâtiment résidentiel dans une stratégie ambitieuse de décarbonation.

La substitution énergétique consiste à remplacer un vecteur énergétique par un autre. Elle constitue donc un levier de réduction des émissions de CO₂ dès lors que l'énergie de substitution est moins carbonée que celle d'origine. Des économies de carbone peuvent donc aussi bien résulter du remplacement d'une source d'énergie fossile par une autre que du recours à une source d'énergie d'origine renouvelable. Dans ce cadre, l'abattement d'émissions est réalisé en amont, au niveau de la production d'énergie ou de la fourniture du service énergétique⁵.

L'efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu (Lovins, 2004). Elle se distingue ainsi de la sobriété énergétique, qui peut impliquer une réduction du niveau de confort ou de développement (Alcott, 2008 ; Herring et

² D'après l'arrêté relatif à la programmation pluriannuelle des capacités de production d'énergie renouvelable adopté en 2016.

³ D'après la LTECV (2015).

⁴ Le sigle BBC signifie « bâtiment basse consommation » et implique un niveau de performance énergétique conduisant à une consommation d'énergie primaire inférieure à 80 kWh/(m².an) en rénovation et 50 kWh/(m².an) dans le neuf (MTES,2017b).

⁵ Par exemple, dans le secteur résidentiel, une chaudière au fioul peut être remplacée par une chaudière à gaz ou un chauffe-eau solaire peut être substitué à un chauffe-eau électrique.

al., 2009). Les mesures d'efficacité visent à l'amélioration des usages de l'énergie (procédés industriels, appareils utilisateurs d'énergie, comportement). Dans une définition plus large, elles englobent aussi l'écoconception des produits et des bâtiments. Ces mesures englobent donc à la fois des actions en amont sur les appareils et systèmes consommateurs et/ou producteurs d'énergie (développement des appareils électroménagers basse consommation, amélioration du rendement énergétique des systèmes de chauffage, etc.) et les opérations de maîtrise de l'énergie en aval (optimisation des performances de l'enveloppe thermique d'un bâtiment par exemple).

La mise en œuvre de ces deux leviers peut être réalisée à partir du déploiement généralisé des technologies actuellement disponibles (Friesen *et al.*, 2012 ; Li *et al.*, 2013). Les difficultés récurrentes à la réalisation de la baisse des émissions du secteur sont donc moins d'ordre technologique que d'ordre économique. Dans un monde où les ressources sont limitées, il est nécessaire de se préoccuper du caractère efficient de l'allocation des moyens mis en œuvre pour atteindre les différents objectifs de politique publique.

Dans ce cadre émerge la question de l'utilisation parcimonieuse de la substitution et de l'efficacité énergétique dans l'optique d'une décarbonation du secteur résidentiel-tertiaire. Si la maxime « l'énergie la moins chère et la moins polluante, c'est encore celle que l'on ne consomme pas⁶ » a guidé en partie la stratégie de réduction d'émissions dans le bâtiment en France et semble frappée du sceau du bon sens, elle néglige de fait les coûts qui peuvent être associés à cette non-consommation, une fois traités les comportements de pur gaspillage. Ainsi, la mise en place de mesures d'efficacité passives (amélioration des performances de l'enveloppe thermique des bâtiments) ou actives (domotique, détecteurs de présence) engendre des coûts qu'il convient de mettre en balance avec ceux liés aux autres options d'abattement.

Cette thèse s'intéresse aux rôles passés et futurs de la substitution et de l'efficacité énergétique dans l'évolution des émissions de CO₂ du secteur résidentiel. Elle s'interroge sur le type d'arbitrage à rendre pour trouver les combinaisons d'action d'efficacité et de substitution permettant de réduire massivement les émissions de CO₂ des logements existants au moindre coût.

Cette question est rendue ardue par l'hétérogénéité caractérisant les logements, leurs équipements et leur environnement. Les seize millions de résidences principales peuvent être distinguées en fonction de leur type (individuel ou collectif), leur surface, leur compacité ou

⁶ Prononcée notamment par Nicole Fontaine, Ministre déléguée à l'Industrie, à l'occasion du débat national sur les énergies à Strasbourg (le 3 avril 2003).

encore leur niveau d'isolation thermique. Elles sont dotées de systèmes de chauffage centralisés ou décentralisés, individuels ou collectifs, et pouvant fonctionner à partir d'une grande variété de vecteurs énergétiques, et sont localisées dans des régions au climat plus ou moins rigoureux. Sans même tenir compte de la diversité des ménages occupant ces habitations, ces seules caractéristiques techniques et géographiques affectent fortement les besoins en énergie des logements et la pertinence des mesures de réduction d'émissions pouvant être implémentées.

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour étudier la contribution de ces deux facteurs à la dynamique des émissions de carbone. Certaines reposent sur des approches « top-down », basées sur l'utilisation de données agrégées, permettant de déterminer les évolutions de la substitution et de l'efficacité énergétique et de relier celles-ci aux variations des émissions de CO₂. D'autres, procédant de démarches « bottom-up », s'appuient sur des données individualisées, une représentation plus ou moins fine du parc de logements, et une description généralement explicite des technologies afin de mesurer les impacts de différents types de mesures d'ordres techniques ou économiques. Si la première catégorie de méthodes est adaptée aux analyses rétrospectives, elle semble moins pertinente dans le cadre de travaux prospectifs, notamment dans un contexte marqué par la nécessité de réduire drastiquement les émissions de CO₂ et d'opérer de profondes mutations des systèmes énergétiques. Les travaux d'Allibe (2012a) soulignent à ce titre la forte prédominance des approches bottom-up dans le cadre des travaux d'analyse prospective du secteur résidentiel.

La littérature portant sur la réalisation de la transition énergétique dans le secteur résidentiel s'est significativement enrichie ces dernières décennies et abrite des travaux extrêmement variés, tant au niveau des questions posées que des méthodes mobilisées. Trois grands types d'exercices prospectifs peuvent être identifiés à partir de la typologie proposée par Börjeson (Börjeson *et al.*, 2006).

Une première catégorie d'études repose sur l'élaboration de scénarios exploratoires destinés à investiguer les implications, notamment sur les consommations d'énergie ou les émissions de CO₂, d'une palette plus ou moins large de transformations du système énergétique ou de son environnement. La question au centre de ces travaux est du type : « que peut-il se passer ? ». Ils consistent à explorer un ensemble de futurs possibles, généralement sur un horizon temporel étendu, à partir d'une description relativement fine du parc de bâtiments et de ses équipements, générés par des mutations des systèmes techniques le plus souvent prédéterminées. Ils traitent par exemple des conséquences résultant de la diffusion de certaines technologies spécifiques (Traisnel, 2001 ; Teissier et Meunier, 2008 ; Marchand *et al.*, 2008) ou de l'impact de la massification de différents types de mesures de décarbonation (Orselli, 2008).

Une seconde catégorie de travaux cherche à répondre à la question : « que va-t-il se passer ? ». Les scénarios développés ne se veulent plus exploratoires mais prédictifs. Si certains modèles de simulation développés dans ce cadre disposent d'une représentation relativement détaillée du parc de logements et d'une modélisation explicite des éléments principaux du système énergétique, le réalisme « technologique » reste limité au profit d'une modélisation microéconomique poussée du comportement des ménages et des différentes barrières à l'investissement et défaillances de marchés mises en lumière par le paradoxe de l'efficacité énergétique (Jaffe et Stavins, 1994). Ce type de travaux prospectif est notamment conduit afin d'évaluer l'impact de différents instruments de politique publique (crédit d'impôt, taxe carbone, prêt bonifiés, certificat d'économies d'énergies) et de leurs potentielles interactions sur l'évolution du parc résidentiel et de ses équipements, et donc *in fine* sur les consommations d'énergie et les émissions de carbone (Giraudet, 2011 ; Nauleau, 2015).

Enfin, un dernier type d'analyses prospectives se focalise sur la construction de scénarios normatifs visant à éclairer des problématiques du type : « comment atteindre tel objectif ? ». Ces travaux ont pour objet principal l'analyse des trajectoires permettant à un système complexe d'atteindre une cible environnementale, énergétique ou économique donnée. La détermination des mutations à opérer est quasi-systématiquement guidée par la recherche d'une efficacité maximale. Ainsi, ce type d'études repose souvent sur l'emploi d'un modèle d'optimisation à l'instar du modèle MARKAL⁷. Elles sont caractérisées par une modélisation poussée des systèmes énergétiques s'opérant au détriment de la représentation des comportements microéconomiques couramment réduits à des mécanismes de rationalité rigides, assez éloignés de la réalité. De ce fait, si ces exercices de prospectives sont principalement menés à des fins de planification énergétique ou dans l'optique d'apporter des éclairages sur la cohérence et la pertinence des stratégies de transformation des systèmes énergétiques, ils ne permettent pas d'éclairer les décideurs sur les mesures de politique publique à adopter afin de déclencher les investissements.

Cette dernière catégorie d'études prospectives apparaît comme particulièrement adaptée à la question des contributions potentielles de la substitution et de l'efficacité énergétiques à la décarbonation du secteur résidentiel français. En effet, la question du rôle de ces facteurs est intrinsèquement liée aux caractéristiques des différentes technologies de production et de maîtrise de l'énergie, suggérant la nécessité d'adopter une approche reposant sur une

⁷ Le modèle MARKAL (MARket ALlocation) est un modèle prospectif d'optimisation des systèmes énergétiques caractérisé par une modélisation explicite des différentes technologies de production d'énergie et une représentation fine des secteurs économiques.

représentation particulièrement fine et réaliste des équipements techniques associés aux logements.

Par ailleurs, un pan de la littérature économique, reposant sur ce type d'approches et notamment sur la minimisation des coûts des services énergétiques, a permis de mettre en exergue l'existence d'interactions négatives entre mise en œuvre de mesures d'économies d'énergie et déploiement de systèmes peu carbonés au sein du secteur résidentiel (Wene, 1980 ; Rydén *et al.*, 1993 ; Rolfsman et Gustafsson, 2003 ; Rolfsman, 2004 ; Nässén et Holmberg, 2013 ; Carpène *et al.*, 2014). La présence d'une potentielle incompatibilité entre différents leviers de réduction d'émissions de CO₂ pose la question de l'impact que celle-ci pourrait avoir sur les contributions respectives de la substitution et de l'efficacité énergétiques à la réalisation de la décarbonation du secteur.

Les outils de modélisation retenus dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre des approches de type Bottom-up précédemment décrites. Ils reposent sur une description fine du parc résidentiel, avec l'objectif d'identifier, pour les différentes sous-catégories de logement, les contributions pertinentes de la substitution et de l'efficacité énergétiques pour réduire les émissions de CO₂.

Un premier chapitre est dédié à une analyse rétrospective des contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur du bâtiment entre 1990 et 2010. Reposant sur la conduite d'analyses de décomposition successives, les travaux révèlent notamment que la relative stabilité des émissions de CO₂ observée sur la période résulte en réalité de la neutralisation de deux types de facteurs. En effet, divers facteurs socio-démographiques ont exercé une forte pression à la hausse sur les émissions de carbone à travers un accroissement continu de la surface totale à chauffer. L'effet de ces facteurs a été entièrement contrebalancé par d'importantes améliorations de l'efficacité énergétique et, dans une moindre mesure, du contenu carbone de la chaleur produite. Les objectifs affichés par les pouvoirs publics mettant l'accent sur l'efficacité énergétique se situent donc dans le prolongement des tendances passées.

Le second chapitre s'intéresse à l'évaluation des coûts d'investissement minimums associés à l'atteinte de niveaux croissants d'amélioration de l'efficacité des bâtiments, de l'efficacité de production et de la décarbonation du mix énergétique mobilisé pour le chauffage du parc résidentiel. Ces derniers sont évalués à partir des coûts associés au remplacement des systèmes de chauffage et à ceux induits par la mise en œuvre d'un large panel de mesures de renforcement de l'enveloppe thermique des bâtiments. La construction de ces fonctions de coûts utilisés à l'échelle de logements-types puis à l'échelle du parc résidentiel permet d'identifier pour chacun des facteurs les solutions techniques minimisant le coût d'investissement à mettre en œuvre et les segments du parc de logements à traiter prioritairement. L'existence de coûts marginaux croissants d'amélioration de l'efficacité

énergétique et du contenu carbone du mix énergétique milite pour s'appuyer simultanément sur les trois leviers, mais la modélisation totalement statique et n'intégrant que l'évaluation des coûts d'investissement ne donne aucune méthode pour orienter les arbitrages à réaliser entre ces deux leviers de réduction d'émissions.

Le troisième chapitre est centré sur une analyse statique de la minimisation systématique du coût global de chauffage des logements du parc résidentiel et de ses implications en termes de travaux d'isolation réalisés et d'évolution des équipements de production de chaleur. Afin d'étudier les effets d'éviction entre amélioration des performances de l'enveloppe des bâtiments et déploiement des systèmes de chauffage efficaces et/ou décarbonés, l'analyse est menée en trois temps. Le coût global de chauffage de l'ensemble du parc de logements est d'abord minimisé en mobilisant l'une et l'autre des mesures séparément puis conjointement. Les résultats mettent en lumière l'existence d'interactions négatives entre la compétitivité des systèmes de chauffage renouvelables, et efficaces dans une moindre mesure, et l'ampleur des travaux d'isolation. Les systèmes de chauffage décarbonés, caractérisés par un coût d'investissement élevé et un coût marginal de production faible ne s'avèrent compétitifs qu'au sein des logements les plus énergivores. A l'inverse, les travaux d'isolation autres que de faible ampleur se révèlent non profitables pour les habitations déjà dotées de ce type de technologie de chauffage. La minimisation du coût global de chauffage laisse apparaître l'existence d'un gisement de réduction d'émissions de CO₂ à coût négatif important, quelles que soient les hypothèses retenues. Ce gisement est exploité à moindre coût dans le cadre d'une mobilisation simultanée des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique.

Enfin, un modèle de simulation prospective technico-économique est développé dans le dernier chapitre de la thèse. Procédant d'une approche Bottom-up, le modèle Zephyr-chaleur se caractérise par une représentation très fine du parc de logements français. Reposant sur les différentes briques développées aux chapitres II et III, le modèle introduit les contraintes temporelles résultant du cycle de renouvellement des systèmes de chauffage et d'un plafond annuel de logements pouvant faire l'objet de travaux d'isolation. La prise en compte de ces contraintes permet de simuler l'évolution prospective du parc de résidentiel français en fonction de différents objectifs de réduction d'émissions sur la période 2015-2035 et en supposant que les voies coûts-efficaces sont systématiquement suivies. Les résultats de simulation permettent d'évaluer la contribution des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques en fonction des objectifs de décarbonation du parc résidentiel.

Les simulations soulignent un rôle d'autant plus important de la substitution dans l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions que ceux-ci sont ambitieux. A l'inverse, loin de ce que suggèreraient les objectifs de performance énergétique adoptés par les pouvoirs publics, le rôle de l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe des bâtiments semble jouer un rôle qui devient secondaire dans la plupart des cas quand on augmente l'ambition climatique. Dans de

nombreux cas, le niveau moyen coût-efficace d'isolation des logements tend même à décroître lorsque les objectifs de décarbonation du parc s'élèvent. Ces résultats conduisent à discuter les priorités des politiques conduites en France à l'égard du secteur résidentiel et l'accent mis sur la rénovation du bâtiment ancien. Pour viser la réduction massive des émissions de CO₂, un rééquilibrage des politiques publiques au profit de la substitution permettrait sans doute de réduire les coûts et donc de renforcer la probabilité de réaliser des objectifs qui n'ont été jusqu'à présent ni atteints ni même approchés.

Chapitre I : Contribution des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions de CO₂ du parc de logements en France entre 1990 et 2010 : une analyse ex-post

1.1)	Introduction	32
1.2)	Méthode de décomposition	33
1.3)	Données	35
1.4)	Décomposition des émissions de CO₂ du parc de bâtiments français par usage	37
1.4.1-	<i>Poids et évolution des usages de l'énergie dans les bâtiments</i>	37
1.4.2-	<i>Analyse de décomposition des émissions du résidentiel par usage</i>	38
1)	Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur résidentiel	40
2)	Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur résidentiel	41
1.4.3-	<i>Analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire par usage</i>	42
1)	Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur tertiaire	43
2)	Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire.....	44
1.5)	Décomposition des émissions de CO₂ du chauffage par type de bâtiments	45
1.5.1-	<i>Catégories de logements</i>	45
1.5.2-	<i>Facteurs additionnels étudiés</i>	45
1.5.3-	<i>Résultats de la décomposition des émissions de CO₂ liées au chauffage par type de logements</i>	47
1.6)	Conclusion	49

Chapitre I : Contribution des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions de CO₂ du parc de logements en France entre 1990 et 2010 : une analyse *ex-post*

1.1) Introduction

Penser les rôles respectifs de l'efficacité et de la substitution dans la transition énergétique implique en premier lieu de s'interroger sur la contribution que ces deux facteurs ont pu avoir jusqu'à présent dans l'évolution des émissions de CO₂. C'est donc à travers ce prisme que ce chapitre entend apporter un premier éclairage sur notre question de recherche.

La science économique fournit toute une panoplie d'instruments et de méthodes à qui souhaite analyser et quantifier l'impact de facteurs divers sur certaines grandeurs. L'approche économétrique, qui vise à tester et à estimer la nature de la relation entre différentes variables dont la forme d'interaction n'est pas triviale, n'est pas nécessairement la plus adaptée à notre objet d'étude en ce sens que les mécanismes liant l'efficacité et la substitution aux émissions de CO₂ sont par nature des relations techniques connues et explicites. A ce titre, l'approche fondée sur les méthodes d'analyse de décomposition (ANG, 2004) semble plus pertinente. Ce type d'approche résulte d'extensions et d'approfondissements de l'équation de Kaya (Kaya, 1989) qui relie par une relation basique la population, le PIB, l'énergie et les émissions de CO₂. L'utilisation de ces techniques de décomposition permet aux économistes de quantifier l'impact de facteurs prédéterminés sur les variations de certains agrégats à l'instar des consommations d'énergie. Depuis une décennie, elles sont largement utilisées pour éclairer certaines problématiques énergétiques ou environnementales (Ang et Zhang, 2000 ; Ang, 2004). Ainsi, dans la littérature, des analyses de décomposition ont été employées pour mesurer l'impact sur les émissions de GES de certains facteurs tel que l'intensité énergétique (Baleažentis *et al.*, 2011 ; Reddy *et al.*, 2010 ; Shahiduzzaman et Alam, 2013) ou les changements structurels (Henriques et Kander, 2010), ou encore pour analyser la demande énergétique de divers secteurs comme l'industrie manufacturière (Tian, 2013, Diakoulaki et Mandaraka, 2007 ; Kim 2017) ou les transports (Timilsina et Shrestha, 2009 ; Papagiannaki et Diakoulaki, 2009 ; Mendiluce et Schipper, 2011). En France, une étude récente a recouru à l'analyse de décomposition pour quantifier la contribution de divers facteurs à l'évolution des émissions de CO₂ entre 1990 et 2015 (Ecoiffier, 2017). Ces travaux ont été menés sur les différents secteurs de l'économie, exception faite du secteur résidentiel. Etonnamment, à l'exception notable de Mairet et Decellas (2009) qui ont travaillé sur les déterminants de la demande d'énergie dans le secteur tertiaire français entre 1996 et 2006, très peu d'études ont appliqué des méthodes de décomposition aux consommations énergétiques ou aux émissions de CO₂ associées aux usages de l'énergie dans les bâtiments.

Ce premier chapitre se propose donc de quantifier *ex post* l'impact de l'efficacité et de la substitution énergétiques sur l'évolution des émissions de CO₂ des bâtiments français à

travers la mise en œuvre de différentes analyses de décomposition. Pour mesurer la prépondérance de ces facteurs dans les variations observées des émissions de CO₂, les effets d'autres types de variables, notamment sociodémographiques, sont également évalués. Cette étude s'articule autour de deux décompositions successives. La première est menée sur les émissions de l'ensemble des bâtiments français entre 1990 et 2010 et distingue la contribution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques en fonction des principaux usages de l'énergie (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson et électricité spécifique). La seconde consiste en un approfondissement de la décomposition des émissions de CO₂ issues du chauffage appliqué au seul secteur résidentiel en fonction de la période de construction des logements.

Le chapitre s'organise comme suit. La section 1.2 décrit la méthode de décomposition utilisée et les différents facteurs de substitution, d'efficacité et d'activité étudiés. La section 1.3 présente les données mobilisées. Une analyse de décomposition des émissions du secteur résidentiel-tertiaire par usage de l'énergie est réalisée en section 1.4. La section 1.5 est dédiée à la décomposition des émissions issues du chauffage des logements par période de construction. La section 1.6 conclut.

1.2) Méthode de décomposition

Un large éventail de techniques mathématiques est mobilisable pour mener une analyse de décomposition. La méthode dite « *Logarithmic Mean Divisia Index* » (LMDI-I) sera appliquée ici en raison de ses nombreux avantages : décomposition parfaite, agrégation cohérente, facilité de mise en œuvre et d'interprétation et capacité à gérer les valeurs nulles (Ang, 2005 ; Ang *et al.*, 2007).

Suivant l'intuition de Kaya, les émissions de CO₂ d'un pays ou d'un secteur peuvent être exprimées comme le produit de différents facteurs. Par exemple, elles peuvent être décomposées comme le produit du facteur d'émission moyen, de l'intensité énergétique et d'une mesure du service rendu par la consommation d'énergie (que l'on désignera ici par le terme : « activité »). Ainsi, les émissions annuelles de CO₂ d'un pays ou d'un secteur spécifique peuvent s'écrire :

$$C = \frac{C}{ET} \times \frac{ET}{ACT} \times ACT \quad (1.1)$$

Avec, C , les émissions totales de CO₂, ET , la consommation totale d'énergie finale et ACT , un facteur d'activité (le PIB par exemple).

Les différents rapports obtenus par la désagrégation des émissions de CO₂ déterminent les facteurs que l'on veut mettre en évidence dans l'analyse de décomposition. Dans un premier temps, nous reprenons donc ce raisonnement en isolant cinq facteurs principaux contribuant directement à l'évolution des émissions de CO₂ du secteur du bâtiment. Trois de ces facteurs relèvent de mécanismes de substitution :

- $CC_{i,j}$, le facteur « contenu carbone » défini par les rapports $\frac{C_{i,j}}{E_{i,j}}$, avec $C_{i,j}$, les émissions de l'usage i , liées aux consommations de la source d'énergie j^8 et $E_{i,j}$ la consommation totale d'énergie fossile j^9 pour l'usage i . Ce facteur permet de prendre en compte de potentielles évolutions du contenu en carbone des sources d'énergies ou des vecteurs énergétiques potentiellement issus de la combustion de plusieurs combustibles différents. Les facteurs d'émission des combustibles fossiles ne font pas l'objet de modification sur la période. Peuvent donc être concernées ici l'électricité et la chaleur directement livrées par le chauffage urbain puisque les mix énergétiques permettant de les produire peuvent évoluer au cours du temps.
- $EM_{i,j}$, le mix énergétique fossile défini par les rapports $\frac{E_{i,j}}{E_i}$, avec E_i , la consommation totale d'énergie fossile pour l'usage i . Ce facteur mesure donc l'effet de substitution entre sources d'énergie non-renouvelables à travers l'évolution du mix énergétique fossile sur la période.
- PN_i , la pénétration des énergies renouvelables, définie comme le rapport $\frac{E_i}{ET_i}$, avec ET_i , la consommation d'énergie finale totale associée à l'usage i .

Ainsi, nous distinguerons dans l'analyse de décomposition les actions de substitution ayant lieu lors de la transformation de l'énergie, de celles réalisées entre sources d'énergie fossiles, ou entre renouvelables et fossiles.

Le quatrième facteur renvoie à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il est à noter que ces gains d'efficacité énergétique peuvent aussi bien provenir d'une rationalisation de l'usage de l'énergie en aval (comme celle induite par l'amélioration de l'isolation des logements) que d'une meilleure optimisation du processus d'utilisation de l'énergie en amont (comme l'emploi de technologies de production d'eau chaude sanitaire ou d'appareils électroménagers à meilleur rendement énergétique). On a donc :

- EE_i , l'efficacité énergétique mesurée par le rapport $\frac{ET_i}{ACT}$, avec ACT , la mesure de l'activité totale du secteur. La nature de cette mesure est par définition dépendante de l'indicateur d'activité choisi.

Enfin, le cinquième facteur renvoie à la mesure des services rendus par l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments :

⁸ Hors énergie renouvelable (biomasse).

⁹ Par commodité, toute source d'énergie ou de chaleur produite au moins partiellement à partir d'énergie fossile sera désignée par le terme « d'énergie fossile », incluant de fait l'électricité et le chauffage urbain.

-*ACT*, la mesure de l'activité du secteur.

Les émissions de CO₂ sont donc décomposées de la manière suivante :

$$C = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j}}{E_{i,j}} * \frac{E_{i,j}}{E_i} * \frac{E_i}{ET_i} * \frac{ET_i}{ACT} * ACT \quad (1.2)$$

En remplaçant les différents rapports par les facteurs associés, on obtient :

$$C = \sum_{i,j} CC_{i,j} \times EM_{i,j} \times PN_i \times EE_i \times ACT \quad (1.3)$$

La méthode *LMDI* permet ensuite d'attribuer la contribution de chacun de ces facteurs à l'évolution des émissions de CO₂ entre deux dates à partir des variations annuelles observées de celles-ci et de celles des facteurs en question. Dans ce chapitre, cette méthode est mobilisée sous sa forme additive. Elle permet d'expliquer la différence d'émissions de CO₂ entre une année t et une année 0 par la somme des contributions des différents facteurs prédéterminés.

$$\Delta C_{totale} = C^t - C^0 = \Delta C_{CC} + \Delta C_{EM} + \Delta C_{PN} + \Delta C_{EE} + \Delta C_{ACT} \quad (1.4)$$

La formule *LMDI* permet ensuite le calcul de la variation attribuable à chacun des facteurs *x* par l'équation suivante :

$$\Delta x_{i,j} = \sum_{i,j} \frac{(C_{i,j}^t - C_{i,j}^0)}{(\ln(C_{i,j}^t) - \ln(C_{i,j}^0))} * \left(\ln \left(\frac{x_{i,j}^t}{x_{i,j}^0} \right) \right) \quad (1.5)$$

Avec $\Delta x_{i,j}$, la variation d'émissions de CO₂ induite par le facteur $x_{i,j}$ sur la période.

1.3) Données

Bien souvent, la mise en œuvre de ce type de travaux est tributaire des données existantes et disponibles. Les données issues des inventaires annuels réalisés par le CITEPA (CITEPA, 2018) au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques¹⁰ et du Protocole de Kyoto (UNFCCC, 1997), font figure de sources de référence lorsqu'il est question des évolutions sectorielles des consommations énergétiques ou des émissions de gaz à effet de serre. Elles sont essentiellement produites par un recensement sectoriel des consommations des différents combustibles fossiles et sont complétées par des données d'enquête (CITEPA, 2015). Elles ont notamment pour avantage de permettre des

¹⁰ Appellées inventaire format Secten.

comparaisons entre pays puisque la méthodologie et les classifications utilisées sont normées au niveau international. Cependant, la structure de cette base de données n'est pas sans poser problème dans le cas d'une analyse centrée sur les usages de l'énergie dans les bâtiments. Tout d'abord, les émissions directement attribuables aux bâtiments ne sont pas regroupées dans une même catégorie. Les émissions liées à la production d'électricité et au chauffage urbain sont affectées à l'industrie de l'énergie, et il n'est pas possible, par exemple, de distinguer sur cette base la part de l'électricité consommée pour les différents usages. De plus, si les consommations sont données par type d'énergie, aucun niveau de désagrégation supplémentaire n'est disponible, ce qui limite, *de facto*, la compatibilité de cette base de données avec une analyse de décomposition approfondie des facteurs contribuant à la variation des émissions de CO₂.

De ce fait, une autre source de données, spécifiquement dédiée aux usages énergétiques des bâtiments, est mobilisée dans cette étude. Il s'agit de la base de données du CEREN (CEREN, 2015)¹¹. Celle-ci offre un niveau de détail supérieur en ce qui concerne les origines des consommations énergétiques du bâtiment. Elle repose sur de vastes enquêtes annuelles menées auprès d'entreprises, de ménages et de maîtres d'œuvres. Elle permet de distinguer les consommations d'énergie par usage mais aussi par type de bâtiments, résidentiels (par date de construction) ou tertiaires (par branche d'activité). Elle contient aussi des informations relatives aux bâtiments industriels et agricoles mais celles-ci ne sont pas mobilisées ici car les consommations d'énergie qui y sont associées relèvent de problématiques spécifiques à ces deux secteurs. Ces données sont disponibles au niveau désagrégé sur la période 1990-2010. En appliquant les facteurs d'émission de l'ADEME (ADEME, 2005 ; ADEME 2014)¹² et de SNCU (SNCU, 2017), les émissions de CO₂ aux différents niveaux de désagrégation sont établies et viennent compléter la base de données initiale.

On observe des différences entre les émissions attribuées au secteur résidentiel-tertiaire en 2010 selon l'inventaire CITEPA (90,9 Mt de CO₂) et à partir des consommations d'énergie comptabilisées par le CEREN (119 Mt de CO₂). Comme évoqué précédemment, cet écart s'explique par les différences de périmètre accordé au résidentiel-tertiaire lors de la réalisation de ces deux inventaires.

¹¹ Le Centre d'Etudes et de Recherches économiques sur l'énergie (CEREN) est un GIE créé en 1958 pour mutualiser les ressources nécessaires à la collecte et au traitement d'informations statistiques sur les consommations d'énergie en France.

¹² Pour attribuer un facteur d'émission à la production annuelle d'électricité et chauffage urbain en France.

1.4) Décomposition des émissions de CO₂ du parc de bâtiments français par usage

1.4.1- Poids et évolution des usages de l'énergie dans les bâtiments

Présenter une décomposition des émissions du bâtiment en fonction des usages requiert au préalable de les classer et d'évaluer leurs importances en termes de consommation d'énergie. On peut distinguer quatre usages principaux de l'énergie dans les bâtiments résidentiels et tertiaires :

- Le chauffage, qui permet d'assurer le confort thermique des individus et dont la production peut être plus ou moins centralisée (environ 30 Mtep¹³ d'énergie finale en 2010).
- La production d'eau chaude sanitaire (ECS), c'est-à-dire d'eau chauffée à usage domestique et sanitaire. Celle-ci peut être effectuée de manière jointe ou indépendante de la production de chauffage (environ 7,5 Mtep d'énergie finale en 2010).
- La cuisson (3,9 Mtep).
- L'électricité spécifique, qui correspond à l'utilisation d'électricité pour des services ne pouvant être rendus que par cette source d'énergie¹⁴ (12,8 Mtep).

Ces usages possèdent des profils de consommation énergétique très différents (types de combustibles, quantités consommées, pic d'utilisation, etc.) et n'ont pas nécessairement le même poids dans chacun des secteurs (Tableau 1.1). Ainsi, le chauffage représente une part plus importante des consommations énergétiques du résidentiel que du tertiaire, où la cuisson et l'électricité spécifique peuvent constituer le premier usage de certaines branches d'activité.

Tableau 1.1- Part des différents usages dans la consommation énergétique des secteurs résidentiel¹⁵ et tertiaire en 2010

	Résidentiel	Tertiaire	Total
Chauffage	62.8 %	59.1 %	69.0 %
ECS	11.0 %		
Cuisson	7.8 %	6.1 %	7.3 %
Electricité spécifique	18.4 %	34.8 %	23.7 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

Ce poids relatif des utilisations de l'énergie n'est pas le même en termes d'émissions de CO₂ du fait de mix énergétiques très différents en fonction des usages. La cuisson repose

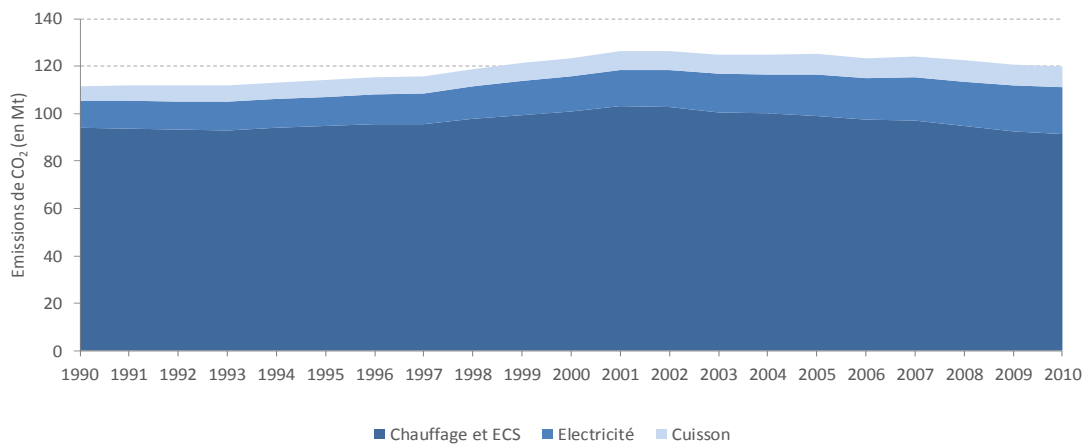
¹³ A climat normal.

¹⁴ Appareils électroménagers, matériel audio-visuel et informatique, etc.

¹⁵ Seules les consommations des résidences principales sont comptabilisées dans ce tableau.

principalement sur l'électricité et le gaz. Les usages spécifiques sont eux, par définition, assurés uniquement par l'électricité. La production de chauffage et d'eau chaude sanitaire s'appuie sur un mix énergétique plus divers. De plus, ces émissions ne suivent pas une dynamique similaire (Figure 1.1).

Figure 1.1- Evolution des émissions de CO₂ des bâtiments résidentiels et tertiaires en fonction de l'usage



Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

Certaines sont relativement stables sur la période (cuisson et chauffage), quand d'autres, à l'instar de l'électricité spécifique, ont fortement progressé (+150 % entre 1990 et 2010) du fait de l'apparition de nouveaux équipements (matériel informatique, climatisation, etc.). Cette première analyse de décomposition vise donc à identifier et à quantifier les facteurs ayant freiné ou amplifié les émissions de CO₂ issues de ces quatre usages et notamment les rôles respectifs de l'efficacité et de la substitution. Les résultats sont présentés d'abord pour le secteur résidentiel puis pour le secteur tertiaire.

1.4.2- Analyse de décomposition des émissions du résidentiel par usage

Trois éléments nécessitent d'être précisés pour mener à bien l'analyse de décomposition. Tout d'abord, l'indicateur d'activité doit être déterminé. Deux types d'indicateurs peuvent être utilisés en analyse de décomposition : des indicateurs monétaires (chiffre d'affaires, valeur ajoutée) et des indicateurs physiques (ventes, surface, population). Chacun d'entre eux dispose d'avantages et d'inconvénients. Les indicateurs monétaires peuvent s'avérer très approximatifs du fait des variations de prix, année après année, dans chaque branche. Les indicateurs physiques, réputés plus précis, posent des problèmes en termes de comparabilité et d'agrégation de l'activité des sous-ensembles étudiés. Ce sont ces derniers qui seront utilisés ici, notamment du fait de la nature « non productive » à proprement parler du secteur résidentiel. Plusieurs options auraient pu être retenues, car plus ou moins adaptées aux différents usages : le nombre d'habitants, le nombre de logements ou la surface totale de ces

derniers. Le chauffage représentant la part majoritaire de la consommation énergétique du résidentiel, nous retiendrons ce dernier indicateur. Pour tenir compte des logements inoccupés, l'analyse se concentrera uniquement sur l'évolution de la surface des résidences principales. A noter, que comme le même indicateur d'activité est utilisé pour tous les usages et que ces derniers s'effectuent simultanément dans le même espace, cette première décomposition ne fera pas apparaître d'effet de structure. En conséquence, l'efficacité énergétique sera ici mesurée à travers la quantité d'énergie finale par m².

Second point de questionnement : quel(s) facteur(s) d'émission utiliser pour l'électricité ? Deux méthodes peuvent se discuter. La première consiste à utiliser des facteurs d'émission différents en fonction des usages. En effet, les émissions n'étant pas les mêmes en fonction de la période de consommation d'électricité (base ou pointe), il apparaît que les facteurs d'émission moyens associés aux différents usages peuvent varier du simple au triple. Ainsi, d'après l'ADEME (2005), il faudrait attribuer un facteur de 40 gCO₂/kWh à l'ECS, 60 gCO₂/kWh pour la cuisson et l'électricité spécifique et 180 gCO₂/kWh pour le chauffage. Cette méthode a pour avantage de permettre d'attribuer plus précisément les émissions liées à l'utilisation de l'électricité pour les différents usages. La seconde approche repose sur l'utilisation d'un même facteur d'émission moyen pour tous les usages. Dans ce cas, la perte de précision sur le contenu carbone de l'électricité pour les différents usages est compensée par la possibilité de prendre en compte l'évolution de ce facteur d'émission dans le temps. Afin d'intégrer l'hétérogénéité des contenus carbone de l'électricité en fonction des usages et de s'aligner sur les méthodes de comptabilisation employées dans les réglementations thermiques les plus récentes (MTES, 2017c), la première approche est retenue ici.

Enfin, si ce choix concernant les contenus en carbone de l'électricité associés aux différents usages conduit à supposer ces derniers constants dans le temps, la question demeure pour le contenu carbone moyen des réseaux de chaleur. Peu de données sont disponibles avant 2005. SNCU (2017) fournit en revanche l'évolution du contenu carbone moyen du chauffage urbain entre 2005 et 2016. En conséquence, le contenu carbone moyen associé à la chaleur issue du chauffage urbain est supposé constant entre 1990 et 2005, puis variable après cette date (Tableau 1.2).

Tableau 1.2- Contenu carbone de la chaleur issue du chauffage urbain (en grCO₂/kWh)

	1990-2005	2006	2007	2008	2009	2010
Contenu en CO ₂ moyen des réseaux de chaleur	210	218	211	192	190	196

Source : calculs de l'auteur à partir des données issues de SNCU (2017)

1) *Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur résidentiel*

Ceci étant tranché, on mène l'analyse de décomposition en appliquant les équations 1.4 et 1.5. Dans un premier temps, seuls les résultats concernant les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques sont présentés (Tableau 1.3).

Tableau 1.3- Résultats de la décomposition par usage des émissions de CO₂ du secteur résidentiel entre 1990 et 2010 pour les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques (en Mt CO₂)

	Substitution			Efficacité	Total
	Contenu carbone	Mix énergétique fossile	Pénétration des renouvelables	Efficacité énergétique	
Chauffage	-0,7	-3,9	4,1	-22,8	-23,3
Eau chaude sanitaire	-0,1	-1,2	0,1	-2	-3,2
Cuisson	0	-0,2	0	0,6	0,4
Electricité spécifique	0	0	0	0,9	0,9
Résidentiel	-0,8	-5,3	4,2	-23,3	-25,2

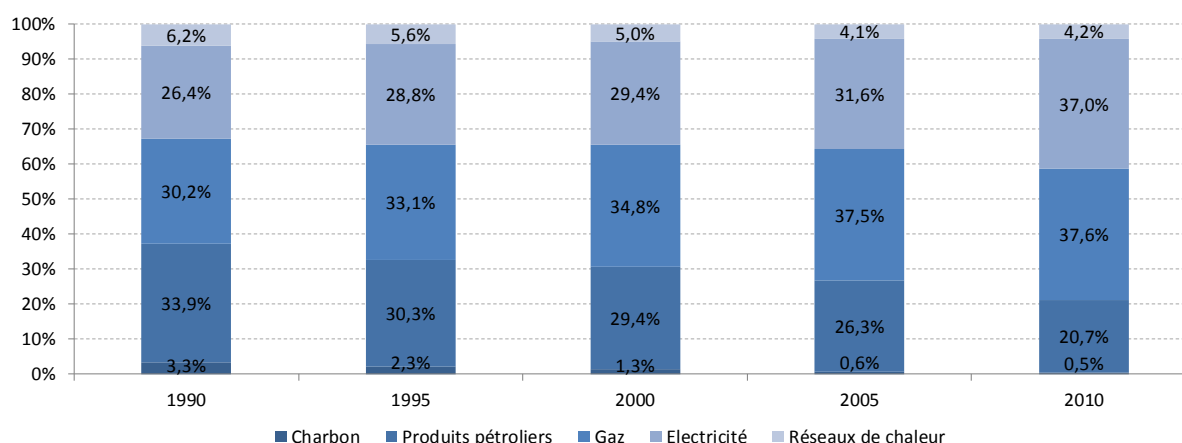
Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

Ces résultats soulignent tout d'abord les importantes réductions d'émission (-25,2 Mt CO₂) induites par les mesures de substitution et d'efficacité sur la période. Ces réductions sont principalement imputables aux gains réalisés en termes d'efficacité énergétique. Ils ont ainsi permis une réduction de 23,3 Mt CO₂. Ils trouvent leur origine dans une meilleure utilisation de l'énergie dans les processus de production de chaleur (chauffage et ECS). Les données utilisées ne permettant pas de distinguer les consommations d'énergies utiles et d'énergies finales, il n'est pas en revanche possible de déterminer si ces gains sont le fruit de systèmes de chauffage plus efficaces ou d'une meilleure isolation des bâtiments, limitant le besoin d'énergie pour chauffer un mètre carré de logement. On observe en revanche des contributions positives du facteur d'efficacité énergétique pour les usages cuissons et électricité spécifique. Ces résultats doivent être interprétés prudemment du fait du choix de l'indicateur d'activité, moins adapté à ces utilisations de l'énergie.

L'autre partie des réductions d'émissions (-1,9 Mt CO₂) est à mettre au crédit des effets de substitution. Les différents types de substitution n'ont pas tous œuvré dans le même sens. Ainsi, la baisse du taux de pénétration des renouvelables a eu un effet expansionniste sur les émissions (4,2Mt CO₂). Cette réduction du poids des renouvelables dans le mix énergétique total correspond à un emploi moindre du bois de chauffage (-24 % sur la période). Cet effet haussier est néanmoins compensé par la modification de la composition du mix fossile, caractérisée par une baisse d'utilisation du charbon et du fioul domestique au profit du gaz et de l'électricité (Figure 1.2) qui a eu un impact bénéfique en termes d'émission (-5,3Mt CO₂).

Il est à noter que les résultats de la décomposition soulignent que l'essentiel des variations des émissions du secteur trouve son origine dans l'usage chauffage. Si cela s'explique mécaniquement par le poids important de ce poste dans le total des émissions sectorielles, il convient de souligner que cet usage est aussi celui pour lequel il existe le plus de possibilités de mise en œuvre à la fois de mesures de substitution et d'efficacité.

Figure 1.2- Evolution du mix énergétique fossile du secteur résidentiel entre 1990 et 2010

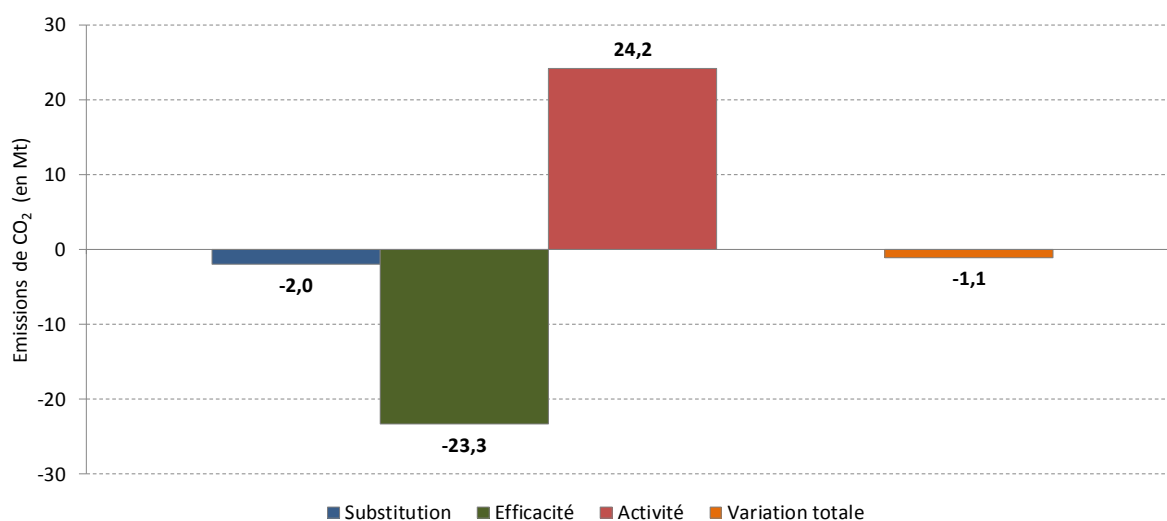


Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

2) Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur résidentiel

D'importantes réductions d'émission ont été induites par des gains en efficacité énergétique principalement, et des phénomènes de substitution énergétique plus marginalement. Or, au niveau global, l'évolution des émissions de CO₂ du secteur n'est caractérisée que par une très légère baisse (-1,1 Mt CO₂). Celle-ci s'explique par la contribution d'un troisième facteur, à savoir le facteur d'activité, mesuré ici par la surface totale des résidences principales. Le résultat général est illustré par la Figure 1.3.

Figure 1.3- Résultats globaux de la décomposition des émissions de CO₂ du secteur résidentiel entre 1990 et 2010



Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

Le facteur d'activité a donc poussé fortement les émissions à la hausse, la surface totale du parc de résidence principale ayant cru de 36 % (CEREN, 2014) entre 1990 et 2010, entraînant un accroissement des émissions de plus de 24 Mt de CO₂.

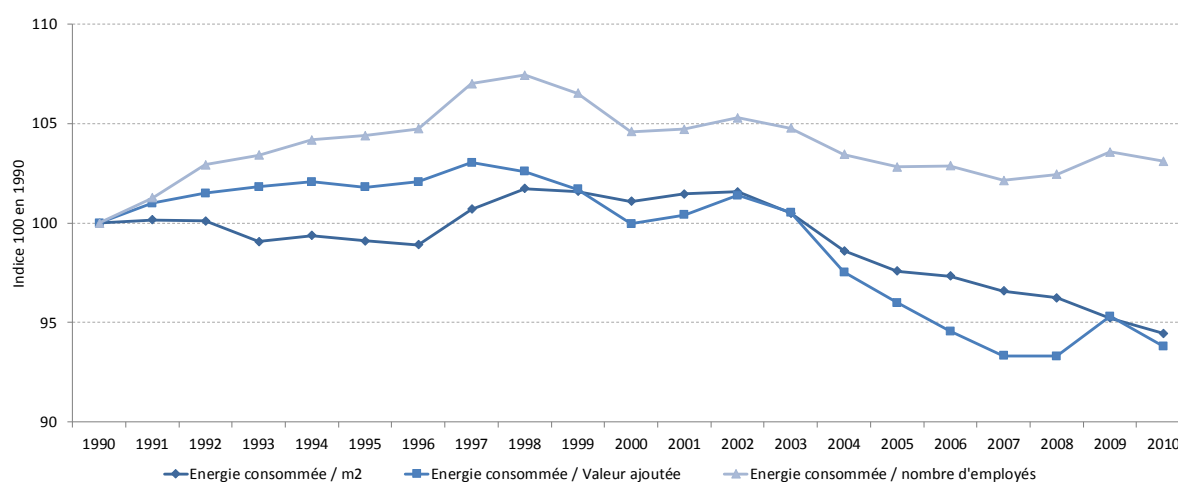
1.4.3- Analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire par usage

Les données disponibles sur le secteur tertiaire étant moins précises que celles du secteur résidentiel, la décomposition de ses émissions ne laissera apparaître que trois usages : chauffage et ECS, cuisson et électricité spécifique. On ne peut donc pas distinguer chauffage et eau chaude sanitaire pour le tertiaire contrairement au résidentiel.

Le secteur tertiaire étant un secteur productif, la question du choix de l'indicateur d'activité se pose différemment que dans le cas du secteur résidentiel. En effet, on pourrait très bien envisager d'utiliser un indicateur d'activité monétaire comme la valeur ajoutée du secteur. Cependant, le chauffage étant le principal usage, on choisira de s'appuyer sur un indicateur physique pour coller au plus près de l'évolution de l'activité : la surface totale des locaux du tertiaire.

Le choix du type d'indicateur d'activité ne devrait pas avoir, dans ce cas, d'impact significatif sur les résultats étant donné que la valeur ajoutée du secteur, et dans une moindre mesure, le niveau d'emploi, ont suivi une progression très proche de celle de la surface des locaux sur la période (Figure 1.4).

Figure 1.4- Evolution du rapport entre la consommation totale d'énergie finale du tertiaire et différents indicateurs d'activité entre 1990 et 2010



Sources : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN et Datamed

1) Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques à l'évolution des émissions du secteur tertiaire

Les résultats obtenus pour le secteur tertiaire ont une forme très proche de ceux observés dans la partie précédente (Tableau 1.4).

Tableau 1.4- Résultats de la décomposition par usage des émissions de CO₂ du secteur tertiaire entre 1990 et 2010 pour les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques (en Mt CO₂)

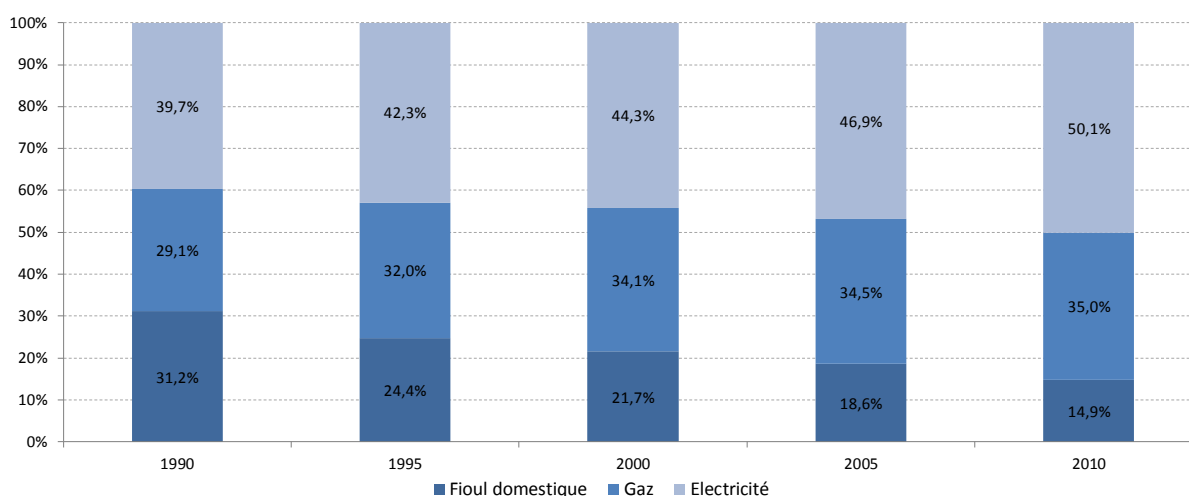
	Substitution			Efficacité	Total
	Contenu carbone	Mix énergétique fossile	Pénétration des renouvelables	Efficacité énergétique	
Chauffage et ECS	-2,0	-1,8	0,7	-5,7	-8,8
Cuisson	0,1	-0,1	0,1	-0,2	-0,1
Electricité spécifique	1,1	0,0	0,0	1,2	2,3
Tertiaire	-0,8	-1,9	0,8	-4,7	-6,6

Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

Sur la période, les facteurs d'efficacité et de substitution ont permis d'abaisser les émissions de CO₂ d'environ 6,6 Mt. C'est une nouvelle fois les gains en efficacité énergétique qui ont contribué le plus fortement à ces abattements d'émissions (-4,7 Mt CO₂). Concernant les effets de substitution, des gains ont été obtenus par la décarbonation du mix énergétique fossile (-1.9 Mt CO₂) grâce au recul du fioul au profit du gaz et de l'électricité (Figure 1.5). Les

renouvelables, dont le poids dans le mix énergétique a peu évolué sur la période, n'ont que peu influencé les émissions (+0,8Mt).

Figure 1.5- Evolution du mix énergétique fossile du secteur tertiaire entre 1990 et 2010

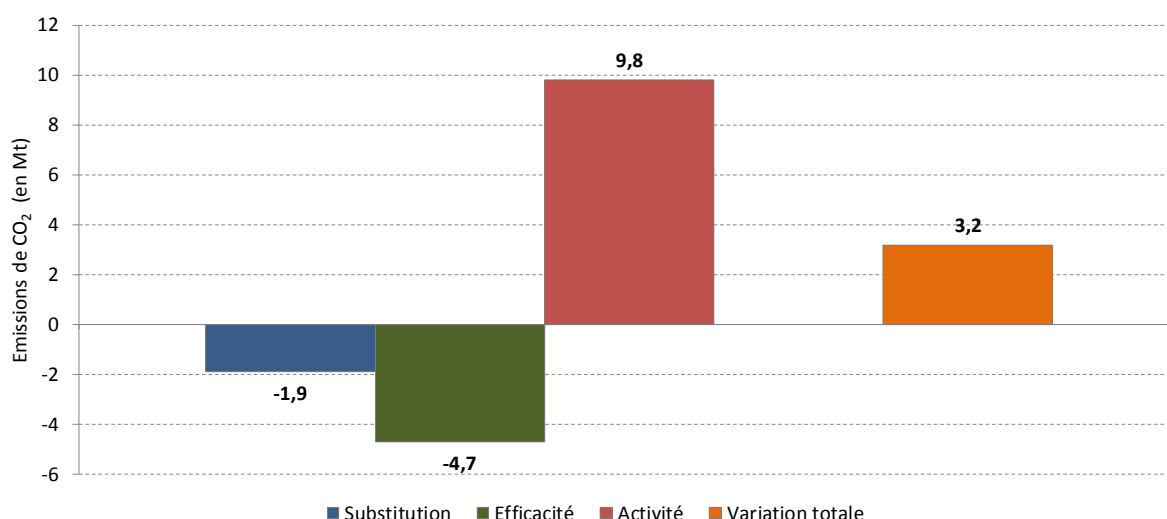


Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

2) Résultat global de l'analyse de décomposition des émissions du secteur tertiaire

Au niveau global, les émissions de CO₂ du tertiaire ont augmenté de 3,2 Mt sur la période (Figure 1.6). Comme pour le résidentiel, c'est la croissance du parc tertiaire (+39 %) qui a contrebalancé les réductions engendrées à la fois par les mécanismes d'efficacité et de substitution énergétique.

Figure 1.6- Résultats globaux de l'analyse de décomposition pour le secteur tertiaire



Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

En définitive, deux points principaux sont soulevés par cette double analyse de décomposition des émissions des secteurs résidentiel et tertiaire :

- Si les émissions de ces deux secteurs semblent relativement stables sur la période, cette stabilité cache en réalité l'existence d'un relatif équilibre entre, d'une part une augmentation structurelle de la surface des bâtiments durant les vingt dernières années ayant un effet fortement expansif sur les émissions de CO₂, et d'autre part, une réduction des émissions engendrée par des gains en termes d'efficacité énergétique et une réduction du contenu carbone moyen du kWh d'énergie mobilisée.
- Le chauffage représente l'usage dont le potentiel de réduction d'émissions est le plus prometteur. Si cela s'explique par son poids dans les consommations totales d'énergie des bâtiments, cela tient aussi à la multiplicité des mesures de substitution et d'efficacité pouvant être mises en œuvre.

1.5) Décomposition des émissions de CO₂ du chauffage par type de bâtiments

La section précédente a été consacrée à la décomposition des émissions du secteur du bâtiment en fonction des usages et a notamment permis de souligner le rôle prépondérant du chauffage dans leur évolution. Dans le but d'approfondir l'analyse précédente, et notamment l'impact des mesures d'efficacité et de substitution sur l'évolution des émissions, une seconde analyse de décomposition est conduite spécifiquement sur les émissions issues du chauffage du secteur résidentiel en fonction de la période de construction des logements.

1.5.1- Catégories de logements

Les émissions associées au chauffage dépendent fortement de l'isolation des bâtiments. Or le niveau moyen d'isolation des résidences principales est corrélé à leur date de construction, ne serait-ce qu'en raison de l'évolution des normes d'isolation thermique des habitations. Les données disponibles permettent de distinguer cinq types de logements, en fonction de leur période de construction :

- Les résidences principales construites avant 1975
- Les résidences principales construites entre 1975 et 1982
- Les résidences principales construites entre 1982 et 1989
- Les résidences principales construites entre 1990 et 1998
- Les résidences principales construites après 1999

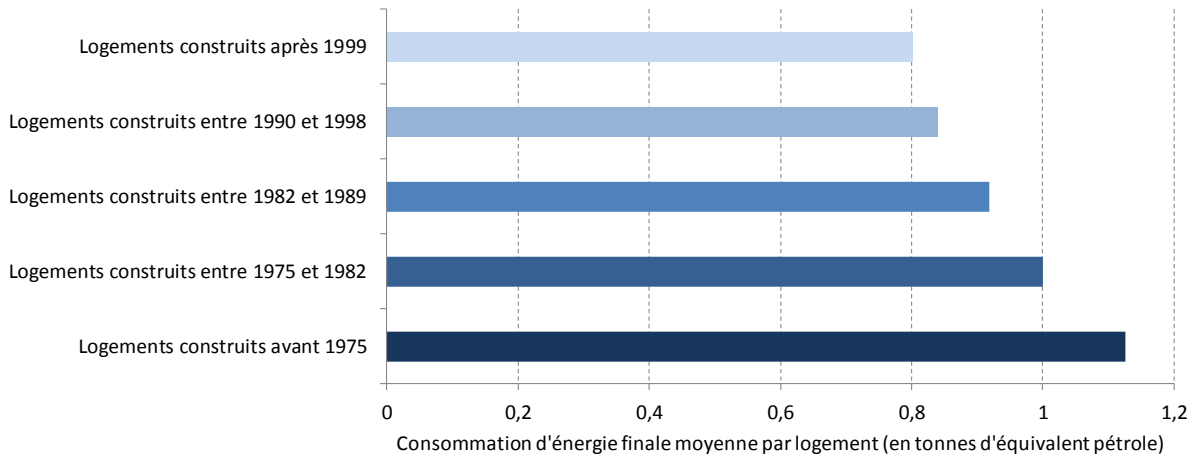
1.5.2- Facteurs additionnels étudiés

Cette décomposition diffère en deux points de celles menées dans la section précédente.

Tout d'abord, la surface totale des différents types de résidences est utilisée comme indicateur d'activité. L'analyse fait donc apparaître un effet structure, noté *ST*, correspondant à l'impact sur les émissions de l'évolution de la part de chaque type de logements dans le total

du parc résidentiel principal. Il correspond au rapport : $\frac{ACT_i}{ACT}$, avec ACT_i , la surface totale des logements de type i . Cet effet peut être considéré comme un second facteur d'efficacité énergétique puisqu'il mesure l'impact sur les émissions de CO₂ de l'évolution de la structure du parc de logement en termes de période de construction et donc indirectement en termes de niveau d'isolation (Figure 1.7)

Figure 1.7- Consommation moyenne d'énergie finale en fonction de la période de construction (en tep/logement)



Sources : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN et Datamed

De plus, pour affiner l'analyse du facteur d'activité sur les émissions issues de l'usage chauffage, celui-ci est divisé en trois sous-facteurs :

- Le facteur « *SMH* » (Surface Moyenne des Habitations) qui rend compte de l'évolution de la surface moyenne des logements. Celui-ci correspond au rapport entre la surface moyenne des habitations et le nombre de logements (noté *NL*) : $\frac{ACT}{NL}$
- Le facteur « *NPL* » (Nombre de Personnes par Logement) qui renvoie au nombre moyen d'occupants par habitation : $\frac{NL}{PP}$
- L'effet démographique qui relate l'évolution de la population : *PP*

Les émissions de CO₂ correspondent ainsi au produit des rapports suivant :

$$C = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j}}{E_{i,j}} \times \frac{E_{i,j}}{E_i} \times \frac{E_i}{ET_i} \times \frac{ET_i}{ACT_i} \times \frac{ACT_i}{ACT} \times \frac{ACT}{NL} \times \frac{NL}{PP} \times PP \quad (1.6)$$

D'où :

$$C = \sum_{i,j} CC_{i,j} \times EM_{i,j} \times PN_i \times EE_i \times ST_i \times SMH \times NPL \times PP \quad (1.7)$$

L'évolution des émissions entre deux dates est donc expliquée comme la somme de ces huit effets :

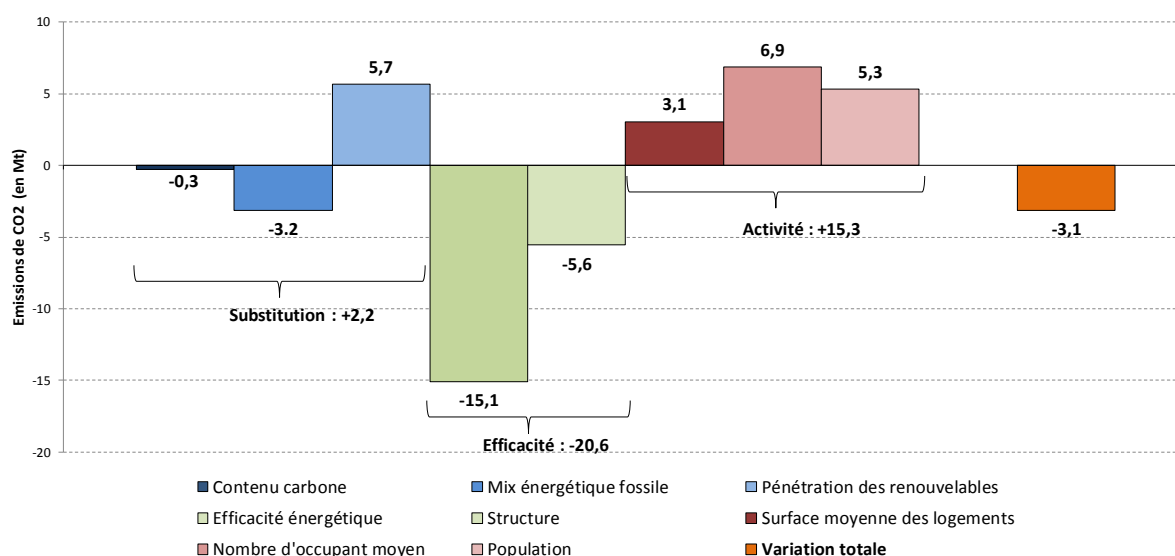
$$\Delta C_{tot} = \Delta C_{CC} + \Delta C_{EM} + \Delta C_{PN} + \Delta C_{EE} + \Delta C_{ST} + \Delta C_{SMH} + \Delta C_{NPL} + \Delta C_{PP} \quad (1.8)$$

L'impact de chacun de ces effets en termes d'émissions est calculé en appliquant l'équation 1.5.

1.5.3- Résultats de la décomposition des émissions de CO₂ liées au chauffage par type de logements

Les résultats de l'analyse au niveau agrégé sont présentés en Figure 1.8.

Figure 1.8- Résultats de l'analyse de décomposition des émissions du chauffage entre 1990 et 2010



Source : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN

On retrouve dans cette décomposition le même schéma que lors de l'analyse précédente. Le facteur d'activité a exercé une forte pression à la hausse sur les émissions de CO₂ durant la période (+ 15,3 Mt). Cette augmentation du besoin de chauffage peut s'expliquer par l'évolution des trois variables sociodémographiques à savoir l'augmentation de la surface moyenne des logements, le processus de décohabitation et la croissance démographique (Tableau 1.5).

Tableau 1.5- Variations et émissions associées aux facteurs sociodémographiques

Facteurs	Valeur 1990	Valeur 2014	Variations	Emissions de CO ₂ associées
Surface moyenne des résidences principales (en m ²)	86,1	91,6	6,4%	3,1
Nombre moyen de personnes par logement	2,7	2,3	-14,8%	6,9
Population (en millions)	58,0	64,6	11,4%	5,3

Sources : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN et de l'INSEE

Les facteurs d'efficacité énergétique sont ceux ayant le plus contribué à compenser les impacts de la hausse des facteurs d'activité. Ainsi, les gains en efficacité ont engendré une réduction de 15,1Mt des émissions de CO₂ et la modification de la structure du parc de logements a permis un abattement de 5,6Mt CO₂. Ces effets ne doivent pas être confondus. Quand le premier renvoie à la réduction de la consommation d'énergie nécessaire au chauffage de chaque catégorie de logements, le second mesure les émissions associées à l'évolution de la structure d'âge du parc résidentiel. Ainsi, les réductions d'émissions attribuées à l'effet de structure résultent de l'augmentation progressive du poids des logements bénéficiant de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique, notamment du fait d'une meilleure isolation thermique, dans le parc résidentiel, et du retrait progressif des logements les plus anciens.

Concernant les facteurs liés aux mécanismes de substitution, on retrouve des effets de sens opposés. La réduction de la quantité de biomasse utilisée dans le chauffage a provoqué une hausse des émissions de 5,7 Mt CO₂. Cependant, la décarbonation du mix énergétique fossile (-3,2 Mt CO₂) a permis de contrebalancer cet effet haussier. Néanmoins, il apparaît qu'au niveau global, les mesures de substitution ont eu une contribution faiblement positive à l'évolution des émissions sur la période. Les résultats désagrégés de l'analyse de décomposition sont présentés en Tableau 1.6.

Ces résultats soulignent la disparité du sens et de l'ampleur des facteurs de substitution et d'efficacité en fonction de la catégorie de logements. Ainsi, on remarque que la décarbonation du mix énergétique fossile et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont en grande partie réalisées dans les logements les plus anciens. On peut noter, à l'inverse, que le facteur de pénétration des renouvelables permet une réduction des émissions de CO₂ dans les logements les plus récents, illustrant un retour progressif de ce mode de chauffage dans les nouvelles constructions.

Tableau 1.6- Résultats de l'analyse de décomposition par catégorie de logement entre 1990 et 2010 (en Mt CO₂)

	Substitution			Efficacité		Activité			Total
	CC	EM	PN	EE	ST	SMH	NPL	PP	
Chauffage Résidentiel	-0,3	-3,1	5,7	-15,1	-5,6	3,1	6,9	5,3	-3,1
Avant 1975	-0,1	-2,9	4,1	-12,0	-12,4	-	-	-	-23,3
Entre 1975 et 1982	-0,1	-0,1	0,8	-1,2	-1,2	-	-	-	-1,8
Entre 1982 et 1989	0,0	0,0	0,7	-0,5	-1,0	-	-	-	-0,8
Entre 1990 et 1998	0,0	0,0	0,3	-0,4	2,8	-	-	-	2,8
Après 1999	0,0	-0,2	-0,2	-1,0	6,2	-	-	-	4,8

Sources : calculs de l'auteur à partir des données du CEREN et de l'INSEE

1.6) Conclusion

Si, de prime abord, les émissions de CO₂ des secteurs résidentiel et tertiaire semblent avoir été relativement stables sur la période 1990-2010, l'analyse de décomposition révèle que cette stabilité est le résultat de la neutralisation de deux types de facteurs : des facteurs sociaux-démographiques d'une part, poussant fortement les émissions à la hausse, et des facteurs technico-économiques, à savoir les mécanismes d'efficacité et de substitution, tendant à les réduire. L'écrasante majorité des réductions d'émissions sont le fait des facteurs d'efficacité énergétique. En effet, si le retrait progressif du fioul domestique au profit du gaz et de l'électricité a permis une diminution du contenu carbone du mix énergétique fossile mobilisé, ces gains ont été absorbés par le recul du recours au bois-énergie.

Ce constat n'est pas sans conséquence. Il implique que pour atteindre les différents objectifs de réductions d'émissions dans le bâtiment, les mécanismes d'efficacité et de substitution devront très certainement permettre des abattements plus ambitieux que les objectifs affichés de manière à compenser la probable hausse de la surface totale du parc de logements. Cette croissance du parc résidentiel semble inévitable tant elle est portée par des facteurs (décohabitation, augmentation de la surface des logements et croissance démographique) dont la progression devrait continuer à être soutenue. En revanche, et cela est illustré dans notre analyse par les réductions d'émissions induites par l'effet structure, on peut raisonnablement penser que cette hausse à venir du facteur d'activité devrait se traduire par des impacts de moindre ampleur, sous l'effet du poids croissant de logements de mieux en mieux isolés, notamment grâce aux normes thermiques successives, dans le stock total de résidences principales.

Chapitre II : Estimation des coûts d'investissement associés à l'amélioration de l'efficacité énergétique et du contenu carbone du chauffage au sein du parc résidentiel

2.1)	Introduction.....	51
2.2)	Estimation des besoins de chauffage : une approche technico-économique.....	53
2.2.1-	<i>La demande de chauffage : entre déterminants physiques et socio-économiques.....</i>	<i>53</i>
2.2.2-	<i>Présentation du modèle thermique.....</i>	<i>55</i>
2.2.3-	<i>Application au parc de logements français.....</i>	<i>58</i>
2.3)	Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des enveloppes au niveau du parc résidentiel français.....	63
2.3.1-	<i>Type de travaux, matériaux et coûts d'isolation.....</i>	<i>63</i>
2.3.2-	<i>Coût d'isolation par type de logements.....</i>	<i>64</i>
2.3.3-	<i>Coût global des mesures d'amélioration de l'efficacité des bâtiments.....</i>	<i>67</i>
2.4)	Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des systèmes par le remplacement des technologies de chauffage.....	70
2.4.1-	<i>Les caractéristiques des systèmes de chauffage modélisés.....</i>	<i>71</i>
2.4.2-	<i>Répartition des systèmes de chauffage au sein du parc résidentiel.....</i>	<i>75</i>
2.4.3-	<i>Estimation du coût minimum d'amélioration de l'efficacité de production par type de logements.....</i>	<i>77</i>
1)	Résultats par type de logements.....	77
2)	Résultats au niveau du parc de logements français.....	80
2.5)	Estimation du coût minimum d'amélioration de décarbonation du mix énergétique.....	84
2.5.1-	<i>Résultats par type de logements.....</i>	<i>84</i>
2.5.2-	<i>Résultats au niveau du parc de logements français.....</i>	<i>86</i>
2.6)	Conclusion.....	89

Chapitre II : Estimation des coûts d'investissement associés à l'amélioration de l'efficacité énergétique et du contenu carbone du chauffage au sein du parc résidentiel

2.1) Introduction

Le chapitre précédent a été consacré à l'évaluation de l'impact des facteurs de substitution, d'efficacité et d'activité sur l'évolution des émissions de CO₂ en France durant la période 1990-2010. Il a notamment été souligné que les gains en termes d'efficacité énergétique et de diminution du contenu carbone de la chaleur produite avaient permis de contrebalancer l'effet haussier de l'accroissement de la surface du parc résidentiel. La progression de celle-ci dans les décennies à venir semble d'ores et déjà acquise en raison des prévisions de croissance démographique¹⁶. Il apparaît donc que seules d'importantes améliorations de l'efficacité et du mix énergétiques du secteur permettraient d'aboutir à des réductions d'émission de CO₂ conformes aux différents engagements adoptés par la France. Or dans un contexte marqué par la limitation des ressources et dans un souci d'efficacité économique, il convient de s'interroger sur les coûts associés à la mobilisation de ces différents leviers de réduction d'émissions et sur la manière de les minimiser.

Si l'on se restreint à l'habitat existant, l'évolution de la substitution et de l'efficacité énergétiques résulte principalement des caractéristiques des logements et des systèmes de chauffage. De ce fait, les politiques de réductions d'émissions à destination du secteur résidentiel sont principalement orientées vers la massification des travaux de rénovation énergétique. Ces travaux comprennent l'ensemble des opérations visant à améliorer les performances des enveloppes thermiques et des systèmes énergétiques des logements. Ainsi, deux principales mesures sont disponibles afin d'améliorer l'efficacité et le mix énergétiques liés à la production de chaleur : la mise en œuvre de travaux d'isolation et le remplacement des systèmes de chauffage. En conséquence, s'intéresser aux coûts de l'efficacité et de la décarbonation implique de déterminer la manière dont ces différents travaux affectent ces deux facteurs et d'étudier la façon dont ils devraient être mis en œuvre à l'échelle du parc de logements français.

La question des travaux de rénovation énergétique à mener afin de minimiser les coûts d'amélioration de l'efficacité énergétique ou du mix énergétique associé à la fourniture de chauffage est ardue pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les travaux d'isolation et les options de chauffage sont multiples. Il existe par exemple de nombreuses techniques et matériaux

¹⁶ Selon les projections de l'INSEE (2010), la population française devrait croître de 10 % entre 2013 et 2040.

pour renforcer l'isolation des différentes parois d'un bâtiment en contact avec l'air extérieur (ADEME, 2013). De même, les systèmes de chauffage disponibles à l'heure actuelle possèdent des caractéristiques très variées (vecteur énergétique, rendement, mode de chauffage, etc.). De plus, ces différents travaux peuvent être menés dans une grande variété d'habitations, le parc résidentiel français étant très hétérogène, tant au niveau des dimensions des logements que de leurs performances thermiques ou des technologies de chauffage les équipant.

Par ailleurs, il convient de noter que les deux grands types de mesures ne sont pas chacune le pendant d'un des deux facteurs. En effet, si le renforcement de l'isolation des logements impacte uniquement le facteur d'efficacité énergétique, le remplacement du système de chauffage peut relever à la fois de la substitution (changement de vecteur énergétique, modification du facteur d'émission par kWh de chaleur) et de l'efficacité (amélioration des rendements énergétiques des systèmes)¹⁷.

Si, à notre connaissance, aucuns travaux ne se sont directement intéressés à la minimisation des coûts permettant d'accroître les différents types d'efficacité énergétique, ou de décarboner le mix énergétique mobilisé au sein du secteur résidentiel, certaines études se sont déjà focalisées sur les combinaisons de mesures à mettre en œuvre dans les logements, notamment en termes d'isolation, afin d'atteindre au moindre coût des niveaux de performance données. Ainsi Ferrara *et al.* (2013) se sont concentrés sur l'optimisation des opérations à implémenter sur un logement-type afin de l'amener à un haut niveau de performance énergétique. Terés-Zubiaga *et al.* (2015) ont travaillé sur l'optimisation des travaux de rénovation concernant certains immeubles espagnols. D'autres travaux de ce type ont été menés à l'échelle nationale ou européenne mais en recourant à un faible nombre de logements-représentatifs et d'options de travaux (Boermans *et al.* (2012) ; Lechtenböhmer et Schüring (2011)).

Ce chapitre prolonge et approfondit ces travaux. Il est dédié à l'estimation des coûts minimums d'investissement associés à l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe, de l'efficacité de production et du contenu carbone de la production de chauffage à l'échelle du parc résidentiel français. Il se focalise ainsi sur la problématique suivante : quels travaux d'isolation et de remplacement de systèmes mettre en œuvre afin d'améliorer l'efficacité et le mix énergétique à moindre coût et comment ces coûts évoluent-ils à mesure que les gains s'accroissent ?

Dans ce cadre, la section 2.2 se concentre sur les déterminants de la demande de chauffage des logements, présente le cadre d'analyse et la méthode de modélisation des

¹⁷ Par commodité de langage, et de manière à différencier les deux sources d'amélioration de l'efficacité énergétique, on distinguera l'efficacité de l'enveloppe ou l'efficacité des bâtiments d'une part, de l'efficacité de production ou de l'efficacité des systèmes d'autre part.

consommations d'énergie, et détaille les résultats obtenus pour les différents logements-types représentatifs du parc résidentiel. La section 2.3 est dédiée à l'estimation des coûts d'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe thermique. Les travaux d'isolation modélisés sont d'abord exposés puis des courbes de coûts minimums sont élaborées pour chacun des logements types et pour l'ensemble des résidences principales. Suivant un schéma similaire et après avoir décrit les différentes technologies de chauffage modélisées et leur répartition au sein du parc de logements, les coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production sont évalués en sections 2.4 et les coûts minimums de décarbonation de la production de chaleur sont estimés en section 2.5. La section 2.6 conclut.

2.2) Estimation des besoins de chauffage : une approche technico-économique

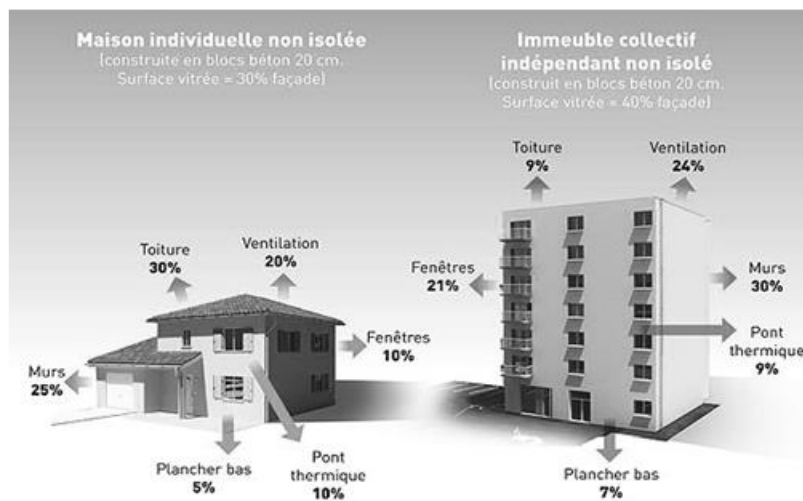
Afin d'estimer les conséquences sur la performance énergétique d'un logement de mesures d'isolation ou de remplacement du système de chauffage, il est nécessaire de connaître ou d'évaluer la quantité de chaleur que celui-ci consomme avant et après la mise en œuvre de ces mesures. Il convient donc dans un premier temps de s'intéresser aux déterminants de la demande de chauffage et à sa modélisation.

2.2.1- La demande de chauffage : entre déterminants physiques et socio-économiques

Les facteurs influençant les consommations d'énergie pour l'usage chauffage sont divers. Une partie d'entre eux sont d'ordre physique. En effet, une loi fondamentale de la physique¹⁸ énonce que lorsque deux éléments sont à des températures différentes, il s'établit nécessairement un échange thermique aboutissant à terme à une égalisation des températures de ces deux éléments. En conséquence, lorsque la température de l'air extérieur est plus faible que la température de l'air intérieur d'un bâtiment, ceci se traduit par l'existence de fuites de chaleurs à travers les parois de la construction (Figure 2.1).

¹⁸ La seconde loi de la thermodynamique, formulée par Carnot en 1824.

Figure 2.1- Illustration des différentes sources de déperdition thermique en logement individuel et collectif non isolés¹⁹



Source : RCSE

C'est pour parer à ces déperditions thermiques et permettre le maintien d'une température stable au sein des logements que ceux-ci sont équipés de systèmes de chauffage. La quantité de chaleur que ces derniers doivent délivrer, et donc les consommations d'énergies associées, varient en fonction de l'importance des déperditions thermiques. Pour une température de consigne et une température extérieure donnée, ces déperditions dépendent de deux facteurs principaux : les caractéristiques architecturales du bâtiment (surface, hauteur sous plafond, etc.) et le niveau d'isolation thermique.

Les caractéristiques architecturales d'un logement dépendent de deux variables impactant son besoin de chaleur : le volume à chauffer et la compacité. Le volume à chauffer correspond simplement au produit de la surface de l'habitation et de sa hauteur. De manière triviale, plus ce volume d'air à chauffer sera important, plus le besoin de chaleur sera élevé. La compacité, quant à elle, renvoie au rapport entre la surface des parois déperditives, ou autrement dit de la surface de l'enveloppe, au volume à chauffer. Plus cette surface d'échange avec l'extérieur sera étendue, plus le besoin de chauffage sera grand, à volume chauffé inchangé. Ainsi, les appartements tendent à être plus compacts que les maisons dans la mesure où leur plancher et/ou leur plafond n'est pas en contact avec l'extérieur. Similairement, une maison en forme

¹⁹ Illustration issue de RCSE, dispositif Mur-Mur. Disponible en ligne : <http://rcse.fr/dispositif-murmur-2/>

de « L » aura une compacité plus élevée, et donc un besoin de chauffage plus important, qu'une maison cubique.

La qualité de l'isolation du logement est quant à elle dépendante des matériaux constituant ces parois extérieures. En effet, les différents matériaux n'ont pas la même capacité à limiter les déperditions thermiques. Ainsi, la nature des matériaux utilisés lors de la conception des murs, du plafond, du sol et des fenêtres a un impact potentiellement important sur le besoin de chauffage d'un bâtiment.

Par ailleurs, d'autres types de facteurs peuvent influencer la demande de chauffage. Ainsi, différentes études empiriques (CGDD, 2015 ; Belaïd, 2016) ont mis en évidence l'existence de déterminants de nature socio-économique de la demande de chauffage au sein des logements : âge des occupants, statut d'occupation, revenu, préférence des ménages, etc. Ces facteurs influent sur la demande à travers deux vecteurs principaux : le choix de la température de consigne et la gestion des équipements de chauffage (Belaïd, 2017 ; Cavailhès *et al.*, 2011). Ainsi, par exemple, certains ménages, en fonction de leurs préférences et de leurs revenus, sont prêts à s'acquitter d'une facture plus élevée afin de bénéficier d'une température intérieure plus confortable. Ces mécanismes sont notamment la source des « effets rebond », correspondant au fait, qu'après rénovation, les gains énergétiques constatés sont plus faibles que ceux calculés théoriquement en raison de l'adoption par les ménages d'une température de consigne plus élevée associée à un confort accru. La réduction de la facture énergétique (effet revenu) engendre une consommation supérieure du bien « chauffage » (effet substitution) (Greening *et al.*, 2000).

2.2.2- Présentation du modèle thermique

Les déterminants du besoin de chaleur des logements sont donc multiples et revêtent aussi bien des dimensions purement techniques que socio-économiques. Conformément à l'approche technico-économique adoptée dans ces travaux, la demande de chaleur ne sera pas définie à travers l'estimation d'une fonction de demande classique mais spécifiée à l'aide d'un modèle énergétique simplifié. Cette démarche a pour avantage principal de permettre d'estimer aisément les économies d'énergie engendrées par les principales opérations d'isolation ou l'adoption de systèmes de production de chaleur plus performants. De plus, elle permet d'évaluer le besoin de chauffage de tout bâtiment dès lors que les caractéristiques architecturales et la nature des parois extérieures de celui-ci sont connues.

La demande de chauffage d'un logement donné est déterminée en deux temps. La première étape ne relève pas du modèle énergétique à proprement parler et vise à déterminer la performance globale d'une enveloppe thermique. Partant des caractéristiques des composants des parois extérieures du bâtiment, on évalue la capacité globale de celles-ci à conserver la chaleur. Les déperditions thermiques associées à un matériau sont mesurées par leur coefficient de transfert thermique, U , exprimé en watt par mètre carré kelvin ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$). Formellement, ce coefficient mesure la quantité de chaleur qui traverse un matériau lorsqu'il

existe une différence de température d'un Kelvin de part et d'autre de celui-ci. Celui-ci est défini par l'équation 2.1 :

$$U_x = \frac{Q}{A \times \Delta T \times \Delta t} \quad (2.1)$$

Avec U_x , le coefficient de transfert thermique du matériau x ; Q , l'énergie transférée en joules (J), A , la surface d'échange en mètre carrés (m^2), ΔT , la différence de température de part et d'autre de la surface d'échange en kelvins (K) et Δt , l'intervalle de temps en secondes (s).

L'enveloppe thermique d'un logement peut être décomposée en quatre éléments principaux à savoir : les murs, le plafond, le sol et les fenêtres. Evaluer la qualité de l'isolation d'une habitation requiert donc de prendre en compte les coefficients de transfert thermique de tous ces composants. Ceci peut être effectué simplement en calculant le coefficient global de transfert thermique (noté U_g) qui correspond à la somme des U des composants pondérés par leur poids dans la surface totale de l'enveloppe du bâtiment (Equation 2.2).

$$U_g = \frac{\sum_i U_x \times S_i}{S_{tot}} \quad (2.2)$$

Avec, U_g , le coefficient global de transfert thermique, en watt par mètre carré kelvin ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), U_i , le coefficient de transfert thermique du composant i , en watt par mètre carré kelvin ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), S_x , la surface du composant x , en mètre carré (m^2), et S_t , la surface totale de l'enveloppe du bâtiment, en mètre carré (m^2).

En conséquence, plus la valeur du U_g est faible, plus l'enveloppe thermique de l'habitation est performante.

La seconde étape consiste à déduire, sur la base du U_g du logement et de ses caractéristiques architecturales, le besoin d'énergie utile à des fins de chauffage de celui-ci (noté BEU). Pour cela nous utilisons un modèle thermique simplifié inspiré de la méthode 3CL²⁰. L'équation 2.3 permet ainsi de déterminer pour un bâtiment donné son besoin d'énergie utile pour l'usage chauffage.

$$BEU = \frac{U_g \times A \times D_{h.ref} \times I}{S \times 10^3} \quad (2.3)$$

Le besoin d'énergie utile, c'est-à-dire la quantité de chaleur que le système de chauffage doit délivrer pour maintenir le logement à la température de référence, est exprimé ici en kilowatt

²⁰ Cette méthode, dénommée 3CL pour « Calcul de la Consommation Conventiennelle des logements » a été établie en 2006 pour décliner en droit français la directive européenne de 2002 sur la performance énergétique des logements et est une des méthodes utilisées pour l'établissement des diagnostics de performance énergétique (Journal Officiel, 2012).

heure par mètre carré et par an ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$). Ce besoin de chaleur est défini ici à partir de quatre types de variables.

- Tout d'abord, comme évoqué plus haut, ce besoin de chaleur est d'autant plus important que le niveau d'isolation thermique global de l'habitation est faible. Ce dernier est estimé à partir du calcul du U_g exprimé en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).
- Il dépend aussi des caractéristiques architecturales du bâtiment et notamment de sa compacité à travers le rapport entre A , l'aire des parois extérieures de la construction exprimée en mètres carrés (m^2), et S , la surface au sol du logement (en m^2). Plus ce rapport sera important, plus les pertes thermiques seront élevées.
- Le besoin de chaleur est également lié aux conditions climatiques et notamment au nombre de jours dans l'année durant lequel le recours au chauffage est nécessaire. La variable $D_{h.ref}$ correspond au nombre de degrés-heures de référence, c'est-à-dire au produit entre le nombre d'heures de chauffe sur une année et la différence entre température extérieure et température de consigne à chacune de ces heures. Elle est exprimée en Kelvin heure ($\text{K}\cdot\text{h}$). ADEME (2013) fournit les valeurs de $D_{h.ref}$ pour les départements de France métropolitaine. Ces valeurs sont estimées pour permettre d'atteindre une température à l'intérieur des logements de 18°C grâce au système de chauffage en partant du principe que les autres sources de chaleurs (lumière, chaleur humaine et des équipements électriques hors chauffage) permettent de parvenir à la température de consigne de 19°C . Dans ce chapitre est utilisé un $D_{h.ref}$ moyen correspondant à la somme des $D_{h.ref}$ départementaux pondérés par leur population, soit une valeur de $53756.81\text{K}\cdot\text{h}$.
- Enfin, un facteur d'intermittence I est pris en compte dans la détermination du besoin de chaleur. Cette variable, comprise entre 0 et 1, est initialement introduite pour tenir compte des conditions d'occupation des logements. En effet, un logement n'étant pas nécessairement habité en permanence (notamment en semaine durant la journée), le système de chauffage n'est pas obligatoirement activé. Qui plus est, comme suggéré dans Allibe (2012a), il est possible, à travers cette variable, d'intégrer partiellement une représentation de l'effet rebond (Herring et Roy, 2007 ; Sorrel et al. 2007 ; Madlener et Alcott, 2009), en établissant le facteur d'intermittence comme une fonction du niveau d'isolation (Equation 2.4).

$$I(U_g) = \frac{I_0}{1+0.1 \times \left(\frac{U_g}{U_{g0}} \times \frac{A}{L} \times \frac{H_0}{H} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

Avec I_0 , le facteur d'intermittence standard, fixé à 1 pour les pour les logements collectifs et à 0.85 pour les logements individuels, U_{g0} , un coefficient global de transfert thermique standard fixé à $1 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, H_0 , la hauteur sous plafond standard fixée à 2 mètres et H , la hauteur sous plafond du logement exprimée en mètre.

Ainsi, à partir de cette relation, est établi un facteur d'intermittence d'autant plus élevé que le U_g est faible et donc que l'isolation est performante. Concrètement, cela suppose que, les ménages dont le logement est faiblement isolé adoptent une stratégie de limitation des consommations d'énergie (par le choix d'une température de consigne plus faible et/ou une désactivation plus régulière du système de chauffage) alors qu'au contraire, les ménages bénéficiant d'une habitation pourvue d'une enveloppe thermique performante en profitent pour jouir d'un confort thermique supérieur. De cette manière, une partie de l'effet rebond est directement intégrée dans la définition du modèle thermique.

Sur la base du modèle énergétique ainsi défini, on peut modéliser la demande de chauffage de tout logement à partir de ses caractéristiques architecturales et des matériaux composant son enveloppe. La consommation d'énergie finale résultant de la production du chauffage nécessaire à chaque habitation est obtenue en rapportant celle-ci au rendement énergétique du système de production de chaleur équipant le logement (Equation 2.5).

$$EF = \frac{BEU}{\eta_h} \quad (2.5)$$

Avec EF , la consommation d'énergie finale et η_h , le rendement énergétique du système de chauffage h .

Dans cette première section, les systèmes de chauffage n'étant pas spécifiés, il sera considéré un rendement énergétique moyen de 90 %. Cette hypothèse sera revue en section 2.4.

2.2.3- Application au parc de logements français

Afin de mener à bien l'évaluation des coûts associés à l'amélioration de l'efficacité et de la décarbonation au niveau national, il convient de caractériser le stock de logements. La diversité de celui-ci est appréhendée à partir de l'élaboration de logements-types représentatifs du parc résidentiel hexagonal.

Une première discrimination repose sur la distinction des logements individuels et des logements collectifs. Ces deux catégories d'habitation doivent impérativement être différenciées car elles possèdent des caractéristiques physiques et architecturales très distinctes. Par ailleurs, les problématiques de rénovation thermique ne se posent pas nécessairement de manière similaire pour ces deux catégories d'habitation²¹.

Dans ce chapitre, la diversité des caractéristiques architecturales des maisons et des immeubles est réduite par l'établissement d'un profil type de ces deux catégories de constructions. Leurs caractéristiques sont établies sur la base des valeurs moyennes observées

²¹ Notamment du fait que l'enveloppe thermique d'un appartement peut être différente en fonction de son positionnement dans un immeuble.

au sein du parc résidentiel français sur la base du rapport RAGE (RAGE, 2012) et de l'enquête Logement de l'INSEE (INSEE, 2015) et présentées en Tableau 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1- Caractéristiques architecturales de la maison-type

Surface du logement (en m ²)	112
Nombre d'étage (rez-de-chaussée compris)	2
Hauteur sous plafond (en m)	2,5
Part des murs extérieurs composée de vitre	30 %

Sources : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE et de l'enquête Logement 2013

Tableau 2.2- Caractéristiques architecturales de l'immeuble-type

Surface des logements (en m ²)	63
Nombre d'étage (rez-de-chaussée compris)	7
Nombre de logements par étage	2
Hauteur sous plafond (en m)	2,6
Part des murs extérieurs composée de vitre	30 %

Sources : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE et de l'enquête Logement 2013

Dans l'optique d'étudier l'impact des mesures d'isolation et de remplacement des systèmes de chauffage sur l'efficacité énergétique et la décarbonation de la production de chaleur, ces deux catégories de logements doivent ensuite être différenciées en fonction de leur consommation de chauffage, et donc de leur performance énergétique. Or, les choix de matériaux de construction ont beaucoup évolué dans le temps sous l'effet du développement de nouvelles technologies puis en raison de l'imposition de normes de réglementation thermique de plus en plus ambitieuses²². Il en résulte que les logements sont dotés d'une isolation thermique d'autant plus performante qu'ils sont récents. A ce titre, la période de construction constitue un indicateur relativement fiable des performances moyennes de l'enveloppe des logements. Partant de ce constat, sept maisons-types et sept appartements-types sont distingués en fonction de leur période de construction, suivant la typologie employée dans le rapport RAGE (RAGE, 2012). Ce rapport a notamment pour avantage de fournir, pour chacune des périodes de construction, les matériaux et coefficients de transfert thermique associés aux composants des enveloppes de chaque classe de logements. Ces coefficients sont présentés en Tableau 2.3 et 2.4. On observe bien une meilleure qualité des performances thermiques des composants de l'enveloppe en fonction de la période de construction. On notera par ailleurs que les coefficients de transferts thermiques des fenêtres

²² La première réglementation thermique ayant été imposée en France en 1974, à la suite du premier choc pétrolier (Collet, 2011).

sont bien supérieurs à ceux des parois verticales opaques, en faisant de fait une surface particulièrement déperditive. Le taux de vitrage des parois verticales peut donc grandement influencer la performance globale de l'enveloppe d'un bâtiment.

Tableau 2.3- Coefficients moyens de transfert thermique des composants des enveloppes des maisons-types par période de construction (en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

	$U_{\text{murs}} (U_m)$	$U_{\text{fenêtre}} (U_f)$	$U_{\text{toit}} (U_t)$	$U_{\text{plafond}} (U_p)$
MI < 67	2.5	4	2.5	1.2
MI 68-74	2.5	3	0.5	1.2
MI 74-81	1	3	0.5	1.2
MI 82-89	0.8	3	0.32	0.74
MI 90-2000	0.5	3	0.26	0.5
MI 2001-05	0.47	2.3	0.25	0.36
MI 2006-2013	0.36	2.1	0.2	0.27

Source : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE

Tableau 2.4- Coefficients moyen de transfert thermique des composants des enveloppes thermiques des appartements-types par période de construction (en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

	$U_{\text{murs}} (U_m)$	$U_{\text{fenêtre}} (U_f)$	$U_{\text{toit}} (U_t)$	$U_{\text{plafond}} (U_p)$
LC <48	2.5	4	1.2	2.5
LC 48-74	2.5	3.68	1.2	2.5
LC 75-81	0.43	3	1	0.61
LC 82-89	0.42	2	0.74	0.4
LC 90-2000	0.33	2	0.5	0.17
LC 2001-2005	0.33	2	0.25	0.17
LC 2006-2013	0.33	2	0.25	0.17

Source : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE

Tableau 2.5- Besoins d'énergie utile et consommations d'énergie finale des maisons-types par période de construction

	MI < 67	MI 68-74	MI 74-81	MI 82-89	MI 90-2000	MI 2001-05	MI 2006-2013
% des maisons	41.4 %	9.5 %	12.2 %	10.5 %	11.4 %	6.3 %	8.7 %
U_g	2.479	1.880	1.279	1.062	0.878	0.713	0.605
Energie utile / m^2	178.9	149.8	113.9	98.7	84.8	71.4	62.0
Energie utile / logement	20 039	16 782	12 756	11 059	9 496	7 996	6 947
Energie finale / m^2	198.8	166.5	126.5	109.7	94.2	79.3	68.9
Energie finale / logement	22 266	18 646	14 173	12 288	10 551	8 885	7 719

Source : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE

Tableau 2.6- Besoins d'énergie utile et consommations d'énergie finale des appartements-types par période de construction

	LC <48	LC 48-74	LC 75-81	LC 82-89	LC 90-2000	LC 2001-2005	LC 2006-2013
% des logements collectifs	24 %	38 %	12 %	7 %	10 %	3 %	6 %
U_g	2.691	2.617	1.108	0.818	0.714	0.685	0.679
Energie utile / m ²	144.5	141.5	70.1	53.5	47.3	45.5	45.2
Energie utile / logement	9 102	8 917	4 419	3 373	2 982	2 869	2 846
Energie finale / m ²	160.5	157.3	77.9	59.5	52.6	50.6	50.2
Energie finale / logement	10 113	9 907	4 910	3 747	3 313	3 187	3 162

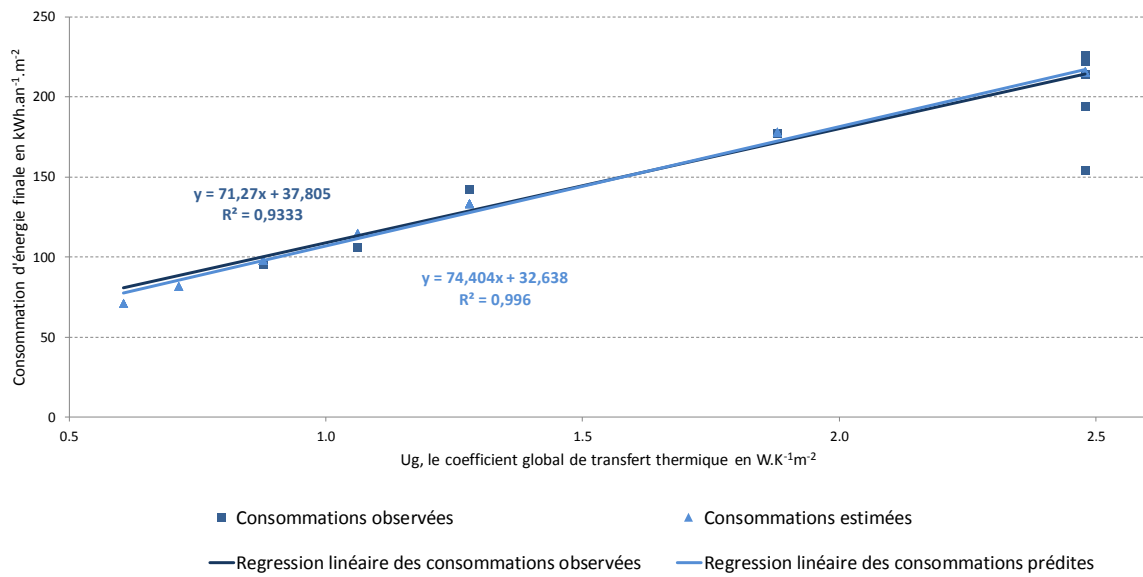
Source : calculs de l'auteur à partir du rapport RAGE

Les caractéristiques architecturales et les performances des composants des enveloppes des différents logements-types étant établies, leur besoin de chauffage et leur consommation d'énergie finale peuvent être estimés en recourant au modèle énergétique précédemment exposé (Tableau 2.5 et 2.6).

Ces résultats mettent en exergue l'amélioration continue des performances thermiques de l'enveloppe externe des vagues successives de nouveaux logements sous l'effet de l'apparition de nouveaux matériaux de construction et des contraintes imposées par les différentes réglementations thermiques. Ainsi, à titre d'illustration, une maison construite en 2006 a, en moyenne, une consommation d'énergie finale pour le chauffage représentant moins d'un tiers de celle d'une maison de même dimension construite en 1947.

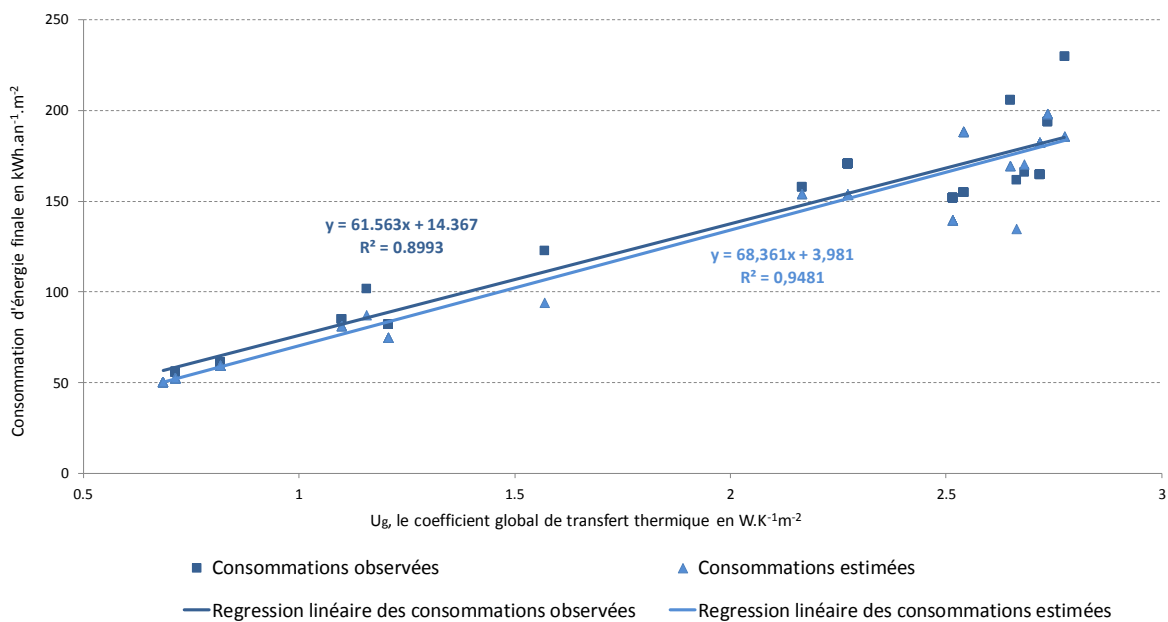
Par ailleurs, il apparaît que le modèle énergétique utilisé ici permet de simuler assez précisément les consommations énergétiques moyennes constatées des différents types de logements du parc résidentiel français. On retrouve ainsi des résultats très proches des consommations moyennes présentées par le rapport RAGE (Figure 2.2 et 2.3).

Figure 2.2- Consommations observées et consommations prédites pour les maisons-types



Source : calculs de l'auteur à partir des données issues du rapport RAGE

Figure 2.3- Consommations observées et consommations prédites pour les appartements-types



Source : calculs de l'auteur à partir des données issues du rapport RAGE

De même, en utilisant la représentativité de chaque logement-type dans le parc résidentiel présentée en tableau 2.5 et 2.6, on aboutit à une consommation d'énergie finale de 30 Mtep. Celle-ci est d'ordre comparable à la consommation 29 Mtep estimée par le CEREN. La

consommation d'énergie réelle est donc inférieure de 12 % à notre estimation. Cet écart est similaire avec ceux constatés dans la littérature s'intéressant à la consommation d'énergie finale pour le chauffage du parc de logement français (22 % dans Mata *et al.* (2014), et 18 % dans Ribas Portella (2012)).

2.3) Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des enveloppes au niveau du parc résidentiel français

Les consommations d'énergie pouvant être estimées grâce au modèle énergétique, on peut désormais identifier les mesures d'isolation pertinentes pour chaque logement-type et les coûts minimums associés. Après avoir présenté les options de rénovation modélisées, cette partie s'intéresse au coût minimum d'isolation pour chaque logement-type puis pour le parc dans son intégralité pour différentes cibles d'efficacité énergétique.

2.3.1- Type de travaux, matériaux et coûts d'isolation

Les performances thermiques d'une habitation peuvent être améliorées par le biais de diverses opérations portant sur les différents éléments composant son enveloppe externe (murs, fenêtres, plancher et plafond). Ces opérations visent à augmenter l'inertie thermique d'un logement, principalement *via* l'installation d'une couche plus ou moins épaisse de matériau isolant (laine de roche, laine de verre, polyuréthane, etc.) sur les surfaces à l'origine des déperditions. Dans cette section, l'estimation des coûts des travaux d'isolation s'appuie sur Batiprix (2015), qui fournit une base de données sur les prix d'achat et d'installation des principaux matériaux d'isolation, et sur un panel d'articles académiques traitant des coûts de rénovation énergétique (Lechtenböhrer et Schüring, 2011 ; Ferrara *et al.*, 2013). Les opérations de rénovation et coûts afférents pour les logements collectifs et maisons individuelles sont présentés en annexe 2.1.

L'isolation des murs peut être réalisée selon deux modalités distinctes ayant chacune leurs avantages et inconvénients propres.

- L'isolation par l'intérieur (notée ITI) est un procédé qui consiste à positionner le matériau isolant du côté intérieur de la cloison. Relativement simple à mettre en œuvre, elle constitue l'option la plus largement utilisée malgré la réduction de la surface habitable qu'elle engendre.
- L'isolation par l'extérieur (notée ITE) est une opération visant à augmenter l'inertie thermique des parois verticales en installant une couche de matériau isolant à l'extérieur de la structure porteuse. Cette méthode est plus efficace que l'ITI, notamment en ce qui concerne l'éradication des ponts thermiques, et n'implique pas de perte de surface. Cependant, elle est plus coûteuse et se révèle parfois incompatible avec les contraintes esthétiques de l'urbanisme.

Pour chacune de ces modalités, différents isolants et différentes épaisseurs sont considérés (dix-neuf options au total).

Concernant les fenêtres, les trois options retenues sont : le double vitrage, le double vitrage avec argon²³ et le triple vitrage. Il convient de noter que l'accroissement des qualités isolantes des fenêtres est plus coûteux que les opérations similaires sur les autres éléments de l'enveloppe thermique d'un bâtiment.

Les techniques d'isolation des planchers hauts sont assez diverses (isolation des combles perdus, isolation des combles aménagés, isolation de toiture terrasse, réfection complète de la toiture, etc.). Les mesures diffèrent notamment en fonction de l'habitabilité des combles. Cependant, les données disponibles ne permettent pas d'estimer la distribution des logements dotés de combles habités. En conséquence, il sera fait ici l'hypothèse que l'intégralité des combles du parc de logements est inhabitable (sept options d'isolation disponibles). Si cela était le cas, leur isolation coûterait de deux à trois fois plus cher, sans toutefois remettre en cause l'ordre de mérite des opérations entre les différents éléments de l'enveloppe externe des habitations. L'inertie thermique du plancher bas peut être améliorée à travers la pose de différentes épaisseurs de laine de roche (trois épaisseurs sont considérées).

Le changement des systèmes de ventilation et le traitement des ponts thermiques peuvent aussi permettre de réduire les déperditions thermiques d'une habitation. Cependant, le modèle thermique utilisé ne permettant pas de prendre ces aspects en compte et les données disponibles n'éclairant pas l'état actuel de ces éléments au sein du parc de logements, ils ne seront pas modélisés dans ces travaux.

2.3.2- Coût d'isolation par type de logements

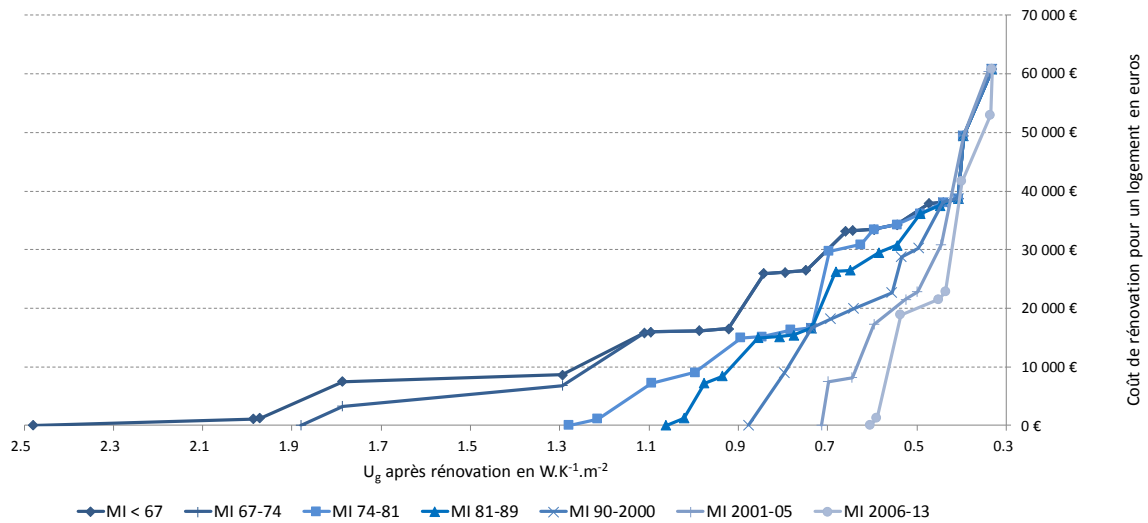
Disposant d'un large panel d'opérations d'isolation pour les différents composants de l'enveloppe thermique des logements, il est possible de calculer le résultat en termes d'efficacité énergétique et de coûts de toutes les combinaisons possibles de travaux pour chacun des logements-types. Or, le choix des travaux d'isolation à mettre en œuvre doit être guidé par la nécessité d'atteindre à moindre coût un objectif d'efficacité énergétique donné. Dans ce cadre, l'étude des coûts de rénovation des logements nécessite une optimisation du choix des opérations d'investissement de manière à pouvoir déterminer le montant minimum associé à l'atteinte de différents objectifs d'efficacité.

Un premier algorithme est donc développé à cette fin. Celui-ci détermine d'abord le coût et le niveau d'efficacité énergétique induits par chaque association possible entre les diverses options d'isolation, statu quo compris, concernant les quatre composants de l'enveloppe thermique puis sélectionne dans un second temps les caractéristiques des combinaisons

²³ L'argon est un gaz introduit entre les deux épaisseurs de vitres, permettant d'améliorer l'isolation par rapport à un double vitrage simple.

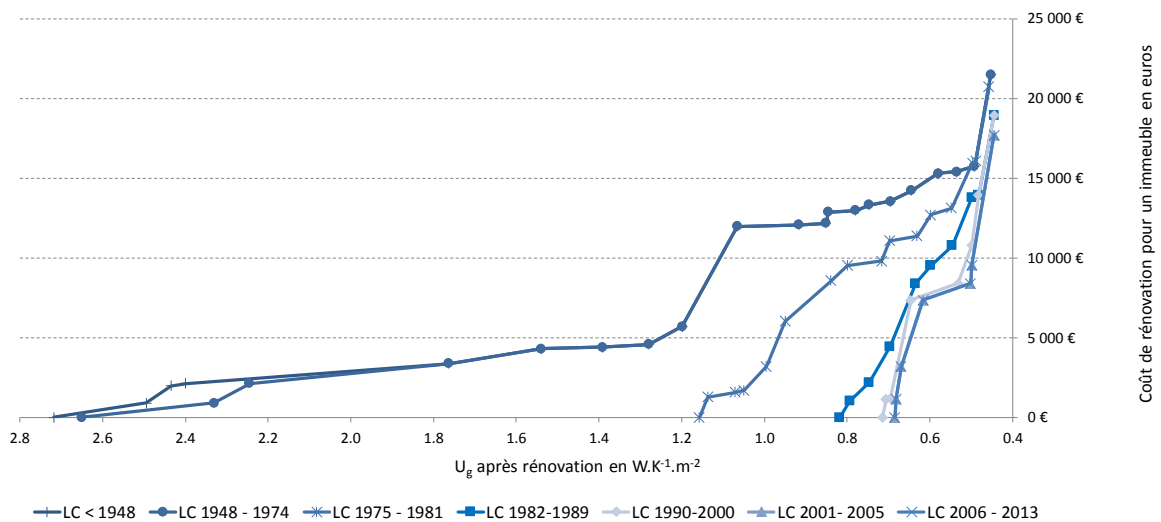
d'opérations qui minimisent le coût d'atteinte de différents intervalles régulier de U_g . Sur cette base, il est possible de construire des courbes de coût minimum d'atteinte de différentes cibles d'efficacité énergétique. Les résultats obtenus pour les maisons et les logements collectifs sont présentés en Figure 2.4 et 2.5.

Figure 2.4- Coût minimum d'isolation pour les maisons-types en fonction de l'objectif de U_g final



Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

Figure 2.5- Coût minimum de rénovation pour les appartements-types en fonction de l'objectif de U_g final



Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

Chaque point de ces graphiques indique le coût minimum associé à la mise en œuvre de la combinaison d'opérations permettant d'atteindre au moindre coût le coefficient global de transfert thermique ciblé. Ces opérations et les coûts correspondants sont déterminés pour chaque type de logements en supposant que leur enveloppe n'a pas déjà fait l'objet d'améliorations par le passé. Il s'agit de courbes de coûts pour des rénovations effectuées d'un seul trait qui ne peuvent en conséquence pas être interprétées comme des illustrations du coût de travaux d'isolation réalisés étape par étape.

Les résultats indiquent que pour de faibles montants d'investissement, il est possible d'améliorer significativement l'isolation des habitations construites avant 1974, représentant un peu plus de la moitié du stock de logements. Les courbes de coûts de rénovation des bâtisses plus récentes, dont le U_g est plus faible, sont beaucoup plus pentues, illustrant le fait qu'une amélioration, même à la marge, des performances de leur enveloppe thermique est coûteuse du fait qu'il est immédiatement nécessaire de recourir à des opérations onéreuses. En revanche, il apparaît que l'atteinte des plus hauts niveaux de performances énergétiques engendre un coût similaire pour tous les logement-types. Ceci s'explique par le remplacement des anciens composants et le recours à de nouvelles technologies quelle que soit la date de construction du logement. Ces améliorations requièrent en conséquence un investissement important (entre 40 k€ et 60 k€ pour les logements individuels par exemple).

L'algorithme fournissant les combinaisons d'opérations minimisant le coût d'atteinte des différentes cibles d'efficacité énergétique, il est possible d'en déduire un ordre de mérite des éléments de l'enveloppe à rénover. Cet ordre de mérite diffère en fonction de la période de construction du logement (Tableau 2.7)

Tableau 2.7- Ordre de mérite des opérations de rénovation pour l'amélioration des performances énergétiques des logements en fonction de leur période de construction

	<74	74-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013
1 ^{er}	Toit	Toit	Toit	Toit	Sol	Toit
2 nd	Mur ITI	Sol	Sol	Sol	Mur ITI	Fenêtre
3 ^{ième}	Sol	Mur ITI	Mur ITI	Mur ITI	Toit	Mur ITE
4 ^{ième}	Fenêtre	Fenêtre	Fenêtre	Fenêtre	Fenêtre	Sol
5 ^{ième}	Mur ITE	Mur ITE	Mur ITE	Mur ITE	Mur ITE	X

Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

La distinction est faite ici entre l'isolation des murs par l'intérieur et par l'extérieur car ces deux types d'opérations ont des coûts et des contraintes associés significativement différentes. Les résultats révèlent que, pour pratiquement tous les logement-types, le premier élément à isoler est le toit, celui-ci pouvant être à l'origine de plus de 30 % des déperditions thermiques dans les logements les plus anciens. Pour les habitations construites avant 2005, l'isolation murale intérieure et le sol arrivent en seconde et troisième position, les fenêtres au quatrième rang et l'isolation murale par l'extérieur, efficace mais coûteuse, en dernière

place²⁴. L'ordre de mérite pour les bâtiments les plus récents est distinct car, ces logements ayant été construits sur la base de normes thermiques contraignantes, l'amélioration de leurs enveloppes externes requiert le recours à des technologies très performantes. Ainsi, pour ces habitations, les fenêtres et l'isolation murale extérieure apparaissent respectivement au second et troisième rang de l'ordre de mérite.

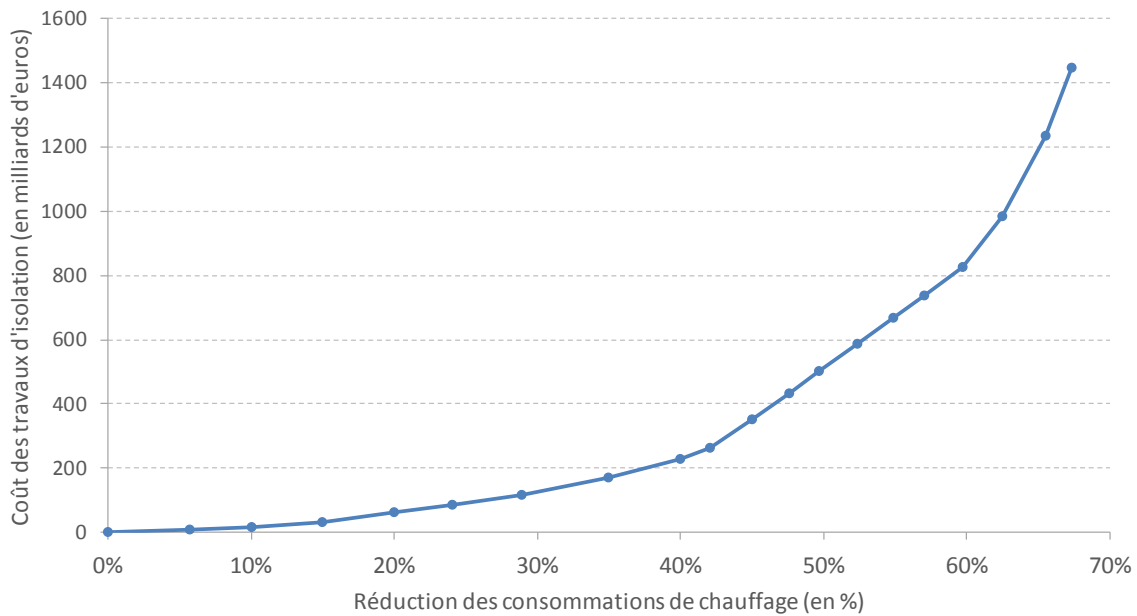
Ces courbes de coûts minimums de rénovation soulignent une évolution spécifique des coûts d'investissement en efficacité énergétique, ni linéaire, ni exponentielle. Ceux-ci suivent en effet une progression en escalier, avec des marches plus ou moins marquées en fonction des sauts technologiques.

2.3.3- Coût global des mesures d'amélioration de l'efficacité des bâtiments

Les courbes de coûts étant établies pour chaque logement-type, se pose la question du coût minimum d'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau du parc résidentiel pris dans son ensemble. Afin d'opérer ce changement d'échelle dans l'analyse, les réductions de besoin de chauffage et les coûts d'investissement associés à chaque combinaison de mesures sont multipliés par le nombre réel de logements représentés par chaque bâtiment-type (Tableau 2.5 et 2.6). Un second algorithme de minimisation est utilisé afin d'établir les logements-types et les travaux d'isolation à mettre en œuvre afin d'atteindre des objectifs d'efficacité énergétique s'échelonnant de -8 % à -68 %. Les gains en termes de réduction des besoins de chauffage et les coûts d'investissement résultant de chaque combinaison de mesures menée sur chacun des logements types sont calculés. Est ensuite sélectionné l'ensemble des travaux permettant d'atteindre à moindre coût les cibles d'efficacité énergétique fixées au niveau du parc de logements. Le résultat de ce processus d'optimisation est présenté en Figure 2.6.

²⁴ A noter que, en cas d'impossibilité d'isolation par l'intérieur pour un quelconque motif (perte de surface par exemple), l'isolation par l'extérieur prend alors sa place dans l'ordre de mérite, l'isolation des murs étant une action clef dans l'amélioration des performances thermiques d'un logement.

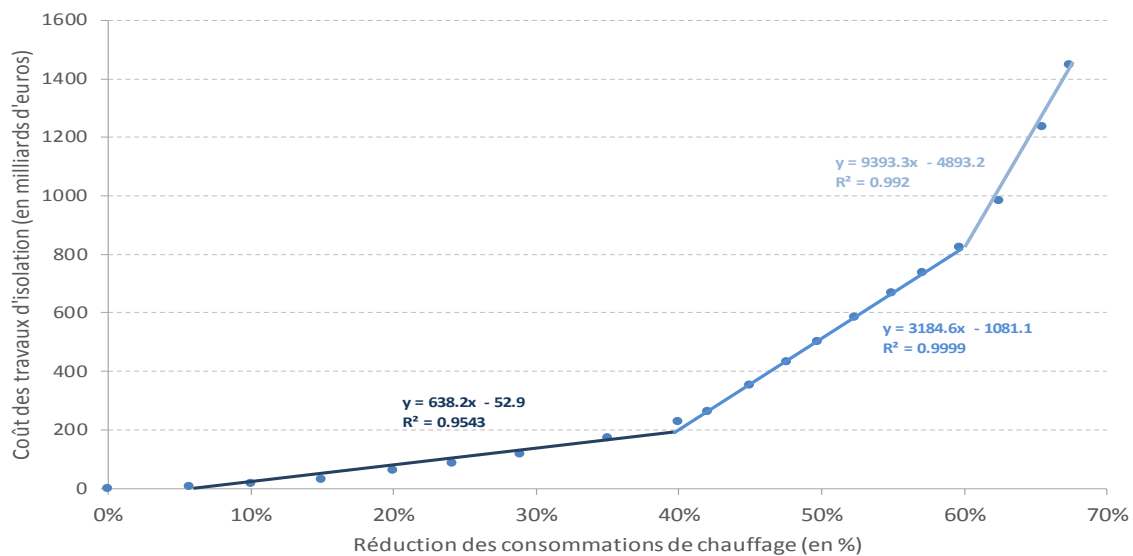
Figure 2.6- Courbe de coût minimum d'isolation du parc de logements français en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique



Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

La courbe de coût obtenue est caractérisée par une allure convexe traduisant l'existence d'un coût marginal d'amélioration de l'efficacité énergétique croissant et présente deux points d'inflexion. Ainsi, atteindre une réduction des consommations énergétiques de 30 % *via* des mesures d'amélioration de la performance de l'isolation reviendrait à 90 milliards d'euros, quand un objectif de 50 % demanderait un budget cinq fois plus important, et une cible de 67 % une enveloppe presque quinze fois supérieure (Figure 2.7).

Figure 2.7- Coûts d'isolation du parc de logement et régression linéaire des trois segments de la courbe



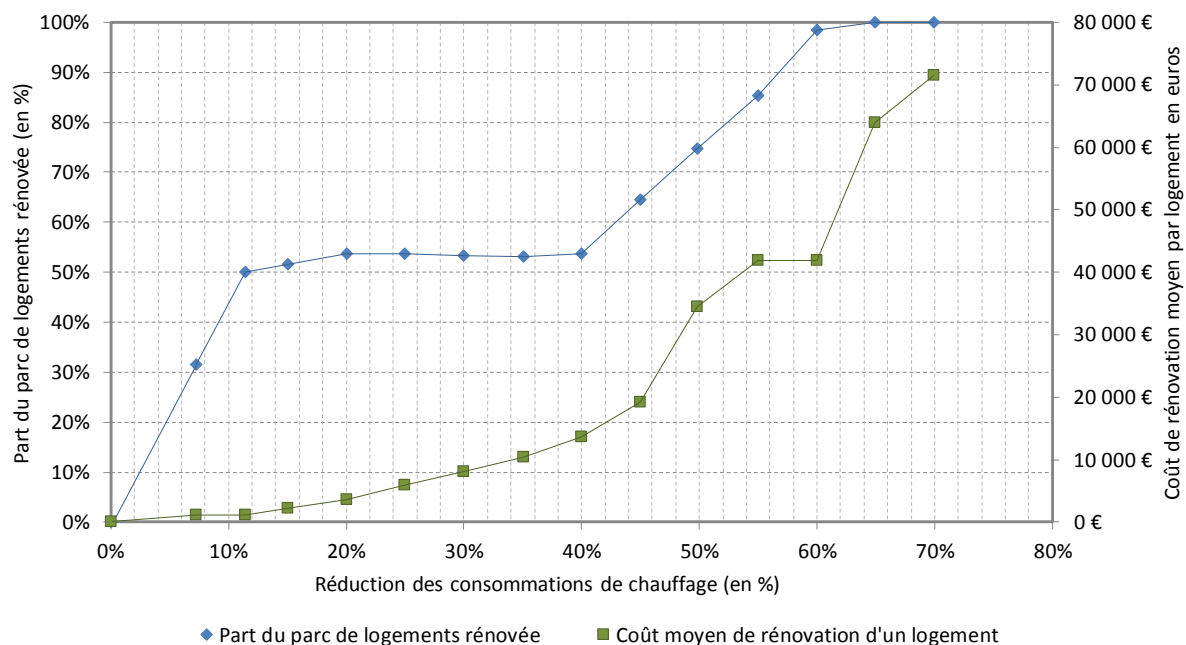
Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

L'origine et la nature de ces points d'inflexion peut s'expliquer au regard de l'évolution de deux variables à savoir la part du parc faisant l'objet d'une rénovation et le coût moyen de rénovation d'un logement, qui renvoie à l'ampleur des travaux entrepris en moyenne dans une habitation (Figure 2.8).

Dans l'intervalle d'évolution de l'efficacité énergétique du parc de 0 % à -12 %, tous les logements construits avant 1974 font progressivement l'objet de travaux de rénovation. Une part importante du parc est donc mobilisée mais uniquement dans le cadre de la mise en œuvre de rénovations légères, comme en témoigne le coût moyen des rénovations sur cet intervalle. Lorsque l'objectif d'efficacité énergétique croît jusqu'à 40 %, très peu d'habitations supplémentaires sont rénovées et les économies d'énergie proviennent principalement d'une augmentation du degré de rénovation des bâtiments les plus anciens. Puis, entre 40 % et 60 %, on assiste à l'inclusion graduelle dans le champ des rénovations du reste du parc de logements. Finalement, pour des gains d'efficacité supérieurs à 60 % émerge la nécessité de mener des travaux d'isolation lourds sur tout le stock de résidences, le coût moyen de rénovation par logement s'élève et renvoie à l'emploi des technologies les plus efficaces (triple vitrage, isolation par l'extérieur). L'évolution de ces deux variables permet ainsi de renseigner la nature des deux points d'inflexion observés sur la courbe de coût d'amélioration de l'isolation. Le premier coude s'explique ainsi par un « effet quantité » : l'atteinte d'objectifs supérieurs à -40 % contraint à la rénovation de logements dont la construction est postérieure à 1974. En revanche, le second point d'inflexion, situé autour de -60 %, relève purement d'un « effet coût unitaire ». Ainsi, pour une cible d'efficacité énergétique plus élevée, c'est l'ampleur des travaux de rénovations par logement qui s'accroît entraînant une forte hausse

du coût moyen des travaux, conséquence du recours aux opérations d'isolation les plus coûteuses.

Figure 2.8- Evolution de la part de logements rénovés et du coût moyen de rénovation par logement en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique



Source : calculs de l'auteur à partir des données de Batiprix

2.4) Estimation des coûts de l'amélioration de l'efficacité des systèmes par le remplacement des technologies de chauffage

Si l'isolation des bâtiments, *via* une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, peut permettre de réduire les émissions de CO₂ liées au chauffage, un second type de mesures, à savoir le changement des systèmes de production de chaleur, peut être mobilisé pour atteindre des fins similaires. Contrairement aux opérations visant l'enveloppe thermique des logements, le remplacement du système de chauffage peut engendrer une réduction des émissions à travers deux effets potentiellement simultanés : un gain d'efficacité énergétique par une amélioration du rendement énergétique des appareils de chauffage (efficacité des systèmes) d'une part, et une diminution du contenu carbone du kWh de chaleur d'autre part (substitution). Après avoir présenté et caractérisé les technologies de chauffage étudiées et les coûts de remplacements associés, les coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production sont évalués.

2.4.1- Les caractéristiques des systèmes de chauffage modélisés

Différentes technologies de chauffage peuvent être utilisées afin de produire et de distribuer de la chaleur au sein d'un bâtiment et ainsi de maintenir une température stable à l'intérieur de celui-ci. Un système de chauffage repose tout d'abord sur un générateur de chaleur. Ce générateur produit de la chaleur transmise à un fluide caloporteur (eau, vapeur, air, etc.) à partir d'une autre forme d'énergie (gaz, fioul, électricité, bois, etc.). Il est caractérisé par un rendement de production, correspondant à la quantité d'énergie délivrée sous forme de chaleur au fluide caloporteur rapportée à l'énergie contenue dans le combustible permettant son fonctionnement. Il est doté aussi d'une certaine puissance (exprimée en Watts). Celle-ci renvoie à la capacité du système de chauffage à produire une certaine quantité de chaleur en un temps donné et est déterminée en fonction des besoins requis pour un bâtiment. En fonction de la technologie de chauffage considérée²⁵, le système de chauffage comprend, en plus du générateur, un système de distribution (boucle d'eau chaude par exemple) et des émetteurs de chaleurs (radiateur à eau, plancher chauffant, etc.).

Un large panel de systèmes de chauffage peut être utilisé dans les bâtiments résidentiels. Une première typologie peut être dressée à partir de l'échelle de production de chaleur :

- Les technologies de chauffage individuel regroupent les systèmes de chauffage dédiés à un seul logement. On distingue les systèmes centralisés, pour lesquels la chaleur est produite par un générateur unique puis distribuée dans l'habitation *via* un réseau de distribution, des systèmes dits décentralisés pour lesquels la chaleur est produite en différents points de l'habitation (comme dans le cas des convecteurs électriques).
- Les technologies de chauffage collectif correspondent aux systèmes situés en pieds d'immeuble et alimentant en chaleur l'ensemble des logements du bâtiment.
- Les réseaux de chaleur²⁶, constitués d'un ou plusieurs centres de production, et qui distribuent la chaleur grâce à des réseaux de canalisation à plusieurs bâtiments, voire à un quartier entier.

L'étude de l'optimisation des coûts associés aux réseaux de chaleur nécessiterait la mise en œuvre d'une approche spatialisée, notamment afin de prendre en compte la densité de la demande de chaleur et les ressources énergétiques mobilisables (déchets, géothermie, chaleur de récupération, etc.) dans un espace donné. Or, les réseaux de chaleur ne représentaient en 2015 qu'à peine 6 % de la chaleur délivrée en France (AMORCE, 2015). Pour

²⁵ Certains dispositifs de chauffage sont à la fois générateurs et émetteurs de chaleur et ne nécessitent pas de systèmes de distribution (ADEME, 2018).

²⁶ Les réseaux de chaleur sont souvent inclus dans la catégorie « chauffage collectif ». Dans ces travaux et par commodité de langage, la distinction entre chauffage en pied d'immeuble et réseaux de chaleur sera effectuée (ces derniers n'étant pas intégrés à la modélisation).

ces raisons, ils ne seront pas pris en compte dans les présents travaux. L'intégralité des technologies de chauffage centralisées et décentralisées couramment utilisées en France sont considérées ici. En revanche, en sont exclues les technologies encore en développement, telles que la micro-cogénération ou la pile à combustible. Par ailleurs, certains systèmes de chauffage peuvent aussi assurer la production de l'eau chaude sanitaire d'un logement. Cependant, les données disponibles ne permettant pas d'évaluer précisément la proportion de foyers dotés de systèmes de production d'ECS indépendants ou joints, il sera fait ici l'hypothèse que les systèmes de production de chaleur sont exclusivement dédiés au chauffage.

En définitive, neuf options de chauffage sont modélisées. Six options de chauffage correspondent à des systèmes centralisés :

- Les chaudières gaz et fioul classiques (en chauffage individuel et chauffage collectif).
- Les chaudières gaz et fioul à condensation (en chauffage individuel et chauffage collectif) : dotées de rendements significativement supérieurs à ceux des chaudières classiques grâce à la récupération de la chaleur contenue dans la fumée issue du processus de combustion.
- Les chaudières à granulés (en chauffage individuel et chauffage collectif) : alimentées par des « pellets » (bois sec compressé à forte densité énergétique)²⁷.
- Les pompes à chaleur air-eau : fonctionnant à l'électricité, ces systèmes produisent de la chaleur partiellement renouvelable dans la mesure où ils extraient des calories de l'air extérieur et délivrent plus d'énergie sous forme d'eau chaude que leur fonctionnement n'en nécessite.

Trois options sont des technologies décentralisées :

- Les convecteurs électriques.
- Les poêles à bois²⁸. Ce système est combiné avec des convecteurs électriques en appoint (65 % de la chaleur est supposée provenir du poêle²⁹). Cette option n'est pas disponible en logement collectif.
- La pompe à chaleur air-air. Cette technologie fonctionne sur le même principe que la pompe à chaleur air-eau mais restitue de l'air chaud et ne nécessite donc pas de boucle d'eau chaude. Ce système est combiné avec des convecteurs électriques en appoint (50 % de la chaleur est supposée provenir de la pompe à chaleur³⁰).

²⁷ Cette option n'est pas disponible en tant que système individuel au sein des en logement collectif.

²⁸ Cette option n'est pas disponible en logement collectif.

²⁹ Cette hypothèse est reprise du rapport final de la mission conjointe ADEME-CSTB (2018) portant sur la réforme du CITE.

Le Tableau 2.8 présente les rendements énergétiques et les contenus carbone associés à ces différents systèmes de chauffage.

Tableau 2.8- Rendement énergétique et contenu en carbone associés à chaque système de chauffage

	Rendement énergétique global (en énergie finale)	Contenu carbone (en gCO ₂ /kWh d'énergie finale)	Contenu carbone (en gCO ₂ /kWh de chaleur)
Systèmes de chauffage décentralisés			
Convecteurs électriques	0.98	180	184
Poêle à bois (appoint convecteurs)	0.8	54	68
PAC air-air (appoint convecteurs)	1.85	180	97
Systèmes de chauffage centralisés			
Chaudière gaz classique	0.83	206	248
Chaudière gaz à condensation	0.95	206	217
Chaudière fioul classique	0.83	271	326
Chaudière fioul à condensation	0.95	271	285
Chaudière bois à granulés	0.95	0	0
PAC air-eau	2.6	180	69

Sources : calculs de l'auteur à partir des données ADEME-CSTB (2018) et des contenus carbonés d'ADEME (2005)

Le rendement énergétique global correspond au rapport entre la quantité de chauffage délivrée au logement et la consommation totale d'énergie consacrée à cet usage. Il se définit ainsi :

$$\eta_{global} = \eta_{production} \times \eta_{distribution} \times \eta_{émission} \times \eta_{régulation} \quad (2.6)$$

Il reflète l'intégralité des pertes liées au système de chauffage considéré. Ces rendements présentés sont issus des simulations menées par l'ADEME et CSTB (ADEME et CSTB, 2018).

Les contenus en carbone de chaque vecteur énergétique sont similaires à ceux utilisés en chapitre un. Pour les poêles à bois, pourvus d'un appoint électrique, le contenu carbone est calculé en pondérant les contenus respectifs des vecteurs énergétiques mobilisés par leur poids dans la production de chauffage. Le contenu carbone du kWh présenté pour chaque option de chauffage correspond au rapport entre le contenu carbone du vecteur énergétique mobilisé au rendement énergétique global du système.

Les prix d'acquisition et d'installation des différents systèmes de chauffage présentent une importante dispersion s'expliquant par divers facteurs : puissance de l'installation, mais aussi marque du produit, taille de l'entreprise de rénovation ou encore localisation géographique du logement (Profil, 2017). Afin d'établir une fonction de coût d'investissement, des prix moyens en fonction de la puissance ont été déterminés pour chaque option de chauffage. Différentes sources de données ont été mobilisées à cette fin en fonction des systèmes étudiés (Batiprix, BatiEtude, Base de données des dispositifs ANAH, CEE et CITE, et données ADEME). Le modèle énergétique utilisé ne permettant pas de définir précisément la puissance adaptée à chaque logement, le besoin de chauffage annuel du logement est pris ici comme approximation. Ainsi, pour chacun des systèmes, le prix d'investissement est défini ainsi :

$$I_{b,h} = a_h + b_h \times BEU_b \quad (2.7)$$

Avec

- $I_{b,h}$, le coût d'acquisition et d'installation de la technologie de chauffage h dans le logement-type b .
- BEU_b , le besoin d'énergie utile annuel (en kWh) pour le chauffage du logement-type b .
- a_h , le coût fixe d'investissement associé au système de chauffage h .
- b_h , le coût d'investissement dans le système de chauffage h dépendant du besoin d'énergie utile du logement.

Les valeurs obtenues pour chaque système sont présentées en Tableau 2.9.

Tableau 2.9- Rendement énergétique et contenu carbone associé à chaque système de chauffage

	Coût d'investissement pour un BEU de 9 000 kWh/an	Coût fixe (a_h)	Coût variable en fonction du BEU (b_h)
Systèmes de chauffage décentralisés			
Convecteurs électriques	1 970 €	620 €	0.15 €
Poêle à bois (appoint convecteurs)	5 220 €	4 500 €	0.08 €
PAC air-air (appoint convecteurs)	7 400 €	5 600 €	0.20 €
Système de chauffage centralisés			
Chaudière gaz classique	4 490 €	3 680 €	0.09 €
Chaudière gaz à condensation	5 360 €	4 460 €	0.10 €
Chaudière fioul classique	4 490 €	3 680 €	0.09 €
Chaudière fioul à condensation	5 360 €	4 460 €	0.10 €
Chaudière bois à granulés	10 025 €	9 575 €	0.05 €
PAC air-eau	11 804 €	10 904 €	0.10 €

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts

La durée de vie des équipements de chauffage est supposée être la même pour toutes les technologies et est fixée à 20 ans. Ainsi, de manière à obtenir des résultats comparables avec ceux issus de l'analyse des coûts d'isolation du parc de logements, les courbes de coûts de

remplacement du système de chauffage sont estimées en intégrant un renouvellement d'équipement similaire après un premier cycle de 20 ans. Le coût d'un système de chauffage est donc calculé ainsi :

$$CS_{b,h} = I_{b,h} + \frac{I_{b,h}}{(1+r)^{20}} \quad (2.8)$$

Avec $CS_{b,h}$, le coût de remplacement du système par l'option de chauffage h au sein du logement-type b sur la période et r , le taux d'actualisation.

Les taux utilisés dans la littérature pour actualiser les investissements en rénovation énergétique sont très divers. Si Gollier (2002) et Quinet et Baumstark (2013) prônent l'utilisation de taux d'actualisation compris entre 2 % et 5 % pour les investissements publics, des taux beaucoup plus élevés sont parfois préconisés. Ainsi, Train (1985) estime que le taux d'actualisation correspondant aux décisions d'investissement des ménages dans le domaine de l'énergie se situe autour de 21%. Ces importants écarts s'expliquent par le rôle et le sens conférés au taux d'actualisation. Celui-ci peut par exemple servir à quantifier les coûts des systèmes énergétiques d'un point de vue sociétal ou viser à expliquer les choix d'investissement individuels des ménages. Dans ce dernier cas, des taux d'actualisation implicite sont employés. En plus du coût du capital ou de la préférence pour le présent, ces taux peuvent permettre une représentation de certaines barrières à l'investissement, mise en lumière par le « paradoxe de l'efficacité énergétique » (Jaffe et Stavins, 1994). Giraudet (2011) utilise ainsi des taux différenciés en fonction du type de logement et du statut d'occupation des ménages, s'échelonnant de 7 % à 40%. De même, Jaccard et Denis ont estimé économétriquement des taux d'actualisation distincts pour l'investissement dans les systèmes de chauffage (9 %) et l'isolation des murs (21 %) des propriétaires occupants de logements individuels. Or, les travaux menés dans cette thèse ne s'inscrivent pas dans cette perspective. Les barrières à l'investissement ne sont pas prises en compte et seules les décisions permettant de minimiser les coûts sont implémentées. Dans ce cadre, un taux d'actualisation de 5% sera utilisé ici, correspondant au taux d'actualisation utilisé dans par Nässén et Holmberg (2013).

2.4.2- Répartition des systèmes de chauffage au sein du parc résidentiel

Les coûts de remplacement des systèmes de chauffage à l'échelle du parc résidentiel sont nécessairement liés à la répartition initiale des différentes technologies dans le stock de logements. La représentation du parc utilisée dans la section précédente requiert donc d'être affinée. Pour cela, différentes sources de données ont dû être mobilisées. La distribution des systèmes de chauffage est effectuée à partir de la segmentation du parc par catégorie de logements et période de construction réalisée précédemment sur la base du rapport RAGE (2012) et de l'Enquête Logement 2013 (INSEE, 2015). La distinction des appartements chauffés par des systèmes individuels et des appartements dotés d'un moyen de chauffage collectif est réalisée à partir de la base PHEBUS (CGDD, 2015 ; Rouquette, 2015). La répartition des systèmes de chauffage dans chacune de ces trois catégories d'habitations et selon leur période

de construction est exécutée en plusieurs étapes. La répartition des chaudières, des PAC et des systèmes convecteurs et poêles à bois s'appuie sur les données de PHEBUS. Puis, la distribution des chaudières par type de combustibles est extrapolée de CEREN (2015). Enfin, le poids des chaudières à condensation pour chaque type d'énergie et la répartition des PAC aérothermiques sont déterminés à partir d'Uniclimate (2015) et d'Observer (2016). La ventilation des systèmes de chauffage au sein du parc résidentiel français ainsi obtenue est présentée en Tableau 2.10, 2.11 et 2.12.

Tableau 2.10- Répartition des systèmes de chauffage dans les logements individuels par période de construction

	MI < 67	MI 68-74	MI 74-81	MI 82-89	MI 90-2000	MI 2001-05	MI 2006-2013	Total
Nombre de logements	6 575 827	1 513 326	1 939 829	1 668 115	1 807 124	1 000 209	1 377 177	15 881 607
Poêle à bois	4.0 %	7.3 %	7.3 %	7.3 %	6.2 %	6.2 %	9.2 %	5.9 %
Convecteurs électriques	16.1 %	29.3 %	29.3 %	29.3 %	24.8 %	24.8 %	35.4 %	23.6 %
PAC air-air	1.9 %	2.6 %	2.6 %	2.6 %	2.8 %	2.8 %	12.2 %	3.2 %
Chaudière gaz classique	36.4 %	28.3 %	27.5 %	33.3 %	37.5 %	43.9 %	26.6 %	34.0 %
Chaudière gaz à condensation	9.1 %	7.1 %	6.9 %	8.3 %	9.4 %	11.0 %	6.7 %	8.5 %
Chaudière fioul classique	23.8 %	18.4 %	19.1 %	13.0 %	13.8 %	7.8 %	4.5 %	17.8 %
Chaudière fioul à condensation	5.9 %	4.6 %	4.8 %	3.3 %	3.5 %	2.0 %	1.1 %	4.4 %
Chaudière bois à granulés	2.1 %	1.7 %	1.7 %	2.1 %	1.2 %	0.7 %	0.4 %	1.0 %
PAC air-eau	0.6 %	0.8 %	0.8 %	0.8 %	0.9 %	0.9 %	3.9 %	1.7 %

Sources : calculs de l'auteur à partir des données issues de PHEBUS, CEREN, Enquête Logement, Observer et Uniclimate

Tableau 2.11- Répartition des systèmes de chauffage individuel dans les logements collectifs par période de construction

	<48	48-74	75-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013	Total
Nombre de logements	2 219 759	1 735 323	621 739	357 477	911 760	271 900	589 005	6 706 963
Convecteurs électriques	43.0 %	47.3 %	47.3 %	47.3 %	53.7 %	53.7 %	63.0 %	48.4 %
PAC air-air	0.4 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.4 %	0.4 %	2.2 %	0.4 %
Chaudière gaz classique	44.2 %	41.2 %	42.1 %	42.0 %	36.2 %	36.6 %	27.2 %	40.2 %
Chaudière gaz à condensation	11.0 %	10.3 %	10.5 %	10.5 %	9.1 %	9.1 %	6.8 %	10.1 %
Chaudière fioul classique	1.0 %	1.0 %	0.1 %	0.1 %	0.4 %	0.1 %	0.0 %	0.7 %
Chaudière fioul à condensation	0.3 %	0.2 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %
PAC air-eau	0.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.1 %	0.1 %	0.7 %	0.1 %

Sources : calculs de l'auteur à partir des données issues de PHEBUS, CEREN, Enquête Logement, Observer et Uniclimate

Tableau 2.12- Répartition des systèmes de chauffage collectif dans les logements collectifs par période de construction

	<48	48-74	75-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013	Total
Nombre de logements	661 070	2 951 853	864 438	497 020	263 174	78 482	155 195	5 471 232
Chaudière gaz classique	58.3 %	58.4 %	56.2 %	58.7 %	58.1 %	17.8 %	17.8 %	56.3 %
Chaudière gaz à condensation	25.0 %	25.0 %	24.3 %	26.2 %	25.0 %	66.5 %	66.5 %	26.8 %
Chaudière fioul classique	12.2 %	12.2 %	13.3 %	8.5 %	11.5 %	4.4 %	4.4 %	11.6 %
Chaudière fioul à condensation	3.0 %	3.0 %	3.3 %	2.1 %	2.9 %	1.1 %	1.1 %	2.9 %
Chaudière bois à granulés	1.4 %	1.4 %	2.9 %	4.5 %	2.4 %	10.2 %	10.2 %	2.4 %

Sources : calculs de l'auteur à partir des données issues de PHEBUS, CEREN, Enquête Logement, Observ'er et Uniclîma

2.4.3- Estimation du coût minimum d'amélioration de l'efficacité de production par type de logements

Le cadre de modélisation et la répartition des systèmes de chauffage au sein du parc résidentiel étant définis, cette section vise à déterminer la fonction de coûts minimums d'amélioration de l'efficacité des systèmes. La minimisation des coûts est d'abord effectuée pour chacun des logements-types avant d'être menée à l'échelle du parc résidentiel.

1) Résultats par type de logements

Comme exposé au Tableau 2.8, les différents systèmes de chauffage sont dotés de rendements énergétiques distincts, c'est-à-dire d'une capacité inégale à produire une certaine quantité de chaleur utile à partir d'un kWh d'énergie finale. Ainsi, remplacer les systèmes de chauffage les moins efficaces par des technologies à rendements supérieurs peut permettre d'effectuer des gains en termes de consommation d'énergie finale pour une consommation de chauffage inchangée.

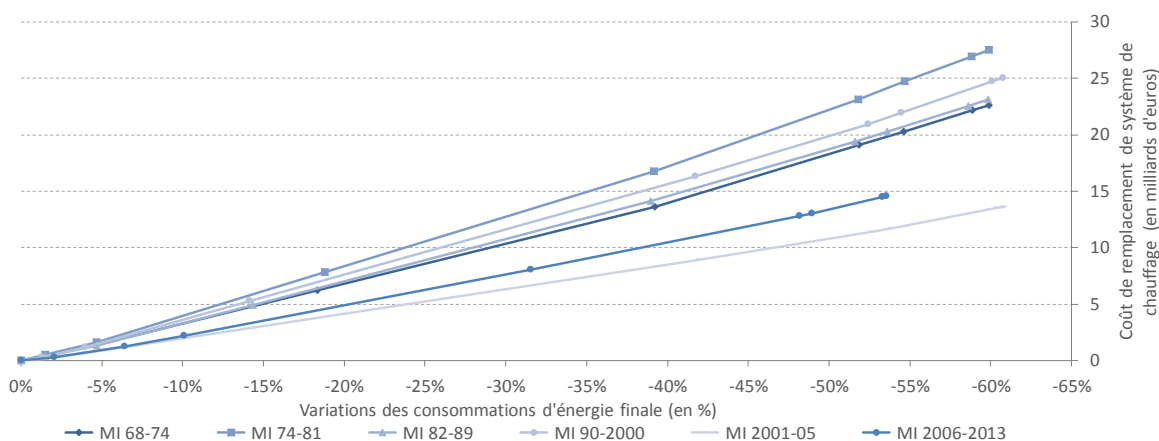
Suivant l'approche retenue dans ce chapitre, l'estimation du coût de l'amélioration de l'efficacité des systèmes est centrée sur les seuls coûts d'investissements. Il n'est donc pas question de s'intéresser à la rentabilité des opérations de remplacement de systèmes en tenant compte des réductions de factures énergétiques en résultant, mais uniquement de déterminer les opérations à mettre en œuvre afin de minimiser le coût d'investissement dans les différentes technologies de production de chaleur permettant d'accroître l'efficacité globale de production du parc de logements.

Dans ce cadre, un premier algorithme est utilisé afin d'identifier et d'ordonner les changements de systèmes de chauffage permettant de minimiser le coût d'amélioration de l'efficacité de production de chaque type de logements en fonction de leur période de construction. Il fonctionne sur un processus composé de deux étapes. La première étape consiste, pour chaque combinaison de logement-type et de technologie de chauffage

initiale³¹, à calculer le rapport entre la réduction de consommation engendrée et le coût de remplacement puis à sélectionner l'opération dont l'économie d'énergie par euro dépensé est la plus élevée. Si d'autres changements de systèmes permettent d'accroître encore l'efficacité énergétique, par rapport à la situation initiale, à un coût plus élevé, l'opération est renouvelée et répétée jusqu'à atteinte de l'efficacité de production maximale. On dispose ainsi pour chaque segment du parc d'un certain nombre d'opérations permettant d'atteindre à moindre coût des objectifs croissants d'efficacité énergétique. Dans un second temps, celles-ci sont ordonnées à l'échelle du logement-type, et les économies d'énergie et les coûts d'investissement sont déterminés en multipliant les résultats obtenus pour chaque opération par le nombre de logements correspondant dans le parc résidentiel.

Les résultats de ce processus d'optimisation étant assez semblables pour chaque catégorie de logements, seuls les résultats concernant les logements individuels sont commentés ici. La Figure 2.9 présente les résultats obtenus pour les maisons-types. Les résultats concernant les appartements sont disponibles en annexe 2.2.

Figure 2.9- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les maisons-types³²



Sources : calculs de l'auteur à partir des données de coûts

Certaines précisions doivent être apportées pour permettre une bonne interprétation de ces courbes. De même que les courbes de coûts présentées dans la partie précédente, il s'agit ici de courbes indiquant les coûts minimums d'atteinte d'une cible d'efficacité énergétique à partir de la situation initiale. Sur chacune des courbes, les points correspondent au

³¹ Par commodité de langage, ces combinaisons seront prénommées « segment » dans le cadre de ces travaux.

³² Pour faciliter la lecture du graphique, les logements construits avant 1968 ne sont pas représentés. Le graphique représentant l'ensemble des maisons est disponible en Annexe 2.2.

remplacement de l'intégralité d'une technologie de chauffage par une autre à l'échelle d'un type de logement³³. Ainsi l'écart horizontal entre deux points est déterminé à la fois par le gain en termes d'efficacité de production engendré par le remplacement d'une technologie par une autre plus efficace, et par le poids de la technologie initiale dans le type de logement considéré puisque cela détermine le nombre de systèmes remplacés. L'écart vertical mesure le coût d'investissement associé à un remplacement donné. Les différences de coût d'atteinte d'une même réduction de consommation entre deux types de logements doivent être considérées prudemment. Elles peuvent résulter de l'investissement dans des technologies distinctes et de coûts d'adoption différents d'une même technologie en fonction de la puissance installée, mais aussi du nombre d'habitations représentées par chaque logement-type. De ce fait, si une amélioration de 60 % de l'efficacité énergétique requiert un investissement deux fois plus important pour les maisons datant de la période 1974-1981 que de celle bâties entre 2000 et 2005, il ne faut pas omettre que ces dernières sont presque deux fois moins nombreuses.

Ces précisions faites, trois enseignements peuvent être tirés de cette optimisation des coûts d'amélioration de l'efficacité de production.

Premièrement, dans le cas du chauffage individuel, seules trois technologies de remplacement sont mobilisées pour atteindre à moindre coût les différentes cibles de réduction des consommations énergétiques : les convecteurs électriques et les pompes à chaleur air-air pour les systèmes décentralisés et les pompes à chaleur air-eau pour les systèmes centralisés. De même, pour le chauffage collectif, l'amélioration de l'efficacité de production repose sur la diffusion progressive des chaudières gaz à condensation. Cela ne signifie pas qu'aucun gain ne peut être obtenu par l'adoption d'autres options de chauffage, mais que ceux-ci seraient plus onéreux une fois ramenés au coût d'investissement associé. Il convient par ailleurs de noter que les convecteurs électriques ne constituent des options coûts-efficaces que pour les logements les plus récents, leur coût devenant prohibitif en cas de besoin de chauffage important.

Deuxièmement, la minimisation du coût est assurée par la mise en œuvre des remplacements de systèmes en fonction du rapport des économies d'énergie au coût d'investissement. Pour un type de logement donné, le coût d'installation d'une même technologie de chauffage ne varie pas en fonction de l'équipement initial. En conséquence, les remplacements de systèmes sont effectués des moins efficaces vers les plus performants. Ainsi, les pompes à chaleur air-air remplacent d'abord les poêles à bois puis les convecteurs électriques. De même, les pompes à chaleur air-eau viennent successivement en substitution des chaudières classiques, des chaudières à granulés, et des chaudières à condensation. Cette diminution des gains en

³³ Par exemple le remplacement des chaudières gaz par des pompes à chaleur dans les maisons construites entre 1968 et 1974.

efficacité issus du remplacement de systèmes de plus en plus performants se traduit graphiquement par l'allure légèrement convexe des courbes de coûts (Figure 2.9)

Troisièmement, l'analyse démontre que l'amélioration de l'efficacité des systèmes peut conduire à des gains en efficacité énergétique allant jusqu'à 60 %. Les gains maximums correspondant à l'adoption généralisée des technologies les plus efficaces, la réduction des consommations d'énergie dépend de l'efficacité de production moyenne initiale de chacun des types de logements. Ainsi, si la diminution maximale des consommations des maisons les plus récentes est de 53 %, cela s'explique par un rendement moyen initial plus important dans cette classe de logements (Tableau 2.13).

Tableau 2.13- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les maisons-types³⁴

	Rendement énergétique moyen initial	Rendement énergétique moyen maximum	Réduction de consommation d'énergie finale maximum
MI < 67	0.88	2.39	-63.0 %
MI 68-74	0.90	2.24	-59.9 %
MI 74-81	0.90	2.24	-59.9 %
MI 82-89	0.90	2.24	-59.8 %
MI 90-2000	0.90	2.29	-60.8 %
MI 2001-05	0.90	2.29	-60.8 %
MI 2006-2013	0.98	2.11	-53.5 %
Ensemble	0.89	2.32	-61.5 %

Sources : calculs de l'auteur à partir des données de coûts de performance des systèmes

Si les gains en termes d'efficacité énergétique peuvent varier en fonction de la période de construction, on notera tout de même que ces différences sont très faibles en comparaison de celles constatées dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique obtenues grâce aux travaux d'isolation.

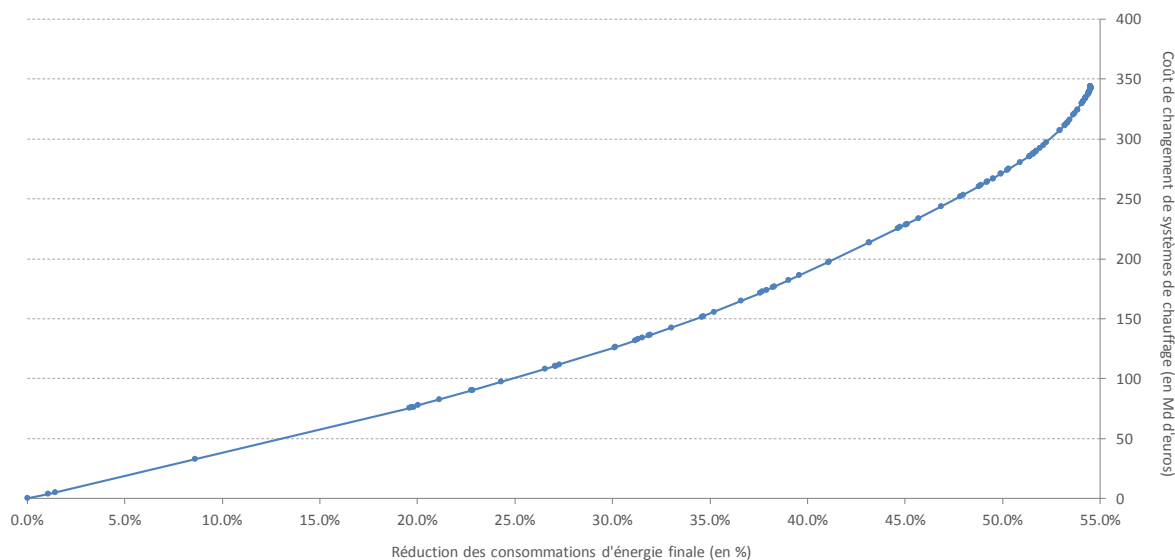
2) Résultats au niveau du parc de logements français

L'estimation de la courbe de coûts d'amélioration de l'efficacité de production au niveau du parc de logements nécessite un nouveau processus d'optimisation. Un second algorithme est donc utilisé ici. Il repose sur le classement de l'intégralité des mesures identifiées lors de l'optimisation des coûts des différents types de logements en fonction de leurs gains en termes de réduction des consommations d'énergie rapportés au montant investi. Les opérations sont ensuite progressivement mises en œuvre en suivant cet ordre. Les gains en termes d'efficacité énergétique à l'échelle du parc résidentiel et le coût cumulé sont

³⁴ Les résultats pour les logements collectifs sont disponibles en Annexe 2.3.

calculés à chaque nouvelle modification de la composition du parc de systèmes de chauffage. La courbe de coût global obtenue ainsi est présentée en Figure 2.10.

Figure 2.10- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production du parc résidentiel



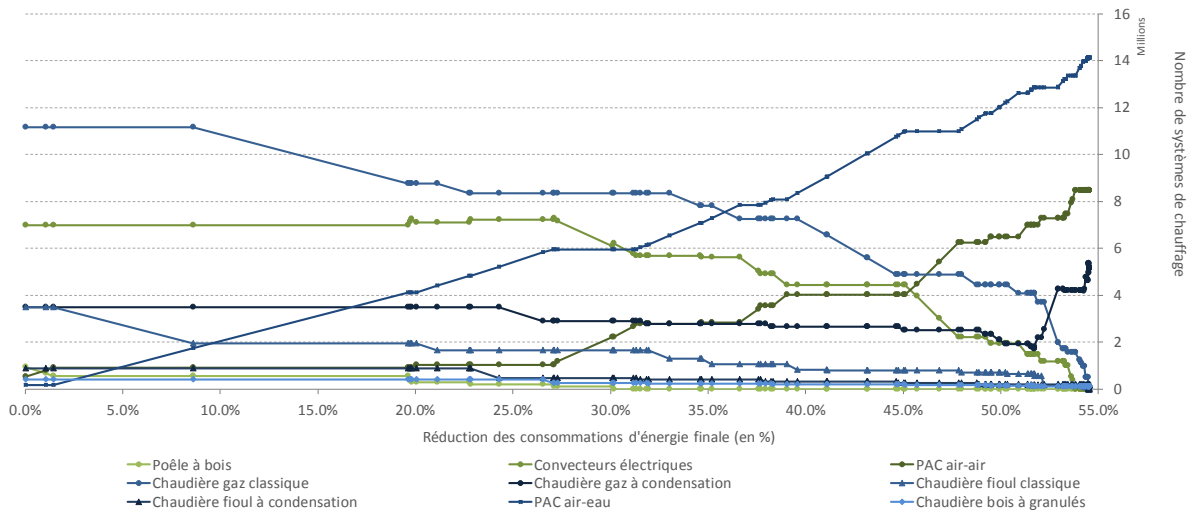
Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

La courbe de coût minimum obtenue est convexe, reflétant la mobilisation progressive de gisement d'amélioration de l'efficacité des systèmes de plus en plus coûteux. Ainsi, il coûterait environ 100 milliards d'euros de réduire d'un quart les consommations d'énergie finale, et plus de 275 milliards d'euros pour les diviser par deux.

A l'échelle du parc, l'ordre des mesures à mettre en œuvre dans le but de minimiser le coût d'amélioration de l'efficacité des systèmes repose principalement sur deux critères : le rendement des technologies initiales et la consommation de chauffage du logement.

Ainsi, si l'on représente l'évolution du nombre de chacun des systèmes de chauffage à mesure que les gains en efficacité énergétique augmentent, on observe que les technologies sont remplacées d'autant plus précocement que leur différence de rendement avec la technologie de substitution est importante. On peut remarquer par exemple qu'améliorer de 20 % l'efficacité énergétique ne requiert que le remplacement des poêles à bois et des chaudières classiques (Figure 2.11). En revanche, on constate que les premiers remplacements dans les logements collectifs n'interviennent que dans l'intervalle d'économie d'énergie de 50 % à 54 % (gains maximums à l'échelle du parc), du fait de l'amélioration limitée apportée par le déploiement généralisé des systèmes à condensation.

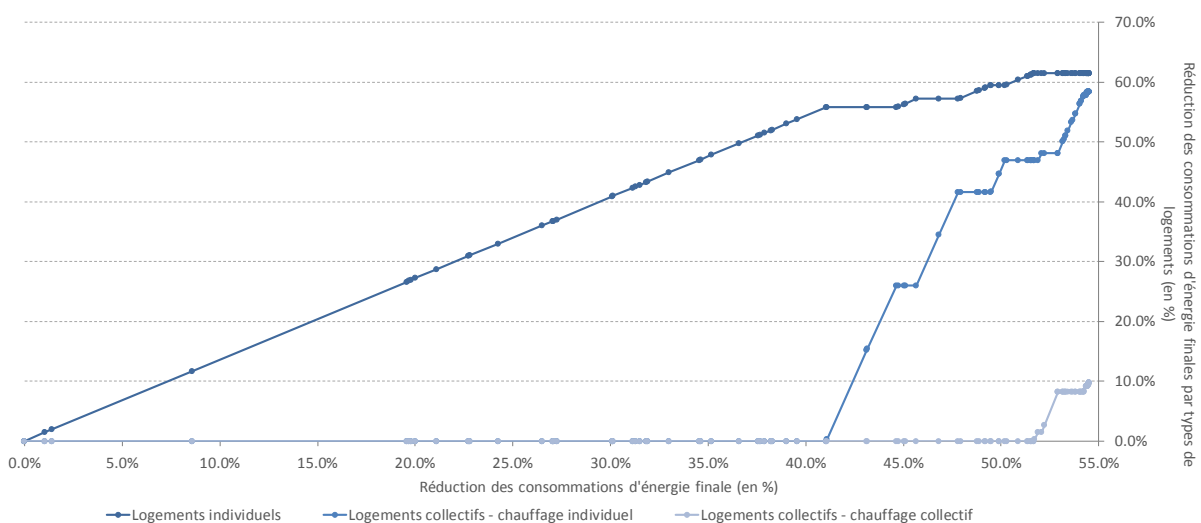
Figure 2.11- Evolution du nombre de systèmes de chauffage types en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

Cet impact assez trivial des différences de rendement sur le classement des opérations était déjà patent à l'échelle des types de logements. En revanche, le passage à l'échelle du parc introduit un second critère de classement, à savoir le besoin de chaleur du bâtiment. Celui-ci étant à l'origine du dimensionnement du système de chauffage, il fait varier le coût d'une même technologie de substitution. Or le coût d'investissement n'étant que partiellement proportionnel à la puissance, il apparaît que plus celle-ci sera importante, plus les économies d'énergie rapportées au coût de remplacement seront grandes. De ce fait, les logements individuels, dont la surface est presque deux fois supérieure à celle des logements collectifs, tendent à être mobilisés en priorité. L'amélioration de 40 % de l'efficacité énergétique du parc résidentiel ne s'appuie d'ailleurs que sur cette catégorie d'habitations (Figure 2.12).

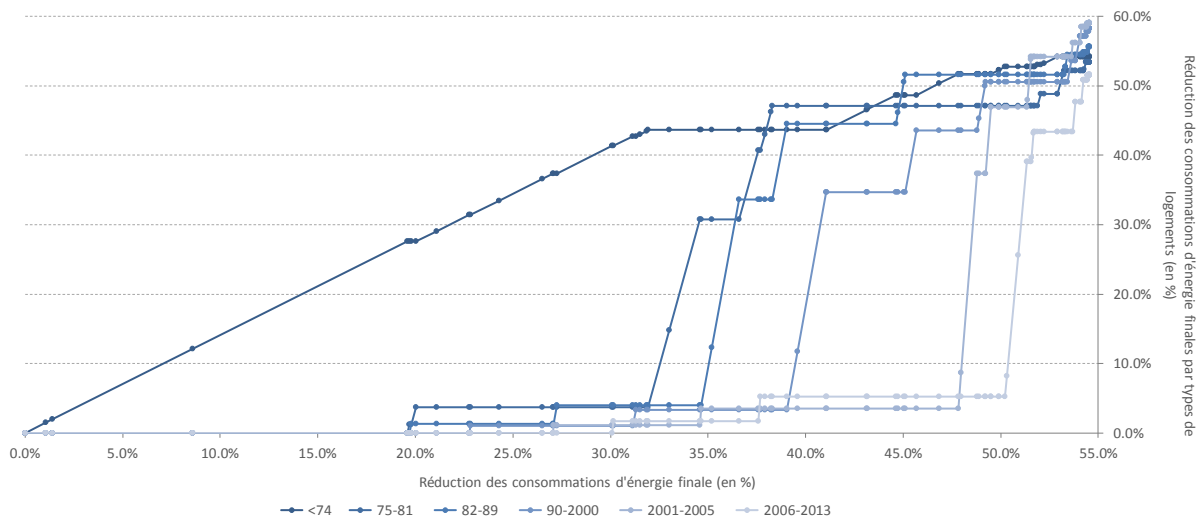
Figure 2.12- Evolution des économies d'énergie au sein de chaque catégorie de logements en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

Suivant le même logique, les logements les plus anciens, dotés d'un niveau d'isolation thermique médiocre, constituent la majeure partie des habitations concernées par les opérations de remplacements lorsque l'efficacité énergétique du parc s'améliore de 35 % (Figure 2.13).

Figure 2.13- Evolution des économies d'énergie au sein de type de logements en fonction de l'objectif d'efficacité énergétique du parc résidentiel



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

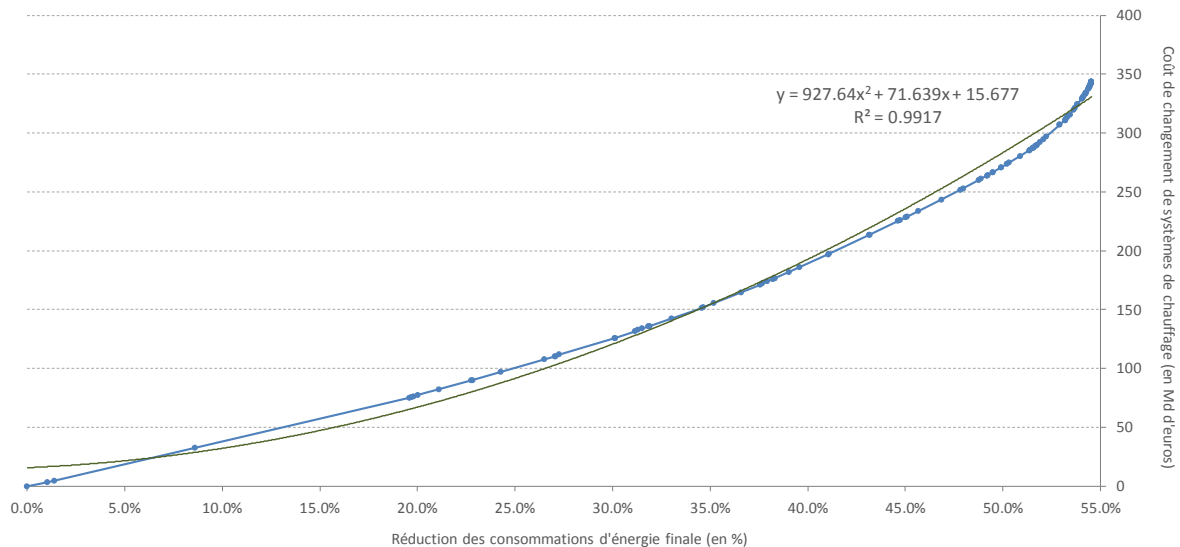
Ainsi si les remplacements sont bien réalisés en fonction des différentiels de rendement pour chaque logement-type, il apparaît qu'à l'échelle globale, cette mécanique est imbriquée avec une dynamique de mobilisation des logements allant graduellement des plus énergivores aux plus sobres en consommation d'énergie.

Par ailleurs, la courbe de coût d'amélioration de l'efficacité de production peut être mise en perspective avec celle associée à l'accroissement de l'efficacité de l'enveloppe thermique³⁵. On constate que d'importantes économies d'énergie peuvent être atteintes par ces deux biais : 54 % au maximum par le remplacement des systèmes contre 67 % via la mise en œuvre de travaux d'isolation. Dans les deux cas, les coûts marginaux d'amélioration de l'efficacité énergétique sont croissants. La comparaison de ces coûts marginaux fait ressortir que l'amélioration de l'efficacité énergétique par l'accroissement du rendement moyen des systèmes est plus coûteuse que celle permise par la mise en œuvre de travaux d'isolation de faible ampleur sur l'habitat ancien, correspondant à la première partie de la courbe de coûts

³⁵ Il convient de noter que l'efficacité énergétique calculée pour les travaux d'isolation correspond à aux gains en termes d'énergie utile, ou autrement de consommation de chauffage, alors que celle étudiée dans le cas des changements de systèmes renvoie aux économies d'énergie finale.

de l'efficacité des bâtiments. En revanche, l'amélioration de l'efficacité de production génère des gains d'efficacité énergétique à un coût plus faible que les autres types de travaux d'isolation (Figure 2.14). Il convient cependant de noter que les gains résultants de ces deux types de mesures ne peuvent pas simplement s'additionner. Ils sont déterminés ici « toutes choses égales par ailleurs ». En effet, les économies issues de l'amélioration des rendements des systèmes sont dépendantes de la consommation de chauffage des habitations et donc de leur niveau d'isolation thermique.

Figure 2.14- Coûts d'amélioration de l'efficacité des systèmes et régression de la courbe



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

2.5) Estimation du coût minimum d'amélioration de décarbonation du mix énergétique

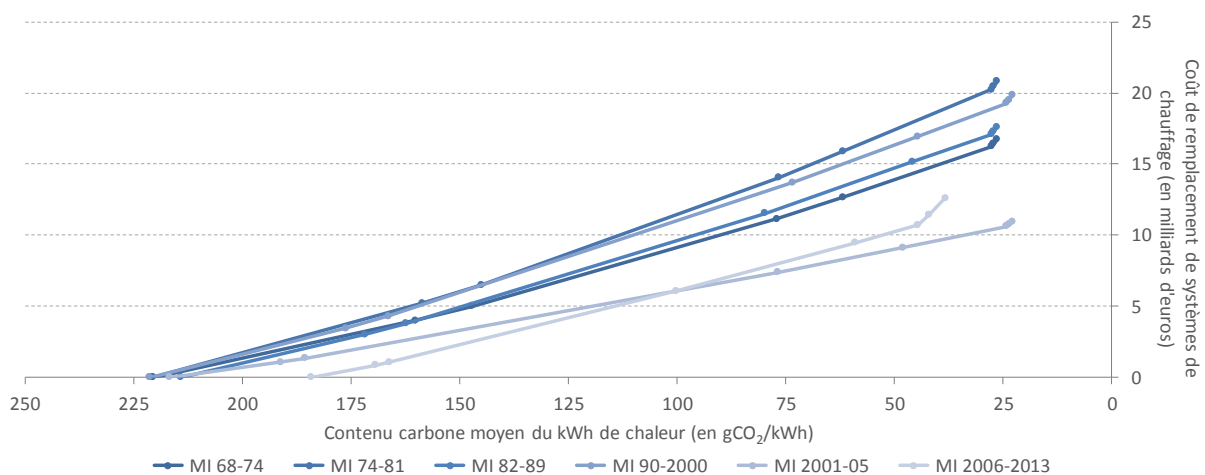
Si le remplacement des systèmes de chauffage peut permettre de réduire les consommations d'énergie résultant de la production d'une même quantité de chaleur, ce type d'opérations peut aussi être un levier de réduction du contenu carbone de la chaleur consommée. Dans un tel cadre, actionner ce levier consiste à déployer non plus les technologies dont le rendement énergétique est le plus élevé, mais celles dont le contenu carbone est le plus faible. Cette dernière partie vise donc à déterminer la courbe de coût minimum d'amélioration du contenu carbone moyen par type de logements puis au niveau du parc résidentiel à niveau d'isolation inchangé.

2.5.1- Résultats par type de logements

Estimer les coûts minimums d'amélioration du contenu carbone de la chaleur produite au sein de chaque type de logement requiert l'utilisation d'un algorithme quasiment similaire à celui mobilisé pour l'amélioration de l'efficacité de production. La seule différence réside dans le critère de classement des options de remplacement : celui-ci est dans ce cas centré sur la

comparaison de la baisse de contenu carbone rapportée au montant d'investissement qu'engendrent toutes les combinaisons de remplacements de systèmes de chauffage. Pour chacun des segments, la technologie de remplacement la plus performante selon ce critère est sélectionnée. S'il existe d'autres remplacements plus coûteux mais permettant d'accroître plus fortement le contenu carbone, une seconde sélection est mise en œuvre afin de retenir la technologie la plus performante au sein de ce nouveau panel. Ce procédé est appliqué jusqu'à l'adoption du système au contenu carbone le plus faible disponible dans chaque catégorie de logements et pour chaque mode de chauffage. L'ensemble de ces solutions de remplacement est ensuite ordonné à l'échelle de chaque logement-type en fonction de leur coût de décarbonation. Les coûts cumulés et l'évolution du contenu carbone moyen sont calculés sur cette base. Comme dans la section précédente, seuls les résultats concernant l'habitat individuel sont présentés ici (Figure 2.15), ceux relatifs aux logements collectifs sont disponibles en annexe 2.4.

Figure 2.15- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone pour chaque type de maisons³⁶



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

Ces courbes de coûts possèdent des caractéristiques similaires à celles présentées dans la section précédente. Elles sont d'allures légèrement convexes en raison de l'augmentation du coût d'amélioration du contenu carbone entre chaque remplacement d'une technologie au sein d'un type de logements donné. L'augmentation de ce coût résulte du remplacement d'un système moins carboné par une même option de substitution, ce qui induit une baisse des gains en termes de réduction de CO₂ pour un même coût d'investissement, ou du recours à

³⁶ Pour faciliter la lecture du graphique, les logements construits avant 1968 ne sont pas représentés. Le graphique représentant l'ensemble des maisons est disponible en Annexe 2.4.

une option de remplacement plus coûteuse. Les technologies de substitution diffèrent en fonction des catégories de logements : poêles à bois et chaudière à pellets dans les logements individuels, pompes à chaleur aérothermiques et chaudière gaz à condensation dans les appartements chauffés individuellement et chaudières bois à granulés en cas de chauffage collectif. Cette hétérogénéité des technologies de substitution en fonction des catégories de logements explique les différences de contenu carbone minimal observées. Ainsi, si celui-ci est nul pour les appartements chauffés collectivement, il est de 80 grCO₂/kWh pour les appartements dotés de systèmes de chauffage individuels et de 20 grCO₂/kWh pour les maisons. Par ailleurs, on observe également certaines différences au sein d'une même catégorie de logements. Les technologies de substitution étant dans ce cas les mêmes, ces écarts s'expliquent par le poids variable des systèmes décentralisés en fonction de la période de construction (Tableau 2.14).

Tableau 2.14- Contenu carbone initial et minimal pour les maisons-types en fonction de la période de construction (en gr de CO₂/kWh de chaleur)

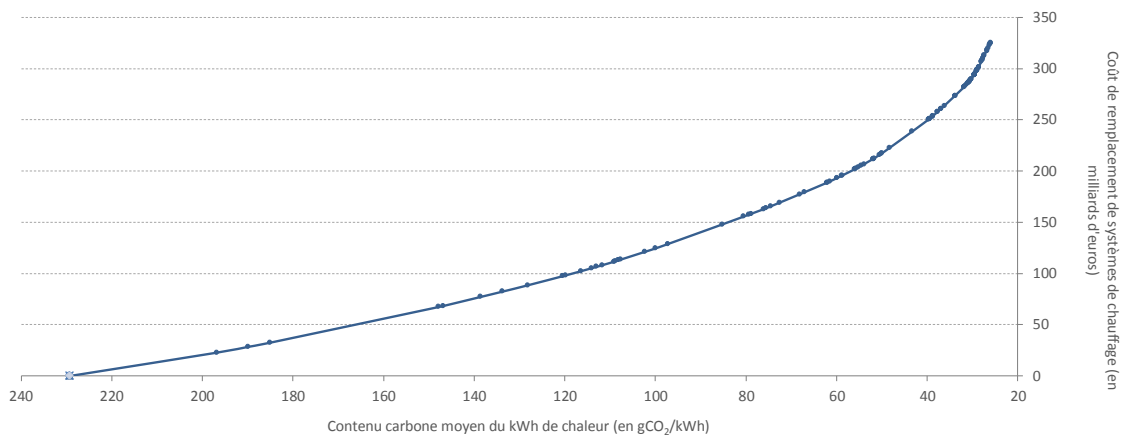
	Contenu carbone initial	Contenu carbone minimal	Réduction maximale du contenu carbone
MI < 67	239.5	17.4	92.8 %
MI 68-74	221.3	30.8	86.1 %
MI 74-81	221.8	30.8	86.1 %
MI 82-89	215.1	30.8	85.7 %
MI 90-2000	222.0	26.6	88.0 %
MI 2001-05	217.5	26.6	87.8 %
MI 2006-2013	185.3	44.7	75.9 %
Ensemble	229.5	20.1	91.3 %

Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

2.5.2- Résultats au niveau du parc de logements français

La courbe de coûts minimums d'amélioration du contenu carbone moyen du kWh de chaleur à l'échelle du parc résidentiel est construite en ordonnant les différentes mesures optimisant le coût de décarbonation des différents logements-types. Celles-ci sont ensuite successivement mises en œuvre et les coûts cumulés ainsi que les gains en termes de remplacements de contenu carbone sont calculés à chaque étape. Le résultat est présenté en Figure 2.16.

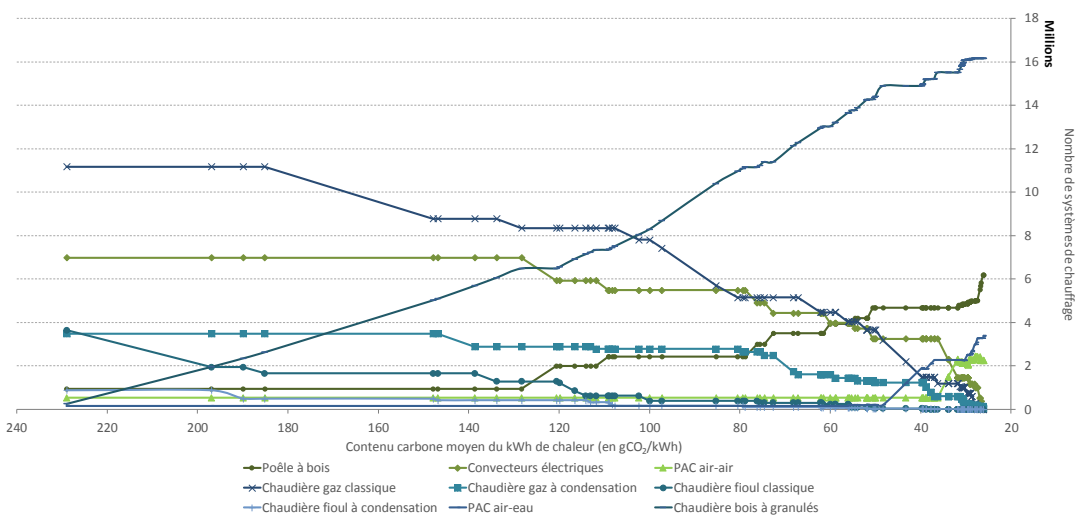
Figure 2.16- Coûts minimums d'amélioration du contenu carbone moyen du kWh de chaleur



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

On obtient logiquement une courbe de coût de décarbonation convexe. Réduire le contenu carbone de 40 % impliquerait un investissement d'environ 80 milliards d'euros quand le diminuer de 80 % nécessiterait un montant quatre fois supérieur. L'atteinte du contenu carbone moyen minimal à l'échelle du parc, 26 gCO₂/kWh, supposerait un investissement total de 324 milliards d'euros. Fort logiquement, la minimisation du coût résulte du remplacement progressif des technologies de chauffage les plus émettrices vers les plus décarbonées. La réduction de 35 % du contenu carbone initial est obtenue grâce au seul remplacement de systèmes fonctionnant au fioul. La décarbonation du parc s'effectue principalement par le déploiement des technologies fonctionnant au bois et des systèmes de pompes à chaleur (Figure 2.17).

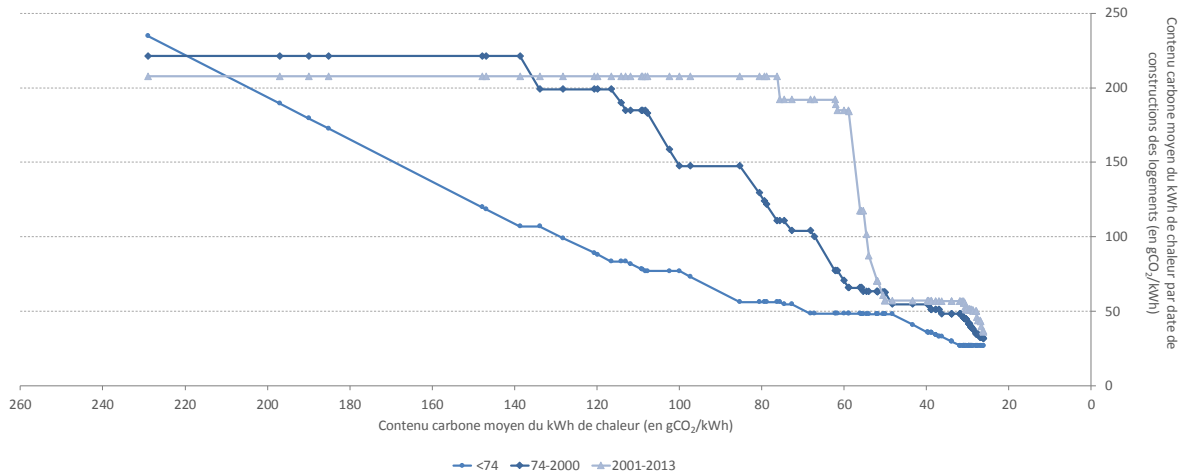
Figure 2.17- Evolution des technologies de chauffage en fonction de l'objectif de contenu carbone



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

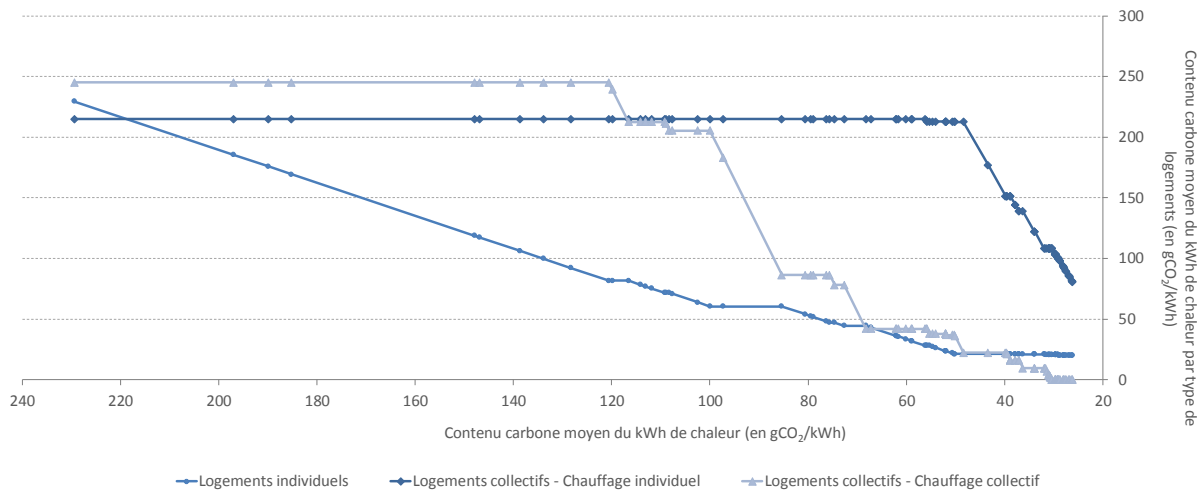
Par ailleurs, comme observé dans la partie précédente, l'optimisation des coûts à l'échelle du parc n'est pas seulement guidée par le contenu carbone des différentes technologies mais repose parallèlement sur le niveau de consommation de chauffage des logements. Les remplacements de systèmes sont d'abord menés des maisons les plus anciennes aux appartements les plus récents (Figure 2.18 et 2.19).

Figure 2.18- Evolution du contenu carbone moyen des logements par période de construction en fonction du niveau de décarbonation du parc résidentiel



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

Figure 2.19- Evolution du contenu carbone par catégorie de logements en fonction du niveau de décarbonation du parc résidentiel



Sources : calculs de l'auteur à partir des hypothèses de coûts et des caractéristiques des systèmes

Les actions sur les systèmes permettant la minimisation des coûts de l'amélioration du contenu carbone d'une part, et de l'accroissement de l'efficacité énergétique d'autre part, partagent des points communs. Dans les deux cas, les remplacements de systèmes sont globalement menés des logements individuels les plus anciens vers les logements collectifs les plus récents. Néanmoins, l'ordre de remplacements des systèmes et la nature des technologies de substitution divergent. Si dans tous les cas les systèmes à la fois carbonés et dotés de rendements énergétiques médiocres sont remplacés prioritairement à l'instar des chaudières au fioul, d'autres technologies peuvent être remplacées dans un cas et constituer une technologie de substitution dans un autre cas, à l'instar des poêles à bois. Cette incompatibilité partielle entre efficacité des systèmes et substitution peut varier en fonction des catégories de logements. On peut noter par exemple que dans des appartements chauffés individuellement, les pompes à chaleur constituent des solutions de substitution dans les deux cas.

2.6) Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir la progression des coûts d'investissement associée l'amélioration des facteurs d'efficacité de l'enveloppe thermique, d'efficacité de la production et de décarbonation de la production de chaleur à mesure que les gains visés s'accroissent. Ces coûts ont d'abord été évalués au niveau des logements-types puis à l'échelle du parc résidentiel français. Dans chacun des cas, il a été observé que les coûts marginaux d'amélioration étaient croissants. Obtenir des gains modérés sur chacun de ces rapports peut être réalisé pour des niveaux d'investissement modérés quand atteindre des performances maximales implique la mobilisation de montants très importants.

Ces coûts ont été déterminés à travers l'optimisation de deux grands types de mesures : les travaux d'isolation et le remplacement des systèmes de chauffage. Les impacts d'un large panel de ce type de mesures ont été évalués pour différents logements-types représentatifs du parc résidentiel français. Cette estimation de l'évolution des consommations d'énergie en fonction des investissements réalisés se fonde sur l'utilisation d'un modèle énergétique combinant une approche purement physique et une prise en compte partielle de l'effet rebond permettant de répliquer de manière consistante les consommations constatées à l'échelle du parc résidentiel (ce modèle constitue par ailleurs l'un des socles sur lesquels repose la suite de ces travaux). A partir de cette modélisation, les mesures permettant d'atteindre à moindre coût des cibles d'améliorations des différents facteurs de plus en plus ambitieuses ont été sélectionnées et ordonnées au niveau du parc de logements et les coûts associés systématiquement calculés.

Cette démarche a permis d'identifier le potentiel maximum d'amélioration des différents facteurs : -67 % pour l'efficacité des bâtiments, -54 % pour l'efficacité de production, et -86 % pour la décarbonation de la chaleur. De plus, un classement similaire des segments du parc de logements mobilisés, attribuable aux caractéristiques des logements (niveau d'isolation et compacité) et aux coûts des systèmes de chauffage émerge : les opérations concernent en

premier lieu les logements individuels les plus anciens avant de s'étendre progressivement aux logements collectifs les plus récents.

Parallèlement, ces résultats amènent à s'interroger sur la manière d'arbitrer entre ces trois leviers. En effet, les coûts marginaux croissants observés pour les différents leviers amènent à penser qu'une stratégie de réduction des émissions de CO₂ visant à atteindre un objectif au moindre coût doit nécessairement s'appuyer sur ces trois piliers. Or, si ceux-ci ont été jusqu'à présent analysés de manière disjointe, ils semblent nécessairement s'exclure les uns les autres, au moins partiellement. D'abord, les deux instruments d'amélioration de l'efficacité énergétique ne sont pas indépendants : la réduction des besoins de chauffage induite par les mesures d'isolation rogne nécessairement sur les gains d'efficacité obtenus par de meilleurs rendements énergétiques. De plus, les leviers d'efficacité de production et de substitution reposent sur une seule et même action : le remplacement de système de chauffage. Or, obtenir des gains sur ces deux facteurs n'implique pas le déploiement de technologies de chauffage similaires. Analyser l'arbitrage entre ces opérations permettant de minimiser le coût d'atteinte de différents objectifs de réduction d'émissions de CO₂ requiert ainsi de passer d'une analyse centrée sur les facteurs efficacité et substitution à une approche axée sur les émissions de CO₂ elles-mêmes.

Chapitre III : L'arbitrage entre efficacité et substitution énergétique dans le cadre de la minimisation du coût global de chauffage

3.1)	Introduction.....	92
3.2)	Cadre d'analyse	93
3.2.1-	<i>Détermination du coût global de chauffage.....</i>	<i>94</i>
3.2.2-	<i>Construction et utilisation des matrices de coûts d'isolation</i>	<i>96</i>
3.2.3-	<i>Hypothèses de modélisation.....</i>	<i>97</i>
3.3)	Changements de systèmes de chauffage coût-efficace et émissions de CO₂.....	98
3.3.1-	<i>La compétitivité des systèmes de chauffage : une résultante de l'interaction entre structure des coûts et besoin de chauffage des logements.....</i>	<i>98</i>
3.3.2-	<i>Les systèmes de chauffage à haut rendement ou décarbonés : des options potentiellement coûts-efficaces dans les logements les plus anciens</i>	<i>104</i>
3.3.3-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces.....</i>	<i>107</i>
3.4)	Mesures d'isolation coûts-efficace et émissions de CO₂.....	110
3.4.1-	<i>Coût d'isolation, coût marginal de production et ampleur des travaux de rénovation coûts-efficaces</i>	<i>110</i>
3.4.2-	<i>Les travaux d'isolation : des mesures potentiellement rentables dans les logements anciens mais d'ampleurs variées en fonction des systèmes de chauffage installés.....</i>	<i>115</i>
3.4.3-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces</i>	<i>116</i>
3.5)	Arbitrage coût-efficacité entre isolation et changement de systèmes de chauffage et potentiel de réduction des émissions de CO₂.....	119
3.5.1-	<i>Les combinaisons de mesures coûts-efficaces pour les logements représentatifs : des couplages variés des deux types d'investissements</i>	<i>119</i>
3.5.2-	<i>Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas de déploiement des combinaisons de mesures optimales</i>	<i>121</i>
3.6)	Analyse de sensibilité.....	127
3.7)	Conclusion	129

Chapitre III : L'arbitrage entre efficacité et substitution énergétique dans le cadre de la minimisation du coût global de chauffage

3.1) Introduction

Le chapitre précédent souligne l'existence de deux types de d'opérations permettant de mobiliser deux facteurs : l'efficacité énergétique *via* l'efficacité du bâtiment et l'efficacité de production, et la substitution à travers l'amélioration du contenu carbone du mix énergétique. Dans le cadre de ces travaux, ces deux facteurs sont considérés comme deux leviers permettant de jouer sur une variable centrale : les émissions de CO₂ du secteur résidentiel. Ainsi, les gains en efficacité énergétique ne sont pas recherchés pour eux-mêmes mais pour leur capacité à générer des réductions d'émission.

L'existence de coûts marginaux croissants, dans l'obtention de gains en efficacité ou en amélioration du contenu carbone, et la présence d'incompatibilités au niveau des technologies employées entre amélioration de l'efficacité de production et décarbonation de la chaleur produite, ont mis en exergue la nécessité d'arbitrer judicieusement entre mesures d'isolation et de remplacement de systèmes de chauffage dans un objectif de minimisation des coûts. Etudier cet arbitrage implique d'inclure dans l'analyse l'intégralité des coûts et bénéfices associés à ces mesures, et notamment les coûts de l'énergie. Cette prise en compte de tous les flux économiques liés aux différents investissements conduit à adopter une approche basée sur le coût global de chauffage.

La littérature économique a commencé à s'intéresser à cette question de l'arbitrage entre investissements en efficacité et investissements en substitution à la suite des deux premiers chocs pétroliers, qui sonnèrent le glas d'une époque marquée par la disponibilité de ressources énergétiques fossiles abondantes et bon marché. Ainsi, des premières études se sont attachées à déterminer l'arbitrage optimal entre ces deux options en vue de réduire la consommation de pétrole dans le secteur du bâtiment. Basées sur l'utilisation du modèle d'optimisation MARKAL, elles ont notamment permis de souligner l'existence d'incitations différentes à mener des travaux de rénovation énergétique en fonction des performances des systèmes de production de chaleur installés (Wene, 1980 ; Wene et Andersson, 1981). Ces études ont par la suite été étendues et approfondies par des travaux menés dans les pays nordiques et centrés sur la question du développement des réseaux de chaleur et des cogénérations. Ainsi, Ryden *et al.* (1993) ont souligné la diminution du niveau d'isolation coût-efficace provoquée par le développement des centrales de cogénération. Nässén et Holmberg (2013) ont évidence l'existence de potentiels effets négatifs de l'amélioration de l'isolation des logements sur la rentabilité des cogénérations. D'autres travaux de modélisation menés sur des systèmes énergétiques locaux à différentes échelles et différents pas de temps ont

démontré que la plupart des améliorations de l'enveloppe thermique des logements se révélaient non profitables dans le cas où ces derniers étaient connectés à un réseau de chaleur (Rolfman et Gustafsson, 2003 ; Rolfman, 2004). L'étude de Carpène *et al.* (2014) a fait ressortir la sensibilité de la compétitivité des réseaux de chaleur fonctionnant au bois à une éventuelle baisse de la demande de chaleur. Par ailleurs, Difs *et al.* (2010) ont montré, dans le cadre d'une analyse du système énergétique d'une municipalité danoise, qu'améliorer l'isolation des logements utilisant le chauffage urbain pouvait mener *in fine* à une augmentation des émissions de CO₂ des habitations. Ces différents travaux ont donc mis en évidence la présence d'une interaction négative entre mesures d'efficacité et mesures de substitution (dans le cas des réseaux de chaleur) qui a pour effet de complexifier la détermination de l'arbitrage coût-efficace entre ces deux leviers de réduction d'émissions.

Le présent chapitre s'inscrit dans la continuité de ces travaux. Il vise à répondre à la question suivante : quels facteurs déterminent l'arbitrage coût-efficace entre mesures d'isolation et déploiement des systèmes de chauffage décarbonés et/ou performants dans le cadre de la minimisation du coût global de chauffage, et quelles conséquences aurait une mise en œuvre généralisée de ces mesures sur le coût global de chauffage et les émissions de CO₂ du parc de logements français ?

Afin d'y répondre au mieux, celui-ci adopte l'organisation qui suit. Après avoir exposé le cadre analytique et les hypothèses de modélisation en section 3.2, l'analyse est menée séquentiellement. La section 3.3 s'intéresse aux déterminants de la compétitivité des technologies de chauffage, à l'identification des systèmes coûts-efficaces pour les différents logements-types, à isolation inchangée, et aux implications liées à leur déploiement. La section 3.4 est centrée sur l'établissement des niveaux optimaux d'isolation des bâtiments en fonction des technologies de chauffage les équipant et aux conséquences de la mise en œuvre de ces travaux à l'échelle du parc résidentiel français. Les combinaisons coûts-efficaces de remplacement de systèmes de chauffage et de mise en œuvre de travaux d'isolation et l'effet de leur adoption sur le coût global de chauffage et les émissions de CO₂ sont étudiées en section 3.5. La sensibilité des principaux résultats aux hypothèses portant sur la valeur du taux d'actualisation et les scénarios d'évolution du prix des énergies est testée en section 3.6. La section 3.7 conclut.

3.2) Cadre d'analyse

Ce chapitre cherche à éclairer les mécanismes régissant la définition des combinaisons de mesures coûts-efficaces dans les différents types de logements et vise notamment à appréhender la manière dont les travaux d'isolation et les systèmes de chauffage permettant de réduire les émissions de CO₂ peuvent être économiquement compatibles. Dans cette optique, les solutions coûts-efficaces et les conséquences liées à leur implémentation sont

d'abord déterminées par type de mesures pris isolément, puis établies en cas de recours simultané aux deux types d'investissements.

3.2.1- Détermination du coût global de chauffage

Si le chapitre précédent était uniquement centré sur les coûts d'investissement relatifs aux opérations de remplacement des systèmes de chauffage et de renforcement de l'isolation thermique des logements, il apparaît que la seule prise en compte de ces derniers ne permet pas d'examiner la rentabilité des différentes mesures étudiées. En effet, si les choix de systèmes de chauffage et de performance thermique des habitations conditionnent la quasi-totalité des coûts futurs, les investissements ne représentent qu'une fraction du coût de chauffage des logements au cours du temps. Estimer le coût total du chauffage des logements implique donc de comptabiliser l'intégralité des coûts différés intervenant sur la période d'étude.

La question de la nature et du périmètre des coûts à intégrer lors de l'évaluation de projets d'investissement renvoie, notamment dans le cadre de l'économie de la construction, à diverses approches regroupées sous le terme d'approches en coût global³⁷. Il existe plusieurs typologies du coût global, reposant systématiquement sur l'adoption de périmètres plus ou moins larges dans la comptabilisation des coûts. Par exemple, la MIQPC(2008)³⁸ distingue trois concepts :

- Le coût global élémentaire, se fondant exclusivement sur les flux financiers.
- Le coût global élargi, ajoutant au précédent les externalités liées au bâtiment (qualité d'usage, qualité de l'air, etc.).
- Le coût global partagé, tenant compte des autres externalités (émissions de CO₂ par exemple).

Nous nous en tiendrons à une approche relativement simple dans le cadre de cette analyse en ne retenant dans la définition du coût global de chauffage (noté CGC) que les différents coûts associés au système de production de chaleur et aux éventuelles opérations d'isolation. Le CGC est défini donc comme la somme actualisée des différents coûts associées à la fourniture de chauffage d'un logement donné. Ainsi, en plus du coût d'investissement, seront intégrés :

- Les coûts d'entretien et de maintenance des systèmes de chauffage.
- Le coût de l'énergie associé à l'usage chauffage.

³⁷ Les premières approches de ce type ont été initiées aux Etats-Unis dans l'après-guerre par le ministère de la Défense qui souhaitait évaluer l'ensemble des coûts afférents à ses programmes de défense.

³⁸ Mission Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publique (MIQPC).

Les hypothèses du chapitre précédent sont maintenues : les calculs sont effectués sur un horizon temporel de 40 ans et la durée de vie de chacune des technologies de chauffage est de 20 ans. Par ailleurs, la comparaison des systèmes de chauffage sera effectuée en supposant que le choix de la technologie de chauffage est effectué pour les 40 ans à venir, autrement dit, le système de chauffage est remplacé par la même technologie à mi-période.

En l'absence de mesure d'isolation, le CGC s'écrit :

$$CGC_{b,h}^{no\ ins} = I_h + \frac{I_h}{(1+r)^{n/2}} + \sum_{t=1}^n \frac{P_{h,b}^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_h^t}{(1+r)^t} \quad (3.1)$$

Avec :

- $CGC_{b,h}^{no\ ins}$: le coût global de chauffage pour le bâtiment-type b doté du système de chauffage h .
- I_h : le coût d'investissement dans la technologie de chauffage h .
- $P_{h,b}^t$: la facture énergétique à la date t pour le système de chauffage h dans le bâtiment-type b .
- $O\&M_h^t$: les coûts d'entretien et de maintenance à la date t .
- r , le taux d'actualisation.
- n , l'horizon temporel.

Le coût global de chauffage étant entendu ici comme l'intégralité des coûts associés à la production et à la gestion de la chaleur, les coûts d'éventuels travaux d'isolation y sont intégrés. Dans ce chapitre, ceux-ci sont supposés être menés à la date 0 et prendre effet immédiatement. Ainsi, en cas de rénovation énergétique du logement, le coût global de chauffage s'écrit :

$$CGC_{b,h}^k = I_h + E_{b,k} + \frac{I_h}{(1+r)^{n/2}} + \sum_{t=1}^n \frac{P_{h,b}^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_h^t}{(1+r)^t} \quad (3.2)$$

Avec $E_{b,k}$, le coût associé à la mise en oeuvre de la combinaison d'opération d'isolation k pour le logement-type b .

L'introduction du coût de l'énergie dans l'analyse implique le calcul de la facture énergétique pour chaque année d'opération du système de chauffage. La facture énergétique pour une année donnée est déterminée comme suit :

$$P_{h,b}^t = \left(\frac{BEU_b^t}{\eta_h} \right) \times p_f^1 \times (1 + \sigma_f)^t \quad (3.3)$$

Avec :

- BEU_b^t , le besoin d'énergie utile pour le chauffage annuel du logement-type b .

- η_h , le rendement énergétique du système de chauffage h .
- p_f^1 , le prix l'énergie f pour l'année de référence.
- σ_f , le taux de variation annuel du prix du vecteur énergétique f .

Dans un premier temps, étant donné l'absence de visibilité sur la variation des prix de l'énergie dans les décennies à venir, on supposera ces derniers constants sur la période (anticipation myope). On aura donc $\sigma_f = 0$.

3.2.2- Construction et utilisation des matrices de coûts d'isolation

Afin de limiter le nombre de combinaisons d'opérations d'isolation à étudier dans l'analyse des mesures de rénovations énergétiques coût-efficaces, des matrices de coûts minimums d'isolation seront utilisées. Elles fournissent, pour chacun des appartements et des maisons types, des coûts d'isolation, exprimés en euros par m^2 , correspondants à différentes performances de l'enveloppe du bâti. Ces niveaux d'isolation sont exprimés en besoin d'énergie utile pour le chauffage par m^2 .

Ces matrices ont été construites sur la base des différentes mesures d'isolation considérées dans le chapitre précédent et présentées en Annexe 2.1. Dix cibles de performance énergétique de l'enveloppe ont d'abord été déterminées. Elles s'échelonnent de 165 à 45 kWh/(m^2 .an) pour les maisons et de 145 à 25 kWh/(m^2 .an) pour les appartements. Puis, à l'aide d'un algorithme, les combinaisons d'opérations permettant d'atteindre ces différents niveaux d'isolation à moindre coût sont identifiées et les coûts minimums associés sont établis. Les matrices de coûts obtenues en suivant cette procédure sont présentées en Tableau 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1- Matrice de coûts d'isolation des logements individuels en fonction de la date de construction

	Besoin d'énergie utile pour le chauffage en kWh/(m^2 .an)									
	165	150	110	100	90	80	70	60	50	45
MI < 67	10	67	90	143	147	236	297	338	442	543
MI 68-74	-	-	70	128	131	215	275	322	442	543
MI 74-81	-	-	-	48	75	137	236	322	442	543
MI 82-89	-	-	-	-	72	81	178	271	442	543
MI 90-2000	-	-	-	-	-	-	73	204	442	540
MI 2001-05	-	-	-	-	-	-	-	168	372	473
MI 2006-2013	-	-	-	-	-	-	-	-	372	420

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts

Tableau 3.2- Matrice de coûts d'isolation des logements collectifs en fonction de la date de construction

	Besoin d'énergie utile pour le chauffage en kWh/(m ² .an)									
	135	105	90	80	70	60	50	45	35	30
LC <48	38	47	68	86	166	168	186	191	216	301
LC 48-74	38	47	68	86	153	167	185	191	216	301
LC 75-81	-	-	-	-	-	71	123	148	204	301
LC 82-89	-	-	-	-	-	-	-	87	202	301
LC 90-2000	-	-	-	-	-	-	-	71	133	291
LC 2001-2005	-	-	-	-	-	-	-	-	133	281
LC 2006-2013	-	-	-	-	-	-	-	-	133	281

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts

Pour chacun des logements-types, ces matrices fournissent donc un coût d'atteinte de chacun des niveaux de performance supérieur à leur état initial. On observe que ces matrices de coûts minimums concordent en tout point avec les résultats du chapitre précédent. On retrouve des coûts d'isolation qui augmentent dans des proportions d'autant plus importantes que le niveau de performance visé est ambitieux.

Par ailleurs, il peut paraître surprenant de retrouver des coûts d'isolation similaires, notamment dans le cas des travaux d'isolation les plus poussés, pour des logements construits à des périodes distinctes. Cela s'explique par le fait que l'atteinte de certains niveaux de performance peut impliquer le remplacement des mêmes composants de l'enveloppe de différents logements-types. Ainsi, si deux logements partent d'un état initial différent, le fait de mettre en œuvre des travaux similaires aboutit à l'obtention d'un même coût d'atteinte.

Ces coûts seront mobilisés dans la suite de ce chapitre dans le calcul du CGC. $E_{b,k}$ correspond donc aux coûts d'isolation permettant au logement-type b d'atteindre de niveau de performance k . Enfin, il convient de noter que les différents coûts de rénovation par mètre carré présentés dans les matrices sont très comparables à ceux déterminés dans d'autres études sur le sujet (Sidler, 2012 ; Branger, 2011).

3.2.3- Hypothèses de modélisation

En vue de calculer les CGC associés aux différents choix de systèmes énergétiques et d'isolation, un certain nombre de choix doivent être effectués quant aux valeurs à utiliser. Le coût d'investissement et le rendement énergétique associé à chaque technologie de chauffage, le contenu carbone des sources d'énergie mobilisées et le taux d'actualisation utilisé dans le second chapitre sont repris ici afin de s'inscrire dans la continuité des travaux précédents (Tableau 2.4 et 2.8). Les prix de référence des différentes sources d'énergie seront

définis à partir des prix constatés en France au 1^{er} janvier 2018, présentés en Tableau 3.3 Le choix de ces valeurs n'étant pas sans incidence sur les résultats de l'analyse, des taux de variations des prix de l'énergie et des taux d'actualisation alternatifs seront testés en fin de chapitre dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

Tableau 3.3- Prix de l'énergie utilisée dans l'analyse (en ct d'euros/kWh)³⁹

Type de chauffage	Logement individuel		Logement collectif	
	Individuel	Individuel	Individuel	Collectif
Electricité	15,9	15,9	15,9	15,9
Gaz	7,3	7,3	7,3	6,4
Fioul domestique	8,8	8,8	8,8	8,1
Bois	4,4	-	-	-
Bois à granulés	5,7	-	-	5,6

Source : calculs de l'auteur à partir des données Pégase sur le prix de l'énergie au 1^{er} janvier 2018

3.3) Changements de systèmes de chauffage coût-efficace et émissions de CO₂

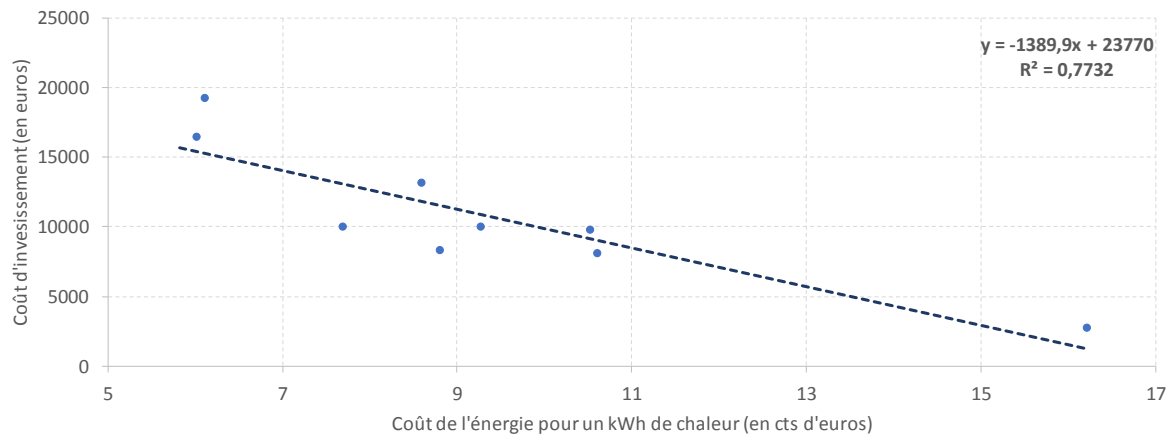
3.3.1- La compétitivité des systèmes de chauffage : une résultante de l'interaction entre structure des coûts et besoin de chauffage des logements

Cette section vise à examiner les déterminants de la compétitivité relative des systèmes de chauffage⁴⁰ en fonction de la consommation de chaleur des logements. Les technologies de chauffage étudiées sont caractérisées par des structures de coûts très variées. Celles-ci se distinguent par le poids relatif de l'investissement initial par rapport au coût d'utilisation, pour un besoin de chauffage donné. Aux deux extrêmes, certains systèmes se démarquent par un coût d'investissement élevé et un coût d'usage faible quand d'autres sont associés à un faible coût d'équipement et des factures énergétiques importantes. Ainsi, on remarque que le coût d'investissement est inversement proportionnel au coût de l'énergie nécessaire pour produire un kWh de chaleur (Figure 3.1).

³⁹ Ce tableau fournit le prix de chaque source d'énergie. Les poêles à bois fonctionnant avec des convecteurs électriques en appoint, le prix moyen de l'énergie pour ce système de chauffage correspondra à la moyenne pondérée entre le prix du bois bûche et de l'électricité.

⁴⁰ La compétitivité étant ici entendue comme le positionnement en termes de coût global de chauffage d'une technologie de production de chaleur par rapport aux autres.

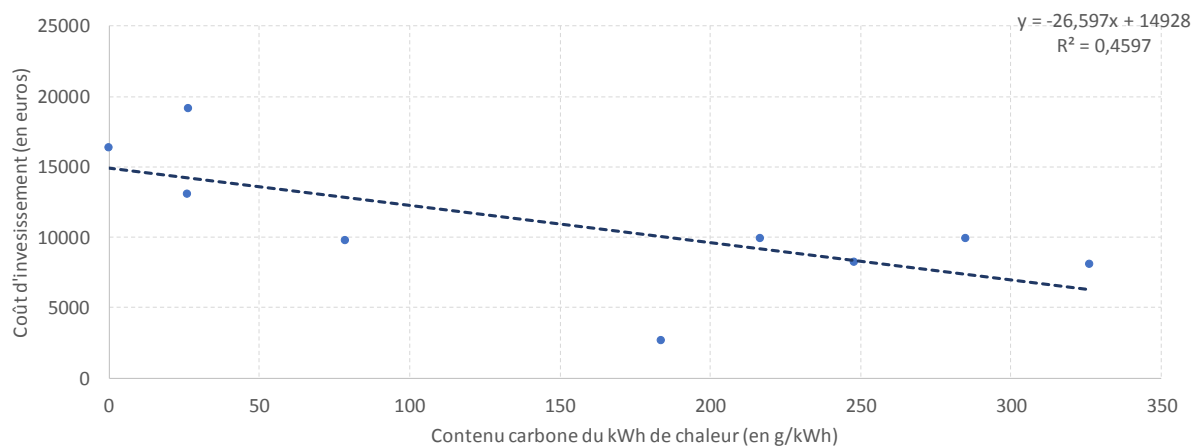
Figure 3.1- Coût de l'énergie et coût d'investissement des systèmes de chauffage⁴¹



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Les systèmes dont le coût d'investissement est élevé sont généralement caractérisés par un contenu carbone moins important et un meilleur rendement énergétique global que les technologies dont le coût d'acquisition est faible (Figure 3.2 et Figure 3.3).

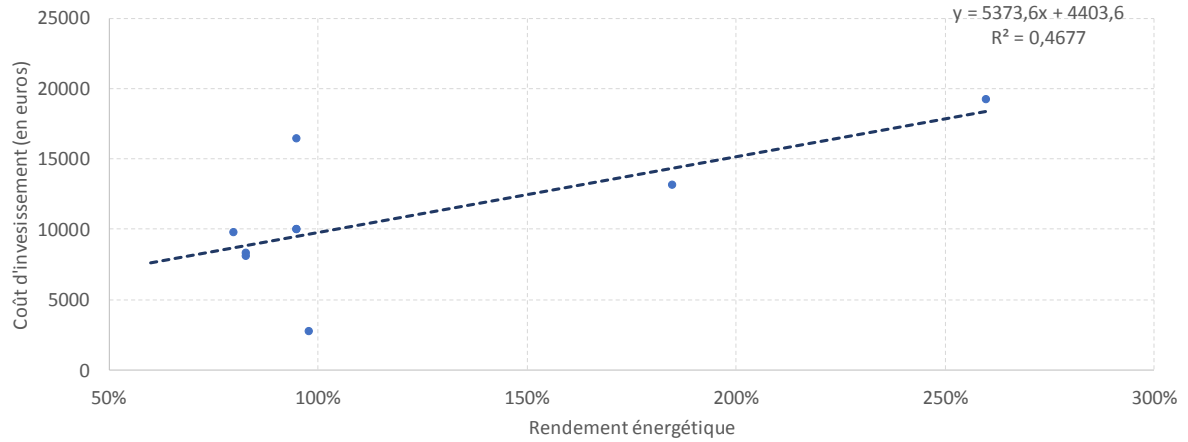
Figure 3.2- Relation entre contenu carbone du kWh de chaleur et coût d'investissement des systèmes de chauffage



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

⁴¹ Le coût d'investissement est déterminé ici pour un BEU de 9 000 kWh/(m².an).

Figure 3.3- Relation entre rendement énergétique et coût d'investissement des systèmes de chauffage



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Logiquement, ces différentes structures de coûts devraient se révéler plus ou moins pertinentes en fonction du besoin annuel de chaleur dans la mesure où plus celui-ci sera important, plus le poids relatif de la facture énergétique dans le CGC sera élevé.

La relation entre structure des coûts des systèmes, besoin annuel de chauffage et compétitivité des technologies de chauffage peut être aisément démontrée. Soit deux technologies-types : le système noté f , caractérisé par un coût d'investissement faible et un coût d'usage élevé, et un système noté r , doté d'un coût d'équipement important et d'un coût d'exploitation modeste. On suppose que le prix des énergies est constant sur la période. Par hypothèse, on a donc d'une part :

$$I_f + \frac{I_f}{(1+r)^{n/2}} < I_r + \frac{I_r}{(1+r)^{n/2}} \quad (3.4)$$

Et d'autre part :

$$\left(\frac{BEU}{\eta_f}\right) \sum_{t=1}^n \frac{p_f}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_f}{(1+r)^t} > \left(\frac{BEU}{\eta_r}\right) \sum_{t=1}^n \frac{p_r}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_r}{(1+r)^t} \quad (3.5)$$

Par commodité, on supposera que les coûts d'entretien et de maintenance de ces deux systèmes de chauffage sont similaires. Il suit que la technologie intensive en capital est plus rentable que la technologie alternative si :

$$CGC_f > CGC_r \quad (3.6)$$

D'où :

$$I_f + \frac{I_f}{(1+r)^{n/2}} + \left(\frac{BEU}{\eta_f}\right) \sum_{t=1}^n \frac{p_f}{(1+r)^t} > I_r + \frac{I_r}{(1+r)^{n/2}} + \left(\frac{BEU}{\eta_r}\right) \sum_{t=1}^n \frac{p_r}{(1+r)^t} \quad (3.7)$$

Ce qui implique :

$$BEU > \frac{I_f + \frac{I_f}{(1+r)^{n/2}} - I_r + \frac{I_r}{(1+r)^{n/2}}}{\frac{1}{\eta_r} \sum_{t=1}^n \frac{p_r}{(1+r)^t} - \frac{1}{\eta_f} \sum_{t=1}^n \frac{p_f}{(1+r)^t}} \quad (3.8)$$

Il en résulte qu'à partir d'un certain niveau de consommation annuelle de chaleur, la technologie la plus coûteuse à l'investissement devient l'option la plus rentable. Les technologies associant un coût d'investissement faible et un coût d'exploitation élevé se révèlent profitables pour de faibles niveaux de production, dans la mesure où le poids de la facture énergétique dans le CGC demeure réduit malgré un coût du kWh d'énergie final élevé. A l'inverse, plus le niveau de production de chaleur est important, plus les systèmes de chauffage coûteux à l'acquisition mais dotés d'un coût de l'énergie faible se révèlent être performants en termes de CGC, puisque l'investissement initial est amorti sur un volume de production important.

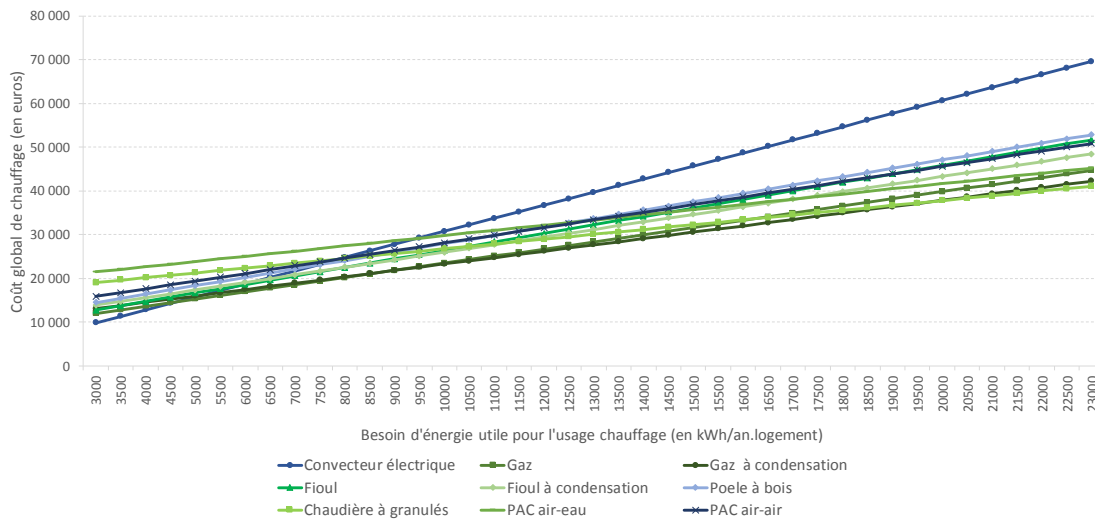
De plus, le besoin de chauffage annuel à partir duquel la technologie r permet de minimiser le CGC est d'autant plus faible que :

- La différence de coût d'achat et de renouvellement du système est faible.
- L'écart de prix entre la source d'énergie utilisée par les technologies r et f est important.
- Le rendement énergétique du système r est élevé et celui du système f est faible.

Cette relation entre compétitivité des systèmes de chauffage et BEU du logement peut être vérifiée en examinant le CGC des technologies de chauffage en fonction de la consommation annuelle de chaleur (Figure 3.4). Cette représentation des CGC associés à chaque système de chauffage permet de visualiser l'évolution de la compétitivité relative des différentes options de chauffage et d'identifier les technologies coûts-efficaces⁴² en fonction de la production annuelle de chaleur.

⁴² On désignera ici comme « technologie coût-efficace », l'option de chauffage permettant, pour un niveau de production donné, d'obtenir le CGC le plus faible parmi les technologies étudiées.

Figure 3.4- Coût global de chauffage des systèmes en fonction du besoin d'énergie utile pour les technologies de production de chaleur individuelles^{43,44}



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

On peut noter que les écarts de CGC entre technologies sont nettement plus marqués lorsque le BEU est faible ou important que dans le cas de consommations de chauffage moyennes⁴⁵. De même, il apparaît que la compétitivité des systèmes de chauffage décentralisés se dégrade fortement par rapport aux technologies centralisées lorsque le besoin de chaleur est important.

Graphiquement, on observe que les droites de coûts des technologies coûts-efficaces, sur un intervalle de BEU donné, ont des coefficients directeurs d'autant plus réduits que la consommation de chaleur est grande.

Les pentes de ces droites correspondent au coût marginal de production de chauffage, c'est-à-dire à l'augmentation du coût global engendré par la fourniture d'un kWh de chaleur annuel additionnel. Ce coût marginal résulte de l'addition de deux composantes :

- Le coût de l'énergie supplémentaire nécessaire à la fourniture d'un kWh de chaleur annuel additionnel, dépendant du prix de l'énergie et du rendement du système de chauffage.
- Le coût d'investissement additionnel associé à l'augmentation de la puissance de l'installation.

⁴³ Les systèmes de chauffage centralisé et décentralisé sont respectivement représentés en vert et en bleu.

⁴⁴ Un graphique similaire pour les systèmes de chauffage collectifs est présenté en Annexe 3.1.

⁴⁵ Entre 7 000 et 11 000 kWh/an par exemple.

Le coût marginal du BEU peut donc s'exprimer ainsi :

$$Cm_h = a_h + \frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_e^t}{(1+r)^t} \quad (3.9)$$

Avec Cm_h , le coût marginal du BEU de la technologie de chauffage h et a_h le coût fixe d'investissement associé à ce système de production de chaleur. Il convient de noter que cette seconde composante est relativement négligeable en termes d'impact sur le coût marginal comparativement à la première (Tableau 3.4).

Tableau 3.4- Prix d'un kWh de chaleur et coût marginal de production de chaleur par système de chauffage (en euros)

	Prix d'un kWh de chaleur ($\frac{p_e}{\eta_h}$)	Prix d'un kWh de chaleur additionnel sur la période ($\frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_e^t}{(1+r)^t}$)	Coût marginal de production ($a_h + \frac{a_h^t}{(1+r)^t} + \frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_e^t}{(1+r)^t}$)
Convecteur électrique	0,16	2,78	2,99
Gaz	0,09	1,51	1,64
Gaz à condensation	0,08	1,32	1,46
Fioul	0,11	1,82	1,95
Fioul à condensation	0,09	1,59	1,73
Poêle à bois	0,11	1,81	1,92
Chaudière à granulés	0,06	1,03	1,10
PAC air-eau	0,06	1,05	1,19
PAC air-air	0,09	1,47	1,75

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

La représentation graphique des CGC illustre bien le fait que la compétitivité des technologies dotées d'un coût d'investissement important et d'un coût marginal de production réduit tend à s'améliorer à mesure que le BEU annuel s'élève.

On retrouve ce principe en examinant les différentes technologies coût-efficaces en fonction du BEU. Dans le cas des systèmes de chauffage centralisés, trois technologies, peuvent permettre de minimiser le CGC :

- Les chaudières à gaz en dessous de 11 500 kWh/an
- Les chaudières gaz à condensation entre 11 500 et 17 500 kWh/an
- Les chaudières bois à granulés au-dessus de 20 000 kWh/an

Similairement, trois options de chauffage décentralisées sont coût-efficaces en fonction du BEU :

- Les convecteurs électriques en dessous de 7 000 kWh/an
- Les poêles à bois entre 7 000 et 11 000 kWh/an
- Les pompes à chaleur air-air au-dessus de 11 000 kWh/an

Systématiquement, un changement de technologie coût-efficace s'accompagne bien d'une diminution du coût marginal de production. De même, on constate que les options de chauffage efficaces et/ou décarbonées ne peuvent émerger comme des solutions coûts-efficaces que lorsque la consommation de chauffage du logement est élevée.

3.3.2- Les systèmes de chauffage à haut rendement ou décarbonés : des options potentiellement coûts-efficaces dans les logements les plus anciens

La relation entre structure de coût de la technologie coût-efficace et consommation de chaleur étant établie, il reste à déterminer la manière dont celle-ci se traduit dans le cas des logements-types représentatifs du parc résidentiel français. Conformément à la méthodologie présentée dans le chapitre précédent, le BEU de chaque logement est estimé sur la base de variables se rapportant à deux attributs principaux de la bâtisse : le niveau d'isolation d'une part, les caractéristiques architecturales d'autre part (surface, hauteur sous plafond, etc.). Or, ces dernières ayant été fixées dans la définition des logements-types, seul le niveau d'isolation modifie le BEU au sein de chaque catégorie de logements. De plus, la possibilité d'améliorer les performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments n'étant pas considérée dans cette section, il en découle que les différences de BEU entre logements-types d'une même catégorie résultent uniquement du niveau d'isolation initial, fonction de la période de construction.

Si on se réfère au graphique précédent, déterminer les CGC liés à l'usage des technologies de chauffage dans les différentes maisons-types, revient à fixer sur l'axe des abscisses leur BEU annuel d'en déduire le CGC associés. Le CGC associé aux différentes options de chauffage et leur classement relatif en termes de compétitivité par logement-type sont présentés en Tableau 3.5 et 3.6.

Tableau 3.5- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage par maison-type⁴⁶

	MI < 67	MI 68-74	MI 74-81	MI 82-89	MI 90-2000	MI 2001-05	MI 2006-2013
BEU annuel (en kWh/(m ² .an))	20 039	16 782	12 756	11 059	9 496	7 996	6 947
Systèmes décentralisés							
Convecteur électrique	60 781	51 039	39 001	33 926	29 251	24 767	21 629
Poêle à bois	47 189	40 944	33 226	29 973	26 975	24 101	22 089
PAC air-air	45 699	39 998	32 952	29 982	27 246	24 622	22 786
Systèmes centralisés							
Gaz	39 892	34 566	27 983	25 209	22 652	20 201	18 485
Gaz à condensation	37 932	33 183	27 313	24 839	22 560	20 374	18 844
Fioul	46 038	39 696	31 859	28 555	25 511	22 592	20 549
Fioul à condensation	43 362	37 730	30 769	27 836	25 133	22 540	20 726
Chaudière à granulés	37 841	34 251	29 815	27 945	26 222	24 570	23 413
PAC air-eau	41 718	37 851	33 073	31 058	29 203	27 423	26 177

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 3.6- Classement des technologies de chauffage par ordre de compétitivité pour les maisons-types⁴

	Systèmes décentralisés			Systèmes centralisés					
	Convecteur électrique	Poêle à bois	PAC air-air	Gaz	Gaz à condensation	Fioul	Fioul à condensation	Chaudière à granulés	PAC air-eau
MI < 67	3	2	1	3	2	6	5	1	4
MI 68-74	3	2	1	3	1	6	4	2	5
MI 74-81	3	2	1	2	1	5	4	3	6
MI 82-89	3	1	2	2	1	5	3	4	6
MI 90-2000	3	1	2	2	1	4	3	5	6
MI 2001-05	3	1	2	1	2	4	3	5	6
MI 2006-2013	1	2	3	1	2	3	4	5	6

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

⁴⁶ Les résultats pour les technologies de chauffage individuelles et collectives utilisées en appartements sont présentés en Annexe 3.2.

On observe que pour deux logements individuels aux caractéristiques architecturales similaires, le CGC peut s'échelonner d'environ 20 000 à 55 000 euros, en fonction des performances initiales de l'isolation et de son adéquation avec la technologie de chauffage adoptée. Découlant de ces calculs de CGC et présenté en Tableau 3.7, le classement des options de chauffage permet d'identifier le système de production de chaleur coût-efficace pour chaque maison-type.

Suivant ce classement, dans des logements individuels dépourvus de systèmes de distribution de la chaleur, l'adoption des technologies coût-efficaces conduirait à l'utilisation :

- De convecteurs électriques dans les maisons construites après 2006
- D'un poêle à bois dans les maisons bâties entre 1982 et 2006
- De pompes à chaleur air-air dans les maisons construites antérieurement

En cas de recours à des technologies de chauffage centralisées, la minimisation du CGC amènerait à l'adoption :

- D'une chaudière à gaz pour les maisons datant d'après 2000
- D'une chaudière gaz à condensation pour les maisons construites entre 1968 et 2000
- D'une chaudière à pellets pour les maisons plus anciennes

Si la performance générale des technologies en fonction de la période de construction est robuste, les résultats quant à la détermination des systèmes coûts-efficaces sont nécessairement à considérer avec prudence, notamment dans le cadre des arbitrages entre technologies dotées de structures de coût proches, et ce, à plusieurs titres. Tout d'abord, ils reposent évidemment sur les hypothèses formulées entre autres sur le taux d'actualisation et l'évolution des prix des énergies⁴⁷. De plus, il apparaît que dans certains cas, à l'instar des performances des chaudières gaz à condensation et bois à granulés dans les maisons les plus anciennes, les différences de CGC entre les deux technologies les plus performantes sont parfois inférieures à 1 %. Or ces écarts relativement négligeables pourront avoir des incidences très significatives en termes de réduction d'émissions de CO₂. Enfin, réserves fatalement inhérentes à une approche reposant sur des bâtiments représentatifs, la « moyennisation », en matière de caractéristiques architecturales par exemple, ne permet pas d'appréhender complètement la diversité du parc résidentiel. La Figure 3.4 permet à ce titre de nuancer l'approche mécanique liée à la définition des logements types, en établissant les fourchettes de BEU annuel favorables aux différents systèmes de chauffage, ceux-ci pouvant par exemple varier en fonction de la surface du logement pour un niveau d'isolation donné.

⁴⁷ L'impact de ces variables sera par ailleurs étudié en section 5 dans le cadre de l'analyse de sensibilité.

3.3.3- Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces

Ces réserves prises en compte, il n'en demeure pas moins instructif de s'intéresser aux conséquences qu'aurait l'adoption dans chaque logements-types de la technologie de chauffage coût-efficace, aussi bien en termes de réduction du CGC au sein des différentes composantes du parc résidentiel qu'au niveau de l'évolution des émissions de CO₂.

Tableau 3.7 Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces⁴⁸

		Initial (en milliards d'euros)	Système de chauffage coût-efficace (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	390	316	-19 %
	>1974	224	195	-13 %
	Totale	614	511	-17 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	104	95	-8 %
	>1974	34	32	-6 %
	Totale	138	127	-8 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	71	65	-9 %
	>1974	22	20	-9 %
	Totale	93	85	-9 %
Total		845	723	-14 %

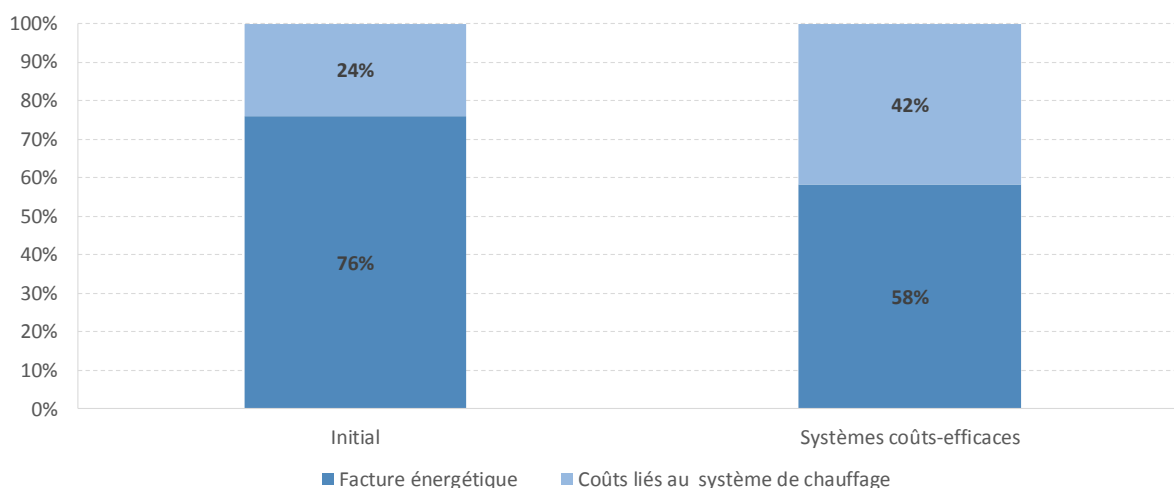
Source : calculs de l'auteur à partir des données de prix de l'énergie et des rendements énergétiques

En accordant à chaque logement-type le facteur de pondération lié à sa représentativité au sein du parc résidentiel, on peut appréhender ces implications à différents niveaux d'agrégation. Le Tableau 3.7 présente l'évolution du CGC pour chaque type et catégorie de logements. Au niveau de la totalité du parc, l'adoption systématique des technologies coûts-efficaces mènerait ainsi à une réduction de 14 % du CGC. Si cette réduction est relativement modeste en pourcentage, elle représente tout de même une économie d'environ 120 milliards d'euros. En décomposant le CGC total du parc résidentiel dans les deux cas, et en distinguant les coûts associés aux systèmes de chauffage (investissement, renouvellement, entretien et maintenance) des factures d'énergie, on constate que l'adoption généralisée des technologies coûts-efficaces débouche sur la diminution du poids relatif du coût de l'énergie dans le CGC (Figure 3.5). Ainsi, en moyenne, l'adoption des technologies

⁴⁸ Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements types est disponible en Annexe 3.3.

minimisant le CGC aboutit à une augmentation des frais d'acquisition et d'entretien des systèmes et à une réduction des factures d'énergie.

Figure 3.5- Coût global de chauffage des systèmes en fonction du besoin d'énergie utile pour les technologies de production de chaleur individuelles



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

A l'échelle des logements-types, on observe des diminutions de CGC comprises dans un intervalle allant de -5 % à -20 %. Ces écarts s'expliquent par deux facteurs. Le premier réside simplement sur la nature des technologies de chauffage équipant initialement les logements. Plus une part importante de ces systèmes de chauffage aura une structure de coût proche de la technologie coût-efficace, moins la réduction de CGC sera significative. Le second, déjà relevé précédemment à l'échelle d'un logement, repose sur l'existence d'écarts de performance entre technologies plus marquées pour les niveaux de consommation faibles et importants. On retrouve, par exemple, un pourcentage de réduction de CGC important pour les maisons les plus anciennes, caractérisées par d'importants besoins de chauffage et pour lesquels l'adoption d'un système associé à un faible coût de l'énergie permet des économies substantielles.

Si les variations de CGC demeurent tout de même relativement limitées, on observe à l'inverse de fortes disparités en termes d'évolution des émissions de CO₂ dans les différents logements-types (Tableau 3.8). Contrairement au CGC qui diminue par définition lors de l'adoption des technologies coût-efficaces, les changements de systèmes de chauffage simulés peuvent mener à une hausse ou à une baisse des émissions d'un segment du parc donné en fonction du « mix de technologies » initialement utilisé et des technologies coûts-efficaces de remplacement.

Tableau 3.8- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces⁴⁹

		Initial (en Mt de CO ₂)	Système de chauffage coût-efficace (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	41	4	-89 %
	>1974	19	13	-29 %
	Totale	60	18	-71 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	8	5	-41 %
	>1974	2	2	-6 %
	Totale	10	7	-34 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	9	7	-20 %
	>1974	2	2	-1 %
	Totale	10	9	-17 %
Total		80	33	-59 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de prix de l'énergie et des rendements énergétiques

Au niveau global, la simulation aboutit à un potentiel de réduction d'émissions de 59 %. Celui-ci résulte d'importantes réductions au sein des logements individuels (71 %), d'une baisse modérée dans les appartements dotés de chauffage individuel (34 %) et d'une réduction plus modeste dans les immeubles recourant au chauffage collectif (17 %).

Comme précédemment, ces résultats doivent être considérés avec prudence. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne l'évolution des émissions de CO₂ à l'échelle du parc entier et au niveau des logements individuels. En effet, il ressort qu'une large partie des abattements d'émissions est opérée dans les maisons datant d'avant 1967 (-37 Mt CO₂) du fait de l'adoption des chaudières bois à granulés dont le contenu carbone est, dans le cadre de nos hypothèses, considéré comme nul. Outre les réserves déjà soulevées sur l'utilisation des bâtiments-types, il apparaît que la différence de CGC entre les chaudières bois à granulés et gaz à condensation pour ce segment du parc est négligeable (inférieure à 1 %). Or, du fait du poids dans les émissions initiales de cette catégorie de logements dans le total du parc résidentiel (environ 43 %), il s'avère que la nature de la technologie coût-efficace dans les maisons les plus anciennes influe fortement sur la variation des émissions de CO₂ au niveau agrégé. Ainsi, il ressort que dans un scénario dans lequel les chaudières gaz à condensation permettraient de minimiser le CGC de cette catégorie de logement, on aboutirait à une

⁴⁹ Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements types est disponible en Annexe 3.3.

réduction de 33 % des émissions au niveau des logements individuels et de 31 % au niveau du parc résidentiel dans son intégralité.

Similairement, compte tenu à la fois de la part prépondérante des logements anciens dans le total des différents types de logements, et de leur forte consommation de chauffage, l'évolution des émissions de ces catégories est aussi déterminante dans les résultats agrégés au niveau des logements collectifs. A l'inverse, la baisse des émissions dans les immeubles chauffés par systèmes collectifs est tirée par les bâtiments les plus anciens auxquels sont associées des chaudières gaz à condensation.

3.4) Mesures d'isolation coûts-efficace et émissions de CO₂

La section 3.3 s'est attachée à analyser la relation entre le BEU d'un logement et à déterminer, à performance d'isolation constante, les technologies de chauffage coût-efficaces ainsi que les implications de l'adoption de celles-ci au niveau du parc résidentiel en termes de CGC et d'évolution des émissions de CO₂. Cette section propose de renverser la perspective en s'intéressant dans un premier temps à la relation entre Cm de production d'un kWh de chaleur et niveau d'isolation optimal, puis en déterminant, à parc de chaudière constant, les conséquences de la mise en œuvre des travaux de rénovations coût-efficaces au niveau des différents bâtiments-types puis à l'échelle du parc de logements français.

3.4.1- Coût d'isolation, coût marginal de production et ampleur des travaux de rénovation coûts-efficaces

Contrairement aux mesures consistant à remplacer un système de chauffage par un autre, l'amélioration de l'enveloppe thermique d'un logement peut être plus ou moins poussée. Ainsi, en suivant le cadre de modélisation présenté en chapitre II, les diverses combinaisons d'actions sur les différents composants de l'enveloppe peuvent permettre d'atteindre une grande variété de performances globales. Partant de ce constat, il convient de s'interroger sur le niveau coût-efficace d'isolation des différentes catégories de logements et des potentiels facteurs pouvant l'influencer.

Formellement, le CGC d'un logement recourant à des travaux d'isolation peut s'écrire :

$$CGC_{b,h}^k = (a_h \times BEU_{b,k} + b) + R_{b,k} + \frac{(a_h \times BEU_{b,k} + b)}{(1+r)^{n/2}} + \left(\frac{BEU_{b,k}}{\eta_h} \right) \sum_{t=1}^n \frac{p_f^1 \times (1+\sigma_f)^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{O\&M_h^t}{(1+r)^t} \quad (3.10)$$

Avec :

- $CGC_{b,h}^k$: le coût global de chauffage pour le bâtiment-type b doté du système de chauffage h et ayant bénéficié l'opération d'isolation k .
- $BEU_{b,k}$: le BEU annuel du logement-type b ayant eu recours à l'opération d'isolation k .

- $R_{b,k}$: le coût de l'opération d'isolation k pour le logement-type b .

Si l'opération d'isolation k est la seule option disponible, il est profitable de mener ces travaux si :

$$CGC_{b,h}^k < CGC_{b,h}^{ini} \quad (3.11)$$

Avec, $CGC_{b,h}^{ini}$, le CGC du logement b doté du système de chauffage h et ne procédant à aucune opération d'isolation.

D'où :

$$R_{b,k} < (BEU_{b,ini} - BEU_{b,k}) \times \left(a_h \times \frac{(1+r)^{\frac{n}{2}+1}}{(1+r)^{\frac{n}{2}}} + \frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_f^1 \times (1+\sigma_f)^t}{(1+r)^t} \right) \quad (3.12)$$

Avec $BEU_{b,ini}$, le besoin d'énergie utile annuel initial du logement-type b .

Fort logiquement, les travaux d'isolation sont avantageux si le coût de l'opération est plus faible que les gains liés à l'achat et au renouvellement d'un système de chauffage moins puissant et à la réduction des factures énergétiques actualisées sur la période d'étude. Ainsi, pour un coût donné de l'opération d'isolation, celle-ci a d'autant plus de chance d'être rentable que :

- La réduction du besoin de chauffage résultant de l'amélioration de l'enveloppe thermique est importante.
- Le coût marginal de production d'un kWh de chaleur sur la période est élevé, ce dernier dépendant de la part variable du coût d'investissement dans le système de chauffage, de son rendement énergétique et du prix du vecteur énergétique mobilisé.

Similairement, soient deux opérations d'isolation k et k' telle que $BEU_{b,k} > BEU_{b,k'}$ et $R_{b,k'} < R_{b,k}$. Les travaux d'isolation les plus ambitieux (ici k'), seront coûts-efficaces si :

$$CGC_{b,h}^{k'} < CGC_{b,h}^k \quad (3.13)$$

Donc si :

$$R_{b,k'} - R_{b,k} < (BEU_{b,k} - BEU_{b,k'}) \times \left(a_h \times \frac{(1+r)^{\frac{n}{2}+1}}{(1+r)^{\frac{n}{2}}} + \frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_f^1 \times (1+\sigma_f)^t}{(1+r)^t} \right) \quad (3.14)$$

Ou encore si :

$$\frac{R_{b,k'} - R_{b,k}}{BEU_{b,k} - BEU_{b,k'}} < Cmp_h \quad (3.15)$$

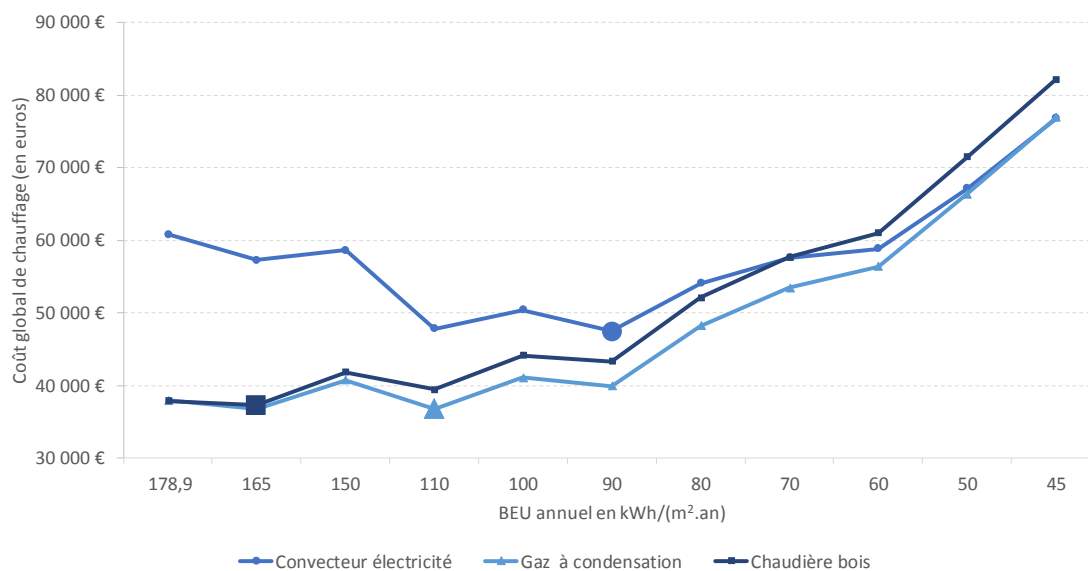
Avec Cmp_h , le coût marginal de production d'un kWh de chaleur sur la période, associé au système de chauffage h .

Les travaux de plus large ampleur seront donc rentables si le coût marginal de réduction d'un kWh de chaleur associé à ces travaux est inférieur au coût marginal de production d'un kWh.

Ainsi, il en ressort que la nature coût-efficace d'une combinaison de mesures d'isolation dépend d'une part de son efficacité propre, mesurée par le coût d'investissement rapporté à la réduction de BEU induite, et d'autre part, du système de chauffage équipant le logement.

Dans ce chapitre, les travaux d'isolation ont déjà été partiellement sélectionnés en fonction de leur efficacité dans la mesure où les matrices de coûts minimums d'isolation, présentées en section 3.2, ont été construites en déterminant les combinaisons de mesures minimisant le coût d'atteinte des différentes cibles d'efficacité énergétique. Partant de ces matrices, il est possible d'examiner cette relation entre ampleur des travaux d'isolation coûts-efficaces et coût marginal de production du kWh en calculant le CGC associé à l'utilisation des diverses technologies de chauffage au sein de différents logements-types.

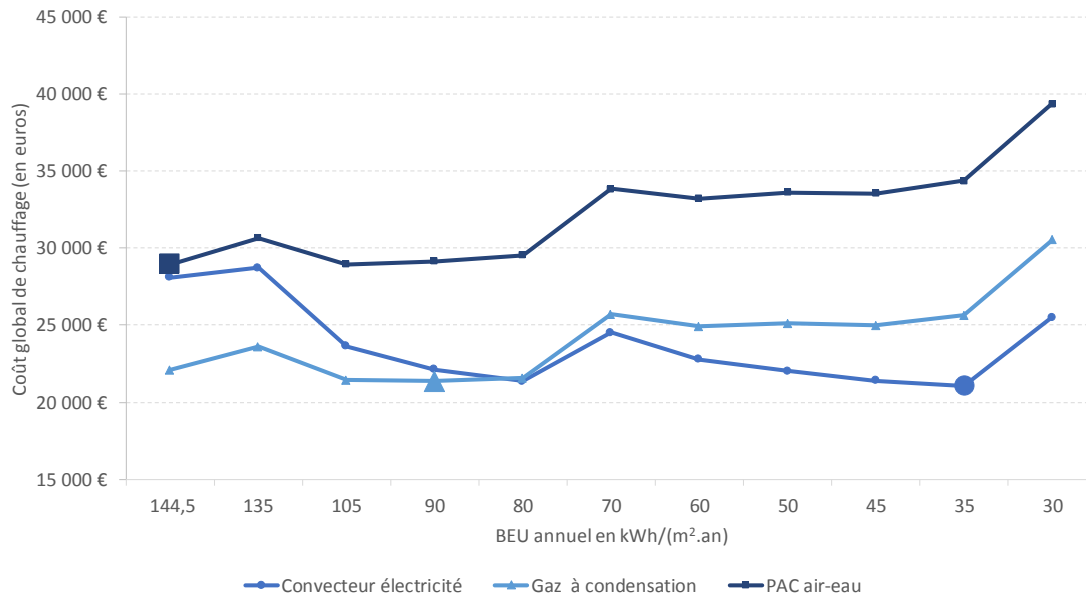
Figure 3.6- CGC associé à une maison construite avant 1967 pour trois systèmes de chauffage en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation⁵⁰



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

⁵⁰ Les marqueurs élargis correspondent au point minimum de chaque courbe.

Figure 3.7- CGC associé à un appartement-type construit avant 1967 pour trois systèmes de chauffage individuel en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation¹⁴

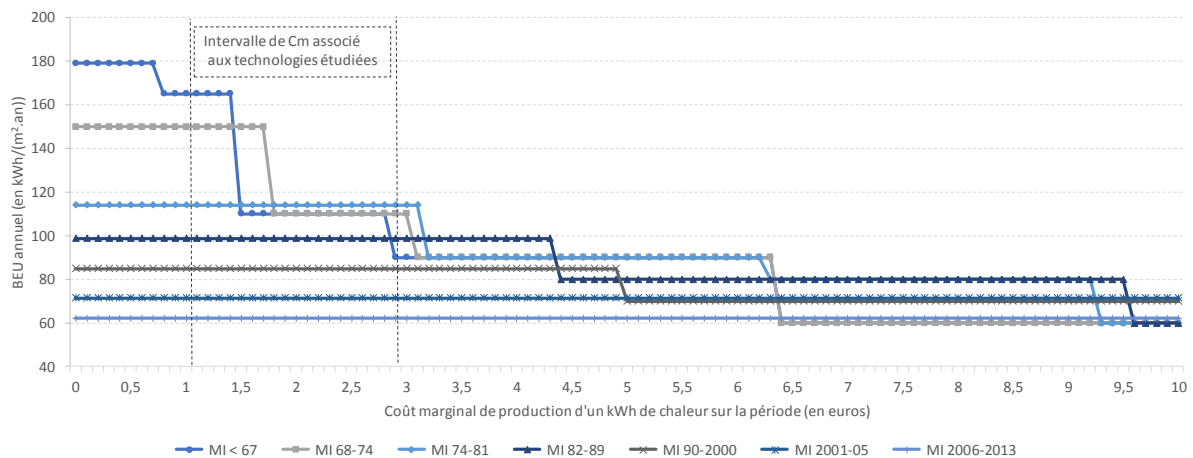


Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Les figures 3.6 et 3.7 représentent le CGC de trois systèmes de chauffage en fonction des travaux de rénovation entrepris dans les logements individuels et collectifs les plus anciens. Les systèmes ont été sélectionnés afin d'obtenir une représentation du CGC de technologies ayant un coût marginal de production élevé (convecteur électrique), moyen (chaudière gaz à condensation) et faible (chaudière à granulés et pompe à chaleur air eau). On retrouve graphiquement la relation établie analytiquement : plus le coût marginal de production est élevé, plus le niveau d'isolation coût-efficace est important. Pour une même maison-type, la minimisation du CGC débouche ainsi sur la mise en œuvre de travaux d'ampleurs diverses en fonction de la technologie de chauffage utilisée. Le BEU résultant de ces travaux est ainsi de 165 kWh/(m².an) pour la maison-type équipée d'une chaudière à granulés, de 110 kWh/(m².an) en cas d'utilisation d'une chaudière gaz à condensation et de 90 kWh/(m².an) lorsque le logement est équipé de convecteurs électriques. En raison de coûts d'isolation inférieurs, la différenciation de l'ampleur des travaux en fonction des systèmes de chauffage est encore plus marquée. Il devient profitable de considérablement renforcer l'enveloppe thermique de l'appartement-type lorsque celui-ci est équipé de convecteurs électrique, l'isolation optimale (35 kWh/(m².an)) dans ce cas dépassant même les performances des logements les plus récents. Les travaux minimisant le CGC du même logement doté d'une chaudière gaz à condensation sont d'une envergure bien moindre puisqu'ils aboutissent à un BEU annuel de 90 kWh/(m².an) et à l'opposé, il apparaît qu'en cas de chauffage de l'habitation par une PAC air-eau, aucune modification de l'isolation ne s'avère rentable.

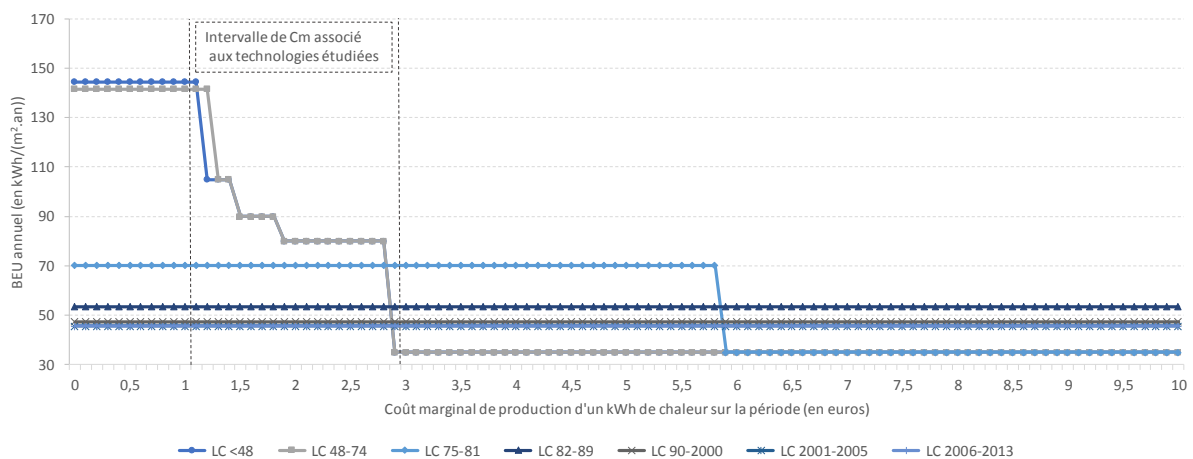
Par ailleurs, afin d'élargir à l'ensemble des systèmes existants ou encore en développement, il est possible d'établir pour chaque catégorie et type de logements la relation entre BEU optimal et coût marginal de production sans se référer à la technologie de chauffage utilisée. En utilisant l'équation (3.10), on peut calculer le CGC minimum de chacun des logements représentatifs en fonction du coût marginal de production d'un kWh de chaleur sur la période.

Figure 3.8- BEU résultant de la mise en œuvre de l'isolation coût-efficace en fonction du coût variable du kWh de chaleur pour les différentes catégories de maisons-types



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Figure 3.9- BEU résultant de la mise en œuvre de l'isolation coût-efficace en fonction du coût variable du kWh de chaleur pour les différentes catégories d'appartements-types



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Les figures 3.8 et 3.9 représentent ainsi le BEU annuel résultant de l'adoption du niveau d'isolation coût-efficace en fonction du coût marginal de production de la chaleur pour chaque logement-type. L'intervalle de valeur de coût marginal exploré est volontairement très large

afin d'appréhender les conséquences que pourrait avoir par exemple une forte hausse du prix des énergies sur l'isolation optimale. Cette dernière est donc déterminée pour un coût du kWh de chaleur allant jusqu'à 10 euros. Dans le cadre des hypothèses de modélisation utilisées et des technologies étudiées dans ce chapitre, les coûts marginaux de production s'échelonnent de 1.10 à 2.99 euros⁵¹ (Tableau 3.4).

Les deux graphiques illustrent parfaitement l'accroissement du niveau de performance de l'enveloppe minimisant le CGC à mesure que le coût marginal de production augmente. Les matrices de coût minimum d'isolation fixant un nombre limité de cibles de BEU atteignables par le biais des travaux d'isolation, les différentes courbes sont caractérisées par une évolution par paliers, correspondant aux changements de BEU résultant des opérations de rénovation coûts-efficaces. Les coûts marginaux auxquels surviennent ces changements diffèrent en fonction de la date de construction car les coûts d'atteinte et les économies d'énergie associés à un niveau de performance énergétique du bâti varient selon l'isolation initiale du logement.

Pour l'intervalle de coût marginal correspondant au cadre de ce chapitre, il apparaît qu'aucune opération d'isolation ne s'avère rentable pour tous les logements-types d'après 1974. Ainsi, quel que soit le système de chauffage les équipant, aucune modification de l'enveloppe ne permet de réduire le CGC. Pour les logements plus anciens en revanche, il ressort que des opérations de différentes ampleurs peuvent être profitables. On compte trois et cinq niveaux de performances coûts-efficaces, respectivement pour les maisons et les appartements, dans l'intervalle de coût marginal des technologies étudiées. Pour des coûts marginaux supérieurs ou très supérieurs, il est intéressant de noter que, dans le cas des logements collectifs, très peu de travaux de rénovation supplémentaires sont déclenchés, du fait notamment des performances énergétiques relativement élevées des appartements construits après 1982

3.4.2- Les travaux d'isolation : des mesures potentiellement rentables dans les logements anciens mais d'ampleurs variées en fonction des systèmes de chauffage installés

Les figures 3.8 et 3.9 renseignent les niveaux d'isolation optimaux dans l'intervalle de coût marginal correspondant aux technologies étudiées. Cette section vise à expliciter, pour chaque combinaison de logement-type et de système de chauffage utilisé, le BEU résultant de la mise en œuvre des travaux coûts-efficaces. Dans la mesure où il a été précédemment établi que les travaux d'isolation ne permettaient pas de réduire le CGC des logements-types bâtis après 1974, seuls les résultats concernant les logements plus anciens sont présentés ici.

⁵¹ Cet intervalle est délimité sur chacun des deux graphiques par la zone encadrée par deux droites en pointillés.

Tableau 3.9- Besoin d'énergie utile résultant de la minimisation du CGC par bâtiment type/système de chauffage installé (en kWh/(m².an))

	Logement individuel		Logement collectif Chauffage individuel		Logement collectif Chauffage collectif		Coût marginal de production d'un kWh sur la période (en euros)
	<67	68-74	<48	48-74	<48	48-74	
BEU initial	179	150	144	142	144	142	
Systèmes décentralisés							
Convecteur électrique	90	110	35	35	-	-	2,99
Poêle à bois	110	110	-	-	-	-	1,92
PAC air-air	110	150	90	90	-	-	1,75
Systèmes centralisés							
Gaz	110	150	90	90	90	90	1,64
Gaz à condensation	110	150	90	90	105	142	1,46
Fioul	110	110	80	80	90	90	1,95
Fioul à condensation	110	150	90	90	90	90	1,73
Chaudière à granulés	165	150	-	-	105	105	1,10
PAC air-eau	165	150	90	142	-	-	1,19

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Le Tableau 3.9 présente ainsi les BEU coûts-efficaces par type de logement et équipement de chauffage. Les niveaux d'isolation optimaux vont de 165 à 90 kWh/(m².an) pour les logements individuels, de 142 à 35 kWh/(m².an) pour les appartements chauffés en individuel et de 142 à 90 kWh/(m².an) pour ceux chauffés collectivement.

On retrouve pour chaque catégorie de logements des configurations dans lesquelles aucune mesure d'isolation n'est rentable. Celles-ci résultent systématiquement de l'utilisation de technologies de chauffage renouvelables, ces technologies assurant le coût marginal de production le plus faible du panel étudié. De surcroît, il convient de noter que ces configurations ne se présentent que pour les maisons-types de la période 1968-1974 et les appartements-types de la période 1948-1974. Même équipés de systèmes de chauffage renouvelable, il existe toujours des travaux de rénovation de faible ampleur rentables pour les logements représentatifs plus anciens, du fait de leur isolation initiale moins performante.

3.4.3- Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces

Le niveau d'isolation optimal de chaque segment du parc ayant été déterminé, on peut évaluer les implications qu'aurait la mise en œuvre systématique des travaux coûts-efficaces, à technologie de chauffage inchangée, en termes d'évolution du CGC et d'émissions de CO₂ au niveau du parc de logements français. Ces évolutions sont établies en calculant ces valeurs avant et après implémentation des travaux dans chaque logement représentatif et en les pondérant par leur poids du parc résidentiel.

Tableau 3.10- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation optimal⁵²

		Initial (en milliards d'euros)	Mise en œuvre des opérations d'isolation coût-efficaces (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	390	342	-12 %
	>1974	224	224	0 %
	Totale	614	566	-8 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	104	84	-19 %
	>1974	34	34	0 %
	Totale	138	118	-14 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	71	68	-4 %
	>1974	22	22	0 %
	Totale	93	90	-3 %
Totale		845	769	-9 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Le Tableau 3.10 relate l'évolution du CGC avant et après application des mesures d'isolation optimales pour les différentes catégories de logements. Fort logiquement, aucune variation de CGC n'est constatée sur les segments du parc construits après 1974 puisqu'aucune amélioration de l'isolation n'a été entreprise dans ces logements. L'intégralité des réductions de CGC s'effectue donc au sein des habitations construites antérieurement à cette date. Ces économies sont relativement modestes, mais significatives, et s'échelonnent de 3 % à 13 % en fonction de la catégorie de logements et de la période de construction. On peut noter que les réductions de CGC sont presque cinq fois plus importantes pour les immeubles chauffés en individuel que pour ceux équipés d'un système collectif. Cela s'explique par l'importance du chauffage électrique dans l'habitat collectif et par les coûts marginaux de production modérés des technologies collectives. Au niveau global, les économies réalisées sur les différents segments du parc se traduisent par une baisse du CGC global de 9 %, soit environ 76 milliards d'euros. Ces gains sont donc un peu plus faibles que ceux associés au changement des systèmes de chauffage, mais demeurent d'un ordre de grandeur comparable.

⁵² Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements représentatifs est disponible en Annexe 3.4.

Tableau 3.11- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies coût-efficaces⁵³

		Initial (en Mt de CO ₂)	Mise en œuvre des opérations d'isolation coût-efficaces (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	41	26	-37 %
	>1974	19	19	0 %
	Totale	60	44	-26 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	8	4	-52 %
	>1974	2	2	0 %
	Totale	10	6	-42 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	9	5	-38 %
	>1974	2	2	0 %
	Totale	10	7	-32 %
Totale		80	58	-28 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Le Tableau 3.11 présente l'évolution des émissions de CO₂ en cas de déploiement des travaux coûts-efficaces. Les réductions d'émissions observées sur la partie du parc rénovée sont relativement importantes. Elles sont comprises entre 20 % et 40 % en fonction de la catégorie et la période de construction des logements et débouchent sur une réduction globale de 28 % des émissions, soit 22 Mt CO₂. Ces gains s'expliquent par la réduction des consommations d'énergie en général induite par une meilleure isolation mais aussi par les incitations différenciées à mener des travaux en fonction du coût marginal de production. En effet, suivant cette mécanique, l'ampleur des travaux d'isolation dans les logements dotés de systèmes de chauffage renouvelable ou à fort rendement est moindre que dans des logements similaires équipés d'autres technologies. Ainsi, ce sont généralement les logements pourvus des technologies les plus émettrices qui sont isolés le plus fortement, ce qui tend à augmenter l'abattement d'émissions par euro dépensé en isolation.

⁵³ Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements représentatifs est disponible en Annexe 3.4.

3.5) Arbitrage coût-efficacité entre isolation et changement de systèmes de chauffage et potentiel de réduction des émissions de CO₂

Les parties 3.3 et 3.4 de ce chapitre se sont focalisées sur les déterminants du choix des systèmes de chauffage et des travaux d'isolation dans le cadre de la minimisation du CGC, sur la définition des changements de technologie et des rénovations coût-efficaces pour chaque logement représentatif, et aux implications qu'aurait le recours généralisé à l'un ou l'autre de ces leviers sur l'évolution du CGC et des émissions de CO₂ à l'échelle du parc résidentiel français. Elles ont mis en exergue, dans les deux cas, le rôle du coût marginal de production dans l'établissement des mesures optimales propres à chaque logement-type. Les systèmes de chauffage pourvus d'un coût marginal de production faible et d'un coût d'acquisition élevé se révèlent d'autant plus compétitifs que le besoin de chauffage annuel d'un logement est important. Concomitamment, pour un logement donné, l'intérêt et l'ampleur des travaux d'isolation sont d'autant plus importants que le coût marginal de production est élevé.

Deux leviers majeurs peuvent être actionnés afin de réduire les émissions de CO₂ : un renforcement de l'isolation des logements et le déploiement de systèmes de chauffage décarbonés ou plus efficace. Or, l'interaction entre coût marginal de production et solutions-efficaces suggère que ces deux types de mesures, loin de s'additionner, pourraient s'exclure partiellement l'une l'autre dans une optique de minimisation du CGC. Il reste donc à investiguer la manière dont le recours à ces deux leviers s'ordonne lorsqu'ils peuvent être utilisés conjointement afin de minimiser le coût de chauffage des logements et à réfléchir aux conséquences sur l'évolution du CGC et des émissions de CO₂ du parc résidentiel.

3.5.1- Les combinaisons de mesures coûts-efficaces pour les logements représentatifs : des couplages variés des deux types d'investissements

Cette première section est dédiée à la définition des mesures coûts-efficaces pour chacun des logements représentatifs. La détermination des combinaisons optimales est effectuée à l'aide d'un algorithme de minimisation calculant, pour chaque logement-type, les CGC découlant de l'ensemble des associations possibles entre remplacement des systèmes de chauffage et travaux d'isolation.

La question des combinaisons de mesures optimales ne se pose que pour les logements construits avant 1974. En effet, il a été établi précédemment qu'il n'existait pas de travaux d'isolation profitables pour les logements plus récents étant donné les systèmes de chauffage modélisés. Ainsi pour ces habitations, les mesures coûts-efficaces ne peuvent consister qu'en des changements de systèmes de chauffage et sont donc les mêmes que celles exposées en Tableau 3.6. Pour les logements plus anciens, les résultats obtenus à partir de l'algorithme de minimisation sont présentés en Tableau 3.12.

Tableau 3.12- Combinaison isolation/système de chauffage optimale pour les logements-types construits avant 1974

		Système de chauffage décentralisé		Système de chauffage centralisé	
		Technologie coût-efficace ⁵⁴	BEU associé à l'isolation coût-efficace ⁵⁵	Technologie coût-efficace ¹⁸	BEU associé à l'isolation coût-efficace ¹⁹
Logements individuels	< 67	PAC air/air*	110 (92)	Gaz à condensation	110 (112)
	68-74	PAC air/air*	150 (91)	Gaz à condensation	150 (135)
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	Convecteur électrique	35 (36)	Gaz classique	90 (90)
	48-74	Convecteur électrique	35 (36)	Gaz classique	90 (90)
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	-	-	Gaz classique	90 (89)
	48-74	-	-	Gaz classique	90 (89)

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Les résultats sont présentés par catégorie de logements et par période de construction. On constate tout d'abord qu'aucun des deux types de mesures ne supprime entièrement l'autre lorsque le CGC est minimisé et que les deux leviers sont disponibles. Certains systèmes performants demeurent coûts-efficaces lorsque l'on peut recourir aux travaux d'isolation : c'est le cas des PAC air-air dans les maisons construites avant 1974. L'optimum dans cette catégorie de logements consiste même en l'adoption de PAC air-air sans renforcement de l'enveloppe pour les habitations bâties entre 1968 et 1974. En revanche, dans d'autres cas, l'optimum est constitué de travaux d'isolation couplés avec l'adoption de systèmes plus carbonés (maisons dotées de systèmes centralisés et appartements chauffés par technologie décentralisées) ou moins efficaces (appartements en chauffage centralisé individuel ou collectif) qu'en partie 3.3. Symétriquement, on observe que dans certains cas, les travaux d'isolation coûts-efficaces sont d'ampleur moindre que ceux déterminés à technologie de chauffage constante. Pour effectuer la comparaison avec les résultats de la partie précédente, donnés système par système, un BEU moyen est calculé en fonction du poids de chacune des technologies dans les logements représentatifs. L'écart est ainsi particulièrement important dans les logements individuels, caractérisés par le maintien de systèmes de chauffage performants dans le cadre des combinaisons de mesures optimales : ainsi dans les maisons-types de la période 1968-1974, le BEU coût-efficace est de 150 kWh/(m².an) contre des BEU

⁵⁴ Un astérisque accompagne les systèmes de chauffage coût optimal similaire à ceux déterminés en partie 3.3.

⁵⁵ Entre parenthèses, le BEU optimal obtenu lors de la détermination des travaux d'isolation coûts-efficaces à chauffage constant. Celui-ci est calculé en pondérant le BEU associé à chaque technologie de chauffage par leur poids dans les différents types de logements du parc résidentiel français.

moyens de 91 kWh/(m².an) et 135 kWh/(m².an), respectivement pour les logements dotés de systèmes décentralisés et centralisés, à technologie de chauffage inchangée.

3.5.2- Réduction du CGC et évolution des émissions de CO₂ au niveau du parc de logements en cas déploiement des combinaisons de mesures optimales

Les combinaisons de mesures optimales étant déterminées pour chaque logement représentatif, on peut extrapoler les conséquences potentielles, en termes de CGC et d'évolution des émissions de CO₂, qu'aurait l'application de ces opérations sur le parc résidentiel à différents niveaux de désagrégation. Les économies sont présentées en Tableau 3.13.

Tableau 3.13- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage optimale⁵⁶

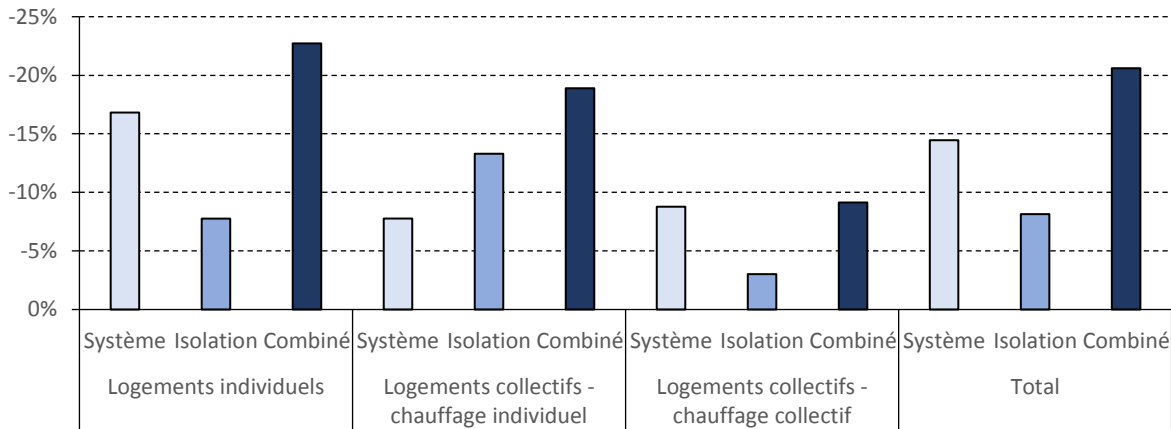
		Initial (en milliards d'euros)	Combinaisons coûts-efficaces (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	390	293	-25 %
	>1974	224	182	-19 %
	Totale	614	474	-23 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	104	82	-21 %
	>1974	34	30	-13 %
	Totale	138	112	-19 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	71	64	-9 %
	>1974	22	20	-9 %
	Totale	93	84	-9 %
Totale		845	671	-21 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Logiquement, la minimisation du CGC par l'utilisation simultanée des leviers « travaux d'isolation » et « remplacement du système de chauffage » conduit à une réduction du CGC équivalente ou plus importante pour tous les segments du parc de logements qu'en cas de recours unique à l'une ou l'autre de ces options (Figure 3.10). Ainsi, au niveau global, l'application des combinaisons optimales permet de réduire le CGC total de 21 %, soit d'environ 175 milliards d'euros sur la période.

⁵⁶ Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements représentatifs est disponible en Annexe 3.5.

Figure 3.10- Réduction du CGC pour les différentes catégories de logements en fonction des mesures mise en œuvre



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Il apparaît donc qu'il est systématiquement profitable de recourir à des combinaisons des deux types de mesures au sein de chaque catégorie de logements afin de minimiser le CGC. On peut noter par ailleurs que les économies sont du même ordre dans les logements individuels et dans les logements collectifs chauffés individuellement (environ 20 %). En revanche, celles-ci sont bien plus réduites dans le cas des appartements équipés d'un mode de chauffage collectif (environ 10 %).

Si l'emploi simultané du remplacement des systèmes de chauffage et des travaux d'isolation assure la minimisation du CGC global du parc résidentiel, rien n'assure cependant que la configuration du parc consécutive au déploiement de ces mesures engendre des gains en termes de réduction d'émissions de CO₂. L'évolution des émissions par catégorie de logements est exposée en Tableau 3.14.

Tableau 3.14- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage optimale⁵⁷

		Initial (en Mt de CO ₂)	Remplacements de systèmes de chauffage et mesures d'isolation coût-efficaces (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	<1974	41	18	-57 %
	>1974	19	13	-29 %
	Totale	60	31	-48 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<1974	8	4	-55 %
	>1974	2	2	-8 %
	Totale	10	6	-45 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<1974	9	5	-41 %
	>1974	2	2	-1 %
	Totale	10	7	-35 %
Totale		80	43	-46 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

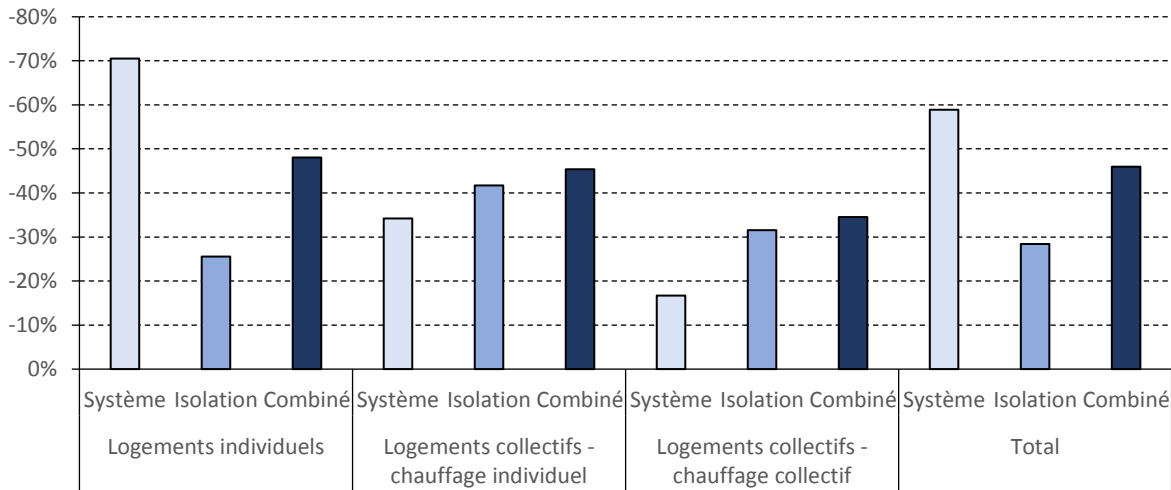
Les résultats mettent en avant l'existence de bénéfices en termes de réductions d'émissions pour chaque catégorie de logements. Ces baisses sont massives : 48 % dans les logements individuels, 45 % dans les immeubles en chauffages individuels et 35 % dans les immeubles équipés de systèmes collectifs. On constate par ailleurs que, pour chacune des catégories de logements et particulièrement dans les cas des immeubles, les abattements d'émissions sont beaucoup plus marqués dans l'habitat ancien, qui de fait, est la seule partie du parc mobilisant à la fois des mesures touchant les systèmes et des travaux sur l'enveloppe.

La Figure 3.11 permet de confronter les gains en termes d'émissions de CO₂ à différents niveaux de désagrégation en fonction des mesures à disposition. Il en ressort que les performances relatives en termes de réduction d'émissions de la minimisation du coût par l'articulation des deux types de mesures, comparativement au recours séparé à l'un ou l'autre des leviers, varient selon la catégorie de bâtiments considérée. Ainsi, la minimisation du CGC par l'utilisation combinée des deux types d'investissement donne lieu à des baisses d'émissions légèrement supérieures lorsqu'elles s'appliquent aux logements collectifs. Néanmoins, elle débouche sur des abattements moindres que ceux observés dans le cadre de l'adoption des systèmes coûts-efficaces dans le cadre des logements individuels. Au niveau

⁵⁷ Pour plus de lisibilité, les résultats sont présentés en distinguant les logements construits avant et après 1974. La désagrégation de ces résultats par période de construction des logements représentatifs est disponible en Annexe 3.5.

global, l'implémentation des combinaisons optimales aboutit à une baisse d'émissions de CO₂ d'environ 46 %, plus importante donc que celle associée à la mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces (-28 %) mais significativement moins importante que celle induite par le déploiement des systèmes économiquement pertinents.

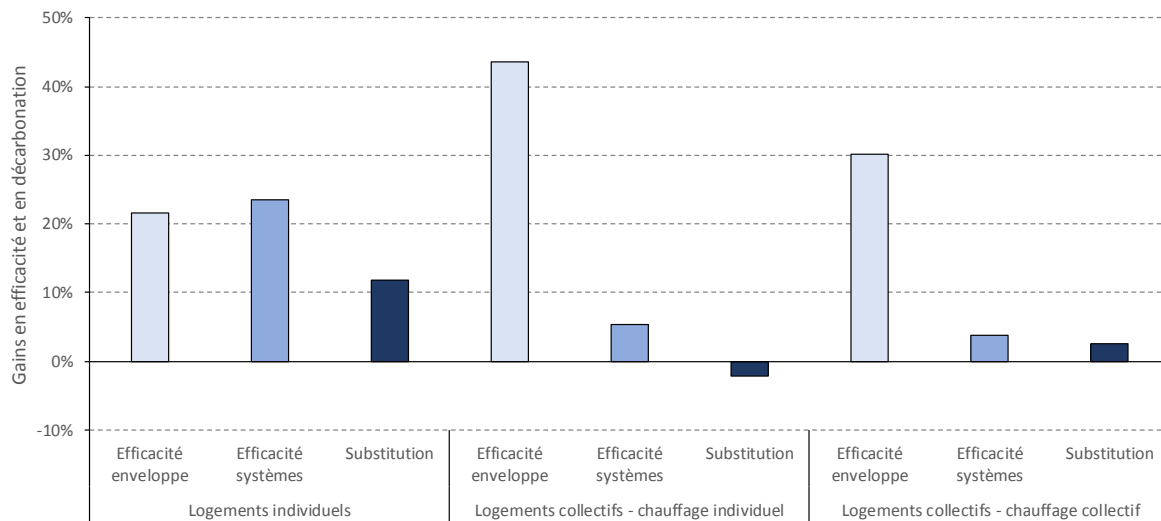
Figure 3.11- Réduction des émissions de CO₂ pour les différentes catégories de logements en fonction des mesures mises en œuvre (en %)



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Si les mesures optimales implémentées dans chaque logement-type constituent le soubassement de ces réductions d'émissions de CO₂, elles ne permettent pas d'appréhender aisément les rôles spécifiques de l'efficacité des bâtiments, de l'efficacité des systèmes et de la substitution dans la réalisation de celles-ci. Sans quantifier leur contribution aux réductions d'émission, il est possible d'examiner l'évolution de ces facteurs au travers des variations du besoin d'énergie utile, du rendement énergétique moyen et du contenu carbone du mix énergétique en fonction des mesures mobilisées afin de minimiser le CGC (Figure 3.12).

Figure 3.12- Gains en efficacité de l'enveloppe, en efficacité des systèmes et en décarbonation du mix énergétique par catégorie de logements en cas de déploiement des mesures coûts-efficaces (en %)⁵⁸



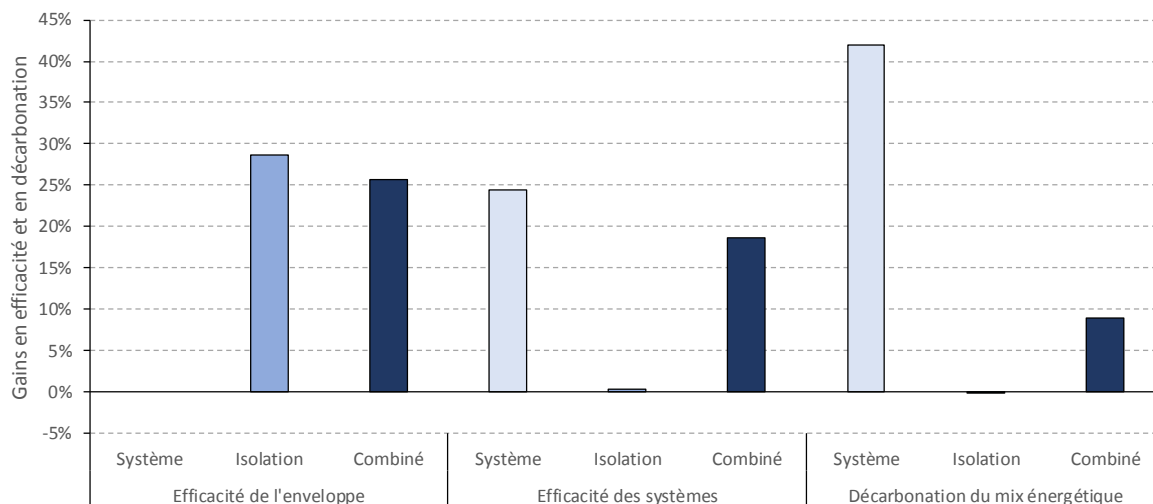
Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

La Figure 3.12 représente les gains obtenus sur les trois facteurs dans le cadre du déploiement des combinaisons de mesures coûts-efficaces. L'examen de leur évolution différenciée selon la nature du logement permet d'accroître la compréhension des mécanismes ayant générés les réductions d'émissions dans chacun des cas. Pour les logements individuels, il se dégage que les trois facteurs ont significativement contribué à la baisse des émissions de CO₂ : on constate une amélioration de deux types d'efficacité et une réduction du contenu carbone moyen. Pour les logements collectifs en revanche, les abattements d'émissions s'avèrent reposer de manière moins équilibrée sur ces différents facteurs. Les réductions d'émission résultent principalement de l'amélioration de l'enveloppe du bâti, et marginalement d'une amélioration du rendement énergétique moyen des systèmes de chauffage. L'évolution du contenu carbone moyen se révèle très modeste. Celui-ci s'améliore légèrement dans les logements chauffés collectivement mais se dégrade dans les appartements relevant du chauffage individuel.

⁵⁸ Les évolutions étant présentées en termes de gains d'efficacité et de substitution, une variation positive de l'efficacité renvoie à la réalisation d'économies d'énergie et une variation positive de la substitution, à une baisse du contenu carbone moyen du mix énergétique.

La Figure 3.13 présente l'amélioration des trois facteurs au niveau du parc résidentiel pris dans son ensemble. A des fins de comparaison, les résultats issus de la combinaison des deux types de mesures sont accompagnés de ceux obtenus par l'utilisation séparée de l'une ou l'autre.

Figure 3.13- Gains en efficacité de l'enveloppe, en efficacité des systèmes et en décarbonation du mix énergétique en fonction des mesures optimales appliquées (en %)



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

On constate que la minimisation du coût *via* les combinaisons coûts-efficaces de mesures conduit à une mobilisation significative des trois facteurs. L'amélioration de l'efficacité des bâtiments est importante, mais des gains significatifs sont aussi obtenus sur l'efficacité des systèmes et la décarbonation du mix énergétique global. Cette structure d'évolution des facteurs se différencie fortement de celles associées aux minimisations du CGC par le recours à un levier unique. En cas d'optimisation des systèmes utilisés dans chaque logement représentatif, les réductions d'émissions s'expliquent par une forte amélioration du contenu carbone de l'énergie et à des gains importants en termes de rendement énergétique des technologies de chauffage. A l'inverse, les abattements d'émissions constatés lors du déploiement des travaux coûts-efficaces sont quasi-intégralement⁵⁹ attribuables à l'amélioration de l'efficacité des bâtiments. Ainsi, au niveau global, l'adoption des combinaisons coûts-efficaces n'entraîne ni une addition des gains observés dans les deux cas,

⁵⁹ Il ressort tout de même de très faibles gains en termes d'efficacité des systèmes et d'amélioration du contenu carbone. Ceux-ci ne s'expliquent non pas directement par les travaux d'isolation, mais par la différenciation de l'isolation en fonction des systèmes qui aboutit à une légère augmentation du poids relatifs des technologies renouvelables et/ou efficaces dans la consommation d'énergie finale du parc.

ni la mobilisation d'un facteur unique mais une amélioration plus modeste mais plus équilibrée des gains en efficacité et en substitution.

3.6) Analyse de sensibilité

Les différents résultats obtenus et analysés en partie 3.3, 3.4 et 3.5 reposent sur les hypothèses formulées quant à la valeur de différents paramètres économiques. Cette section examine les impacts qu'auraient des valeurs alternatives du taux d'actualisation et des scénarios différents d'évolution du prix des énergies sur les résultats au niveau global.

A cette fin, deux taux d'actualisation alternatifs sont testés : une valeur basse (2 %) et une valeur haute (8 %). Similairement, deux nouveaux scénarios d'évolution des prix des énergies sont construits. Le premier suppose une augmentation annuelle de 2 % du prix de toutes les sources d'énergies sur la période. Le second réplique une situation dans laquelle un prix du carbone de 200 euros/tCO₂ serait appliqué au cours de l'année initiale et maintenu tout au long de la période. Le Tableau 3.15 fournit, au niveau agrégé, l'évolution des émissions de CO₂ ainsi que du BEU, du rendement énergétique moyen et du contenu carbone moyen du mix énergétique pour le scénario central et les quatre scénarios alternatifs.

Tableau 3.15- Evolution, en %, des émissions de CO₂, et des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et de variation des prix des énergies retenues.⁶⁰

	CO ₂	Besoin d'énergie utile	Rendement énergétique moyen	Contenu carbone moyen du mix énergétique
Scénario central	-46,0%	-25,7%	18,7%	-13,6%
Actualisation à 2%	-47,9%	-29,0%	24,1%	-5,5%
Actualisation à 8%	-28,0%	-5,4%	8,5%	-17,4%
Prix de l'énergie croissants	-46,2%	-28,3%	28,0%	-4,0%
Prix du carbone	-87,2%	-13,3%	10,1%	-83,8%

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Les scénarios alternatifs aboutissent fort logiquement à des réductions d'émission de CO₂ significativement différentes, s'échelonnant -28 % à -87%, et trouvant leur origine dans des combinaisons variées d'amélioration de l'efficacité et de décarbonation du mix énergétique.

⁶⁰ Seuls sont présentés ici les résultats concernant le déploiement des combinaisons de mesures coûts-efficaces. Les résultats concernant le recours aux travaux d'isolation et au remplacement de systèmes sont disponibles en Annexe

De prime abord, les implications de l'utilisation d'un faible taux d'actualisation sur l'évolution de l'efficacité et de la substitution énergétiques ne sont pas triviales. En effet, en valorisant plus fortement les coûts futurs, un taux d'actualisation bas peut rendre plus avantageux la mise en œuvre de travaux d'isolation et le déploiement de systèmes de chauffage efficaces et/ou décarbonés. Travaux d'isolation d'ampleur et technologies de chauffage intensives en capital s'excluant partiellement l'un l'autre, le résultat final n'est pas aisément prévisible. Les résultats obtenus ici suggèrent que la baisse du taux d'actualisation de 3 % avantage essentiellement l'accroissement de l'efficacité énergétique. On observe ainsi des gains plus importants en efficacité des bâtiments et en efficacité des systèmes que dans le cadre du scénario central, et à l'inverse, une diminution bien moindre du contenu carbone du mix énergétique. Symétriquement, l'utilisation d'un taux d'actualisation plus élevé débouche, dans le cadre cette analyse de sensibilité, sur un faible recours à l'efficacité énergétique au profit de la décarbonation de la production de chaleur.

Le scénario « prix croissants de l'énergie » conduit à des réductions d'émission équivalentes à celles du scénario central. En revanche, la hausse indifférenciée des prix de l'énergie mène à une mobilisation différente des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques. L'efficacité des bâtiments et l'efficacité de production font de l'objet de fortes améliorations tandis que le contenu carbone du mix énergétique ne se réduit que faiblement. Enfin, le scénario « prix du carbone » est largement favorable aux technologies de chauffage renouvelable. La forte décarbonation de la production de chaleur résulte d'un déploiement massif des systèmes de chauffage basés sur le bois-énergie s'opérant au détriment des gains en efficacité énergétique, qui se révèle presque deux fois plus faible que dans le cadre du scénario central.

Les choix effectués quant aux valeurs du taux d'actualisation et au scénario d'évolution du prix des énergies influent donc sur l'estimation du gisement potentiel de réduction d'émissions et sur la mobilisation des facteurs permettant de l'exploiter. Les résultats présentés dans ce chapitre sur la base du scénario central sont donc à considérer à la lumière des hypothèses de modélisation retenues. Néanmoins, quel que soit le scénario, certaines tendances peuvent être dégagées. On observe ainsi que la minimisation du CGC repose systématiquement sur une amélioration de l'efficacité énergétique et baisse du contenu carbone moyen du mix énergétique dont résulte invariablement une réduction significative des émissions de CO₂. Par ailleurs, la comparaison des résultats issus des différents scénarios illustre parfaitement l'existence d'incompatibilités entre mesures d'efficacité et de substitution énergétiques. Il apparaît ainsi que lorsque les gains sur l'un des deux facteurs sont supérieurs à ceux constatés au sein du scénario central, la mobilisation de l'autre levier de réduction d'émissions est moindre.

3.7) Conclusion

L'objet principal de ce chapitre était de s'interroger sur la nature des opérations à effectuer dans le but de minimiser le CGC, d'abord au niveau des logements représentatifs puis à l'échelle du parc résidentiel et de ses différents segments. Cette optimisation du CGC a été successivement menée en recourant au remplacement des systèmes de chauffage (à isolation inchangée), à la mise en œuvre de travaux d'isolation (à technologies de chauffage constantes) et à la combinaison de ces deux leviers. Logiquement, cette dernière méthode s'est révélée supérieure aux deux autres en termes de capacité à réduire le CGC, permettant d'atteindre une diminution de 20 % de la facture totale contre respectivement 14 % et 9 % dans le cas de l'utilisation unique du remplacement des systèmes et de la mise en œuvre des travaux d'isolation.

L'intérêt de la démarche testant ces trois alternatives ne réside pas dans la démonstration que l'optimisation d'une variable par la combinaison de deux types d'actions est plus efficace que dans le cas où elle n'est menée qu'avec un seul d'entre eux, mais dans la possibilité qu'elle ouvre d'appréhender les potentielles interactions entre les deux types de mesures. En l'occurrence, si la nature des opérations à mener n'importe pas particulièrement pourvu qu'elles contribuent à minimiser le CGC, elle peut être lourde de conséquences quant à l'évolution des émissions de CO₂. Or, l'examen de la minimisation du CGC mobilisant les deux leviers séparément a permis de mettre en lumière l'existence d'incompatibilités entre déploiement des systèmes de chauffage décarbonés, et efficaces dans une moindre mesure, et l'ampleur des travaux d'isolation. Ainsi, du fait de leur structure de coûts, caractérisée par un coût d'investissement important et un coût variable faible, les technologies de production de chaleur renouvelables ou efficaces ne sont compétitives qu'à partir d'un certain niveau de production. Or, les travaux d'amélioration de l'enveloppe thermique des bâtiments ayant pour effet de réduire le BEU des logements, ils détériorent la compétitivité de ces technologies et réduisent leur capacité à émerger comme technologies coûts-efficaces. A l'inverse, dans les habitations déjà équipées de systèmes de chauffage de cette nature, il apparaît que les incitations à mener des travaux d'isolation sont amoindries dans la mesure où la valeur des kWh potentiellement économisés est relativement faible. Travaux d'isolation d'ampleur et déploiement des systèmes de chauffage renouvelables ou efficaces tendent donc à ne pas pouvoir s'additionner dans le cadre de la minimisation du CGC du parc de logements.

Le scénario principal étudié dans ce chapitre illustre cette relation et permet de tirer certains enseignements quant à la pertinence de la mise en œuvre de ces opérations sur les différents segments du parc. Il permet notamment d'affirmer que, dans le cadre des hypothèses formulées, aucune opération d'isolation n'est rentable dans les logements dont la construction est postérieure à 1974. La question de la combinaison de mesures d'isolation et de remplacement de systèmes de chauffage ne concerne donc que les habitations les plus

anciennes, représentant tout de même la majorité du parc résidentiel français. Dans ces logements, l'équilibre minimisant le CGC consiste en la mise en œuvre de travaux d'isolation modérés couplés avec l'adoption de chaudières efficaces. Ces combinaisons débouchent au niveau global sur une réduction potentielle des émissions de CO₂ de l'ordre de 45 %. En revanche, il est à noter que les mesures d'isolation appliquées empêchent de fait les technologies de chauffage renouvelable d'être déployées.

Cependant, cette analyse souffre de certaines limites. Parmi celles-ci, deux semblent être majeures dans l'optique d'appréhender avec plus de précision la réalité. La première réside dans l'utilisation de logements-types. Le recours à un faible nombre de bâtiments représentatifs a pour conséquence de centrer l'analyse sur un nombre restreint de BEU. Comme indiqué en chapitre II, celui-ci repose sur de nombreuses autres variables que la date de construction, à l'instar des caractéristiques architecturales du bâtiment ou de la zone climatique. Or, le BEU des logements, ou de l'immeuble dans le cas du chauffage collectif, est un élément déterminant dans la compétitivité des systèmes de chauffage et donc, *in fine*, dans l'arbitrage permettant la minimisation des coûts. La seconde repose sur la nature statique de l'étude. Tout se passe comme si toutes les mesures pouvaient être opérées instantanément. Toutefois, il apparaît périlleux d'appréhender la question de la minimisation du coût et de l'arbitrage entre mesures sans prendre en compte la dynamique des différentes opérations. D'une part, l'objectif fixé par le LTECV (2015) d'atteindre les 500 000 rénovations par an permet de souligner que la filière professionnelle de la rénovation n'est pas dimensionnée pour pouvoir réaliser toutes les rénovations rentables en une année. De plus, la dimension statique de l'analyse empêche de prendre en compte le cycle de renouvellement des systèmes de chauffage dans l'intérêt des remplacements de technologies. Enfin, si ce chapitre permet d'identifier les combinaisons d'opérations aboutissant à une atteinte coût efficace d'un abattement de 46 % des émissions de CO₂, il n'apporte aucune indication sur les investissements à mettre en œuvre pour pousser la réduction des émissions au-delà. Le chapitre suivant se propose donc d'approfondir l'exercice de modélisation pour dépasser les deux grandes limites identifiées et d'explorer la question de l'arbitrage dans le cadre de réductions additionnelles.

Chapitre IV : Efficacité et substitution énergétiques et ambition de l'objectif de décarbonation : les enseignements du modèle Zephyr-Chaleur

4.1)	Introduction.....	133
4.2)	Présentation du modèle Zephyr-Chaleur	134
4.2.1-	<i>Les modèles de simulation prospectifs dans la littérature</i>	<i>134</i>
4.2.2-	<i>Les mécanismes de modélisation.....</i>	<i>136</i>
4.2.3-	<i>Typologie des logements-types et représentation du parc résidentiel.....</i>	<i>142</i>
4.2.4-	<i>Hypothèses de modélisation.....</i>	<i>144</i>
4.3)	Enseignements de la simulation « Business as Usual »	145
4.3.1-	<i>Travaux d'isolation et remplacement des systèmes de chauffage</i>	<i>145</i>
1)	Mise en œuvre des travaux d'isolation entre 2015 et 2035	145
2)	Evolution du parc de systèmes de chauffage entre 2015 et 2035	147
4.3.2-	<i>Evolution des facteurs d'efficacité, des facteurs de substitution et des émissions de CO₂ entre 2015 et 2035</i>	<i>151</i>
4.3.3-	<i>Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution aux réductions d'émissions de la simulation BAU</i>	<i>156</i>
4.4)	Objectif de réduction d'émissions à l'horizon 2035 et contribution des facteurs d'efficacité et de substitution	160
4.4.1-	<i>Accroissement des réductions d'émissions de CO₂ et minimisation du coût</i>	<i>161</i>
4.4.2-	<i>Evolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et objectifs de réduction d'émissions en 2035</i>	<i>162</i>
1)	Efficacité de l'enveloppe	162
2)	Efficacité des systèmes.....	164
3)	Pénétration des énergies renouvelables	166
4)	Contenu carbone du mix énergétique non renouvelable	167
4.4.3-	<i>Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution dans le cadre de quatre objectifs de réduction d'émissions</i>	<i>169</i>
4.5)	Sensibilité des résultats au plafond annuel de rénovation et à l'évolution du contenu carbone de l'électricité	172
4.5.1-	<i>Sensibilité au plafond annuel de rénovation</i>	<i>172</i>

4.5.2-	<i>Sensibilité à l'évolution du contenu carbone de l'électricité.....</i>	179
4.6)	Discussion des implications en termes de politique publique	185
4.6.1-	<i>Les dispositifs d'aide à la rénovation énergétiques des logements.....</i>	186
4.6.2-	<i>Les objectifs de rénovation énergétique.....</i>	187
4.6.3-	<i>Les voies d'amélioration de la stratégie de décarbonation du parc de logements</i>	190
4.7)	Conclusion	192

Chapitre IV : Efficacité et substitution énergétiques et ambition de l'objectif de décarbonation : les enseignements du modèle Zephyr-Chaleur

4.1) Introduction

Le chapitre précédent a analysé les interactions existantes entre systèmes de chauffage efficaces et mise en œuvre de travaux d'isolation dans le cadre de la minimisation du CGC des différents segments du parc résidentiel français. Il en est notamment ressorti qu'au niveau agrégé, celles-ci aboutissaient systématiquement à une réduction des émissions de carbone⁶¹. Les travaux menés ont permis de mettre en évidence l'existence d'un gisement de réductions d'émissions atteignable à coût négatif, puisqu'il résulte d'une minimisation du coût global des différents logements-types, et de détailler les combinaisons d'opérations permettant de l'exploiter de manière coût-efficace. Cet exercice est néanmoins limité par le caractère statique de la modélisation. Les réductions d'émission estimées constituent un gisement potentiel, dans la mesure où elles sont calculées en supposant que toutes les actions peuvent être menées simultanément.

S'intéresser de manière plus réaliste à la façon dont les émissions de CO₂ pourraient évoluer en cas de minimisation généralisée du CGC suppose donc d'intégrer une dimension temporelle à l'analyse. Par ailleurs, les travaux précédemment menés ne permettent pas de déterminer les mesures à mettre en œuvre afin d'atteindre un niveau de décarbonation du parc résidentiel plus ambitieux que celui résultant simplement de la minimisation du CGC. C'est ce qu'entreprend de faire ce chapitre en développant un modèle de simulation qui permet de représenter le parc de logements français et d'étudier son évolution au cours du temps en fonction de différents objectifs de réduction d'émissions et de différents jeux de scénarios.

Le présent chapitre propose donc de s'intéresser à la question suivante : Comment atteindre différents objectifs de réduction d'émissions à moindre coût et quelle est la contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique dans ce cadre ?

Pour cela, un modèle de simulation Bottom-up est développé. Il s'inscrit dans la poursuite des travaux menés en chapitre II et III. La focale est donc intégralement portée sur le stock de logements existants. Les caractéristiques des ménages et les différentes barrières à l'investissement ne sont pas intégrées à l'analyse au profit d'une représentation très poussée du parc de logements et des technologies d'isolation et de production de chaleur mobilisables.

⁶¹ Variable en fonction des hypothèses économiques retenues.

Les analyses des chapitres précédents sont développées et approfondies en plusieurs sens. Trois principaux apports sont à souligner. Tout d'abord, la dynamique de transformation du parc est intégrée. Son évolution est étudiée sur la période 2015-2035 à travers un processus de minimisation du coût global de chauffage répété annuellement. L'ancienneté des systèmes de chauffage est prise en compte et un plafond annuel de logements pouvant faire l'objet de travaux d'isolation est instauré.

Un second prolongement des analyses précédentes, partiellement lié à l'introduction d'une dimension temporelle dans la modélisation, repose sur l'utilisation d'un nombre accru de bâtiments représentatifs. Ces derniers sont d'abord multipliés de manière à prendre en compte pour chaque catégorie et type de logements les différences d'ancienneté des systèmes de chauffage dont ils sont dotés. De plus, les travaux précédents ayant permis de souligner la sensibilité des résultats concernant la définition des technologies de chauffage coûts-efficaces aux besoins de chauffage des différents bâtiments-types, ce chapitre propose une segmentation du parc de logements plus fine, en tenant compte notamment de la diversité des surfaces des habitations et des zones climatiques.

Enfin, contrairement au chapitre III, essentiellement tourné vers les mesures d'isolation et de remplacement des systèmes de chauffage, les résultats de simulation sont majoritairement centrés sur les variations des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et leur contribution à l'évolution des émissions de CO₂. La méthode d'analyse de décomposition utilisée en chapitre I est réintroduite de manière à pouvoir quantifier l'apport de ces différents facteurs à la réalisation des objectifs de réduction des émissions de CO₂.

Le chapitre s'organise comme suit. Le modèle Zephyr-Chaleur est présenté en section 4.2. Sont détaillés dans cette présentation les caractéristiques des bâtiments-types modélisés et leur poids dans le parc résidentiel français, l'architecture et le fonctionnement du modèle de simulation et les principales hypothèses de modélisation utilisées. La section 4.3 est dédiée à la simulation « Business as Usual ». La section 4.4 est centrée sur l'évolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et sur leurs contributions à l'atteinte d'objectifs croissants de décarbonation du parc résidentiel à l'horizon 2035. La section 4.5 explore l'impact sur les résultats d'une modification du plafond annuel de rénovation et de la prise en compte d'une décarbonation progressive du mix électrique. La section 4.6 discute les implications en termes de politique publique des résultats obtenus et la section 4.7 conclut.

4.2) Présentation du modèle Zephyr-Chaleur

4.2.1- Les modèles de simulation prospectifs dans la littérature

Le secteur résidentiel français a déjà fait l'objet d'études prospectives reposant sur des modèles de simulation *ex-ante* de l'évolution du parc résidentiel et de ses équipements. Ces

modèles sont généralement qualifiés de modèles « énergie - économie » du fait de l'importance accordée à la représentation du système énergétique dans la modélisation (Mundaca *et al.*, 2010). On distingue généralement les modèles dits « Bottom-up », souvent associés à des approches « ingénieurs », des modèles dits « top-down », plus conformes aux approches traditionnelles en économie fondées sur l'emploi de fonctions de demande et de production (Swan et Ugursal, 2009). Ces modèles se distinguent par le degré de désagrégation des données d'entrée utilisées. Les modèles top-down reposent sur l'utilisation de données agrégées (population, nombre de logements, PIB, etc.) pour expliquer les consommations d'énergie pour ensuite les attribuer à des sous-groupes en fonction de leurs caractéristiques. Les technologies utilisées sont peu ou pas explicitées et la dynamique des consommations est déterminée à partir de fonctions d'élasticité de la demande d'énergie. A l'inverse, dans le cas des modèles bottom-up, les consommations d'énergie sont estimées à l'échelle du logement avant d'être agrégées pour déterminer les consommations des différents segments du parc résidentiel. Les consommations d'énergie sont estimées soit à partir d'approches statistiques liant les caractéristiques des ménages, des logements et de l'environnement aux consommations constatées, soit à partir d'approches « physiques » reposant sur le recours à des modèles thermiques simplifiés. Les technologies sont représentées de manière explicite et les comportements des ménages sont le plus souvent modélisés de manière assez simpliste. Ce dernier type de modèles est celui le plus largement utilisé dans le cadre des exercices de simulations prospectives concernant le secteur résidentiel français (Allibe, 2012b).

La grande diversité des modèles développés en France fait écho à la diversité des objectifs leur étant assignés⁶². Ainsi, certains travaux se sont intéressés aux impacts qu'aurait sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ la diffusion de certaines technologies de chauffage ou de travaux d'isolation à partir de scénarios prédéterminés (Traisnel, 2001 ; Marchand *et al.*, 2008 ; Teissier et Meunier 2008 ; Orselli, 2008). Les modèles alors mobilisés reposent sur une représentation détaillée du parc de logements et des équipements et les changements technologiques sont fixés de manière exogène à partir des scénarios envisagés. Un autre pan de littérature est centré sur l'évaluation de l'impact de différents instruments de politique publique (taxe carbone, crédit d'impôts, prêt à taux zéro, etc.) sur le déclenchement des investissements en rénovation énergétique et sur leur capacité à permettre l'atteinte des objectifs nationaux. Les modèles utilisés visent alors à simuler les décisions d'investissement des ménages en tenant compte de leur hétérogénéité, des différentes barrières à l'investissements et des défaillances de marché. C'est notamment le

⁶² Différentes taxonomies des modèles dédiés à l'évolution des consommations énergétiques du secteur résidentiel sont disponibles dans la revue de littérature réalisée par Allibe (2012b).

cas du modèle RES-IRF (Giraudet, 2011), du modèle MENFIS (Nauleau, 2015) et des travaux de Charlier et Risch (2012). Enfin, d'autres études se sont intéressées à la manière d'atteindre des objectifs d'efficacité énergétique de manière optimale. C'est par exemple le cas de Cayla (2011) qui utilise le modèle d'optimisation TIMES-MARKAL afin de déterminer les trajectoires permettant d'atteindre à moindre coût le facteur 4 dans les secteurs du résidentiel et du transport.

A notre connaissance, aucun modèle de simulation prospective ne s'est intéressé aux mesures d'isolation et de remplacement des systèmes de chauffage permettant d'atteindre à moindre coût différentes cibles de réduction d'émissions.

4.2.2- Les mécanismes de modélisation

Le modèle Zephyr-Chaleur prolonge et approfondit l'approche adoptée lors du chapitre précédent. Il s'agit d'un outil de simulation prospective basé sur une approche technico-économique et centré sur la minimisation du CGC d'un grand nombre de logements-types, représentatifs du parc résidentiel français. Il procède d'une démarche bottom-up : l'évolution des caractéristiques physiques, techniques et économiques du stock de bâtiments résulte de l'agrégation des opérations menées au niveau des logements-types. Suivant la logique précédemment empruntée, ce modèle n'est pas développé dans une perspective de prévision de l'évolution du parc résidentiel mais vise à simuler d'hypothétiques transformations du parc de logements existants dans un cadre où celles-ci seraient uniquement guidées par la minimisation du CGC de manière à explorer les évolutions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques permettant d'opérer à moindre coût.

Le développement d'un modèle de simulation permet d'étudier la dynamique de transformation du parc résidentiel. La minimisation du CGC n'est donc plus réalisée sur une période unique. Elle est effectuée dans un cadre temporel donné, sur la base d'un pas de temps annuel. Chaque logement-type débute une année n dans une configuration donnée en termes de composition de l'enveloppe thermique et d'équipement de système de chauffage et opère dans cette configuration tout au long de l'année. Puis, en fin d'année n , le CGC est minimisé sur un nouvel horizon temporel ($n+1$ à $n+41$) menant, ou non, à un remplacement du système de chauffage et/ou à une amélioration de certains composants de l'enveloppe thermique. Ces potentielles mesures sont supposées être mises en œuvre immédiatement tant et si bien que chaque logement-type entame l'année $n+1$ dans sa nouvelle configuration. Ce cycle est répété année après année sur une période de vingt ans, simulant ainsi l'évolution du parc de logement de 2015 à 2035.

L'inscription dans ce cadre temporel permet d'intégrer une autre dimension jusqu'ici négligée à savoir le cycle de renouvellement des technologies de chauffage. Précédemment, il était implicitement supposé que les systèmes dont étaient dotés les logements-représentatifs

arrivaient en fin de vie puisqu'était calculé pour chacun d'entre eux un coût global de chauffage supposant l'installation d'un nouvel équipement en début de période, que la technologie utilisée soit modifiée ou qu'elle demeure inchangée. Or, les systèmes de chauffage ayant une durée de vie moyenne de 20 ans, la question ne se pose en réalité pas dans des termes si simples. S'il peut être profitable de remplacer dès maintenant un système âgé d'une dizaine d'années, il peut aussi être plus avantageux de conserver l'équipement en place un certain temps avant de procéder à son remplacement. Dans le but de tenir compte de cette temporalité susceptible d'influer sur les arbitrages entre mesures de différents types, l'ancienneté des systèmes de chauffage est désormais prise en compte lors de l'établissement de la classification des logements-types. La prise en compte de cette dimension modifie la formulation des CGC calculés dans le cadre de la minimisation.

Si aucun remplacement ou renouvellement du système de chauffage n'est effectué, le CGC s'écrit :

$$CGC_{b,h_0}^k = \frac{I_{h_0} \times (1+i)^{d-a}}{(1+r)^{d-a}} + \frac{I_{h_0} \times (1+i)^{2d-a}}{(1+r)^{2d-a}} + E_k + \sum_{t=1}^n \frac{P_{h_0,b}^t}{(1+r)^t} \quad (4.1)$$

A l'inverse, en cas de remplacement du système de chauffage, le CGC est calculé comme suit :

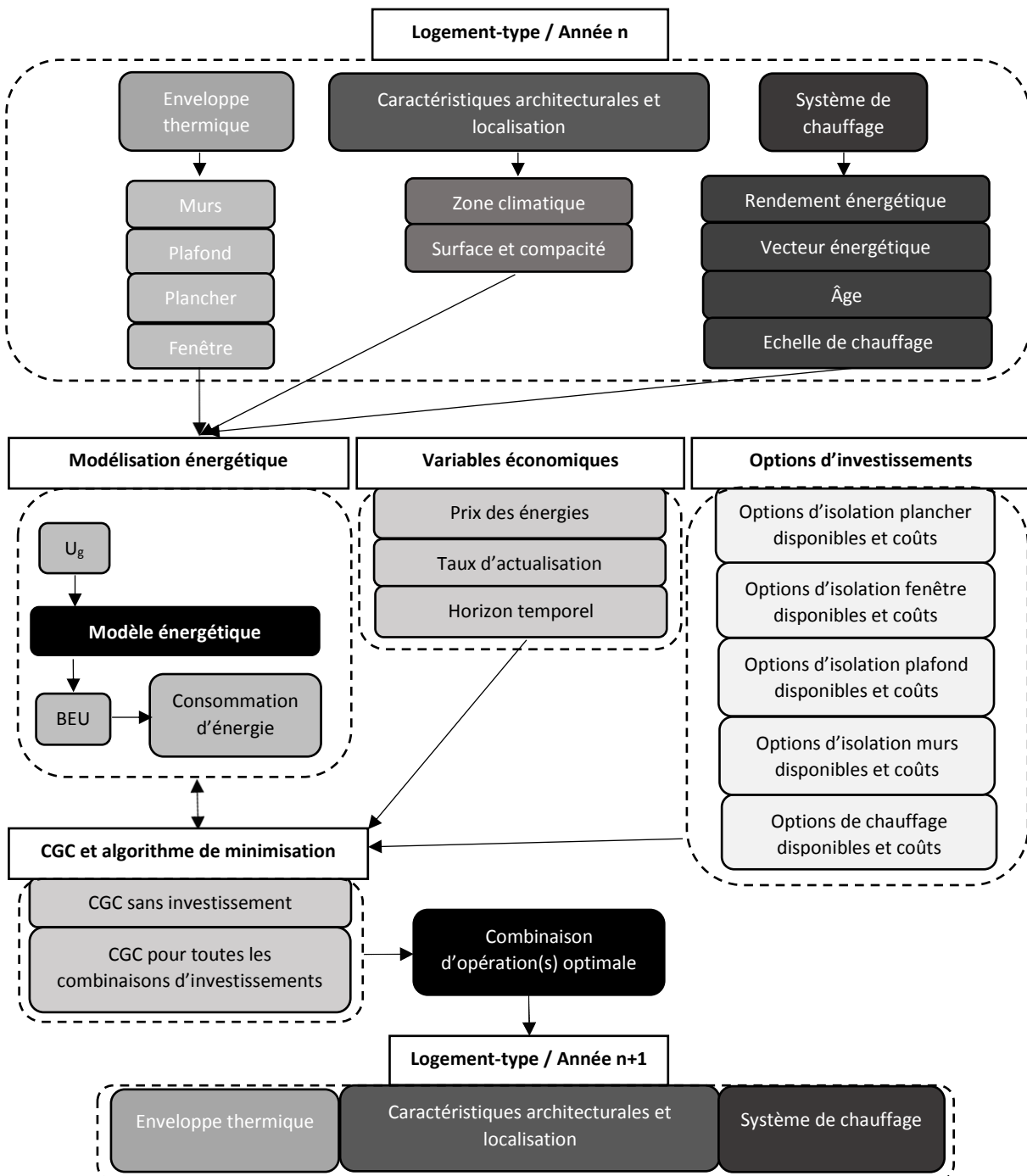
$$CGC_{b,h}^k = I_h \times (1+i) + \frac{I_h \times (1+i)^d}{(1+r)^d} + E_k + \sum_{t=1}^n \frac{P_{h,b}^t}{(1+r)^t} \quad (4.2)$$

Avec :

- CGC_{b,h_0}^k , le coût global de chauffage logement-type b en cas de mise en œuvre de la combinaison d'opérations d'isolation k et de maintien du système de chauffage initial h_0 en place.
- $CGC_{b,h}^k$, le coût global de chauffage logement-type b en cas de mise en œuvre de la combinaison d'opérations d'isolation k et de l'adoption du système de chauffage h .
- I_{h_0} et I_h , le coût d'achat et d'installation des système de chauffage h_0 et h .
- i , le taux d'inflation, supposé constant sur la période.
- d , la durée de vie de la technologie de chauffage.
- a , l'âge de du système de chauffage h_0 .
- r , le taux d'actualisation.
- E_k , le coût total de la combinaison d'opérations k .
- $P_{h,b}^t$, la facture énergétique associée au système de chauffage h opérant dans le logement type b .

La prise en compte de l'ancienneté des systèmes de chauffage opérant dans les différents logements-types à chaque période de la simulation permet d'intégrer le cycle de renouvellement des équipements. En effet, comme indiqué par l'équation 4.1, en cas de maintien de la technologie de chauffage, le renouvellement de celui-ci interviendra à une date d'autant plus éloignée que le système de chauffage est récent. En conséquence, et du fait du taux d'actualisation qui tend à réduire le poids des dépenses futures, plus un logement sera doté d'un système de chauffage récent, moins il sera probable qu'un remplacement de l'équipement soit une opération profitable. Ainsi, si les systèmes les moins économiques pour un logement-type donné seront nécessairement remplacés à terme par la technologie coût-efficace, la date de ce remplacement dépendra à la fois de l'ancienneté de l'équipement initial et de l'écart de profitabilité entre cet équipement et la technologie coût-efficace. Plus l'écart en termes de CGC sera important, plus le remplacement interviendra avant la date de fin de vie du système en place. Sur la base des équations 4.1 et 4.2, le CGC est minimisé à chaque période à l'aide d'un algorithme de minimisation. Celui-ci calcule les CGC associés à toutes les combinaisons d'opérations de changement de système de chauffage et d'actions sur les quatre composants de l'enveloppe thermique possibles et sélectionne la configuration permettant d'obtenir le CGC le plus faible (Figure 4.1).

Figure 4.1- Représentation du fonctionnement du modèle au niveau d'un logement-type sur une année



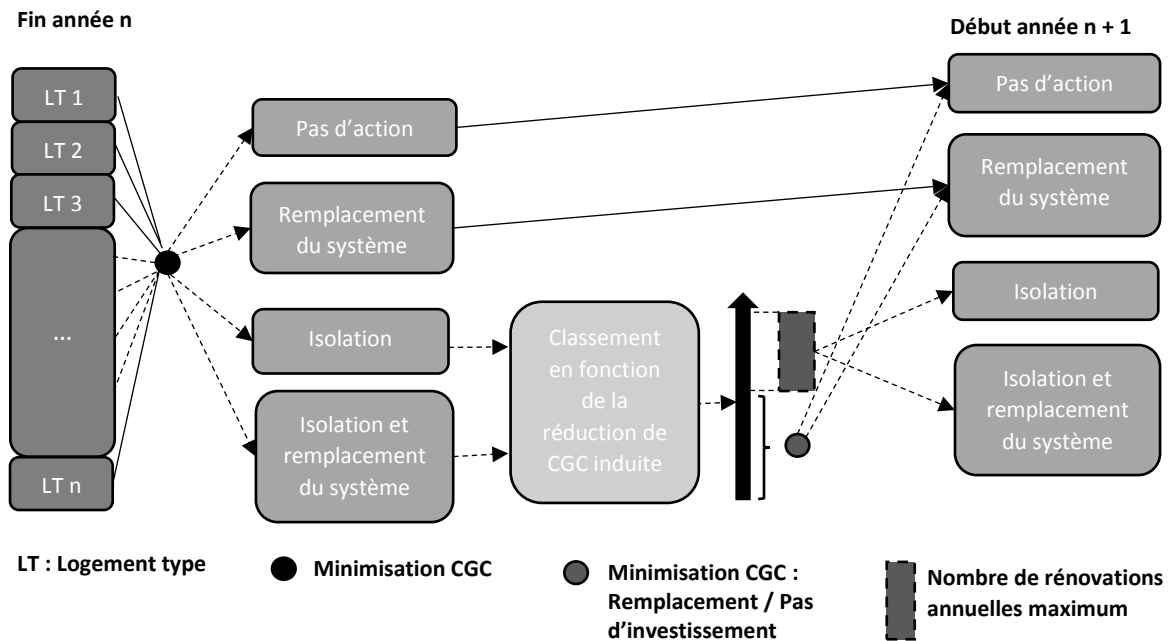
Enfin, une troisième dimension temporelle est intégrée dans l'analyse. Précédemment, il était supposé que toutes les opérations d'amélioration de l'enveloppe thermique des logements-types profitables étaient réalisées sur-le-champ. Si cette hypothèse a du sens lors de l'estimation du potentiel d'économie d'énergie du parc résidentiel, elle n'en reste pas moins irréaliste. D'abord, au niveau d'un logement ou d'un immeuble, la mise en œuvre de travaux d'isolation peut s'étaler sur une période de plusieurs semaines ; c'est notamment le cas de l'isolation par l'intérieur ou par l'extérieur des parois verticales. Néanmoins, c'est au niveau du parc résidentiel pris dans son intégralité que la contrainte temporelle prend tout son sens. Si, comme suggéré dans le chapitre précédent, des actions d'isolation sont requises dans tous les logements construits avant 1974, soit environ 15.5 millions d'habitations, il apparaît alors une impossibilité « physique » liée au dimensionnement de la filière des entreprises de rénovation en France. S'il peut être ardu d'estimer avec précision les capacités actuelles de celle-ci, il est tout de même possible d'appréhender la contrainte au travers de deux marqueurs. Le premier est celui des rénovations énergétiques performantes ou très performantes recensées par la campagne 2015 de l'enquête OPEN (ADEME, 2016) dont le nombre s'élève à 288 000 sur l'année 2014. Le second est l'objectif de 500 000 rénovations énergétiques annuelles que s'est fixé la LTECV à l'horizon 2017. Par ailleurs, si un développement progressif de cette filière peut être envisageable, il est à noter que celui-ci ne pourra se faire que progressivement du fait du temps nécessaire à la formation d'une main d'œuvre spécialisée et qualifiée.

L'existence de cette contrainte se traduit dans le modèle par l'établissement d'un plafond annuel de rénovation. Ce plafond pourrait être exprimé en montant de travaux d'isolation réalisés ou en nombre de logements rénovés. Si la première option semble plus pertinente dans l'optique d'illustrer la contrainte pesant sur l'offre, c'est la seconde qui est retenue ici afin de coïncider avec la formulation de l'objectif de la LTECV (2015). Il résulte mécaniquement de ce plafond annuel de rénovations l'impossibilité de procéder, à chacune des périodes, à l'isolation de tous les logements qu'impliquerait la minimisation du CGC. La procédure de sélection est la suivante : les investissements résultant de la minimisation des CGC des différents logements-types et comportant des actions d'isolation sont opérés par ordre décroissant de réduction de CGC engendrée jusqu'à l'atteinte du plafond de rénovation⁶³. Une seconde minimisation de CGC est effectuée pour les logements-types dont les opérations d'isolation n'ont pas pu être mises en œuvre. Celle-ci repose sur un spectre réduit d'options : remplacement du système de chauffage ou maintien de l'équipement initial. Ce processus de

⁶³ A l'inverse, les actions permettant la minimisation du CGC des logements-types et ne comportant pas d'opération d'isolation sont directement implémentées.

plafonnement et de sélection des travaux d'opération est répété à chaque période (Figure 4.2).

Figure 4.2- Représentation du processus d'optimisation sur une année



L'inscription dans un cadre temporel, la prise en compte de l'ancienneté des systèmes de chauffage et l'introduction d'un plafond annuel de rénovation contribuent à intégrer à la modélisation une dimension temporelle. Néanmoins, si le modèle permet d'appréhender les mécanismes d'interaction entre cycles de renouvellement des systèmes de chauffage et contrainte de rénovation, il convient de noter qu'il ne relève pas d'une logique d'optimisation dynamique intégrale. En effet, à chaque période, l'optimisation du CGC des logements-types est effectuée en explorant les potentielles économies que permettraient les différentes combinaisons d'opérations sur l'enveloppe et les systèmes si elles étaient mises en œuvre à une date t . Les choix sont uniquement effectués période par période et l'opportunité de différer dans le temps un investissement n'est pas considérée. Ainsi, dans le cas des logements dont la minimisation du CGC appelle la mise en œuvre de travaux d'isolation qui ne peuvent néanmoins pas être réalisés du fait de la contrainte de rénovation, il s'ensuit une minimisation par défaut sur la base des solutions techniques disponibles (*statu quo* ou remplacement de l'équipement de chauffage). L'arbitrage potentiel entre agir sur le système à la date t et attendre une période ultérieure dans l'optique d'associer changement de technologie de chauffage et mesure d'isolation n'est pas étudié.

L'évolution dans le temps des caractéristiques de l'ensemble des logements-types en termes de systèmes de chauffage utilisés et de composition des enveloppes thermiques est donc dérivée des mécanismes de modélisation microéconomiques et régie par une contrainte s'appliquant au niveau du parc. La pondération des logements-types en fonction de leur

représentativité permet ensuite de simuler les transformations du parc résidentiel français qui seraient induites par la recherche exclusive de la minimisation du CGC. Sur cette base, les différentes composantes du CGC, les besoins de chauffage, les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ des différents segments du stock de logements sont collectés afin de calculer l'évolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques. Leur contribution respective à l'évolution des émissions de CO₂ est ensuite déterminée à l'aide d'analyses de décomposition.

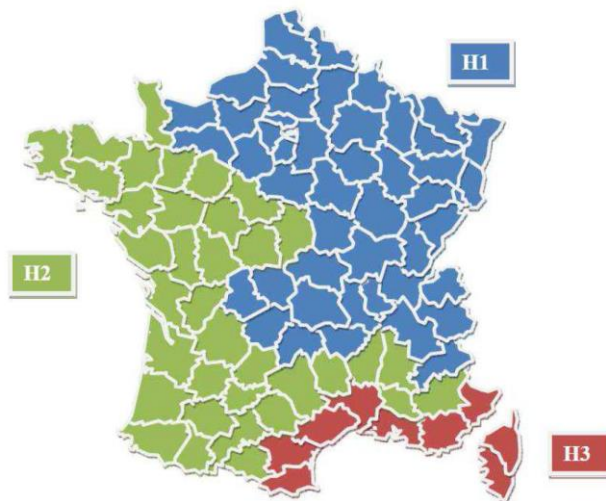
4.2.3- Typologie des logements-types et représentation du parc résidentiel

Le nombre de bâtiments-types utilisé dans le modèle est considérablement accru par rapport à la typologie mobilisée dans les chapitres précédents. Cette multiplication des logements représentatifs s'explique pour deux raisons. La première découle logiquement de la prise en compte de l'ancienneté des systèmes de chauffage équipant les logements puisque celle-ci implique d'ajouter ce critère à chaque logement-type. Le pas de temps du modèle étant annuel et la durée de vie des systèmes de chauffage étant estimée à 20 ans, l'introduction de ce critère multiplie à lui seul le nombre de logements-représentatifs par 20. De plus, le chapitre précédent ayant mis en lumière la sensibilité de la compétitivité des différents systèmes de chauffage au besoin de chauffage des habitations, deux critères additionnels sont introduits dans l'optique d'appréhender plus précisément l'hétérogénéité des logements et de leur environnement :

- La taille du logement ou de l'immeuble : l'approche par la taille moyenne adoptée précédemment a pour limite de n'illustrer que très imparfaitement la diversité des BEU du parc résidentiel français. Or, le chapitre précédent a mis en exergue que cette variable déterminait très largement la compétitivité des systèmes de chauffage. Afin d'améliorer la représentativité des bâtiments-types, trois catégories de surface de logements et d'immeubles sont introduites. Ainsi à la catégorie moyenne précédemment adoptée, sont ajoutées deux catégories additionnelles à savoir les logements de surface importante et les logements de surface réduite. Celles-ci sont établies pour chaque type de logements à partir de la moyenne des surfaces observées pour le premier et le dernier quartile de distribution des surfaces.
- La zone climatique : les logements-types sont différenciés en fonction de leur localisation en termes de zone climatique. Trois zones sont considérées ici : H1, H2 et H3 (Figure 4.3). L'introduction de ces zones climatiques permet de prendre en compte l'impact du climat sur les besoins de chaleur des différents bâtiments-types. Cette variation en termes de besoin de chauffage associé aux conditions climatiques se traduit par la distinction des degrés heure de référence (Dh_{ref}) utilisés dans la modélisation thermique. Ainsi, en recourant à la moyenne des Dh_{ref} départementaux

de chaque zone climatique pondérés en fonction de leur nombre de résidences principales, des valeurs moyennes sont estimées pour les zones H1, H2 et H3⁶⁴.

Figure 4.3- Délimitation géographique des zones climatiques H1, H2 et H3⁶⁵



L'intégration et le croisement de ces critères additionnels aboutissent à l'utilisation de 32 760 logements-types.

La simulation de l'évolution du parc résidentiel existant à partir de ces logements-types nécessite un approfondissement de la représentation du parc utilisée jusqu'à présent. Aucune base de données existante ne permet d'obtenir une photographie du parc résidentiel et des systèmes de chauffage associés à un niveau de désagrégation combinant zone climatique, type de logement, distribution des surfaces, période de construction, système de chauffage et ancienneté des équipements.

La pondération des différents bâtiments-types associant ces attributs est en conséquence effectuée par le croisement de différentes sources de données et l'utilisation de clefs de répartition. Le nombre total de résidences principales par type de logement et période de construction se fonde sur les résultats de l'Enquête Logement 2015 (INSEE, 2015). La ventilation de ces habitations en fonction des catégories de surface, de la zone climatique et de la nature du système de chauffage utilisée est réalisée sur la base des résultats de l'Enquête

⁶⁴ On aboutit aux valeurs suivantes : 59 488 °C/h pour la zone H1, 49 391 °C/h pour la zone H2 et 34 281 °C/h pour la zone H3.

⁶⁵ Illustration issue de la page web : http://www.ecoprimesaidee.fr/ressources/Departement_H1.pdf

PHEBUS⁶⁶ (CGDD, 2015). L'ancienneté des équipements est établie sur la base des chroniques de ventes de systèmes de chauffage depuis 1995 (Uniclimate, 2015 ; Observ'ER, 2016). Les principaux résultats de cette caractérisation désagrégée du parc résidentiel sont présentés en Annexe 4.1.

Il convient de noter que le modèle simule exclusivement l'évolution du bâti existant. Les logements neufs ne sont pas progressivement intégrés à la modélisation. Néanmoins, du fait des normes de construction actuelles (Collet, 2011) et à venir, ces nouveaux logements ne devraient avoir qu'un impact marginal sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ du parc résidentiel.

4.2.4- Hypothèses de modélisation

Les principales hypothèses de modélisation et données d'entrées des chapitres précédents sont reprises ici. Les prix des énergies utilisés correspondent à ceux présentés en Tableau 3.3. Les coûts d'investissement et d'entretien des systèmes de chauffage sont repris du Tableau 2.9 et leur rendement énergétique global du Tableau 2.8. Afin d'améliorer le réalisme des coûts d'investissement associés aux systèmes de chauffage, des coûts spécifiques à chacune des technologies sont pris en compte. Ces coûts dépendent du système initialement installé et correspondent aux coûts annexes associés à certaines technologies tels que les frais correspondant à l'achat d'une cuve à fioul, d'un silo de stockage des pellets, d'un conduit d'évacuation étanche pour les systèmes à condensation, etc. Ces coûts spécifiques sont présentés en Annexe 4.2. Pour les systèmes de chauffage comme pour les travaux d'isolation, aucun dispositif d'aide n'est pris en compte. De plus, aucun effet d'apprentissage pouvant réduire les coûts des différentes technologies dans le futur n'est modélisé.

Seuls les coûts associés à l'investissement, à l'entretien et la maintenance et à la consommation d'énergie, sont comptabilisés. Les coûts intangibles, les coûts cachés et les co-bénéfices associés à chacune des technologies ne sont pas valorisés.

Afin de tenir compte de l'impossibilité d'être relié au réseau de gaz, une contrainte est ajoutée aux logements chauffés au fioul. On présume que le recours à ce vecteur énergétique suppose l'impossibilité de recourir au gaz réseau. En conséquence, les chaudières fioul peuvent être

⁶⁶ L'Enquête Performance de l'Habitat, Equipements, Besoins et Usage de l'énergie (PHEBUS) est basée sur un échantillon de 8 000 logements représentatifs des régions, des zones climatiques, des types d'habitat et des années de construction (CGDD, 2015).

remplacées par des chaudières gaz en logement individuel mais en recourant au propane. La transition du fioul vers le gaz est en revanche impossible pour les logements collectifs.

L'horizon temporel sur lequel les calculs de CGC sont effectués est de 40 ans et le taux d'actualisation est de 5 %. Par ailleurs, dans un premier temps, le plafond de rénovation annuel est fixé à 500 000 logements, de manière à correspondre à l'objectif fixé par la LTECV (2015).

Le contenu carbone des différents vecteurs énergétiques est supposé constant dans le temps. Cette hypothèse sera remise en cause pour l'électricité en section 4.5. Les simulations sont effectuées en postulant un climat constant sur la période.

4.3) Enseignements de la simulation « Business as Usual »

Cette section est dédiée à l'analyse de la simulation « Business As Usual ». Celle-ci consiste en l'implémentation de la minimisation du CGC de l'ensemble des logements du parc résidentiel suivant les mécanismes explicités en section 4.2. Elle est nommée « Business As Usual »⁶⁷ dans la mesure où aucune action n'est mise en œuvre dans le but d'accroître les réductions des émissions de CO₂⁶⁸.

4.3.1- Travaux d'isolation et remplacement des systèmes de chauffage dans la simulation BAU

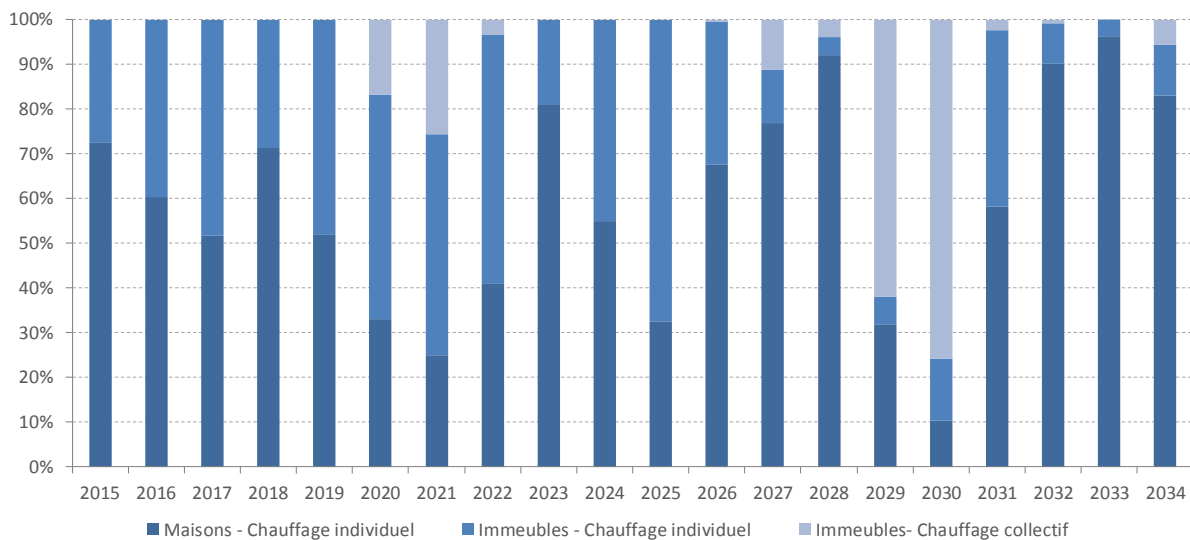
1) Mise en œuvre des travaux d'isolation entre 2015 et 2035

Dans le cadre de cette simulation BAU, le plafond annuel de travaux d'isolation est atteint systématiquement durant les vingt années simulées. Ainsi, dix millions de logements font l'objet de travaux d'amélioration de leur enveloppe thermique sur la période. Suivant le fonctionnement de la contrainte annuelle de rénovation, ce sont les travaux de rénovation les plus profitables qui sont réalisés chaque année. De ce fait, ils touchent de manière variable les différents segments du parc résidentiel. Ainsi, comme souligné dans le chapitre précédent, aucune mesure d'isolation n'est rentable, et donc *a fortiori* mise en œuvre, dans les logements construits après 1974. De même, les travaux sont menés prioritairement dans les habitations équipées de systèmes de chauffage au coût marginal de production le plus élevé et à la compacité la plus faible. On constate ainsi qu'aucun immeuble chauffé collectivement ne fait l'objet de travaux d'isolation durant les cinq premières années de la période (Figure 4.4).

⁶⁷ Par commodité, le terme « BAU » sera utilisé dans la suite du chapitre.

⁶⁸ Cela constitue l'objet de la section suivante.

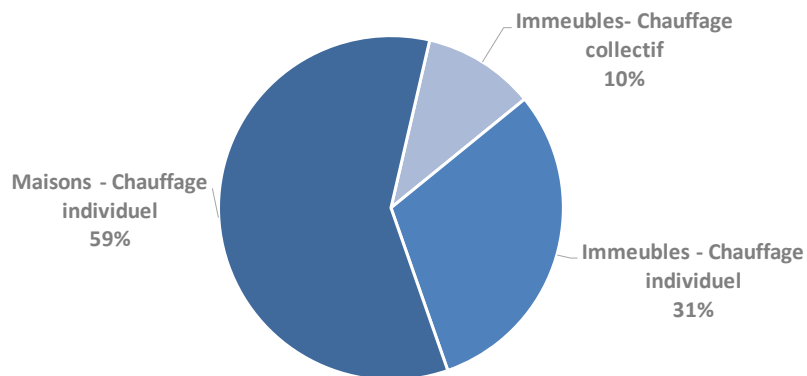
Figure 4.4- Répartition annuelle des travaux d'isolation par catégorie de logements



Source : résultats de la simulation du BAU

Au final, sur les dix millions de rénovations menées sur la période, près de 60 % concernent les logements individuels et 30 % les logements collectifs chauffés individuellement (Figure 4.5).

Figure 4.5- Répartition des travaux d'isolation par catégorie de logements



Source : résultats de la simulation BAU

La mise en œuvre de ces travaux se traduit par une réduction progressive des besoins de chauffage du parc de logements. Le besoin d'énergie utile annuel moyen passe ainsi de 155 à 128 kWh/(m².an) soit une réduction de 17 %. Cette baisse résulte de la stabilité des besoins de chaleur des habitations construites après 1974 et d'une diminution moyenne de 26 % des besoins de chauffage des logements bâtis avant la première réglementation thermique. Il apparaît ainsi que les travaux d'isolation menés dans le cadre de cette simulation sont d'envergure faible à moyenne. On peut noter que les économies d'énergie obtenues dans les maisons et les appartements chauffés collectivement sont deux fois moindres que celles réalisées en moyenne dans les immeubles dotés de systèmes de chauffage individuels (Tableau 4.1).

Tableau 4.1- Evolution du besoin d'énergie utile par catégorie de logements

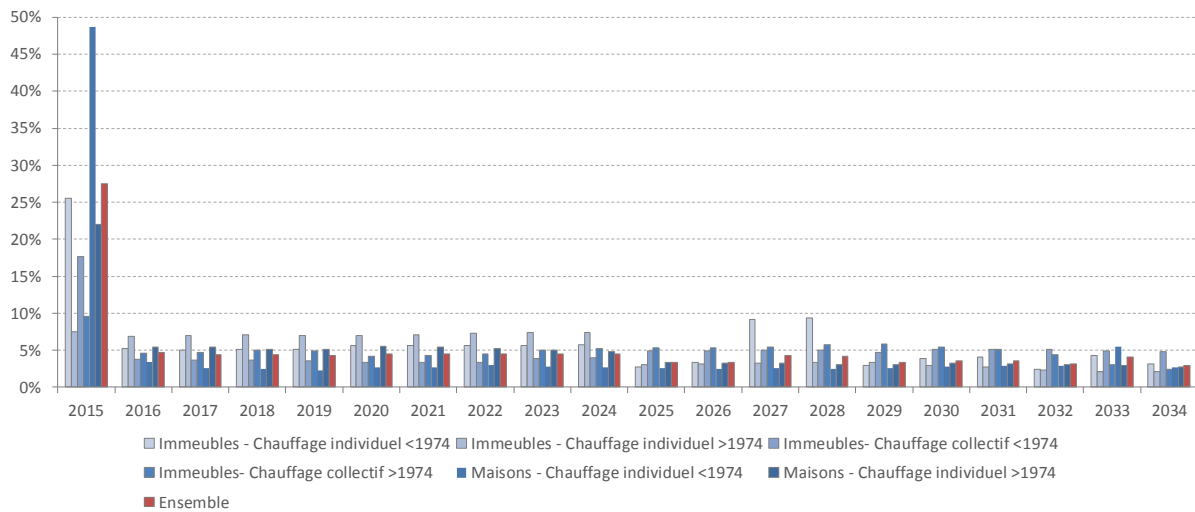
Catégorie de logements	Période de construction	2015	2025	2035	Variations
Immeubles- Chauffage individuel	<1974	177	131	108	-38,9 %
	>1974	76	76	76	0,0 %
Immeubles- Chauffage collectif	<1974	168	160	138	-17,9 %
	>1974	80	80	80	0,0 %
Maisons	<1974	201	171	151	-24,9 %
	>1974	126	126	126	0,0 %
Total	<1974	191	162	141	-26,2 %
	>1974	114	114	114	0,0 %
Immeubles- Chauffage individuel	Total	135,7	108,5	95,0	-30,0 %
Immeubles- Chauffage collectif	Total	138,2	133,3	118,4	-14,4 %
Maisons	Total	163,1	148,6	138,5	-15,1 %
Total	Total	155	140	128	-17,2 %

Source : résultats de la simulation BAU

2) Evolution du parc de systèmes de chauffage entre 2015 et 2035

Parallèlement à la mise en œuvre des travaux d'isolation, le parc de systèmes de chauffage évolue au cours de la période simulée. Le remplacement d'un système de chauffage peut intervenir pour deux raisons. Il peut résulter soit du renouvellement d'un système lorsqu'il arrive à la fin de sa durée de vie, soit du remplacement d'une technologie de chauffage par une autre, plus adaptée au profil de consommation de chauffage du logement et permettant de minimiser le coût global de chauffage. Comme précisé précédemment, dans ce dernier cas, plus l'écart de compétitivité est important entre le système installé et l'option de substitution, plus la technologie initiale sera remplacée prématurément. Contrairement aux rénovations énergétiques, aucun plafond annuel n'est fixé quant aux changements de technologies de production de chaleur. Cette absence de limitation aboutit à un nombre important de remplacements de systèmes la première année (Figure 4.6).

Figure 4.6- Taux de remplacement annuel des systèmes de chauffage par catégorie de logements et période de construction

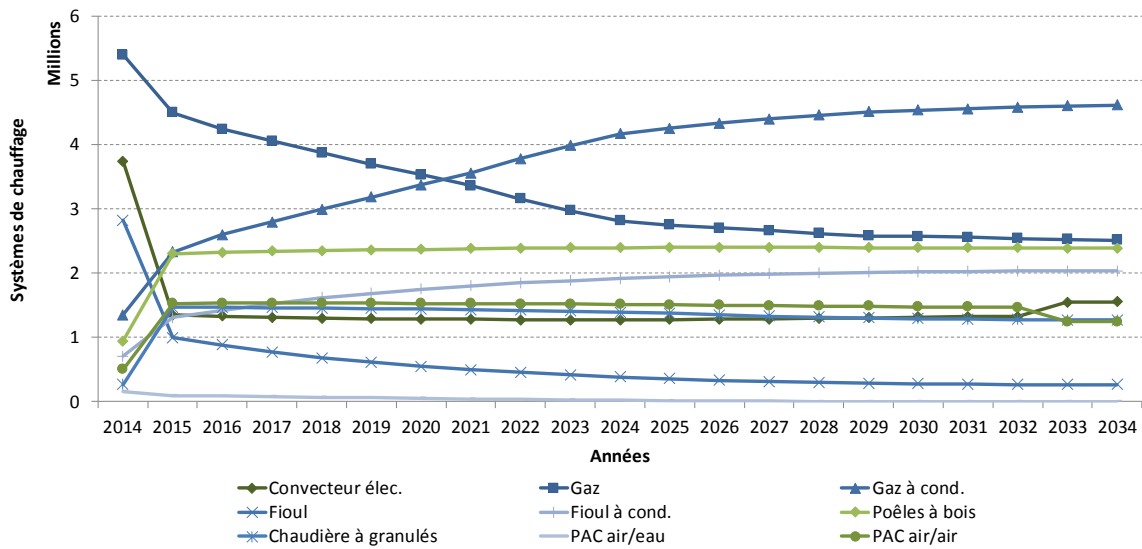


Source : résultats de la simulation BAU

Un réajustement des systèmes de chauffage en fonction des consommations de chauffage des logements s’opère en 2015 : un peu plus d’un quart des systèmes de chauffage est remplacé la première année. Le taux de remplacement lors de cette année de réajustement diffère fortement en fonction de la catégorie de logements, de la période de construction et des technologies de substitution. Ainsi, dans la mesure où l’écart de compétitivité entre technologies est plus faible pour des besoins de chauffage réduits ou modérés, on observe un taux de remplacement inférieur à la moyenne pour les logements les plus récents d’une part, et pour les habitations collectives d’autre part. De même, les technologies de chauffage collectives ayant des structures de coûts plus proches que les systèmes individuels, on note un taux de remplacement relativement faible dans le cas des immeubles chauffés collectivement. A l’inverse, près de 50 % des logements individuels datant d’avant 1974 font l’objet d’un remplacement de système dès la première année.

Comme étudié dans le chapitre précédent, la nature des technologies de substitution dépend de la consommation de chauffage des logements et varie donc fortement en fonction de la catégorie de logements. La Figure 4.7 présente l’évolution des technologies de chauffage équipant les logements individuels dans le cadre des projections BAU.

Figure 4.7- Evolution des technologies de chauffage équipant les maisons entre 2015 et 2035⁶⁹



Source : résultats de la simulation BAU

Les résultats obtenus révèlent certaines tendances globales. Au niveau des systèmes centralisés, on observe une réduction de l'utilisation des chaudières classiques au profit des systèmes à hauts rendements. Les chaudières à gaz perdent progressivement du terrain au profit des chaudières gaz à condensation, tandis que nombres de chaudières fioul sont remplacées par des chaudières fioul à condensation et des chaudières bois à granulés. En ce qui concerne les systèmes décentralisés, on assiste au déploiement de technologies décarbonées à travers un recul du recours aux convecteurs électriques au profit des poêles à bois et des pompes à chaleur air-air. Il convient de remarquer que la diversité des profils des maisons et la prise en compte de coûts d'investissement spécifiques conduisent à une projection en 2035 caractérisée par la coexistence de nombreux systèmes, seules les pompes à chaleur air-eau étant sorties du marché (Tableau 4.2).

⁶⁹ Afin de faciliter la lecture, les systèmes décentralisés sont représentés par des courbes vertes, les systèmes centralisés par des courbes bleus.

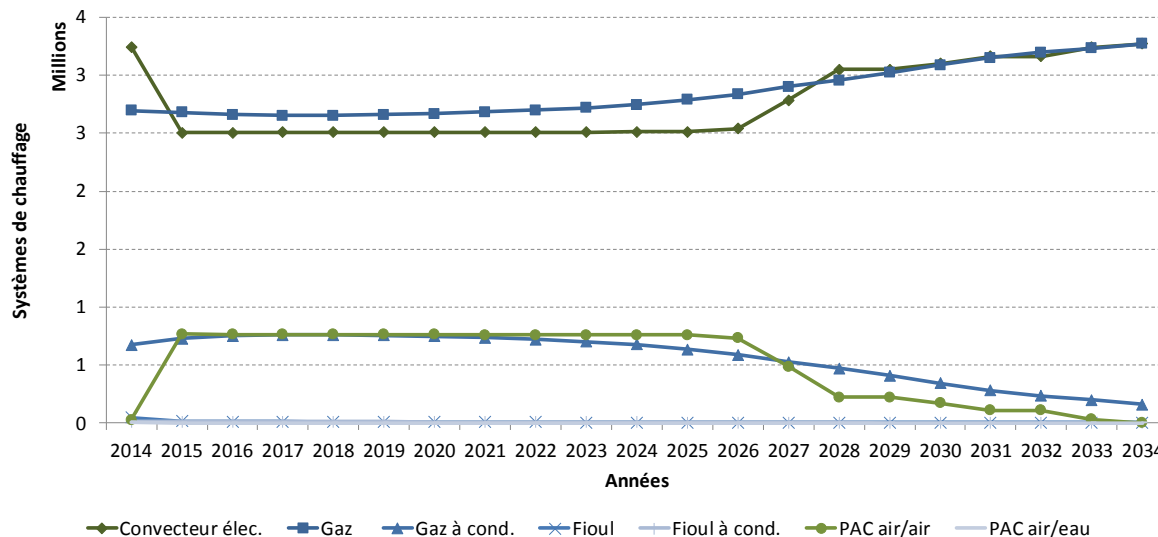
Tableau 4.2- Parts de marché des technologies de chauffage équipant les logements individuels

Technologies	2015	2025	2035
Systèmes décentralisés			
Convecteur élec.	72 %	25 %	30 %
Poêles à bois	18 %	46 %	46 %
PAC air/air	10 %	29 %	24 %
Systèmes centralisés			
Gaz	50 %	26 %	23 %
Gaz à condensation	13 %	39 %	43 %
Fioul	26 %	4 %	2 %
Fioul à condensation	7 %	18 %	19 %
PAC air/eau	1 %	0 %	0 %
Chaudière à granulés	3 %	13 %	12 %

Source : résultats de la simulation BAU

Cette diversité des technologies coûts-efficaces est moins prégnante dans le cas des immeubles chauffés individuellement (Figure 4.8). Les technologies bois ne sont pas disponibles, et les chaudières au fioul et les PAC air-eau, initialement déjà peu nombreuses, sortent rapidement du marché. Seules quatre technologies, deux centralisées et deux décentralisées, produisent la quasi-totalité de la chaleur sur la période.

Figure 4.8- Evolution des technologies de chauffage équipant les immeubles chauffés individuellement entre 2015 et 2035⁷⁰



Source : résultats de la simulation BAU

⁷⁰ Les résultats concernant les immeubles chauffés collectivement sont disponibles en annexe 4.1.

L'évolution du recours à ces différentes technologies permet de souligner les interactions entre les dynamiques de rénovations énergétiques et de remplacements des systèmes de chauffage. En effet, en début de période, une partie des technologies classiques (chaudières à gaz et convecteurs électriques) est remplacée par des systèmes efficaces et/ou renouvelables (chaudières gaz à condensation et pompes à chaleur air-air). Puis dans un second temps, sous l'effet progressif du déploiement des travaux d'isolation au sein du parc de logements, on assiste à un renversement de la dynamique d'évolution des parts des différentes technologies : la part des convecteurs électriques et des chaudières gaz classiques augmente au détriment des systèmes performants et retrouve un niveau égal ou plus important qu'en début de période (Tableau 4.3).

Tableau 4.3- Parts de marché des technologies de chauffage équipant les logements individuels

Technologies	2015	2025	2035
Systèmes décentralisés			
Convecteur élec.	99 %	77 %	100 %
PAC air-air	1 %	23 %	0 %
Systèmes centralisés			
Gaz	79 %	80 %	95 %
Gaz à condensation	20 %	20 %	5 %
Fioul	1 %	0 %	0 %
Fioul à condensation	0 %	0 %	0 %
PAC air/eau	0 %	0 %	0 %

Source : résultats de la simulation BAU

4.3.2- Evolution des facteurs d'efficacité, des facteurs de substitution et des émissions de CO₂ entre 2015 et 2035

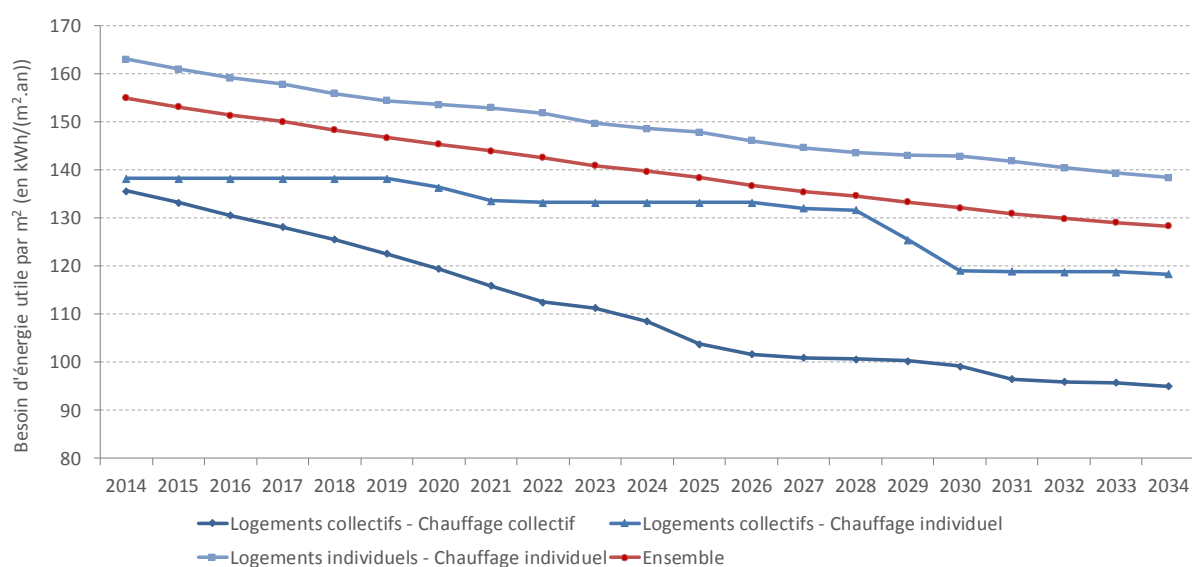
De la mise en œuvre des travaux d'isolation et des remplacements des systèmes de chauffage, opérés tout au long de la période simulée, résulte une modification des différents facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques. En effet, les différents investissements affectent progressivement l'évolution des besoins de chauffage, des consommations d'énergie finale et du mix énergétique mobilisé. Dans ce chapitre, deux facteurs d'efficacité et deux facteurs de substitution seront dissociés :

- Le facteur d'efficacité de l'enveloppe thermique, notée EE, défini par le rapport du besoin d'énergie utile (en kWh/(m².an)) à la surface de logement chauffée (en m²).
- Le facteur d'efficacité des systèmes, notée ES, correspondant au rapport de la consommation d'énergie finale au besoin d'énergie utile.
- Le facteur de pénétration des renouvelables, notée RE, mesuré par la consommation d'énergie renouvelable ramenée à la consommation d'énergie finale totale.

- Le facteur d'évolution du mix énergétique non renouvelable, noté ME, déterminé par la part de la consommation de chaque énergie non renouvelable dans le total de la consommation d'énergie finale non renouvelable.

Le facteur d'efficacité de l'enveloppe renvoie directement à l'évolution des performances d'isolation thermique des différents types de logements. L'efficacité de l'enveloppe s'améliore donc progressivement à mesure que les travaux d'isolation sont mis œuvre (Figure 4.9)

Figure 4.9- Evolution de l'efficacité moyenne des bâtiments par catégorie de logements entre 2015 et 2035



Source : résultats de la simulation BAU

L'amélioration totale de ce facteur par catégorie de logements et période de construction a déjà été présentée en Tableau 4.1 afin d'illustrer l'ampleur des travaux d'isolation menés dans les différentes catégories d'habitations.

Les trois autres facteurs découlent de l'évolution du parc de systèmes de chauffage. Le Tableau 4.4 présente l'évolution du facteur d'efficacité de production par catégorie de logements et période de construction.

Tableau 4.4- Evolution de l'efficacité globale moyenne des systèmes par catégorie de logements et période de construction

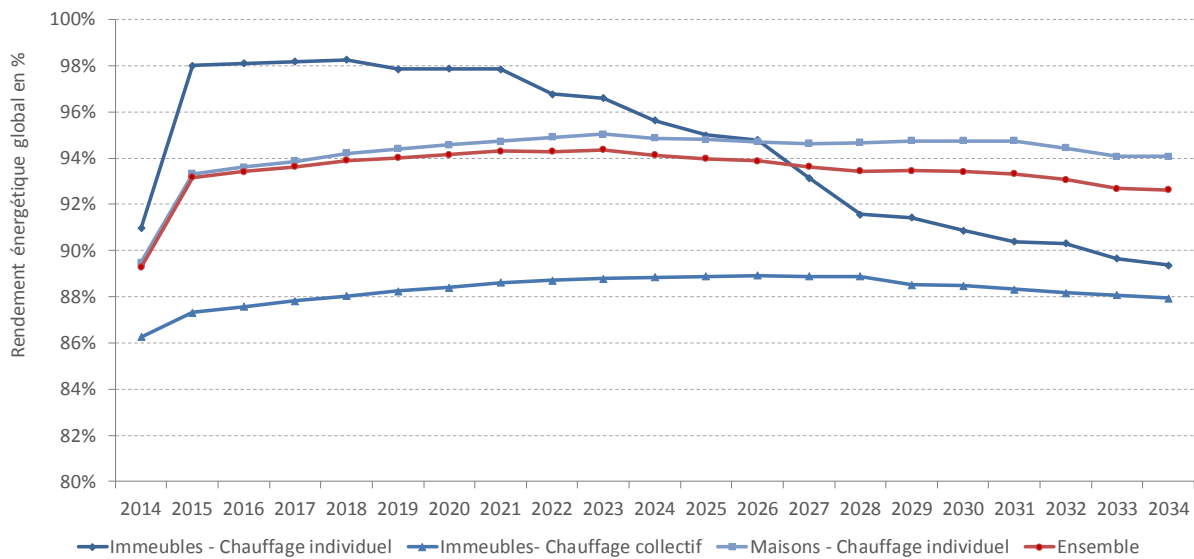
Catégorie de logements	Période de construction	2015	2025	2035	Variations
Immeubles- Chauffage individuel	<1974	91 %	98 %	89 %	-2,0 %
	>1974	92 %	91 %	90 %	-1,7 %
Immeubles- Chauffage collectif	<1974	86 %	90 %	90 %	4,0 %
	>1974	87 %	86 %	83 %	-4,6 %
Maisons	<1974	89 %	98 %	96 %	9,0 %
	>1974	91 %	92 %	91 %	0,5 %
Total	<1974	88 %	96 %	94 %	6,3 %
	>1974	91 %	91 %	91 %	-0,1 %
Immeubles- Chauffage individuel	Total	91 %	96 %	89 %	-1,7 %
Immeubles- Chauffage collectif	Total	86 %	89 %	88 %	1,9 %
Maisons	Total	89 %	95 %	94 %	5,1 %
Total	Total	89 %	94 %	93 %	3,8 %

Source : résultats de la simulation BAU

Dans le cadre des projections BAU, on observe une légère amélioration de l'efficacité de production sur la période : le rendement énergétique moyen passe de 89 % à 93 % soit une amélioration d'environ 4 %. Ces gains d'efficacité ne se répartissent pas de manière uniforme au sein des différents segments du parc de logements. Ils sont pour la quasi-totalité générés dans les logements datant d'avant 1974 (+6,3 % pour ces seuls logements). Au sein de cet ensemble, l'amélioration de l'efficacité de production est tirée à la hausse par les maisons (+9 %) et dans une moindre mesure par les immeubles pourvus de systèmes de chauffage collectifs (+4 %) tandis que les immeubles chauffés individuellement voient leur rendement moyen se réduire sur la période (-2 %). A l'inverse, il apparaît que l'efficacité des systèmes associés aux logements plus récents tend à stagner ou à diminuer (-0,1 %). Cette évolution disparate des gains reflète la relation entre compétitivité des systèmes efficaces et consommation de chauffage des logements.

Par ailleurs, cette relation trouve aussi son illustration dans l'évolution des rendements au cours de la période (Figure 4.10)

Figure 4.10- Evolution de l'efficacité moyenne des systèmes par catégorie de logements entre 2015 et 2035



Source : résultats de la simulation BAU

Entre 2015 et 2025, les rendements énergétiques moyens augmentent significativement pour chaque catégorie de logements avant de décroître de manière plus ou moins marquée lors de la décennie suivante. Ainsi, partant d'un niveau initial de 91 % en 2015, le rendement moyen des systèmes individuels équipant les appartements passe à 96 % en 2025 avant de retomber à 89 % en fin de période. Cette évolution dans le temps de l'efficacité de production reflète l'expansion puis le retrait progressif des technologies efficaces (et notamment des PAC air-air au sein des appartements) à mesure que les travaux d'isolation sont mis en œuvre.

Cette amélioration du rendement global des systèmes s'accompagne d'un accroissement du recours aux renouvelables⁷¹. La part d'ENR dans la consommation finale du parc résidentiel passe ainsi de 4,6 % à 16,2 % sur la période. Ce déploiement des renouvelables s'effectue quasi uniquement au sein des logements individuels pour lesquels la consommation d'ENR représente 22 % de l'énergie finale mobilisée. Fait notable, le recours aux renouvelables s'opère aussi bien dans les maisons anciennes que dans les plus récentes (notamment grâce à l'association des poêles à bois avec des convecteurs électriques dans le cas des systèmes décentralisés). On notera encore ici l'existence de deux dynamiques inverses dans la mesure

⁷¹ Dans le cadre de ces travaux, seule la consommation de bois est comptabilisée comme de la consommation d'ENR.

où la part des renouvelables dans chaque catégorie de logements décroît après une hausse rapide sous l'effet de l'amélioration de l'isolation des habitations (Tableau 4.5).

Tableau 4.5- Evolution du taux de renouvelables dans la consommation d'énergie finale par catégorie de logements et période de construction

Catégorie de logements	Période de construction	2015	2025	2035
Immeubles- Chauffage individuel	<1974	0 %	0 %	0 %
	>1974	0 %	0 %	0 %
Immeubles- Chauffage collectif	<1974	1,7 %	1,6 %	0,4 %
	>1974	4,7 %	1,1 %	0,0 %
Maisons	<1974	5,4 %	31,4 %	30,2 %
	>1974	6,8 %	13,7 %	13,0 %
Total	<1974	3,9 %	21,2 %	20,2 %
	>1974	5,9 %	11,4 %	10,7 %
Immeubles- Chauffage individuel	Total	0 %	0 %	0 %
Immeubles- Chauffage collectif	Total	2,3 %	1,5 %	0,3 %
Maisons	Total	5,9 %	23,5 %	22,0 %
Total	Total	4,6 %	17,3 %	16,2 %

Source : résultats de la simulation BAU

Enfin, la simulation BAU aboutit également à une amélioration du contenu carbone des consommations d'énergie non renouvelables à l'échelle du parc résidentiel. Celui-ci décroît de 2,4 % sur la période. L'évolution de ce facteur est très différenciée selon la catégorie de logements considérée et l'ancienneté de l'habitation (Tableau 4.6). Cette légère réduction du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable résulte de gains obtenus dans les immeubles chauffés collectivement (-3,9 %) et dans les logements individuels d'avant 1974 (-4,1 %).

Tableau 4.6- Evolution du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable par catégorie de logements et période de construction (en $qrCO_2/kWh$)

Catégorie de logements	Période de construction	2015	2025	2035	Variations
Immeubles- Chauffage individuel	<1974	196	199	197	0,3 %
	>1974	193	193	193	0,0 %
Immeubles- Chauffage collectif	<1974	214	206	206	-4,0 %
	>1974	214	207	206	-3,6 %
Maisons	<1974	224	215	215	-4,1 %
	>1974	212	213	213	0,6 %
Total	<1974	217	210	209	-3,7 %
	>1974	210	210	210	0,1 %
Immeubles- Chauffage individuel	Total	195	197	196	0,0 %
Immeubles- Chauffage collectif	Total	214	206	206	-3,9 %
Maisons	Total	219	214	214	-2,4 %
Total	Total	215	210	210	-2,4 %

Source : résultats de la simulation BAU

Dans le cadre de la simulation BAU, on observe donc une amélioration des différents facteurs d'efficacité et de substitution à l'échelle du parc résidentiel. L'apport cumulé de ces gains se traduit par une réduction globale des émissions de CO₂ de 31,6 %

A l'image de l'évolution des différents facteurs en fonction de la catégorie et de la période de construction de logements, les réductions d'émissions sont réparties inégalement au sein des différents segments du parc de logements (Tableau 4.7). La majeure partie des abattements est réalisée au sein des logements individuels. Les émissions de CO₂ de cette catégorie d'habitations diminuent de plus d'un tiers entre 2005 et 2035, et de près de 45 % pour les maisons bâties avant la première réglementation thermique. D'importantes réductions sont aussi réalisées dans les logements collectifs : -28,7 % pour ceux chauffés individuellement et -17,7 % pour ceux recourant au chauffage collectif. En revanche, dans le cas de ces logements, les baisses d'émissions résultent de gains importants réalisés dans l'habitat ancien partiellement contrebalancés par un accroissement des émissions des logements plus récents.

Tableau 4.7- Evolution des émissions de CO₂ par catégorie de logements et période de construction

Catégorie de logements	Période de construction	2015	2025	2035	Variations
Immeubles- Chauffage individuel	<1974	10	7	6	-37,5 %
	>1974	3	3	3	1,8 %
Immeubles- Chauffage collectif	<1974	10	8	7	-23,2 %
	>1974	2	2	2	6,0 %
Maisons	<1974	41	22	20	-51,2 %
	>1974	24	23	23	-6,6 %
Total	<1974	61	38	34	-44,6 %
	>1974	29	28	28	-4,8 %
Immeubles- Chauffage individuel	Total	12	10	9	-28,7 %
Immeubles- Chauffage collectif	Total	12	11	10	-17,7 %
Maisons	Total	66	45	43	-34,7 %
Total	Total	90	65	62	-31,6 %

Source : résultats de la simulation BAU

4.3.3- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution aux réductions d'émissions de la simulation BAU

Si l'évolution des différents facteurs et des émissions de CO₂ dans le cadre de la simulation du scénario viennent d'être retracés sur la période 2015-2035, leur contribution aux abattements constatés reste à évaluer. Pour ce faire, une analyse de décomposition est menée sur les résultats de simulation à l'aide de la méthode LMDI. Sont considérés dans cette décomposition les quatre facteurs précédemment explicités à savoir : l'efficacité de l'enveloppe (*EE*), l'efficacité des systèmes (*ES*), la pénétration des renouvelables (*PM*) et le contenu carbone du mix énergétique non renouvelable (*EM*).

L'évolution des émissions de CO₂ peut donc s'exprimer ainsi :

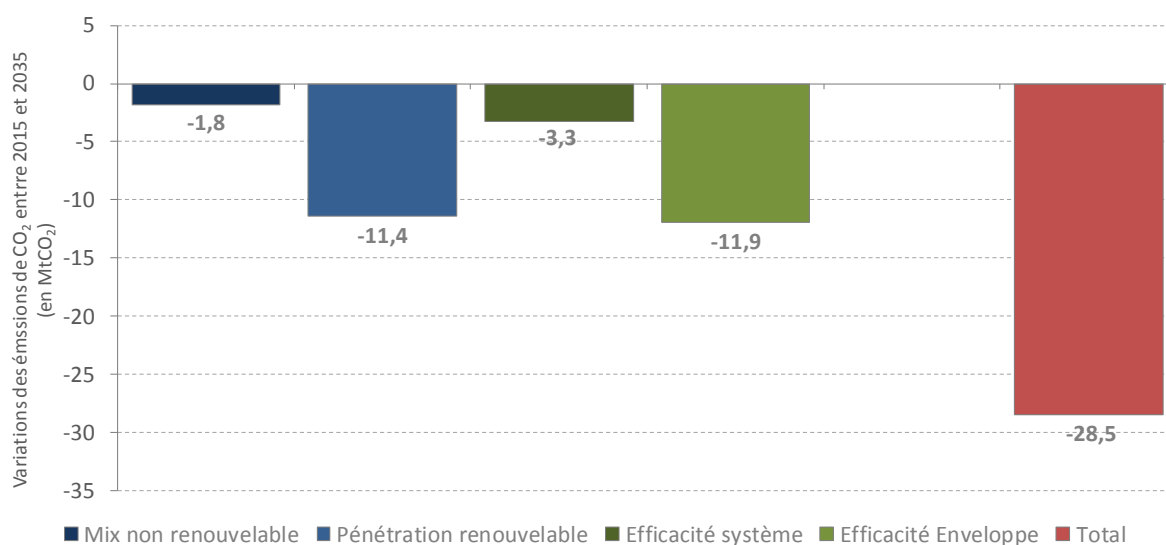
$$C = \sum_{i,j} \frac{C_{i,j}}{E_i} * \frac{E_i}{ET_i} * \frac{ET_i}{BEU_i} * \frac{BEU_i}{ACT_i} \quad (4.3)$$

D'où :

$$C = \sum_{i,j} EM_{i,j} \times PN_i \times ES_i \times EB_i \quad (4.4)$$

Aucun facteur d'activité n'est considéré ici dans la mesure où les simulations n'intègrent pas la construction de nouveaux logements sur la période. La surface totale à chauffer est donc constante sur la période. La méthode LMDI est utilisée sous sa forme additive et d'une manière analogue aux analyses menées dans le cadre du chapitre I. La Figure 4.11 présente les résultats de la décomposition menée à l'échelle du parc résidentiel sur la période 2015-2035.

Figure 4.11- Résultat de l'analyse de décomposition de l'évolution des émissions de CO₂ sur la période 2015-2035



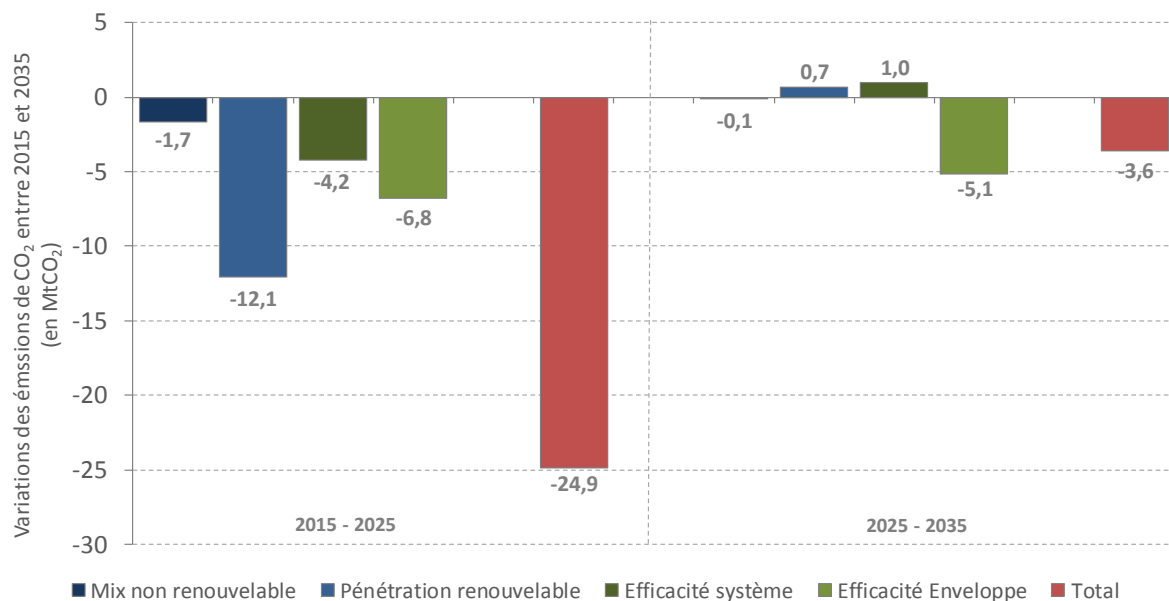
Source : résultats de la simulation BAU

La décomposition des émissions met en évidence la contribution de deux facteurs majeurs à la réduction des émissions de CO₂ : l'efficacité des bâtiments (-11,9 Mt CO₂) et la pénétration des renouvelables (-11,4 Mt CO₂). Ils expliquent ainsi près de 82 % des abattements réalisés entre 2015 et 2035. L'amélioration de l'efficacité des systèmes génère une réduction de 3,3 Mt CO₂ supplémentaire tandis que la modeste réduction du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable contribue à diminuer les émissions de 1,8 Mt CO₂. Pris dans leur ensemble, il apparaît donc que les facteurs d'efficacité sont à l'origine de 53 % des gains en

termes d'émissions contre 47 % pour les facteurs de substitution. Les abattements réalisés dans le cadre de la simulation BAU repose ainsi sur une contribution beaucoup plus équilibrée des deux grands types de facteurs que celles constatées dans le cadre de la décomposition des émissions de CO₂ issues du chauffage sur période 1990-2010.

S'intéresser à la contribution des différents facteurs sur les chacune des deux décennies simulées permet de mettre en exergue la dynamique des réductions d'émissions (Figure 4.12).

Figure 4.12- Résultat de l'analyse de décomposition de l'évolution des émissions de CO₂ sur les périodes 2015-2025 et 2025-2035

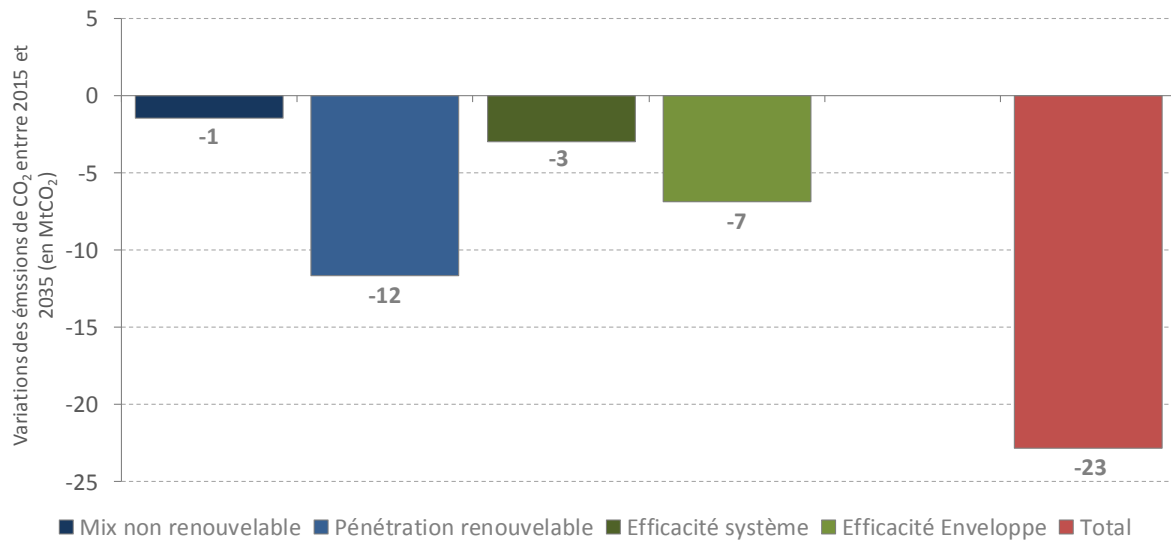


Source : résultats de la simulation BAU

On constate ainsi que plus de 85 % des réductions d'émissions sont opérés entre 2015 et 2025. Durant cette période, près de la moitié des abattements proviennent de l'augmentation de la consommation d'énergie renouvelable (-12,1 Mt CO₂). Viennent ensuite l'efficacité des bâtiments (-6,8 Mt CO₂), l'efficacité des systèmes (-4,2 Mt CO₂) et l'évolution du mix énergétique non renouvelable (-1,7 Mt CO₂). La baisse des émissions est beaucoup moins marquée lors de la décennie suivante (-3,6 Mt CO₂). Cette période se caractérise par la réalisation d'abattements d'émissions résultant de la poursuite de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments (-5,1 Mt CO₂) et par la détérioration ou la stagnation des facteurs de substitution et d'efficacité des systèmes (+1,7 Mt CO₂) traduisant un recul de l'utilisation des technologies de chauffage efficaces et/ou renouvelables.

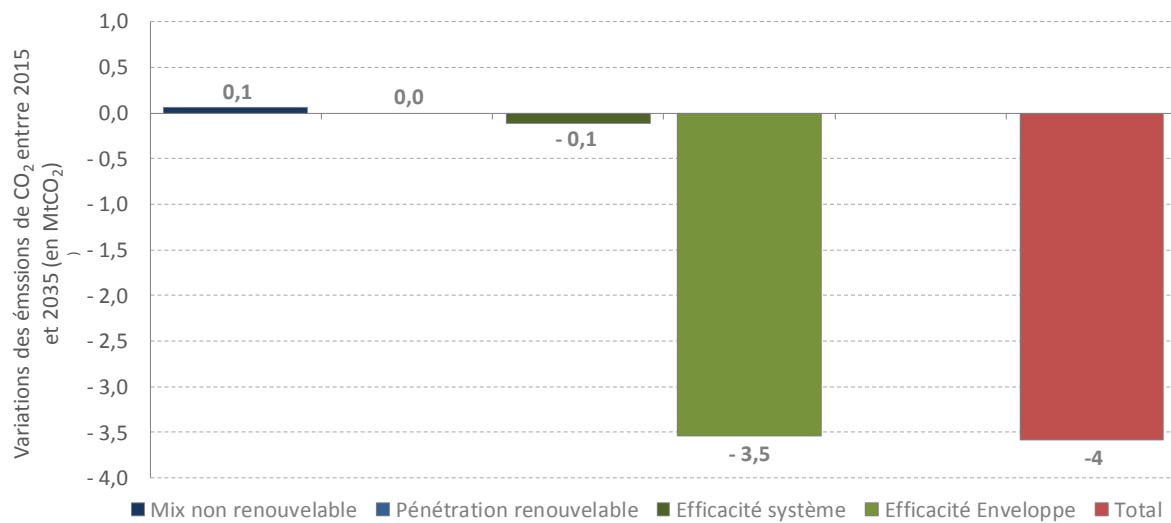
On constate également des contributions très différenciées des différents facteurs aux réductions d'émissions des différentes catégories de logements (Figure 4.13, 4.14 et 4.15).

Figure 4.13- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique aux réductions d'émissions de CO₂ dans le cas des logements individuels



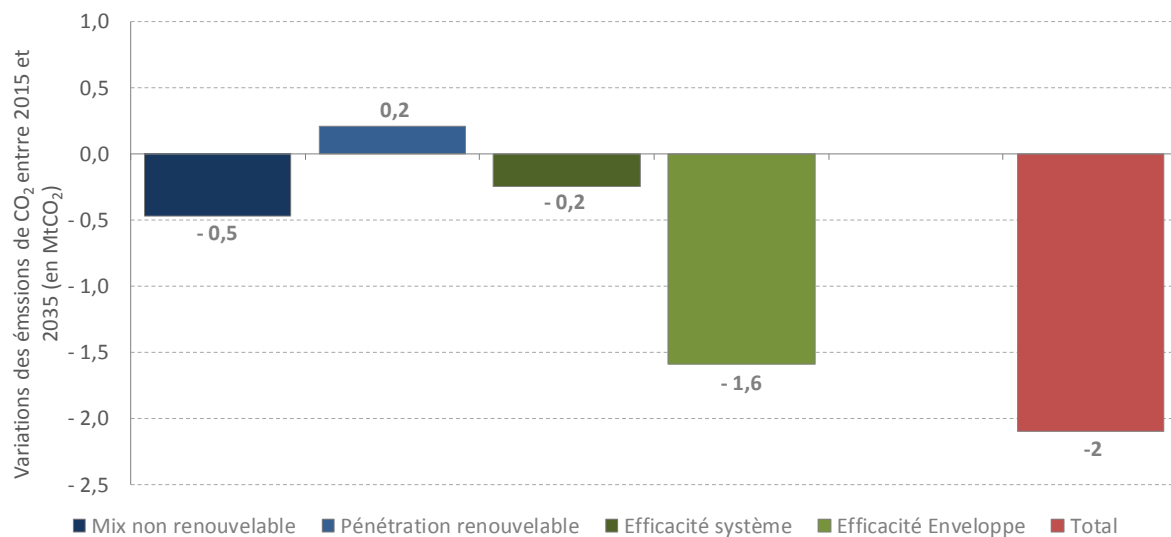
Source : résultats de la simulation BAU

Figure 4.14- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique aux réductions d'émissions de CO₂ dans le cas des logements collectifs chauffés individuellement



Source : résultats de la simulation BAU

Figure 4.15- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques aux réductions d'émissions de CO₂ dans le cas des logements collectifs chauffés individuellement



Source : résultats de la simulation BAU

Ainsi, l'analyse de décomposition souligne le rôle prépondérant de l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe thermique dans le cadre des réductions d'émissions constatées dans l'habitat collectif. Les émissions des immeubles chauffés collectivement déclinent principalement grâce à l'isolation et dans une moindre mesure *via* la réduction du contenu carbone du mix non renouvelable et l'accroissement de l'efficacité de production. Les abattements d'émissions au sein des appartements dotés de systèmes de chauffage individuels s'expliquent quant à eux presque uniquement par le renforcement de leur enveloppe thermique. Enfin, les abattements importants constatés dans les logements individuels sont principalement réalisés grâce à la diffusion des systèmes renouvelables.

4.4) Objectif de réduction d'émissions à l'horizon 2035 et contribution des facteurs d'efficacité et de substitution

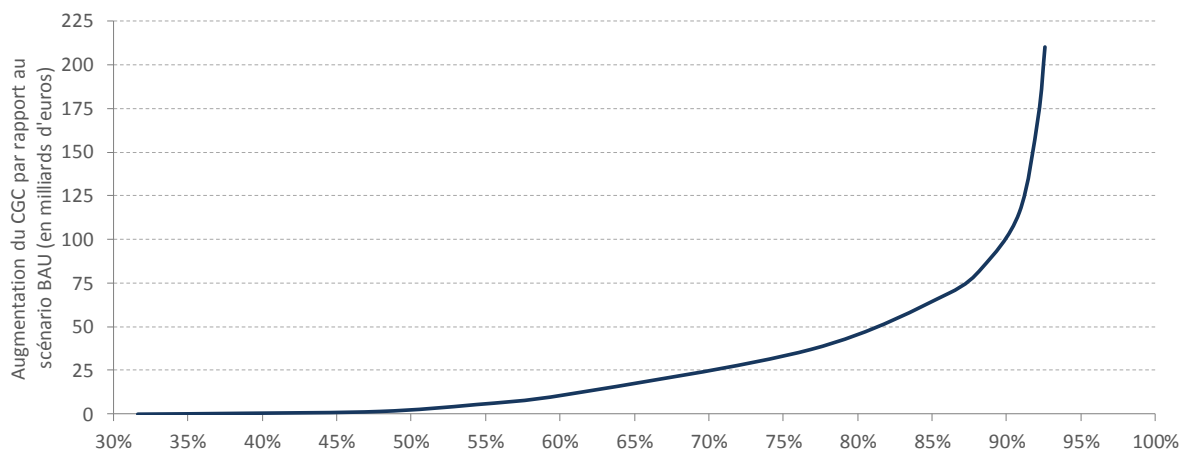
La simulation BAU, résultant de la minimisation annuelle du coût global de chauffage de l'ensemble des logements-types, débouche sur une réduction des émissions de 31,6 Mt CO₂ en 2035 par rapport à 2015. Cette section s'intéresse désormais aux investissements permettant d'atteindre des niveaux d'abattement supérieurs à moindre coût, à l'évolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique en découlant et à leur contribution respective aux réductions d'émissions de CO₂.

4.4.1- Accroissement des réductions d'émissions de CO₂ et minimisation du coût

La détermination des investissements permettant d'atteindre des réductions d'émissions supérieures à celles de la simulation BAU repose sur l'introduction d'un prix du carbone dans la modélisation. A chaque scénario est associé un prix du carbone constant sur la période et s'appliquant à l'ensemble des vecteurs énergétiques. L'introduction de ce prix a pour effet d'augmenter le coût des énergies proportionnellement à leur contenu carbone et de déclencher des investissements de réduction d'émissions non rentables dans le cadre de la simulation BAU. Plus le prix du carbone appliqué est élevé, plus les réductions d'émissions sont importantes sur la période simulée. L'introduction de ce prix du carbone uniforme au cours du temps permet d'enclencher les mesures de réduction coûts-efficaces en rendant profitables les opérations dont le coût d'abattement est inférieur au prix du carbone. En procédant ainsi, on obtient des scénarios d'évolution du parc de logements et des systèmes de chauffage permettant de minimiser le coût d'atteinte d'objectifs de réduction d'émissions de plus en plus ambitieux. Grâce aux simulations générées, il devient alors possible d'étudier l'évolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique en fonction de la cible de réduction d'émissions à l'horizon 2035.

Dans ce cadre, différentes simulations impliquant des prix du carbone s'échelonnant de 0 à 6400 euros/tCO₂ sont implémentées. Les résultats obtenus permettent de déterminer les mesures à mettre en œuvre sur les différents segments du parc afin d'atteindre des objectifs de réductions d'émissions compris entre 31 % et 92 %. La Figure 4.16 présente la courbe de coût marginal d'abattement dérivée des résultats de simulations.

Figure 4.16- Courbes de coût marginal d'abattement issue des résultats de simulations



Source : résultats de la simulation BAU

Cette courbe représente l'augmentation du coût global de chauffage par rapport à la simulation en fonction de l'objectif de réduction d'émissions visé à l'échelle du parc

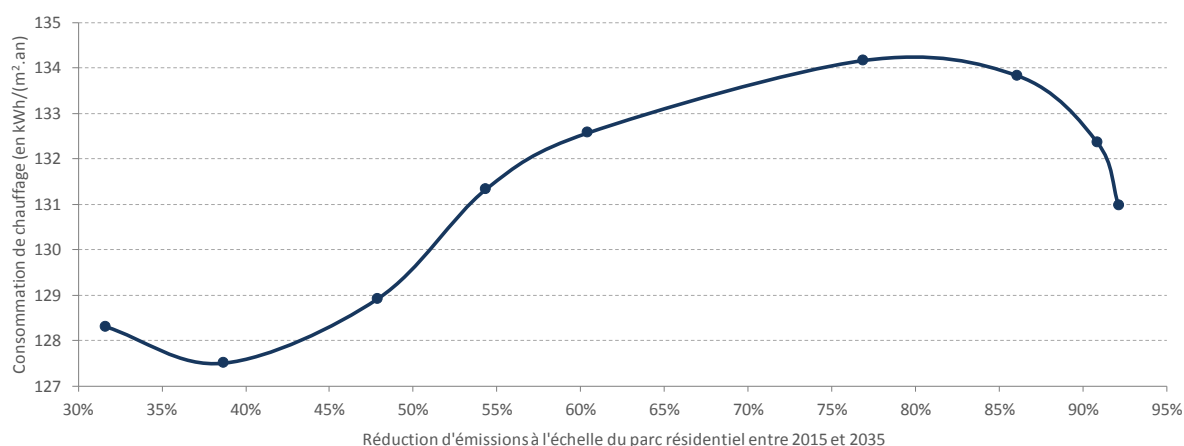
résidentiel. Il convient de noter que, dans la mesure où le prix du carbone ne vise qu'à déclencher les investissements, celui-ci est retranché du montant de la facture énergétique lors du calcul du CGC des différents scénarios. On observe que le coût marginal d'abattement est fortement convexe, reflétant la mobilisation progressive de mesures de plus en plus coûteuse.

4.4.2- Evolution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et objectifs de réduction d'émissions en 2035

1) Efficacité de l'enveloppe

La Figure 4.17 présente l'évolution de l'efficacité moyenne de l'enveloppe thermique en fonction des réductions d'émission réalisées en 2035 au niveau national.

Figure 4.17- Besoin d'énergie utile moyen en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂

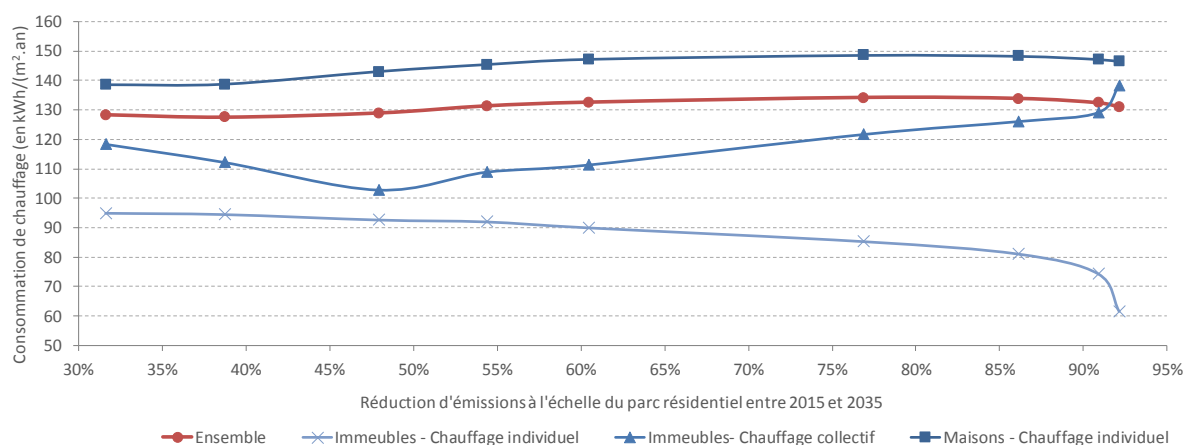


Source : résultats de la simulation BAU

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de ces résultats. On constate d'abord qu'atteindre des objectifs ambitieux de réduction d'émissions de CO₂ à moindre coût n'implique pas l'amélioration des performances thermiques des habitations beaucoup plus fortement que dans la simulation BAU. Au contraire, si le niveau d'isolation moyen des logements s'accroît légèrement sur l'intervalle -31 /-39 %, il décroît ensuite progressivement sur l'intervalle -39 /-80 % avant de remonter pour des niveaux d'abattement supérieurs, sans égaler pour autant les performances résultant de la projection BAU. Par ailleurs, si on observe des variations du niveau d'isolation, celles-ci sont de faible ampleur et correspondent à des niveaux de consommation de chauffage relativement élevés au regard des objectifs nationaux de performances énergétique du parc. Ainsi, quel que soit le niveau de réduction d'émissions, le besoin de chauffage moyen oscille entre 127 kWh/(m².an) et 134kWh/(m².an).

L'examen des résultats désagrégés révèle que cette progression de l'efficacité moyenne des bâtiments cache des évolutions très contrastées selon la catégorie de logements considérée (Figure 4.18).

Figure 4.18- Besoin d'énergie utile moyen en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ par catégorie de logements



Source : résultats de la simulation BAU

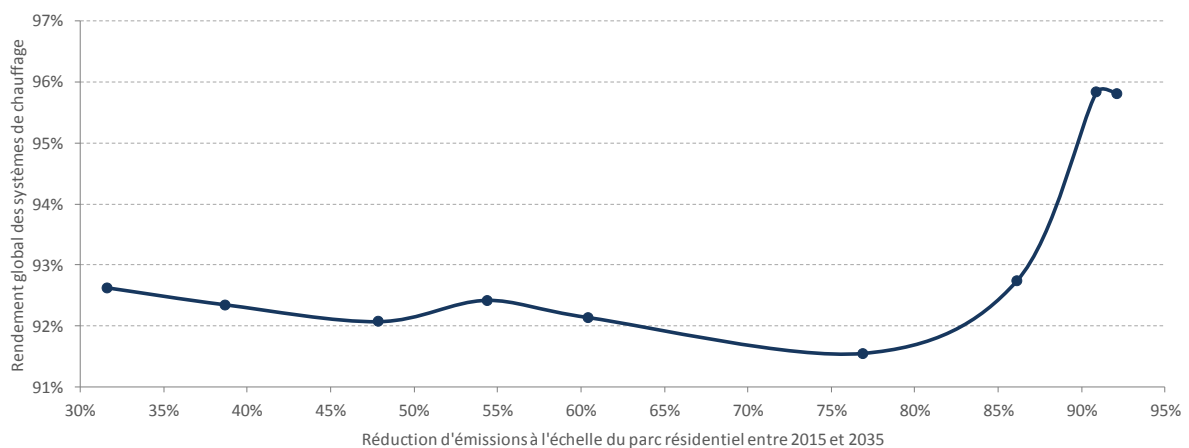
De 139 kWh/(m².an) dans la simulation BAU, le besoin de chauffage moyen du parc de logements individuels ne descend jamais en dessous de cette valeur, quel que soit l'objectif de réduction d'émissions visé en 2035. A l'inverse, il s'élève progressivement jusqu'à frôler les 150 kWh/(m².an) lorsque les abattements d'émissions sont poussés à 80 % à l'échelle du parc résidentiel, avant de diminuer très faiblement pour des objectifs encore plus ambitieux. La trajectoire de l'isolation moyenne des immeubles recourant au chauffage collectif est quant à elle marquée par un point d'inflexion. Elle s'améliore dans un premier temps, passant de 118 kWh/(m².an) dans la simulation BAU à 103 kWh/(m².an) dans le cadre d'une réduction générale des émissions de 48 %. Puis, au-delà de ce niveau d'abattement, l'efficacité moyenne de l'enveloppe se dégrade à mesure que les objectifs de décarbonation du parc augmentent. La consommation moyenne de chauffage atteint ainsi près de 140 kWh/(m².an) dans le scénario de réduction maximum des émissions de CO₂. Le cas des appartements chauffés individuellement contraste fortement avec les deux précédents. En effet, le niveau d'isolation moyen de ces logements ne fait que progresser avec les objectifs de réduction d'émissions. La relation entre amélioration de l'efficacité de l'enveloppe et accroissement des cibles de décarbonation est relativement stable. Seule exception notable, l'atteinte de la cible maximale de réduction d'émissions qui passe par une accélération de l'amélioration des performances des bâtiments débouchant sur une consommation moyenne de chauffage de 62 kWh/(m².an) pour ce type de logements.

Il apparaît donc clairement ici que dans un cadre de minimisation des coûts, la relation entre objectifs de réduction d'émissions de CO₂ et mise en œuvre des travaux d'isolation n'est pas triviale. Elle dépend notamment fortement de la catégorie de logements considérée, ce qui pourrait plaider pour l'établissement de stratégies de rénovation différenciées pour les différentes catégories de logements.

2) Efficacité des systèmes

Second levier de l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les logements, l'efficacité moyenne des systèmes varie significativement en fonction des ambitions de décarbonation du parc à l'horizon 2035 (Figure 4.19).

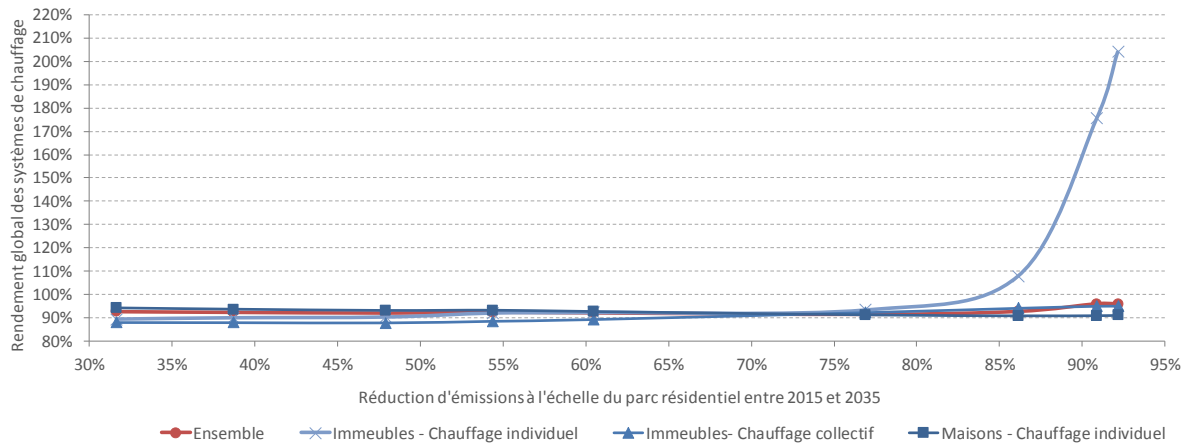
Figure 4.19- Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ par catégorie de logements



Source : résultats des simulations

Pour des réductions globales des émissions comprises entre 31 % et 80 %, les variations de l'efficacité moyenne de production à l'échelle du parc sont relativement modestes, les valeurs observées étant comprises entre 91 % et 93 %. Pour des objectifs d'abattement plus ambitieux en revanche, l'efficacité moyenne des systèmes est caractérisée par une nette progression l'amenant à plafonner à 96 % dans les scénarios de décarbonation les plus poussés. L'évolution atypique de l'efficacité des systèmes s'explique par l'existence de dynamiques divergentes au sein des différentes catégories de logements (Figure 4.20)

Figure 4.20- Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ par catégorie de logements⁷²



Source : résultats des simulations

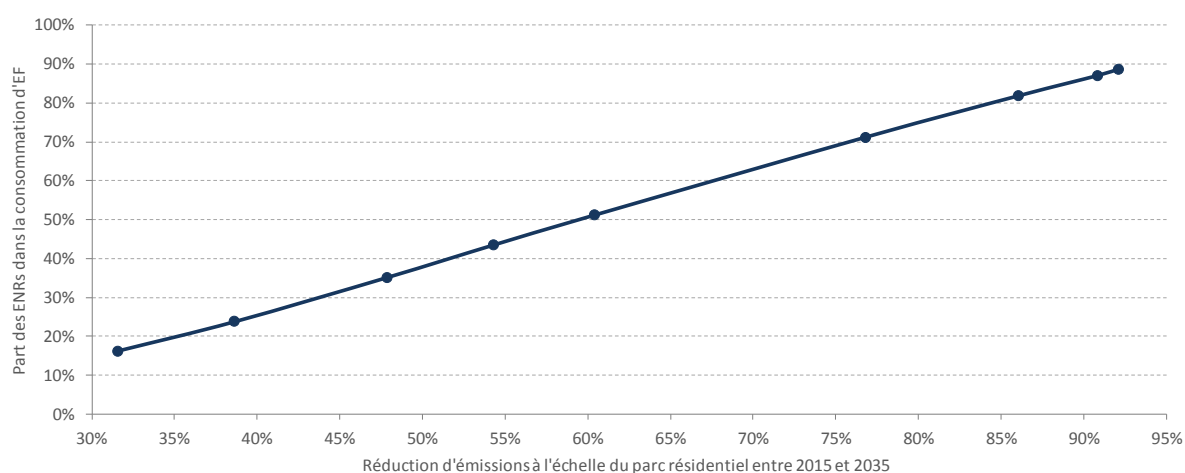
Au sein des logements chauffés collectivement, on observe deux phases d'évolution de l'efficacité des systèmes. Pour des réductions d'émissions au niveau du parc allant jusqu'à 48 %, l'efficacité de production évolue très peu par rapport à la simulation BAU, se maintenant autour de 88 %. Puis, pour des objectifs supérieurs, le rendement moyen s'accroît graduellement pour atteindre 95 %, soit le rendement des systèmes collectifs de chauffage les plus efficaces, dans les scénarios de décarbonation les plus ambitieux. A l'inverse, on note une diminution progressive de l'efficacité des systèmes équipant les maisons qui passe de 94 % à 91 % à mesure que les objectifs de réduction d'émissions deviennent plus ambitieux. Mais c'est au sein des appartements dotés de systèmes de chauffage individuels que l'efficacité de production varie le plus fortement en fonction du niveau de décarbonation du parc résidentiel. Si l'amélioration de l'efficacité des systèmes par rapport à la simulation BAU reste modérée tant que l'objectif de réduction d'émissions n'est pas supérieur à 80 %, le rendement moyen passant de 90 % à 94 %, elle devient très importante au-delà. Ainsi, le rendement moyen des systèmes atteint près de 210 % dans le scénario de décarbonation maximale. Ces gains massifs dans l'efficacité des systèmes s'expliquent par la nécessité de déployer très largement les différents types des pompes à chaleur dans le cadre des scénarios de réduction d'émissions de CO₂ les plus ambitieux.

⁷² Afin d'assurer une meilleure lisibilité des résultats concernant les maisons et les immeubles chauffés collectivement, un graphique similaire sans les appartements dotés systèmes de chauffage individuel est disponible en Annexe 4.3.

3) Pénétration des énergies renouvelables

Si les transformations du parc de systèmes de chauffage associées aux différents scénarios de réduction d'émissions impactent l'efficacité de production, elles affectent aussi les facteurs de substitution. La Figure 4.21 présente l'évolution de la part de l'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ du parc de logements.

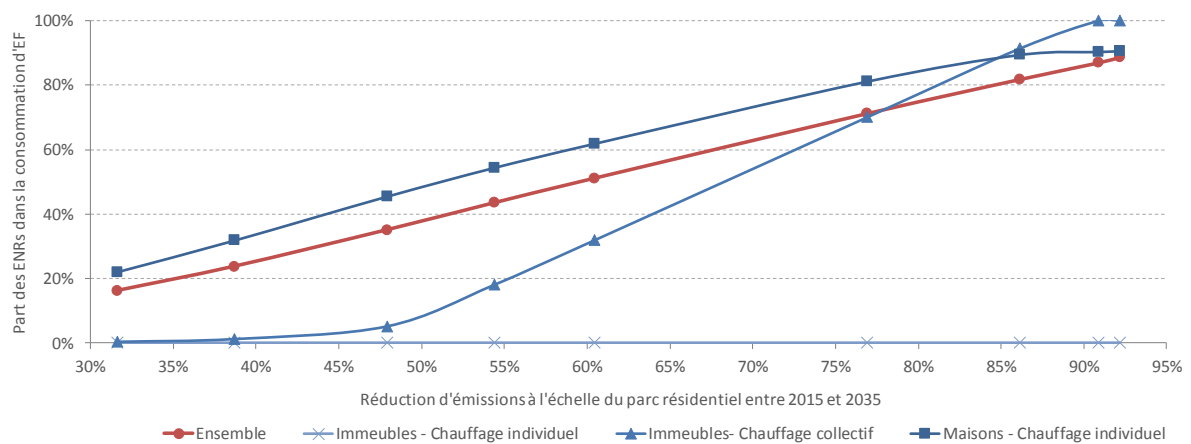
Figure 4.21- Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions



Source : résultats des simulations

Les résultats à l'échelle de l'ensemble du parc laissent apparaître une augmentation continue de la part des énergies renouvelables à mesure que les objectifs de réduction d'émissions de CO₂ s'accroissent. La relation entre poids des renouvelables et niveau de décarbonation est relativement stable. La pénétration des renouvelables, de 16 % dans le cadre de la simulation BAU, augmente donc progressivement jusqu'à atteindre 89 % dans les scénarios visant les objectifs d'abattement à l'échelle du résidentiel les plus ambitieux. L'évolution de ce poids moyen des renouvelables recouvre des réalités très contrastées en fonction des catégories de logements étudiées (Figure 4.22).

Figure 4.22- Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions par catégorie de logements



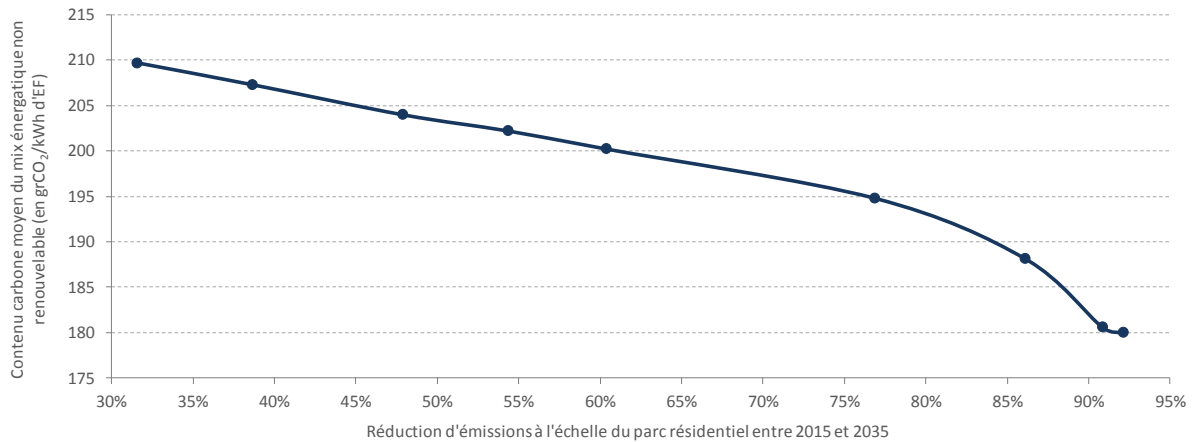
Source : résultats des simulations

Ainsi, conformément à l'absence de systèmes de chauffage individuels recourant au bois et aux modalités de comptabilisation des consommations d'énergie issues de pompes à chaleur dans ces travaux, le poids des renouvelables dans les immeubles chauffés individuellement est nul quel que soit l'objectif de réduction d'émissions de CO₂. Concernant les immeubles chauffés collectivement, la pénétration des renouvelables, nulle dans le cadre de la simulation BAU, augmente significativement lorsque le niveau de décarbonation du parc de logements dépasse les 50 %. A partir de ce seuil, on assiste à une forte augmentation de la part des renouvelables, aboutissant à une production de chaleur reposant intégralement sur le bois pour les objectifs de diminution des émissions les plus poussés. Enfin, on observe une augmentation continue de la part des renouvelables dans le mix énergétique mobilisé dans les logements individuels. Déjà supérieure à 20 % dans la projection BAU, la pénétration des renouvelables s'élève graduellement jusqu'à atteindre 90 %, les systèmes de chauffage décentralisés ne permettant pas de décarboner intégralement la production de chaleur.

4) Contenu carbone du mix énergétique non renouvelable

Fort logiquement, le mix énergétique non renouvelable, second facteur de substitution, évolue également fortement avec les transformations du parc résidentiel associées aux différents niveaux de diminution des émissions de CO₂ (Figure 4.23).

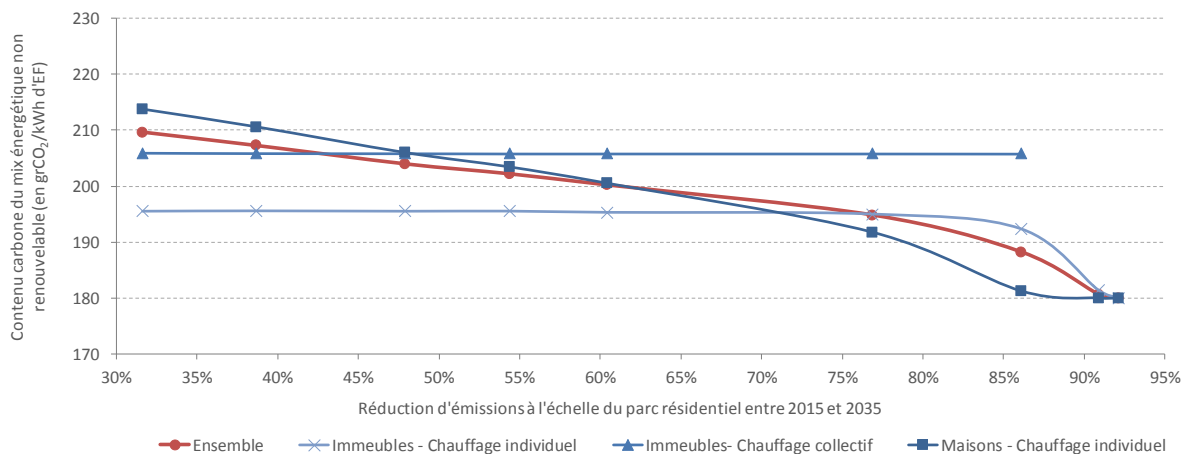
Figure 4.23- Contenu carbone moyen du mix énergétique non renouvelable à l'échelle du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émissions



Source : résultats des simulations

Le contenu carbone moyen des énergies non-renouvelables mobilisées décroît fortement avec l'augmentation des objectifs de décarbonation du parc résidentiel. De 210 grCO₂/kWh dans le cadre de la simulation BAU, il décroît petit à petit jusqu'à atteindre 180 grCO₂/kWh, soit le contenu carbone associé à l'électricité.

Figure 4.24- Contenu carbone moyen du mix énergétique non renouvelable à l'échelle du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émissions



Source : résultats des simulations

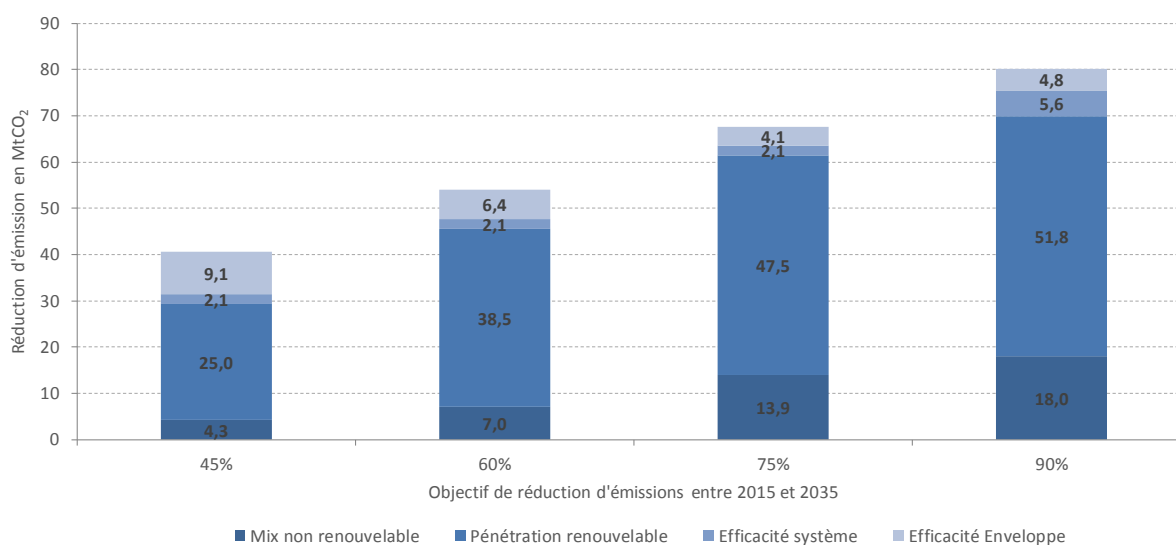
Cette amélioration du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable résulte du poids relatif des vecteurs énergétiques utilisés pour la production de chauffage dans les différentes catégories de logements. Le mix non renouvelable mobilisé pour la production de chaleur au sein des immeubles chauffés collectivement ne varie pas par rapport à la simulation BAU

puisqu'il correspond à l'emploi exclusif du gaz. Ce mix n'est plus représenté pour les plus hauts niveaux de décarbonation car l'intégralité de la consommation d'énergie est alors renouvelable pour cette catégorie d'habitation. Concernant les logements individuels, on observe une décroissance constante et progressive du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable : celui-ci, passe ainsi de 213 grCO₂/kWh à 180 grCO₂/kWh, illustrant l'élimination graduelle du fioul et du gaz à mesure que les objectifs d'abattement d'émissions augmentent. L'électricité devient également l'unique vecteur énergétique non renouvelable mobilisé au sein des appartements chauffés individuellement dans le cadre des scénarios de décarbonation maximale du parc résidentiel. Le recours au gaz est maintenu dans les mêmes proportions que dans la projection BAU pour des objectifs de réduction d'émissions allant jusqu'à 80 % mais s'effondre brutalement lorsque la décarbonation est poussée au-delà.

4.4.3- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution dans le cadre de quatre objectifs de réduction d'émissions

Si l'évolution des facteurs d'efficacité et de substitution en fonction de l'objectif de réduction d'émissions à l'horizon 2035 vient d'être étudiée, la contribution de chacun de ces facteurs à l'atteinte des objectifs reste à déterminer. Celle-ci est évaluée ici pour quatre cibles de décarbonation du parc de logements par rapport 2015 : -45 %, -60 %, -75 % et -90 %. Pour chacun de ces cas, la méthode de décomposition LMDI est utilisée de manière analogue à la section précédente et permet de mettre en exergue le rôle de chacun des facteurs dans l'atteinte des objectifs. La Figure 4.25 synthétise les résultats issus des différentes analyses de décomposition.

Figure 4.25- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution à l'atteinte de différents objectifs de réduction d'émissions en 2035 (en Mt CO₂)

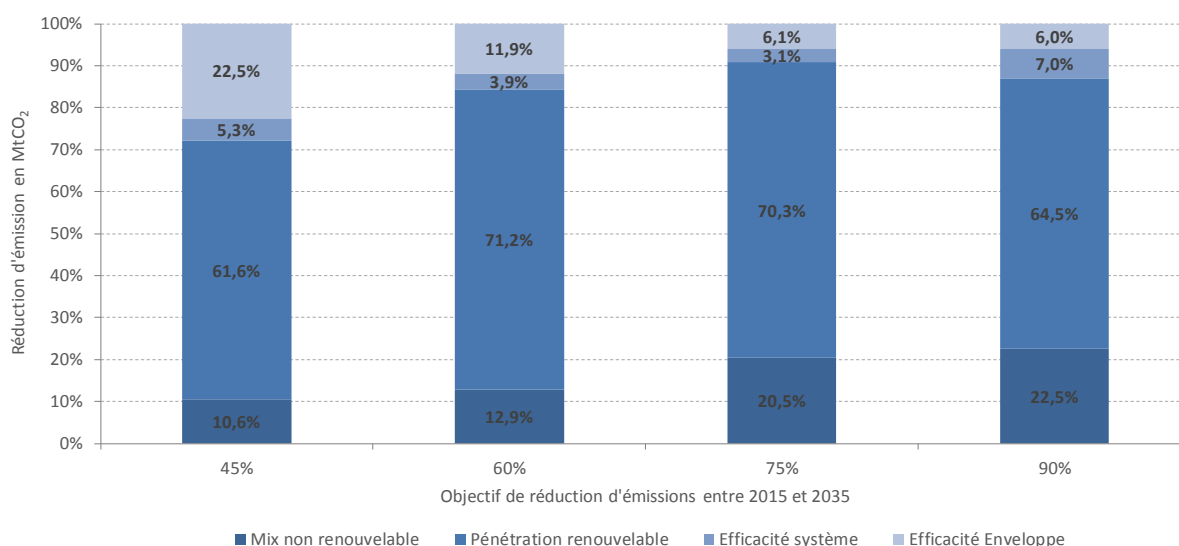


Source : résultats des simulations

Conformément à ce que les résultats portant sur l'évolution des différents facteurs laissent transparaître, les analyses de décomposition révèlent des contributions très variées des facteurs en fonction des réductions d'émission visées en 2035.

L'atteinte à moindre coût des cibles de réduction d'émissions conduit à une utilisation réduite de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et ce d'autant plus que l'objectif de décarbonation est élevé. Ainsi, si dans le cadre du scénario -45 %, le renforcement de l'efficacité des bâtiments conduit à une baisse des émissions de 9,1 Mt CO₂, la contribution de ce facteur n'est plus que 4,1 Mt CO₂ dans le scénario -75 % et de 4,8 Mt CO₂ dans le scénario -90 %. Bien que les réductions d'émissions attribuables à l'efficacité des bâtiments augmentent légèrement entre ces deux scénarios, notamment du fait de l'accroissement de l'isolation des appartements dotés de systèmes de chauffage individuels, la contribution en pourcentage des travaux d'isolation à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions se réduit lorsque ces derniers s'élèvent. (Figure 4.26).

Figure 4.26- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution à l'atteinte de différents objectifs de réduction d'émissions en 2035 (en pourcentage de l'objectif de décarbonation)



Source : résultats des simulations

De 41 % dans la simulation BAU, la contribution de l'efficacité de l'enveloppe passe à 22,5 % dans le scénario -45 %, 11,9 % dans le scénario -60 % et 6 % dans le scénario -90 %. Ces résultats suggèrent donc que la pertinence des travaux d'isolation comme solution coût-efficace d'abattement et leur place dans la stratégie de décarbonation du parc varient significativement en fonction de l'objectif final de réduction d'émissions visé. L'évolution des trois autres facteurs dépendant exclusivement des technologies de chauffage utilisées, il apparaît également que les mesures de remplacement des systèmes doivent prendre une place d'autant plus grande dans cette stratégie que ses ambitions sont élevées.

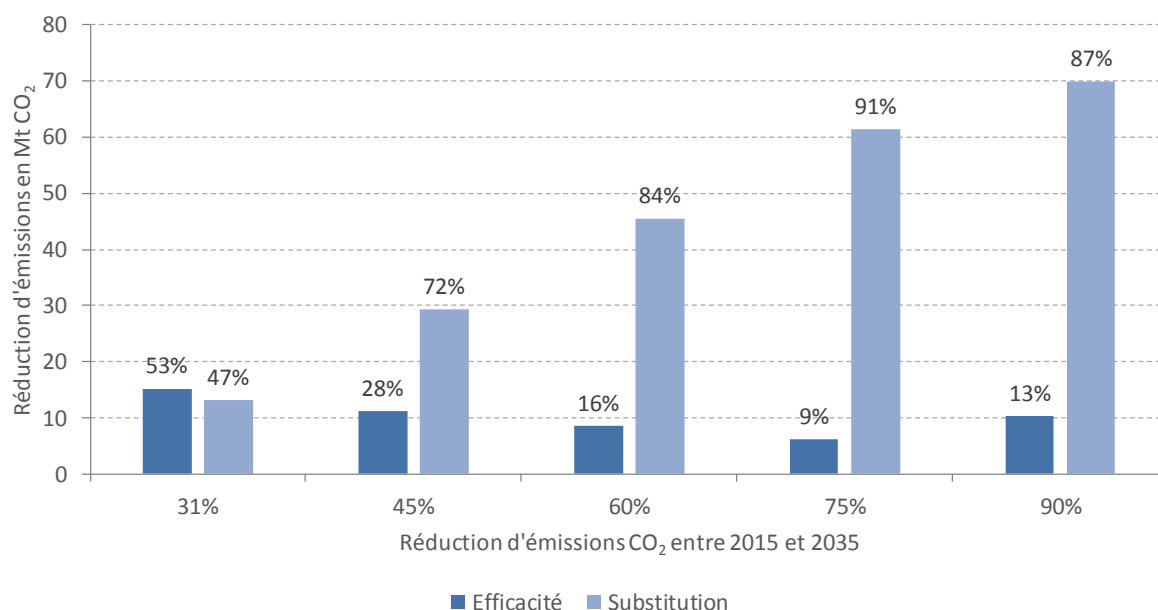
La contribution de l'efficacité des systèmes à la réduction des émissions fluctue en fonction des scénarios examinés. Dans le cadre des trois premiers niveaux de décarbonation, la baisse des émissions attribuables à ce facteur est modeste, environ 2,1 Mt CO₂ dans chacun des cas. En revanche cette contribution s'amplifie significativement dans le scénario -90 %. Grâce notamment au déploiement généralisé des pompes à chaleur dans l'habitat collectif, l'augmentation de l'efficacité moyenne des systèmes génère un abattement de 5,6 Mt CO₂, en faisant dans ce cadre le facteur d'efficacité contribuant le plus fortement à l'atteinte de l'objectif de réduction d'émissions.

A l'inverse de l'efficacité des enveloppes, les facteurs de substitution se voient attribuer un rôle de plus en plus prépondérant lorsque les niveaux de décarbonation s'élèvent. A la différence de ce qu'a révélé la projection BAU, la pénétration des renouvelables constitue le premier contributeur aux réductions d'émission réalisées dans les quatre scénarios étudiés ici. L'augmentation de la part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale concourt à réduire considérablement les émissions de CO₂ : de 25 Mt CO₂ dans le cadre du scénario 40 % à près de 52 Mt CO₂ pour le scénario de décarbonation le plus avancé. Quel que soit le scénario considéré, ce facteur participe à la réalisation de 60 % à 70 % de l'objectif final de réduction d'émissions de CO₂.

Concomitamment, si, mécaniquement, les modifications du mix énergétique non renouvelables ne permettent pas de générer des réductions d'émissions comparables à celles induites par le déploiement des énergies renouvelables, elles contribuent tout de même fortement à l'atteinte des différents objectifs de décarbonation. Le recul du fioul et du gaz au profit de l'électricité engendre des réductions d'émissions allant de 4,3 Mt CO₂ à 18 Mt CO₂ selon le scénario retenu.

In fine, les résultats des analyses de décomposition menées sur les résultats de simulation de quatre scénarios de décarbonation du parc résidentiel permettent de mettre en exergue des contributions très différenciées de l'efficacité et de la substitution énergétique. Contrairement aux analyses de décomposition menées en chapitre I sur les émissions sectorielles de la période 1990-2010 qui ont permis de souligner le rôle majeur de l'efficacité comme contributeur à la limitation des émissions de CO₂, la décomposition des émissions issues des différentes simulations met en évidence une prédominance de la substitution énergétique comme levier de réduction des émissions (Figure 4.27).

Figure 4.27- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions



Source : résultats des simulations

On constate que si le recours à l'efficacité énergétique peut constituer un vecteur majeur de réduction des émissions de CO₂ à moindre coût, ceci n'est le cas que dans le cadre d'objectifs de décarbonation modérés. Ainsi, plus les ambitions en termes de diminution des émissions sont importantes, plus la substitution énergétique s'impose comme le principal levier permettant d'atteindre les objectifs à moindre coût.

4.5) Sensibilité des résultats au plafond annuel de rénovation et à l'évolution du contenu carbone de l'électricité

Cette section propose de revenir sur deux hypothèses réalisées dans le cadre des simulations de la section 4.3 et 4.4 concernant la valeur du plafond annuel de rénovation et l'évolution du contenu carbone de l'électricité et d'explorer l'impact qu'auraient des valeurs alternatives sur les principaux résultats précédemment exposés.

4.5.1- Sensibilité au plafond annuel de rénovation

Dans le cadre des simulations précédentes, le plafond annuel de rénovation a été fixé à 500 000 logements afin de concorder avec l'objectif fixé par la LTECV (2015). Dans la mesure où ce plafond contraint, de fait, le nombre de logements pouvant faire l'objet d'une amélioration de leur enveloppe thermique, il pourrait influencer significativement sur les contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques à l'atteinte de

différentes cibles de réduction d'émissions. Afin d'appréhender l'effet de cette contrainte sur les contributions respectives des facteurs, deux nouveaux scénarios sont étudiés : l'un permettant d'isoler 200 000 logements annuellement, l'autre 800 000⁷³.

Les simulations BAU associées à ces deux nouveaux scénarios aboutissent à des réductions d'émissions significativement différentes de celles du scénario central. Les scénarios R2 et R8 débouchent sur des baisses respectives des émissions de 22,2 et 32,9 Mt CO₂ à mettre en perspective avec les 28,5 Mt CO₂ économisées dans le scénario principal (Tableau 4.8).

Tableau 4.8- Réductions d'émission et coût global de chauffage du parc résidentiel pour les différents scénarios

	Réductions d'émission en Mt CO ₂	Réductions d'émission en %	Coût global de chauffage total (en milliards d'euros)
Scénario R2	22,2	24,6 %	843
Scénario central	28,5	31,6 %	827
Scénario R8	32,9	36,5 %	817

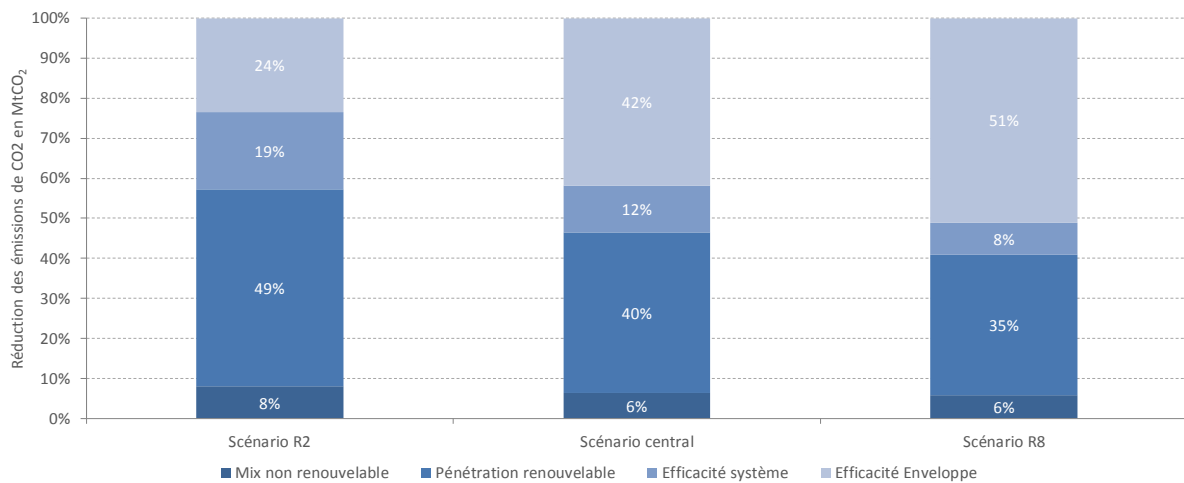
Source : résultats des simulations

Les réductions d'émissions sont d'autant plus importantes dans le cadre des simulations BAU que le plafond annuel de rénovation est élevé. De surcroît, il apparaît que le niveau de ce plafond impacte le coût global de chauffage du parc résidentiel sur la période. Le scénario R2 conduit ainsi à un CGC total supérieur de 2 % à celui du scénario central quand le scénario R8 permet une baisse de 1,2 %. En effet, en limitant le nombre de travaux d'isolation pouvant être menés sur la période, le plafond de rénovation entrave la mise en œuvre de certaines opérations coûts-efficaces, et mène au déploiement de mesures de second rang contribuant à renchérir le coût global de chauffage du parc de logements.

L'analyse de décomposition conduite sur les résultats des simulations BAU de chacun des scénarios révèle des contributions différenciées des différents facteurs aux réductions d'émissions de CO₂ (Figure 4.28).

⁷³ Par commodité, dans la suite du texte, ces deux scénarios seront respectivement dénommés R2 et R8.

Figure 4.28- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émission



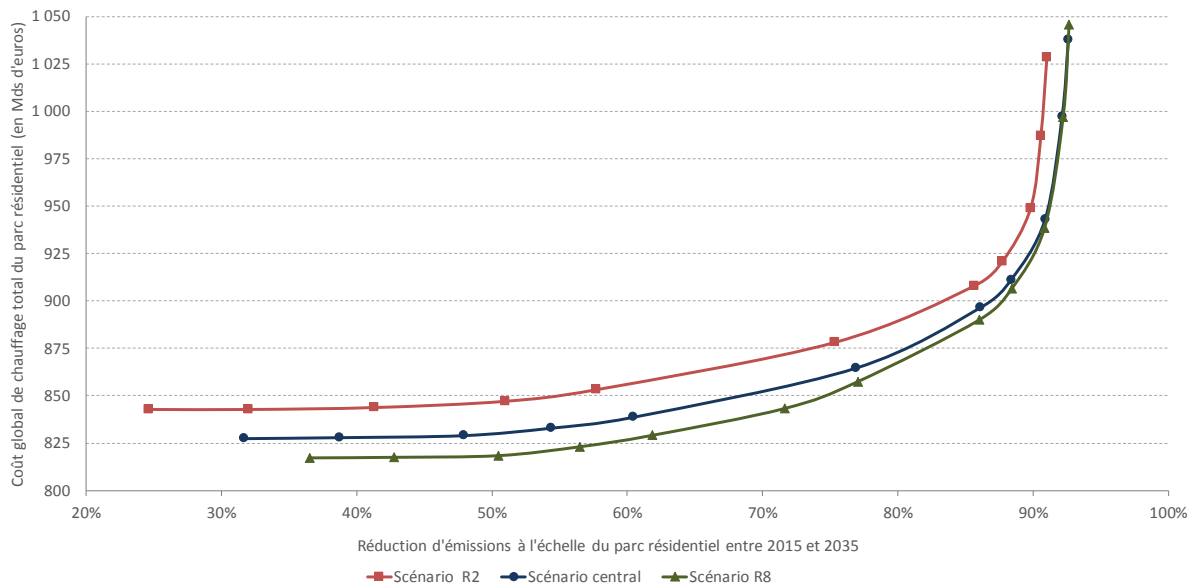
Source : résultats des simulations

On constate ainsi logiquement un accroissement de la contribution de l'efficacité de l'enveloppe lorsque de plafond annuel de rénovation est relevé et inversement, une réduction de celle-ci lorsqu'il est abaissé. L'amélioration des bâtiments explique la moitié des abattements réalisés dans le cadre du scénario R8 contre 25 % dans le scénario R2. Parallèlement, en raison de l'effet d'éviction que le renforcement de l'isolation peut avoir sur le déploiement des systèmes efficaces et/ou renouvelables, on constate, pour les facteurs de pénétration des renouvelables et d'efficacité de production, des contributions moindres dans le scénario R8 (respectivement 35 % et 8 %) et supérieures dans le scénario R2 (respectivement 49 % et 19 %) aux réductions d'émission de CO₂ réalisées, comparativement au scénario central.

Les simulations réalisées pour des objectifs croissants de réductions d'émissions à l'échelle du parc résidentiel renseignent sur la manière dont une modification du plafond annuel de rénovation peut affecter l'atteinte des différentes cibles d'abattement.

Premier constat pouvant être dressé, l'augmentation du plafond de rénovation permet de réduire le coût global de chauffage associé à un niveau de réduction des émissions du parc de logements donné (Figure 4.29).

Figure 4.29- Coût global de chauffage total du parc résidentiel en fonction de l'objectif de réduction d'émission



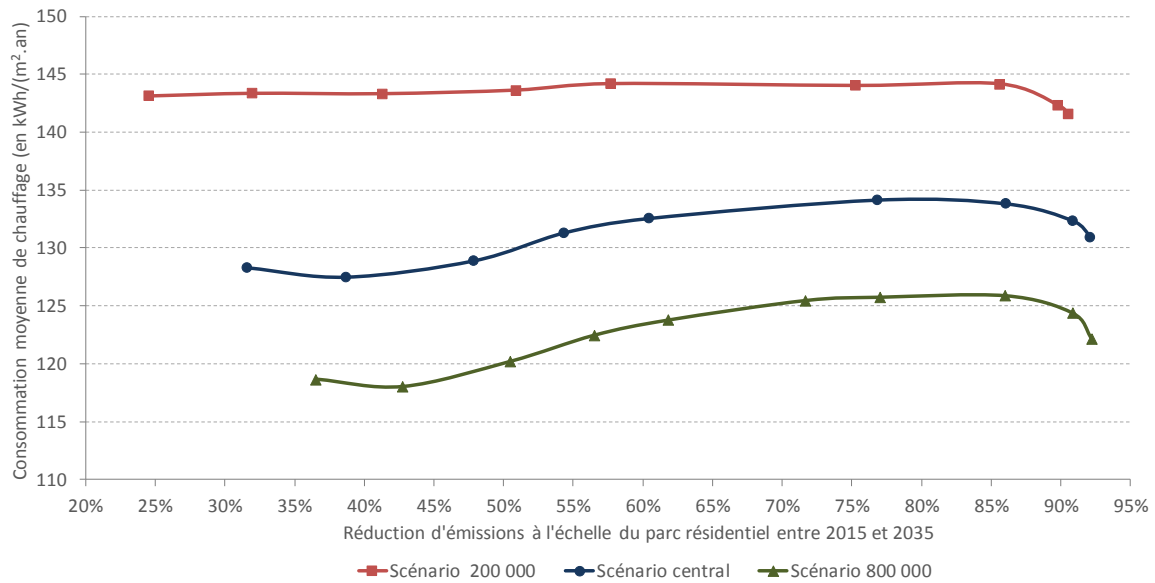
Source : résultats des simulations

Suivant le même mécanisme que celui décrit pour les simulations BAU, le rehaussement du plafond de rénovation permet de limiter le nombre de mesures de second rang et permet ainsi de réduire le CGC du parc de logements. On notera que l'écart de CGC tend à se réduire à mesure que les objectifs de réduction d'émissions s'accroissent. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du scénario R8 dont résultent des CGC quasi-similaires à ceux du scénario central lorsque les abattements d'émissions excèdent les 88 %.

On observe par ailleurs une évolution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques en fonction des scénarios étudiés. Le plafond de rénovation impacte ainsi le niveau moyen d'isolation du parc quel que soit l'objectif de décarbonation du parc visé (Figure 4.30).

Oscillant entre 127 et 135 kWh/(m².an) dans le cadre du scénario central, le BEU moyen est compris entre 140 et 145 kWh/(m².an) dans le scénario R2 et 118 et 126 kWh/(m².an) dans le scénario R3. Un plafond de rénovation plus élevé conduit donc à un niveau d'isolation moyen du parc plus élevé. Néanmoins, on observe que les niveaux de consommation demeurent relativement élevés, témoignant d'un recours encore modéré à l'amélioration de l'enveloppe thermique des habitations. De plus, quel que soit le scénario, on constate une évolution similaire des consommations moyennes de chauffage en fonction de l'objectif de réduction d'émissions. Elles augmentent progressivement lorsque l'objectif de décarbonation passe de 45 % à 85 % avant de diminuer légèrement pour des niveaux d'abattement supérieurs.

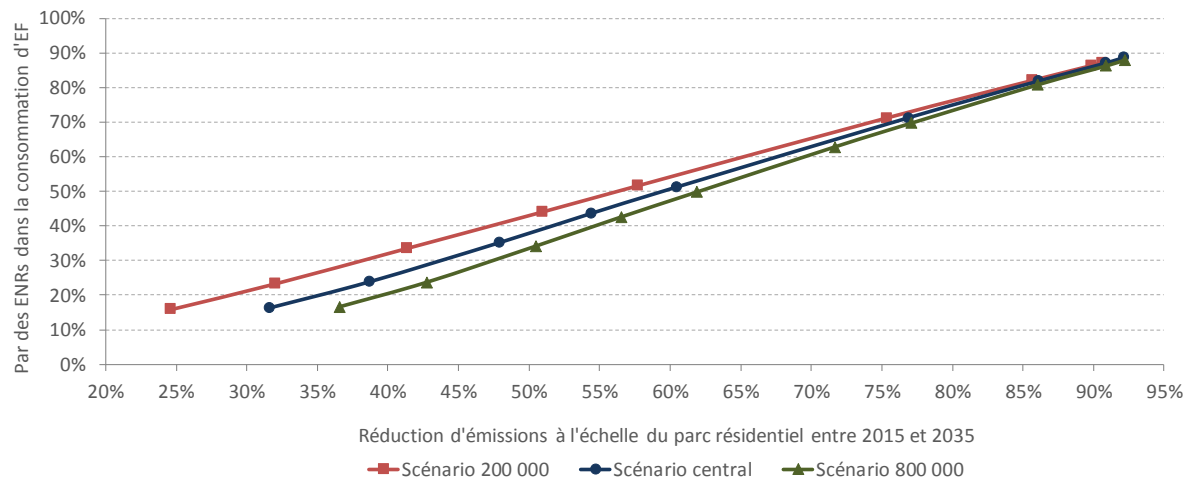
Figure 4.30- Evolution des besoins moyens de chauffage des logements en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ et du plafond annuel de rénovation



Source : résultats des simulations

Parallèlement, la valeur du plafond de rénovation influence la part d'énergie renouvelable mobilisée pour un niveau de décarbonation du parc donné (Figure 4.31).

Figure 4.31- Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions et du plafond de rénovation



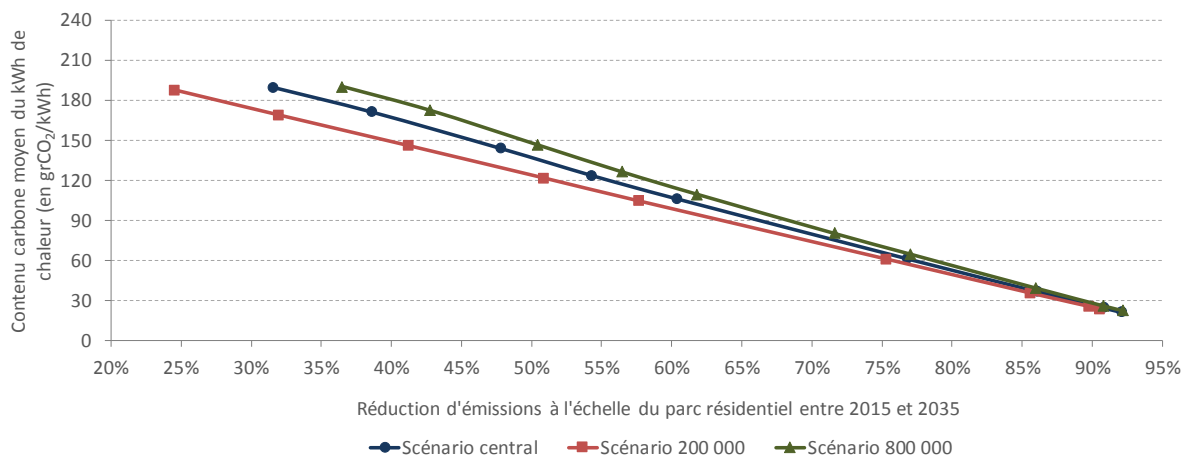
Source : résultats des simulations

On constate ainsi un recours aux énergies renouvelables d'autant plus important que le plafond est contraignant. Réduire les émissions de 40 % implique ainsi une pénétration des

renouvelables de 32 % dans le scénario R2 contre 25 % dans le scénario central et 20 % dans le scénario R8. Toutefois, il s'avère que ces écarts dans la mobilisation des sources d'énergie renouvelable se réduisent à mesure que les cibles de réduction d'émissions s'accroissent jusqu'à devenir négligeables pour les plus hauts niveaux de décarbonation du parc résidentiel.

Ces tendances sont également perceptibles au niveau de l'évolution du contenu carbone moyen du kWh de chaleur, indicateur résultant de l'évolution conjointe de la substitution énergétique et de l'efficacité de production (Figure 4.32).

Figure 4.32- Evolution du contenu carbone moyen du kWh de chaleur en fonction de l'objectif de réduction d'émissions et du plafond annuel de rénovation

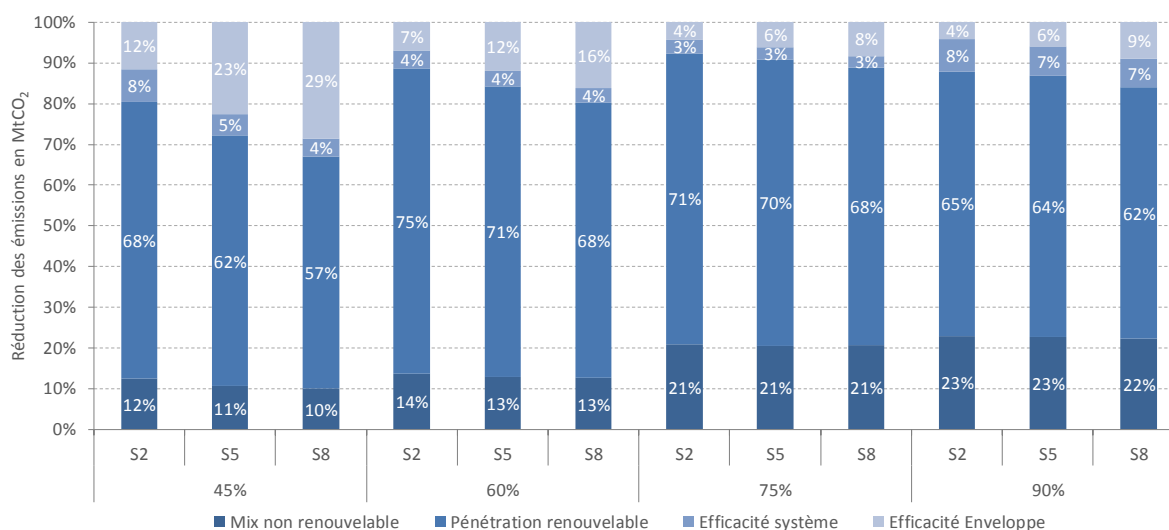


Source : résultats des simulations

Pour un niveau donné de décarbonation du parc résidentiel, le contenu carbone moyen du kWh de chaleur est d'autant faible que la contrainte annuelle de rénovation est basse témoignant d'une compensation d'un niveau d'isolation moindre par l'adoption de systèmes de chauffage moins carbonés afin d'atteindre un même niveau d'émissions de CO₂. Là encore, les écarts entre les différents scénarios deviennent très faibles pour de hauts niveaux de décarbonation du parc. Il pourrait sembler contradictoire que l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions de CO₂ les plus ambitieux soit réalisée pour des contenus en carbone du kWh de chaleur quasiment similaires dans chacun des scénarios. En effet, de significatives différences en termes d'isolation moyenne persistant pour ces niveaux de décarbonation du parc résidentiel, on pourrait s'attendre à la subsistance d'écart entre contenu carbone venant compenser ce différentiel de performance du bâti. Néanmoins, les contenus en carbone atteints étant très faibles (environ 22 grCO₂/kWh), le différentiel d'isolation n'affecte plus que très peu les émissions pour ces niveaux de décarbonation du stock de logements.

L'évolution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétique se traduit par des variations contrastées de leur contribution à la réalisation des objectifs de décroissance de émissions (Figure 4.33).

Figure 4.33- Contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques à l'atteinte de quatre objectifs de réduction d'émissions de CO₂

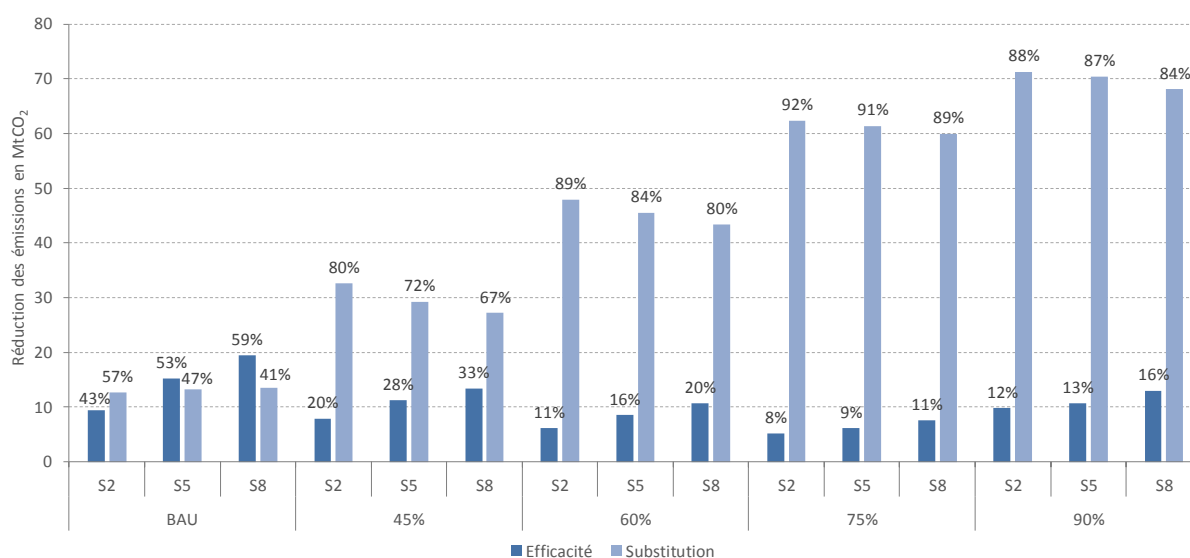


Source : résultats des simulations

L'analyse de décomposition des résultats de simulation visant à atteindre quatre cibles de décarbonation du parc de logements pour différents plafonds annuels de rénovation permet de dégager des tendances quant aux contributions des différents facteurs au sein des trois scénarios. On constate que quelle que soit la cible de réduction d'émissions visée, la contribution de la pénétration des renouvelables demeure invariablement massive puisqu'elle explique entre 57 % et 75 % des abattements réalisés. La contribution de la composition du mix non renouvelable tend à augmenter quant à elle avec l'ambition des objectifs, traduisant concrètement une baisse progressive de la part du fioul et du gaz au profit de l'électricité, et ne varie que très peu d'un scénario à l'autre pour un objectif de décarbonation du parc donné. Les baisses d'émissions attribuables à l'amélioration de l'efficacité de production sont relativement modestes pour les quatre objectifs de réduction d'émissions étudiés. Plus importante dans le cadre du scénario R2 pour la cible de décarbonation la moins ambitieuse, la contribution de ce facteur tend à être sensiblement la même dans chaque scénario pour les autres objectifs. Enfin, la contribution de l'efficacité des bâtiments est nettement affectée par la valeur du plafond de rénovation pour les objectifs de baisse des émissions modérés. Ainsi, dans le cadre d'une décarbonation du parc de logements de 45 % à l'horizon 2035, l'amélioration de l'enveloppe du bâti explique respectivement 12 % et 29 % des réductions d'émissions pour les scénarios R2 et R8.

De manière plus générale, la décomposition des résultats de simulation souligne que si la valeur du plafond de rénovation impacte significativement les contributions de l'efficacité et de la substitution à l'atteinte des différents objectifs, la différence de répartition entre ces deux facteurs s'atténue fortement à mesure que les cibles de décarbonation deviennent plus ambitieuses. De surcroît, si les rôles respectifs des deux grands facteurs peuvent être légèrement affectés par la valeur du plafond, il n'en demeure pas moins que la tendance observée dans le scénario central, à savoir une baisse progressive de la contribution de l'efficacité, demeure la même quel que soit le scénario examiné (Figure 4.34).

Figure 4.34- Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions



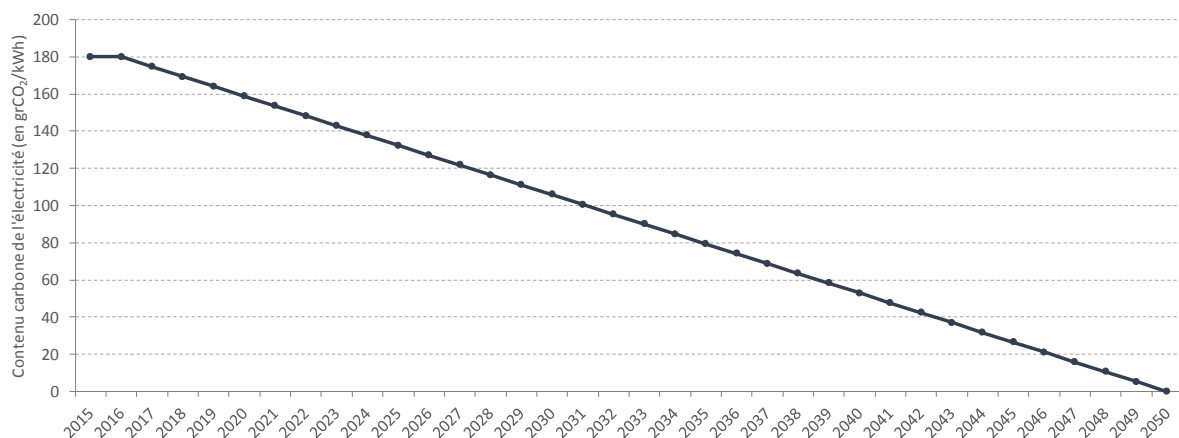
Sources : résultats de simulations

4.5.2- Sensibilité à l'évolution du contenu carbone de l'électricité

Les simulations réalisées en section 4.3 et 4.4 reposaient sur l'hypothèse de constance du facteur d'émission des différentes sources d'énergie non-renouvelables. Or, cette hypothèse fait fi des évolutions à venir du contenu carbone de l'électricité et du gaz dans un contexte politique visant à la décarbonation du mix électrique et au développement du biogaz. Ainsi, la LTECV (2015) s'est fixé comme ambition l'atteinte de 40 % d'électricité et de 10 % de gaz d'origine renouvelable à l'horizon 2030. S'interroger sur l'évolution du contenu carbone de ces sources d'énergie revient à s'intéresser non plus à la décarbonation de la production de chaleur par une modification des vecteurs énergétiques mobilisés mais à la décarbonation en amont de ces derniers. Ce levier de réduction d'émissions, correspondant à une amélioration du facteur « contenu carbone » évoqué en chapitre I, viendrait donc s'ajouter aux actions directes portant sur l'enveloppe thermique des logements et sur les systèmes de chauffage les équipant.

Il est fait le choix ici de ne s'intéresser qu'à la décarbonation du mix électrique eu égard à l'importance donnée à celle-ci dans nombre des scénarios de réduction d'émissions de CO₂ en France. Si aucun objectif officiel n'a encore été adopté quant au contenu carbone de l'électricité à l'horizon 2050, différents scénarios plus ou moins ambitieux ont été développés. Le scénario ANCRE-LTECV (ANCRE, 2017) postule l'atteinte d'un mix électrique basé à plus de 50 % sur des sources d'énergie renouvelables quand d'autres plaident pour une électricité intégralement décarbonée en 2050 (Négawatt, 2017 ; ADEME, 2017). Suivant ces derniers, on supposera dans cette analyse de sensibilité l'atteinte d'un mix électrique 100 % renouvelable en 2050. Ne disposant pas de trajectoire précise permettant l'atteinte d'un tel mix électrique ni d'indications sur la manière dont serait impacté dans le temps le contenu carbone moyen de l'électricité mobilisée pour le chauffage⁷⁴, on suppose simplement une décroissance linéaire du contenu carbone de l'électricité mobilisée aboutissant à un facteur d'émission nul en 2050. Cela revient donc à présumer une baisse annuelle du contenu carbone de l'électricité destiné à l'usage chauffage d'un peu plus de 5 grCO₂/kWh à partir de 2016 (Figure 4.35).

Figure 4.35- Evolution supposée du contenu carbone de l'électricité entre 2015 et 2050 dans le cadre de l'analyse de sensibilité



Source : Hypothèse de modélisation

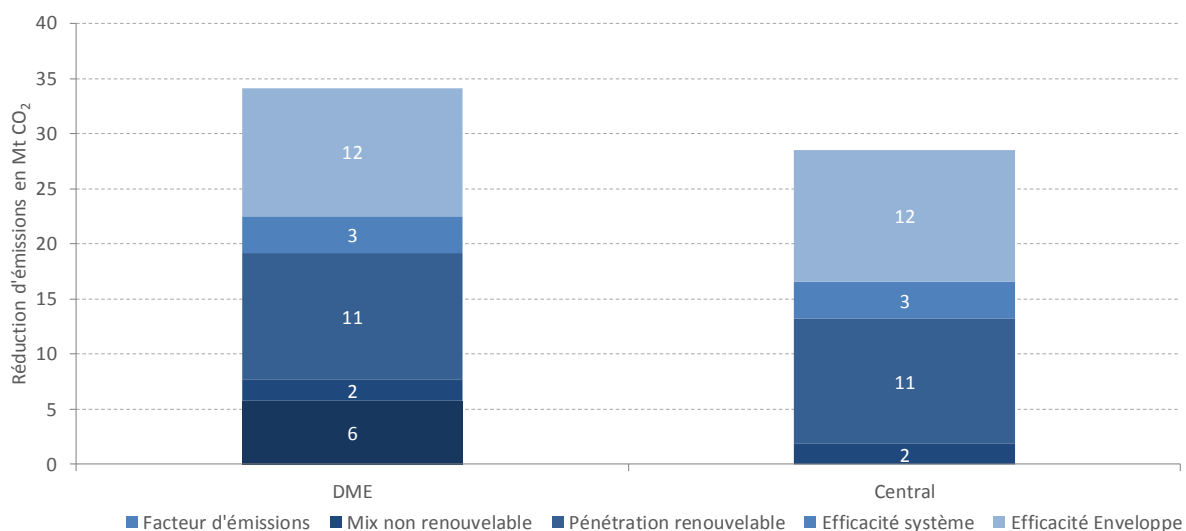
Sur cette base, de nouvelles simulations sont effectuées pour constituer un scénario « décarbonation du mix électrique » (aussi désigné scénario DME dans la suite de ces travaux).

La simulation BAU issue de ce scénario aboutit à une réduction de 34,1 Mt CO₂ entre 2015 et 2035, soit 5,5 Mt CO₂ d'abattement additionnel par rapport au scénario central. L'analyse de

⁷⁴ Celui-ci n'étant pas linéairement dépendant du contenu carbone moyen de l'électricité dans la mesure où une partie importante des consommations de chauffage ont lieu pendant les périodes de pointe et de semi-base.

décomposition menée sur les résultats de cette simulation met en évidence une contribution quasi-identique des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques aux réductions d'émissions dans le cadre des deux scénarios. Les réductions additionnelles du scénario DME sont attribuables aux gains réalisés sur le facteur d'émission, existant par construction uniquement dans le scénario DME (Figure 4.36)

Figure 4.36- Contribution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétique aux réductions d'émissions des simulations BAU dans le cadre du scénario DME et du scénario central



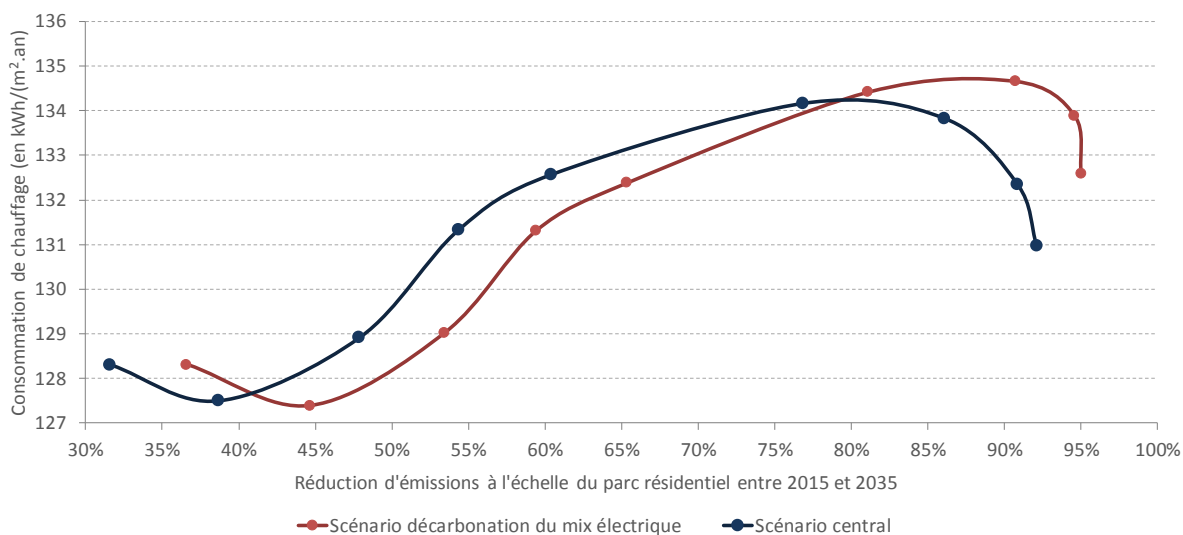
Source : résultats des simulations

Dans le cadre de l'atteinte à moindre coût d'objectifs de réduction d'émissions plus ambitieux, les résultats de simulations du scénario DME laissent apparaître certaines différences quant à l'évolution des différents facteurs. Pour un objectif de réduction donné, on observe des niveaux d'isolation pouvant légèrement diverger (Figure 4.37).

On note ainsi que, pour des cibles de réductions d'émissions de CO₂ comprises entre -45 % et -80 %, le scénario DME débouche sur des besoins de chauffage moyens inférieurs à ceux du scénario central en raison du maintien d'un plus grand nombre de convecteurs électriques dans le cadre de la décarbonation de l'électricité. Pour des niveaux d'abattement supérieurs en revanche, il apparaît que l'isolation des logements est moins poussée dans le scénario DME que dans le scénario central. La baisse progressive du contenu en carbone de l'électricité réduisant les émissions issues des systèmes reposant sur ce vecteur énergétique, notamment des pompes à chaleur largement déployées en logements collectifs dans le cadre des objectifs de réduction d'émissions ambitieux, conduit à une mobilisation moindre des travaux d'isolation pour l'atteinte d'une cible donnée de décarbonation. Ceci s'avère particulièrement manifeste dans le cas des appartements chauffés individuellement : ainsi, pour une réduction

de 90 % des émissions de CO₂ à l'échelle du parc résidentiel, la consommation moyenne de chauffage de cette catégorie d'habitations est de 90 kWh/(m².an) dans le scénario central contre 60 kWh/(m².an) dans le scénario DME.

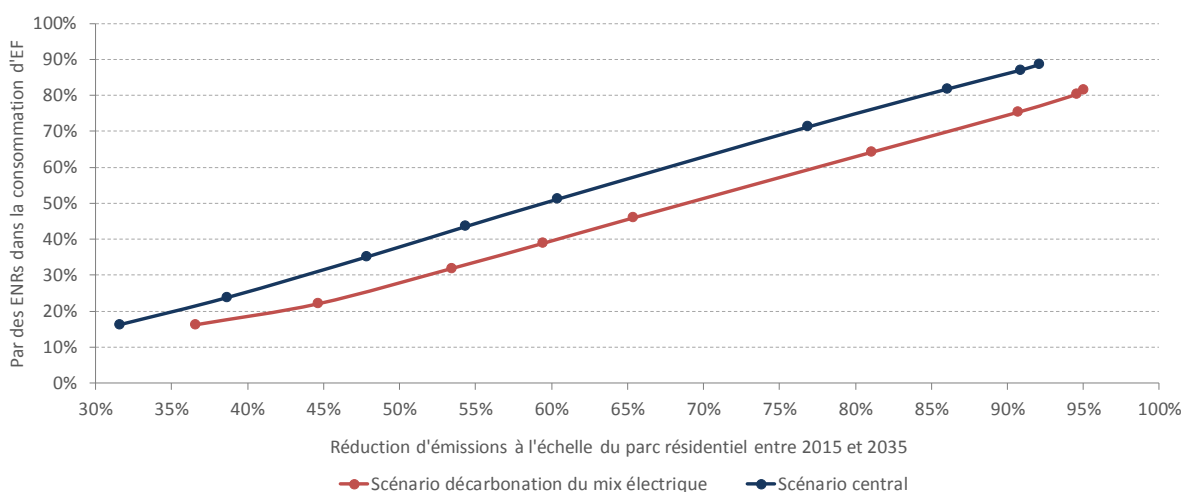
Figure 4.37- Evolution du besoin de chauffage en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central



Source : résultats des simulations

Parallèlement, on constate un recours moindre aux systèmes de chauffage basés sur des sources d'énergie renouvelables (Figure 4.38).

Figure 4.38- Evolution de la part des renouvelables dans la consommation d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central

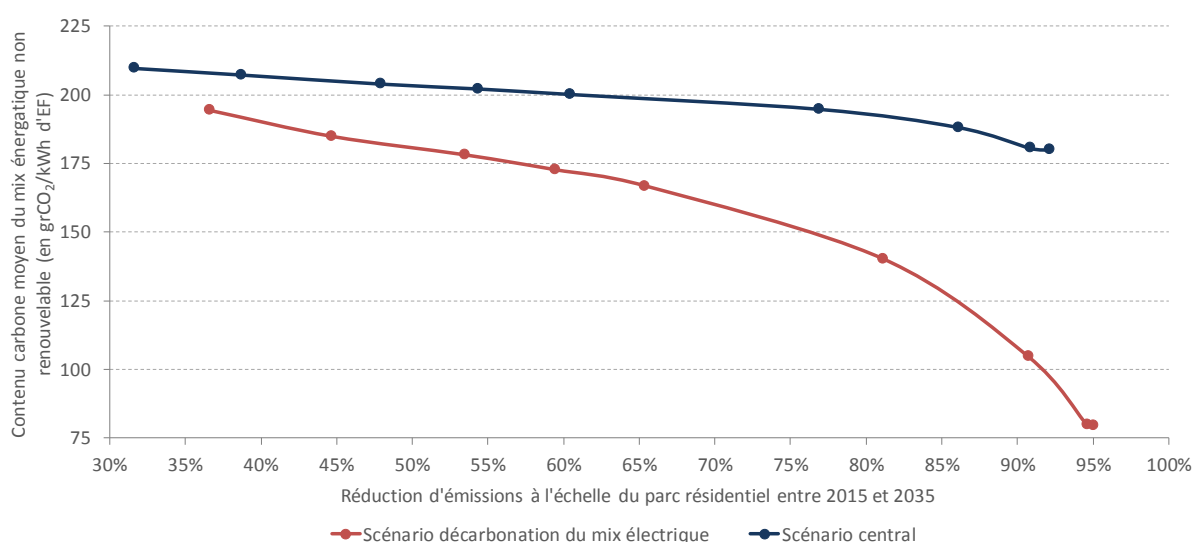


Source : résultats des simulations

Ainsi, dans le cadre de la réalisation d'une baisse des émissions de 60 % à l'horizon 2035, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale passe de 50 % dans le scénario central à 40 % dans le scénario DME. Ce constat est néanmoins à nuancer dans la mesure où, *via* la décarbonation de l'électricité, une part d'énergie renouvelable, non comptabilisée ici, est mobilisée à travers le recours à l'électricité.

Ceci se retrouve ainsi dans l'évolution du contenu carbone des énergies non renouvelables (Figure 4.39).

Figure 4.39- Evolution du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ dans le cadre du scénario DME et du scénario central

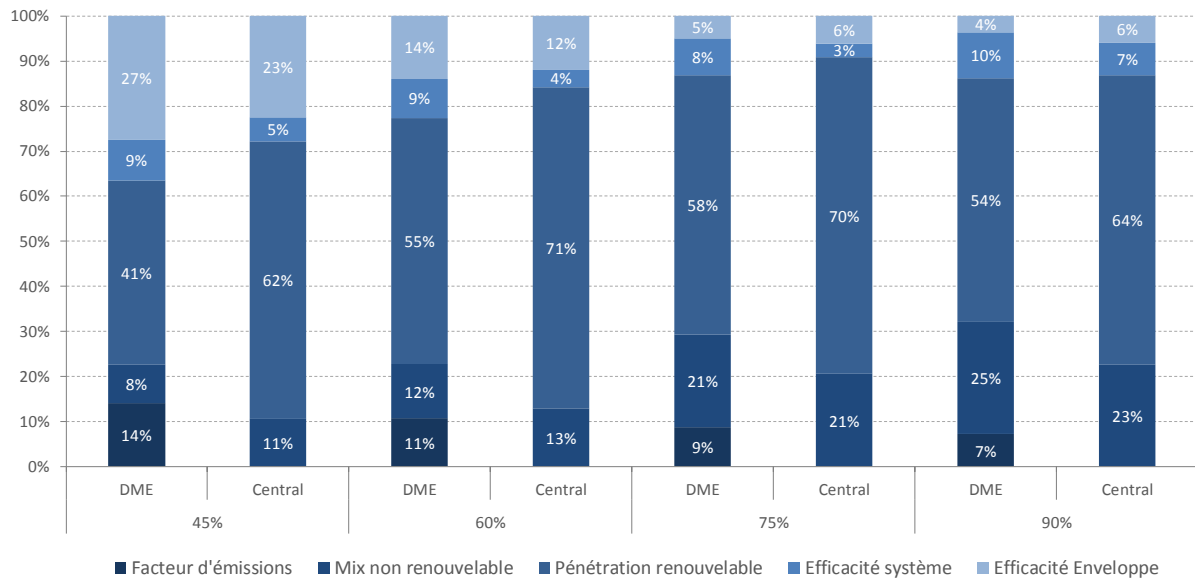


Source : résultats des simulations

On observe ainsi une décroissance plus forte et plus rapide de celui-ci dans le cadre du scénario DME. L'écart grandissant entre les contenus en carbone moyens mesurés dans les scénarios illustre un recours croissant au vecteur électrique à mesure que les objectifs de réduction d'émissions augmentent. Ainsi dans le cadre d'une réduction de 90 % des émissions de CO₂, le contenu carbone des énergies non renouvelables est de 105 grCO₂/kWh dans le scénario DME contre 180 grCO₂/kWh dans le scénario central.

Ces évolutions différenciées des facteurs se retrouvent dans la contribution de ceux-ci à l'atteinte des différentes cibles centrales de réduction d'émissions (Figure 4.40)

Figure 4.40- Contribution des facteurs d'efficacité et de substitution énergétique à l'atteinte de quatre cibles de réduction d'émissions de CO₂ dans le cadre du scénario central et du scénario DME

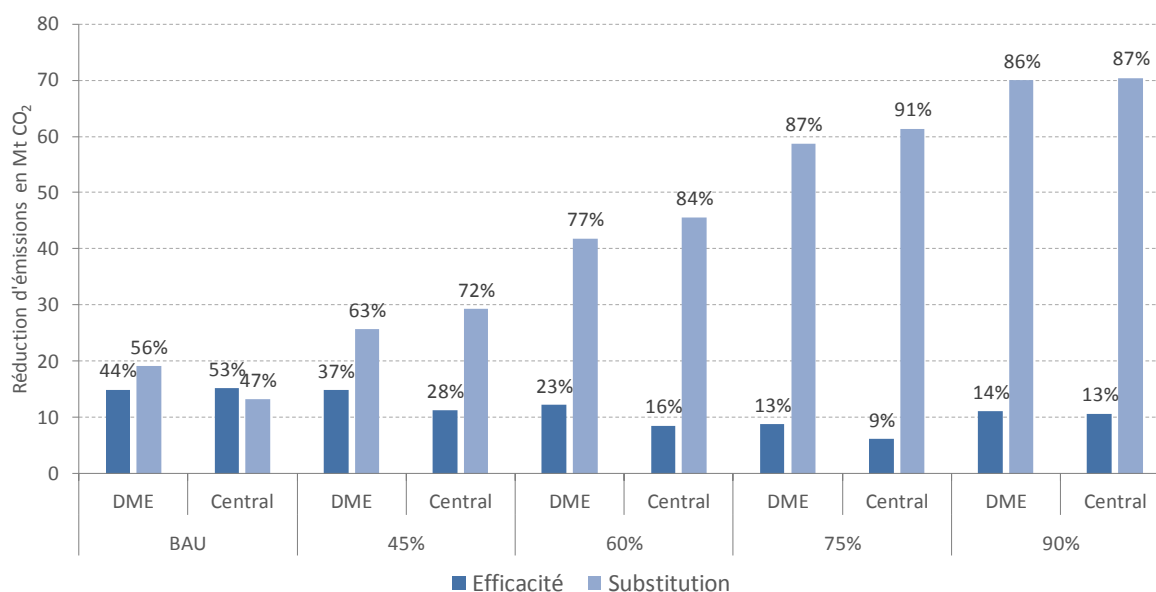


Source : résultats des simulations

On observe ainsi une contribution plus importante de l'efficacité des bâtiments à l'atteinte des objectifs -45 % et -60 % mais une contribution plus faible pour les deux cibles plus ambitieuses. On constate par ailleurs une contribution systématiquement plus importante de l'efficacité de production reflétant un déploiement plus important des systèmes de pompes à chaleur. Parallèlement, la contribution des renouvelables décroît fortement dans le cas du scénario DME.

Au final, il apparaît tout de même que la prise en compte de la décarbonation du mix électrique ne vient pas bouleverser significativement l'arbitrage entre efficacité et substitution pour les différentes cibles de réduction d'émissions de CO₂ (Figure 4.41).

Figure 4.41- Contribution de l'efficacité et de la substitution à l'atteinte de quatre scénarios de décarbonation dans le cadre du scénario DME et du scénario central



Source : résultats des simulations

4.6) Discussion des implications en termes de politique publique

Les précédentes sections ont défini les actions à mettre en œuvre et les évolutions des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques permettant d'atteindre, à moindre coût, des objectifs croissants de réduction d'émissions de CO₂.

Il n'est pas possible de tirer directement de ces résultats des enseignements quant aux instruments de politique publique à mettre en œuvre ou à la manière socialement optimale d'atteindre un niveau de décarbonation donné du secteur résidentiel. En effet, le cadre d'analyse utilisé est assez restrictif. Les travaux ont été menés en suivant un objectif de minimisation des coûts et en supposant que l'intégralité du parc de logement était administrée en poursuivant cette unique logique et en l'absence de toute barrière à l'investissement. En réalité, les décisions de rénovation énergétique ne reposent pas seulement sur un simple calcul rationnel de minimisation des coûts. Ce constat est au cœur de la littérature traitant du « paradoxe de l'efficacité énergétique » (Jaffe et Stavins, 1994) et se retrouve illustré dans les travaux menés ici par l'existence d'un grand nombre d'investissements permettant de minimiser le coût global de chauffage et demeurant cependant non réalisés.

Néanmoins, le recours aux solutions de rénovation les plus profitables et la minimisation des coûts de décarbonation du secteur demeurent des leviers pouvant s'avérer déterminants dans

la réalisation de la transition énergétique au sein de l'habitat existant. Les différents résultats obtenus peuvent donc être mobilisés pour apporter certains éléments de réflexion sur la question des instruments et des objectifs de politique publique à destination du secteur résidentiel.

4.6.1- Les dispositifs d'aide à la rénovation énergétiques des logements

Afin d'encourager les ménages à réaliser des travaux d'isolation et à s'orienter vers des systèmes de production de chaleur efficaces et/ou décarbonés, de nombreux dispositifs d'aide ont été développés durant les quinze dernières années. Ces dispositifs visent à informer et sensibiliser les ménages (création des espaces info-énergie et des points rénovation info-service par exemple), à favoriser la qualité des travaux (création du label « Reconnu Garant de l'Environnement » par exemple) et à réduire les coûts d'investissement associés à la réalisation de travaux d'isolation et de remplacement de systèmes de chauffage.

Les aides financières reposent sur cinq principaux dispositifs :

- Le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE) permettant d'obtenir un abattement d'impôt allant jusqu'à 30% des sommes engagées pour des travaux de rénovation énergétiques (1 675 millions d'euros en 2016)⁷⁵.
- Le taux de TVA réduit consistant en l'application d'un taux de TVA de 5,5% sur la pose, l'installation et l'entretien des équipements éligibles au CITE (343 millions d'euros en 2016).
- La prime énergie ou prime CEE, associée au dispositif des certificats d'économie d'énergie, pouvant financer jusqu'à 20% des travaux de rénovation en fonction des économies d'énergie engendrées (162 millions d'euros en 2016).
- Les aides de l'Agence Nationale de l'Habitat, subventionnant les opérations de rénovation énergétique sous conditions de ressource (349 millions d'euros en 2016).
- L'éco-prêt à taux zéro, permettant l'obtention d'un crédit sans intérêt allant jusqu'à 30 000 euros pour financer des bouquets de travaux améliorant la performance énergétique des logements (387 millions d'euros).

Ces dispositifs sont souvent cumulables⁷⁶ et ont en commun de permettre, parfois sous des conditions spécifiques, le financement des travaux d'isolation et le déploiement de systèmes de chauffage efficaces et/ou décarbonés.

Néanmoins, il convient de souligner que ces aides tendent à favoriser plus fortement l'amélioration de l'efficacité que la décarbonation du mix énergétique. Le CITE et la TVA à taux

⁷⁵ Les montants d'aides associés à chacun des dispositifs sont tirés du rapport I4CE-2018 (Robinet, 2018).

⁷⁶ Ce n'est pas le cas des aides de l'ANAH avec la prime énergie.

réduit s'appliquent ainsi de la même manière à toutes les technologies éligibles. Celles-ci comprennent la plupart des travaux d'isolation et les systèmes de chauffage à condensation et renouvelables (à l'exception des PAC air-air). Aucun avantage spécifique n'est ainsi accordé à la production de chaleur renouvelable. Par ailleurs, les conditions d'éligibilité des technologies sont régulièrement mises à jour, sur la base d'un accroissement des exigences en termes de rendement énergétique dans le cas des systèmes de chauffage. Ainsi, certains poêles à bois ou certaines chaudières à granulés peuvent ne plus entrer dans le champ des dispositifs éligibles lorsque des systèmes à condensation y demeurent. Le montant de prime CEE dépend lui directement des économies d'énergie réalisées, aboutissant à favoriser plus fortement les actions d'efficacité, bien qu'un facteur correctif soit appliqué en fonction du vecteur énergétique sur lequel est basée la technologie de chauffage. Enfin, les aides de l'ANAH et le prêt à taux zéro sont délivrés sous conditions d'atteinte d'un certain niveau d'amélioration de la performance énergétique, introduisant là aussi un biais en faveur de l'amélioration de l'efficacité.

4.6.2- Les objectifs de rénovation énergétique

Ces différents dispositifs ont été instaurés de manière à pouvoir atteindre les objectifs que se sont fixés les pouvoirs publics sur le bâti existant. Si aucun objectif de réduction d'émissions de CO₂ spécifique au secteur résidentiel n'a été officiellement entériné, la LTECV (2015) a arrêté plusieurs cibles en lien avec l'efficacité et la substitution énergétiques, dont notamment :

- La rénovation annuelle de 500 000 logements à partir de 2017.
- L'atteinte d'une consommation finale de chaleur renouvelable de 38% à l'horizon 2035, décomposée en sous-objectifs répartis par filière (biomasse, biogaz, pompe à chaleur, géothermie et solaire thermique)⁷⁷.
- La généralisation du standard « bâtiment basse consommation » (BBC) ou équivalent à l'ensemble des logements à l'horizon 2050.

Il se révèle instructif de mettre en perspective ce dernier objectif avec les résultats obtenus dans ce chapitre. Le label BBC rénovation, lancé par les pouvoirs publics en 2009, renvoie à l'atteinte d'un certain niveau de performance énergétique pour un logement portant sur cinq usages de l'énergie : le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation, la ventilation et l'éclairage (Effinergie, 2011). La consommation d'énergie primaire pour assurer

⁷⁷ Cet objectif reposant en partie sur les réseaux de chaleur et des technologies non modélisées dans ce chapitre, il ne fera pas l'objet d'une mise en perspective avec les résultats de simulation.

l'ensemble de ces usages ne doit pas dépasser les 80kWh/(m².an)⁷⁸. Partant du principe que le chauffage peut représenter jusqu'à deux tiers des consommations énergétiques des logements, l'atteinte de cette cible impliquerait une consommation d'énergie primaire pour l'usage chauffage d'environ 54kWh/(m².an).

Or, au regard des résultats de simulation, ce niveau d'efficacité, préconisé pour l'ensemble du bâti existant à l'horizon 2050, apparaît comme particulièrement élevé, tout du moins dans une optique où l'efficacité serait principalement considérée comme un levier de réduction des émissions de CO₂. Ce seuil maximal de consommation d'énergie primaire pour le chauffage est en effet à mettre en perspective avec les résultats obtenus dans les sections précédentes concernant l'évolution des facteurs d'efficacité en fonction des objectifs de décarbonation du parc. Les simulations du scénario central conduisent ainsi à des estimations de consommations de chauffage coûts-efficaces comprises entre 139 et 149 kWh/(m².an) pour les maisons, 102 et 138 kWh/(m².an) pour les immeubles chauffés collectivement et 95 kWh/(m².an) et 60 kWh/(m².an) pour les appartements dotés de chauffage individuel. La traduction de ces besoins de chauffage en consommation d'énergie finale ne fait qu'accentuer l'écart entre le niveau de performance BBC et les consommations coûts-efficaces des maisons et des immeubles chauffés collectivement puisque l'efficacité de production pour ces logements ne dépasse jamais les 95 %. Les consommations d'énergie finale varient ainsi entre 147 et 163 kWh/(m².an) pour les logements individuels et 117 et 145 kWh/(m².an) pour les appartements chauffés collectivement en fonction de l'objectif de décarbonation du parc résidentiel.

La question se pose différemment pour les appartements dotés de systèmes de chauffage individuels. En effet, pour cette catégorie de logements, parallèlement à l'efficacité moyenne de l'enveloppe, qui croît avec les objectifs de réduction d'émissions, l'efficacité moyenne de production s'améliore aussi grandement avec la hausse des cibles de décarbonation, sous l'effet du déploiement des systèmes de pompes à chaleur. La consommation d'énergie finale moyenne de ces habitations décline ainsi jusqu'à 40 kWh/(m².an) lorsque l'on vise une baisse de 90 % des émissions du parc de logements. Le standard BBC pourrait donc sembler compatible avec les performances énergétiques coûts-efficaces telles que simulées dans ce chapitre. Néanmoins, la performance énergétique imposée par le standard BBC est exprimée en énergie primaire et non en énergie finale. Or, dans la réglementation française, un facteur de conversion de 2,58 est appliqué à l'électricité pour la définition des consommations d'énergie primaire (Journal Officiel, 2012). Ainsi, il apparaît que même dans le cas des

⁷⁸ Cette valeur standard fait l'objet de modulations en fonction de la zone climatique et de l'altitude à laquelle est situé le logement.

appartements chauffés en individuel, les performances énergétiques visées par LTECV impliquent des gains en efficacité bien supérieurs aux niveaux découlant de la minimisation des coûts de réduction d'émissions de CO₂ du secteur.

Rénover l'intégralité du bâti existant au niveau BBC impliquerait ainsi l'atteinte de niveaux de consommation d'énergie deux à trois fois inférieurs aux niveaux coûts-efficaces déterminés dans ce chapitre. Cette isolation excessive au regard de la trajectoire coût-efficace peut être à l'origine de potentiels surcoûts importants. Celui-ci serait double.

Tout d'abord, étant donnée la forte croissance du coût marginal d'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe des bâtiments, cette « sur-isolation » engendrerait des coûts d'investissement additionnels considérables. Par exemple, amener l'intégralité du parc de logements à un besoin d'énergie utile de 70kWh/(m².an) en vingt ans⁷⁹ impliquerait un coût d'investissement actualisé en isolation d'environ 250 milliards d'euros, contre 139 milliards d'euros dans le cadre de la simulation du scénario central permettant le plus haut niveau de décarbonation⁸⁰.

De plus, une fois les logements fortement isolés, les systèmes de chauffage efficaces et/ou décarbonés deviendraient peu compétitifs, rendant de fait difficile l'atteinte d'objectifs ambitieux de réduction d'émissions de CO₂. Dans ce cadre, seules d'importantes aides publiques venant combler ce déficit de compétitivité pourraient permettre le déploiement des technologies décarbonées, engendrant de nouveaux coûts additionnels contribuant au surcoût global.

Par ailleurs, il convient de noter que l'atteinte de cet objectif global de 80 kWhep/(m².an) va à l'encontre de la réalisation de gains en termes de substitution énergétique tels que défini dans ce chapitre. En effet, la définition d'une cible en énergie primaire, défavorable à l'électricité, limiterait très fortement les possibilités d'amélioration du contenu carbone du mix énergétique non renouvelable dans la mesure où les simulations relatent une part d'autant plus forte de l'électricité dans le mix non renouvelable que l'objectif de réduction d'émissions est élevé. De plus, si le bois-énergie bénéficie d'un coefficient de conversion en énergie primaire favorable au sein du standard BBC⁸¹, il convient de noter qu'aucune contrainte n'existe quant à la mobilisation d'énergie renouvelable dans le cadre de la rénovation du parc.

⁷⁹ Cette période est choisie de manière à correspondre à la période simulée par le modèle Zephyr-chaueur.

⁸⁰ Cette simulation étant celle aboutissant au coût d'investissement en travaux d'isolation le plus élevé.

⁸¹ Le coefficient de conversion du bois étant fixé à 0,6.

Ainsi, dans un cadre de minimisation des coûts de chauffage et au sein duquel les rénovations énergétiques ne seraient considérées que comme un levier de réduction d'émissions CO₂, on constate que les objectifs visés par la LTECV (2015) tendent à promouvoir une amélioration trop poussée de l'efficacité au détriment de la substitution.

Cette observation mérite tout de même d'être nuancée pour plusieurs raisons. En premier lieu, il peut être considéré que l'amélioration de l'efficacité énergétique n'est pas uniquement recherchée dans un but de réduction d'émissions de CO₂. Une amélioration de la balance commerciale et une plus forte indépendance énergétique peuvent justifier, au moins partiellement, ces objectifs d'efficacité ambitieux. Ensuite, l'isolation des logements est à l'origine de bénéfices pouvant s'ajouter aux économies d'énergie, tels que des gains en confort thermique et acoustique, une meilleure qualité de l'air intérieur (Wilkinson *et al.*, 2009) ou une augmentation de la valeur patrimoniale des biens (Jakob, 2006 ; Wilkinson *et al.*, 2009 ; Dinamic, 2015). La réduction des besoins d'énergie pour le chauffage peut aussi être considérée comme une protection face au risque de variation des prix énergies (Tuominen et Seppänen, 2017). En revanche, il convient de noter que les travaux d'isolation peuvent comporter également des coûts cachés tels qu'une perte de surface habitable ou une indisponibilité du logement durant la réalisation des travaux. Ainsi, certains motifs peuvent être avancés pour expliquer, au moins en partie, l'importance des gains visés en efficacité énergétique au sein du secteur résidentiel.

Enfin, on peut noter que ce tropisme envers l'efficacité énergétique tend à s'effriter. En effet, un nouveau label, nommé E+C-, est actuellement testé et devrait poser les bases des standards à venir et notamment de la future réglementation thermique (RT 2020). Celui-ci n'est plus principalement focalisé sur l'amélioration de l'enveloppe thermique des habitations mais intègre la nécessité de recourir à des énergies décarbonées et promeut l'autoproduction d'électricité (MTES, 2017c) laissant présager qu'un changement de paradigme s'opérera peut-être dans les années à venir.

4.6.3- Les voies d'amélioration de la stratégie de décarbonation du parc de logements

La mise en perspective des dispositifs d'aides à l'investissement et des objectifs de rénovation énergétique avec les résultats de simulation révèle l'existence d'une prédominance de la recherche de l'amélioration de l'efficacité énergétique sur des gains potentiellement atteignables *via* des mesures de substitution, pouvant conduire à un renchérissement de la décarbonation du secteur résidentiel. Sur cette base, trois pistes de réflexion sur l'évolution des stratégies de décarbonation du secteur résidentiel peuvent être avancées.

La première consiste à s'interroger sur l'opportunité de développer des stratégies de rénovation différenciées pour les logements individuels et collectifs. En effet, l'examen de la contribution des facteurs à l'atteinte au moindre coût des différentes cibles de décarbonation

a permis de souligner des rôles très variés de l'efficacité et de la substitution en fonction des catégories de logements étudiées. Ces derniers témoignent du fait que la pertinence économique des différentes solutions techniques, aussi bien en termes de travaux d'isolation qu'en termes de systèmes énergétiques, varie fortement en fonction de la nature du logement et du mode de chauffage (individuel ou collectif et centralisé ou décentralisé). Ainsi, la mise en œuvre de travaux d'isolation d'ampleur importante semble particulièrement coût-efficace dans le cas des appartements chauffés individuellement quand le déploiement de technologies renouvelables apparaît comme plus approprié aux maisons anciennes.

Or, si certaines mesures visent spécifiquement certains types de ménages, à l'instar des aides de l'ANAH, peu d'entre elles sont calibrées de manière à correspondre aux spécificités des logements. Ainsi, le CITE n'est pas différencié en fonction de la catégorie de logements considérée, de son niveau d'isolation ou du système de chauffage l'équipant initialement. Cette indifférenciation s'observe par ailleurs également au niveau des objectifs de performance énergétique, l'objectif du standard BBC en 2050 s'appliquant uniformément à tout le parc résidentiel.

Les résultats obtenus dans ce chapitre pourraient donc plaider pour l'établissement de stratégies de réduction d'émissions de CO₂ différenciées en fonction des catégories de logements. Si entrer de manière détaillée dans les spécificités des bâtiments peut s'avérer complexe ou engendrer des coûts prohibitifs (par la mise en œuvre d'un audit préalable par exemple), une différenciation des aides à l'investissement et des objectifs de rénovation en fonction de la catégorie de logements pourrait permettre d'orienter les ménages vers les mesures les plus efficaces, tant au niveau économique qu'environnemental.

Une seconde piste de réflexion pourrait consister à questionner la pertinence de définir les cibles de performance énergétique à partir d'un indicateur unique et formulé en énergie primaire. En effet, si cette mesure a pour avantage de permettre une prise en compte exhaustive des pertes d'énergie, elle a pour inconvénient de mêler efficacité et substitution par le jeu des coefficients de conversion. Le recours à un objectif de performance énergétique exprimé en énergie primaire non-renouvelable voire à un simple objectif de réduction d'émissions conduirait à une réduction du coût de la décarbonation du secteur.

Enfin, les simulations ayant mis en évidence l'existence de niveaux d'isolation variables en fonction de l'objectif de réduction d'émissions, il convient de souligner que des modifications répétées de la cible de décarbonation peut engendrer des surcoûts importants, liés à la mise en œuvre de travaux d'amélioration de l'enveloppe devenus inadéquats. Si l'évolution des objectifs de réduction d'émissions de CO₂ peut bien entendu se justifier par toutes sortes de logiques, l'existence de ce risque de surcoûts potentiels convient d'être soulignée. L'élaboration de stratégies priorisant la réalisation de travaux coûts-efficaces quel que soit l'objectif de décarbonation de long terme pourraient être de nature à réduire ce risque.

4.7) Conclusion

Ce chapitre repose sur le développement d'un modèle de simulation bottom-up visant à déterminer les mesures à mettre en œuvre afin d'atteindre à moindre coût différents cibles de réduction d'émissions de CO₂ à l'horizon 2035 et les contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques associées. La modélisation du parc de logements est caractérisée par l'adoption d'une approche visant à appréhender l'hétérogénéité du parc résidentiel de manière plus poussée. Dans ce cadre, le parc résidentiel est représenté à travers l'établissement de plus de 35 000 logements types. Par ailleurs, le modèle utilisé est construit de manière à prendre en compte la dimension temporelle de la transformation du parc. L'optimisation des investissements est donc réalisée chaque année sur une période de vingt ans et intègre la dynamique de renouvellement des systèmes de chauffage et une contrainte de rénovation annuelle.

La simulation BAU, consistant à minimiser le coût global de chauffage sur la période, conduit à une baisse d'émissions de CO₂ de 31,6 % entre 2015 et 2035. Cette réduction des émissions repose sur une contribution équilibrée des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques caractérisée par la prédominance de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et de la pénétration des renouvelables. L'évolution des différents facteurs est ensuite examinée pour des cibles de décarbonation du parc résidentiel allant jusqu'à 90 %. Ces simulations mettent en évidence un fait particulièrement notable : non seulement le niveau d'isolation coût efficace se révèle bien moindre que celui visé actuellement par les pouvoirs publics mais celui-ci tend même à diminuer à mesure que les objectifs de réductions d'émissions s'accroissent. Ce constat reste néanmoins à nuancer en fonction des catégories de logements considérées. En effet, à l'inverse de la tendance globale, il apparaît que l'atteinte de hauts niveaux d'abattements à moindre coût dans les appartements dotés de systèmes de chauffage individuels pourrait s'avérer compatible avec d'importants travaux d'isolation. Dans ce cadre, ces résultats militeraient pour l'établissement d'objectifs et de stratégies de décarbonation différenciés en fonction des catégories de logements.

Plus généralement, il apparaît que l'atteinte de cibles de décarbonation croissantes du parc résidentiel est caractérisée par un accroissement progressif des facteurs de substitution au détriment des facteurs d'efficacité. Des analyses de sensibilité, menées sur la valeur du plafond annuel de rénovation et sur la prise en compte de la décarbonation du mix électrique, viennent compléter l'analyse. Elles permettent de pointer l'effet de ces variables sur la contribution des différents facteurs mais les différences constatées demeurent relativement limitées et tendent à s'effacer à mesure que les objectifs de décarbonation augmentent.

Conclusion générale

A rebours de la majorité des travaux s'intéressant à la réalisation de la transition énergétique dans le secteur résidentiel, principalement centrés sur les gisements d'économie d'énergie et leur exploitation, cette thèse s'est focalisée sur les contributions passées et futures des deux principaux leviers mobilisables afin d'opérer la décarbonation du secteur : l'efficacité et la substitution énergétiques.

L'analyse rétrospective réalisée dans le premier chapitre a permis de mettre en évidence la contribution de ces deux facteurs à l'évolution des émissions de CO₂ entre 1990-2010. Si celles-ci n'ont que peu varié sur la période, l'analyse de décomposition souligne le rôle central des gains en efficacité énergétique, qui ont permis de contrebalancer l'augmentation continue de la surface totale de logements à chauffer. Il est apparu, en revanche, que la substitution énergétique n'a que faiblement influencé l'évolution des émissions, la décarbonation du mix énergétique non renouvelable ayant été neutralisée par un recul de l'utilisation du bois-énergie.

La suite des travaux réalisés dans cette thèse a eu pour objet d'évaluer le rôle que les facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques pourraient avoir à l'avenir dans la décarbonation du parc de logements. Ce travail prospectif s'est inscrit dans un cadre précis, celui de la minimisation des coûts et de la recherche de l'optimum technologique. Les caractéristiques et comportements des occupants des logements n'ont pas été modélisés au profit d'une représentation détaillée du parc résidentiel et d'une modélisation explicite des technologies de chauffage et des mesures d'isolation.

A partir de cette approche, le second chapitre a d'abord permis d'évaluer les coûts minimums d'investissement associés à l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et de l'efficacité de production et à la réduction du contenu carbone du mix énergétique. A partir d'un large panel de travaux d'isolation et d'options de remplacement des systèmes de chauffage, d'une modélisation technico-économique des besoins de chaleur des bâtiments et du recours à un processus d'optimisation en deux temps, ces coûts ont été évalués au niveau de logements-types puis à l'échelle du parc résidentiel. Les résultats ont permis de mettre en évidence l'existence de coûts marginaux fortement croissants dans chacun des cas suggérant que l'atteinte d'un objectif de réduction d'émissions à moindre coût reposerait nécessairement sur la mise en œuvre d'un arbitrage judicieux entre ces différents facteurs.

Dans le troisième chapitre, cet arbitrage a été exploré à travers l'étude de l'évolution des différents facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques dans le cadre d'une minimisation systématique du coût global de chauffage des différents segments du parc de logements. Cette modélisation statique du parc résidentiel et des mesures coûts-efficaces a notamment permis de mettre en exergue l'existence d'incompatibilités entre amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des logements et diffusion des technologies

efficaces et/ou renouvelables. Le nécessaire arbitrage que cette relation implique entre les différentes mesures de réduction d'émissions vient souligner que substitution et efficacité énergétiques ne peuvent pas simplement s'additionner et doivent s'articuler de manière complexe dans le cadre d'une minimisation du coût de la décarbonation du secteur résidentiel. Par ailleurs, cette analyse met en évidence l'existence d'un important gisement potentiel de réduction d'émissions, atteignable à coût négatif, s'échelonnant de 28 % à 87 % en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et d'évolution du prix des énergies retenues.

Enfin, capitalisant sur les travaux précédemment menés, le dernier chapitre de cette thèse repose sur le développement et l'utilisation d'un modèle de simulation prospective. L'outil développé permet de mieux appréhender les contraintes techniques existantes. Il se base sur une représentation très fine du parc de logements, permet la prise en compte de la dynamique de renouvellement des systèmes de chauffage et tient compte d'un plafond annuel de logements pouvant faire l'objet de travaux d'isolation. Le modèle simule les transformations du parc de logements sur la période 2015-2035 permettant d'atteindre à moindre coût différents objectifs de réduction d'émissions. La mise en œuvre d'analyses de décomposition sur les résultats obtenus conduit ensuite à l'évaluation des contributions des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques à l'atteinte des cibles de décarbonation.

La simulation « Business As Usual » conduit à une baisse d'émissions de CO₂ de 31,6 % entre 2015 et 2035 basée sur une contribution équilibrée des facteurs d'efficacité et de substitution énergétiques et caractérisée par la prédominance de l'amélioration de l'efficacité des bâtiments et de la pénétration des énergies renouvelables. Des simulations visant des objectifs croissants de réduction d'émissions à l'horizon 2035 sont ensuite réalisées. Les résultats mettent en évidence une contribution grandissante des facteurs de substitution à mesure que les cibles de décarbonation s'accroissent. Le recours aux renouvelables, et dans une moindre mesure, la réduction du contenu carbone du mix énergétique fossile utilisé, constituent les principales actions conduisant à atteindre de hauts niveaux de réduction d'émissions. A l'inverse, la contribution des facteurs d'efficacité à l'atteinte des objectifs diminue rapidement avec l'ambition de la politique climatique. Le niveau moyen d'isolation tend même à décroître lorsque les objectifs de décarbonation s'élèvent. Cette tendance ne s'inverse que pour des objectifs de décarbonation dépassant les 90 %. Des analyses de sensibilité, menées sur la valeur du plafond annuel de rénovation et sur la prise en compte de la décarbonation du mix électrique, viennent compléter ces travaux. Elles permettent de pointer l'effet de ces variables sur la contribution des différents facteurs mais les différences constatées demeurent relativement limitées et tendent à s'effacer à mesure que les objectifs de décarbonation augmentent.

Les résultats de cette thèse soulignent donc que, bien que peu mobilisée par le passé, la substitution énergétique, et par conséquent le remplacement des systèmes de chauffage équipant actuellement les logements, constitue le principal levier permettant de minimiser les coûts associés à l'atteinte de niveaux importants de décarbonation du parc résidentiel

français. Dans notre cadre d'analyse, si l'amélioration de l'efficacité énergétique, et plus spécifiquement le renforcement de l'isolation des logements, s'avère bénéfique pour certains segments du parc résidentiel, elle constitue un facteur à mobiliser modérément dans un strict objectif de minimisation du coût de décarbonation du secteur.

Ces travaux appellent des prolongements dans plusieurs directions, notamment en raison du cadre d'analyse restrictif au sein duquel ils ont été menés et des hypothèses de modélisation retenues. Trois principaux axes d'approfondissement peuvent être évoqués.

Sans sortir d'une logique de recherche d'un optimum technologique, un premier prolongement pourrait consister en une prise en compte plus large des différents coûts et bénéfices associés à chacune des mesures modélisées et de leur évolution au cours du temps. En effet, l'adoption de systèmes de chauffage efficaces et/ou décarbonés et l'amélioration de l'isolation des logements impliquent des gains et des coûts, souvent non-monétaires, autres que ceux pris en compte dans ces travaux. Ainsi, le renforcement de l'enveloppe thermique d'une habitation peut engendrer des bénéfices en termes d'amélioration du confort (thermique, acoustique, voire visuel) et de valorisation patrimoniale du bien et peut simultanément induire des coûts-cachés tels qu'une perte de surface habitable ou une durée d'indisponibilité du logement. Symétriquement, le déploiement d'un système de chauffage performant peut générer des contraintes additionnelles, telles qu'une perte d'espace associée au stockage du combustible ou des pertes de temps liées au réapprovisionnement, et des co-bénéfices, à l'instar de la production de froid durant l'été. De même, le prix des différentes sources d'énergie a été fixé de manière exogène. Or, dans le cadre des scénarios de forte décarbonation du secteur, cette hypothèse s'avère très limitée, notamment en ce qui concerne le bois-énergie. Enfin, aucun effet d'apprentissage n'a été modélisé, le coût des différentes mesures étant supposé stable dans le temps. L'intégration de ces paramètres dans l'analyse pourrait être de nature à modérer ou accentuer les conclusions des présents travaux.

Un second prolongement pourrait reposer sur un élargissement du spectre des technologies et des vecteurs énergétiques modélisés. Ainsi, la représentation des réseaux de chaleur permettrait de passer d'une analyse réalisée à l'échelle du logement à une analyse basée sur le quartier. Dans cette optique, l'évolution de la densité des zones desservies par le chauffage urbain pourrait être mise en perspective avec l'amélioration de l'isolation des logements. De même, la prise en compte du développement du solaire thermique, de la production décentralisée d'électricité et du biogaz pourrait venir significativement modifier les résultats obtenus ici, notamment en ce qui concerne la contribution des différents types de substitution aux évolutions futures des émissions de CO₂. A l'image de ce qui a pu être esquissé ici dans le cadre de l'analyse de sensibilité portant sur le contenu en carbone de l'électricité, la baisse du contenu en carbone du mix énergétique pourrait résulter, dans ce cadre, d'un arbitrage entre déploiement des systèmes de chauffage renouvelable et décarbonation des vecteurs énergétiques.

Enfin, un dernier axe d'approfondissement des travaux menés dans cette thèse consisterait à ne plus s'intéresser à la question des rôles potentiels de la substitution et de l'efficacité

énergétiques que dans le cadre d'un optimum purement technologique. En effet, les travaux menés ici sont uniquement centrés sur la détermination des mesures à mettre en œuvre sur un stock de logements donné au détriment de la modélisation de la situation et du comportement des occupants. Or, la littérature fournie au sujet du « paradoxe de l'efficacité énergétique » souligne vigoureusement les différences existantes entre optimums technico-économiques et réalisation concrète des transformations du parc de logements et de ses équipements. Ainsi, des travaux basés sur des modèles visant à simuler la réalité des comportements d'investissement des ménages et à intégrer les différentes défaillances de marchés et barrières à l'investissement identifiées dans la littérature pourraient permettre de porter un regard complémentaire sur les rôles futurs de l'efficacité et de la substitution dans la décarbonation du parc résidentiel français, et les combinaisons d'instruments de politique économique susceptibles de les déclencher.

Bibliographie

ADEME (2005). Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France. *Publication ADEME*.

ADEME (2013). Isoler son logement : Pour réduire les dépenses d'énergie et améliorer le confort d'un logement existant. *Publication ADEME*.

ADEME (2014). Base carbone – Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone. *Publication ADEME*.

ADEME (2016). Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du Logement (OPEN), Campagne 2015. Disponible en ligne : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf.

ADEME (2017). Mix électrique 100% EnR en 2050 : quelles opportunités pour décarboner les systèmes gaz et chaleur ? *Rapport Ademe*, 51 p.

ADEME (2018). Les solutions pour optimiser les systèmes de chauffage et d'eau chaude. *Publication ADEME*.

ADEME et CSTB (2018). Mission conjointe ADEME-CSTB : Transformation du CITE en prime forfaitaire. *Rapport à destination de la DHUP*.

Alcott, B. (2008). The sufficiency strategy: Would rich-world frugality lower environmental impact? *Ecological Economics*, 2008, vol. 64, no 4, p. 770-786.

Allibe, B. (2012a). *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme-Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes*. Partie II, Chapitre I Thèse de doctorat. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS)

Allibe, B. (2012b). *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme-Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes*. Partie I, Chapitre II Thèse de doctorat. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS).

AMORCE (2015). Compétitivité des réseaux de chaleur en 2015. Série économique RCE, 26. Disponible en ligne : <https://www.amorce.asso.fr>

ANCRE (2016). Scénario « Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte » (LTECV). Présentation. Disponible en ligne : <https://docplayer.fr/37467382-Scenario-loi-de-transition-energetique-pour-la-croissance-verte-àltecv.html>

Ang, B.W. et Zhang, F.Q., (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, vol.25, no 12, p.1149-1176.

Ang, B.W. (2004). Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy policy*, vol. 32, no 9, p. 1131-1139.

Ang, B.W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy policy*, vol. 33, no 7, p. 867-871.

Ang, B.W et Liu, N.A. (2007). Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy policy*, vol. 35, no 1, p. 238-246.

Baleažentis, A., Baleažentis, T., et Sreimikiene, D. (2011). The energy intensity in Lithuania during 1995–2009: a LMDI approach. *Energy Policy*, vol. 39, no 11, p. 7322-7334.

Batiprix (2015). Bibliothèque complète des ouvrages. Disponible en ligne : <https://www.batiprix.com/15-bibliotheque-en-telechargement>

Belaïd, F. (2016). Understanding the spectrum of domestic energy consumption: empirical evidence from France. *Energy Policy*, vol. 92, p. 220-233.

Belaïd, F. (2017). Untangling the complexity of the direct and indirect determinants of the residential energy consumption in France: Quantitative analysis using a structural equation modeling approach. *Energy Policy*, vol. 110, p. 246-256.

Boermans, T., Bettgenhäuser, K., Offermann, M. et Schimschar, S. (2012). Renovation tracks for Europe up to 2050: Building renovation in Europe- what are the choices? *Ecofys*.

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., et al. (2006). Scenario types and techniques: towards a user's guide. *Futures*, vol. 38, no 7, p. 723-739.

Branger, F. (2011). *Modélisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel français*. Mémoire de master. Paris, AgroParisTech.

Carpène, L., Bertrand, V., Ollivier, T. (2014). Comparing Biomass-Based and Conventional Heating Systems with Costly CO2 Emissions: Heat Cost estimations and CO2 Breakeven Prices. *Climate Economics Chair, Information and debates Series*, n°34.

Cavailhès, J., Joly, D., Brossard, T., et al. (2011). La consommation d'énergie des ménages en France. Dans : *Convention MEEDM-INRA*. p. 0009.

Cayla, J.-M. (2011). *Les ménages sous la contrainte carbone : exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiels et transports avec TIMES*. Thèse de doctorat. Paris, Mines-ParisTech.

CEREN (2015). Données statistiques du CEREN, années. Centre d'études et des recherches économiques sur l'énergie. Disponible en ligne : <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>

CITEPA (2015). Inventaire SECTEN 2015. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France disponible en ligne : <https://citepa.org/fr/catalog/show/64>

CITEPA (2018). Inventaire SECTEN 2018, disponible en ligne : <https://citepa.org/fr/catalog/show/64>

Charlier, D. et Risch, A. (2012). Evaluation of the impact of environmental public policy measures on energy consumption and greenhouse gas emissions in the French residential sector. *Energy Policy*, vol. 46, p. 170-184.

CGDD (2015). La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ? *La Revue du CGDD*. Disponible en ligne : http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_TEMIS_0081488/la-renovation-thermique-des-logements-quels-enjeux-queelles-solutions

Collet, P. (2011). La réglementation thermique de 1974 à aujourd'hui. *Publications Actu Environnement*. <http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/energie-batiment-rt2012/historique-reglementation-thermique.php4>.

Diakoulaki, D. et Mandaraka, M. (2007). Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO₂ emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, vol. 29, no 4, p. 636-664.

Difs, K., Bennstam, M., Trygg, L., *et al.* (2010) Energy conservation measures in buildings heated by district heating—a local energy system perspective. *Energy*, vol. 35, no 8, p. 3194-3203.

Dinamic (2015). La valeur verte des logements d'après les bases Notariales BIEN et PERVAL. 2015. disponible en ligne : https://www.notaires.fr/sites/default/files/Valeur-Verte_Etude_Mars2015.pdf

Ecoiffier, M. (2017). Les acteurs économiques et l'environnement. *Dossier 3 : Une analyse de la baisse des émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie en France depuis 1990*.

Effinergie (2011). Règles techniques label BBC-Effinergie rénovation ou certification Effinergie rénovation. *Publication Effinergie*.

Ferrara, M., Virgone, J., Fabrizio, E., *et al.* (2013). Modeling zero energy building: technical and economical optimization. Dans : *CLIMAMED 2013*. 8p.

Field, C., Barros, V., Stocker, T., *et al.* (2014). *Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport des Groupes de travail I et II du GIEC*.

Publié pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. ISBN 978-92-9169-233-0.

Friesen, C., Malbert, B., et Nolmark, H. (2012). Renovating to passive housing in the Swedish million programme. *Planning Theory & Practice*, vol. 13, no 1, p. 113-174.

Giraudet, L.-G. (2011). *Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : une évaluation multidimensionnelle*. Thèse de doctorat. Paris, Université Paris Est.

Gollier, C. (2002) Discounting an uncertain future. *Journal of public economics*, vol. 85, no 2, p. 149-166.

Greening, L.A., Greene, D.L., Difiglio, C. (2000), "Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey", *Energy Policy*, 28(6-7):389-401

Henriques, S.T. et Kander, A. (2010). The modest environmental relief resulting from the transition to a service economy. *Ecological Economics*, vol. 70, no 2, p. 271-282.

Herring, H., Sorrell, S., *et al.* (2009). Energy efficiency and sustainable consumption. *The Rebound Effect, Hampshire*.

INSEE (2010). La population des régions en 2040, INSEE première.

INSEE (2015). Les conditions de logement fin 2013. Publication de l'Institut National de la Statistique et des études économiques. 2015. disponible en ligne : https://www.insee.fr/fr/metadonnees/.../DOC_ENQ_LOGEMENT_2013_QUEST.pdf

Jaccard, M. et Dennis, M. (2006). Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model. *Environmental Modeling & Assessment*, vol. 11, no 2, p. 91-100.

Jaffe, A.B. et Stavins, R.N. (1994). The energy-efficiency gap What does it mean? *Energy policy*, vol. 22, no 10, p. 804-810.

Jakob, M. (2006). Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector. *Energy policy*, vol. 34, no 2, p. 172-187.

Journal Officiel. (2012). Arrêté du 27 janvier 2012 relatif à l'utilisation réglementaire des logiciels pour l'élaboration des diagnostics de performance énergétique suivant la méthode de calcul 3CL-DPE version 2012 et modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif aux méthodes et procédures applicables au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine.

LTECV (2015). LOI N 2015-992 Du 17 Août 2015 Relative À La Transition Énergétique Pour La Croissance Verte. *Journal Officiel*.

- Kaya, Y. (1989). Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios. *Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group*.
- Kim, S. (2017). LMDI decomposition analysis of energy consumption in the Korean manufacturing sector. *Sustainability*, vol. 9, no 2, p. 202.
- Lechtenböhmer, S. et Schüring, A. (2011). The potential for large-scale savings from insulating residential buildings in the EU. *Energy efficiency*, vol. 4, no 2, p. 257-270.
- Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K.S., et al. (2007). Residential and commercial buildings. *Climate change*, vol. 20, p. 17.
- Li, D. H., Yang, L. et Lam, J.C. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications—a review. *Energy* 54, 1–10.
- Lovins, A.B. (2004) Energy efficiency, taxonomic overview. *Encyclopedia of Energy*, vol. 2, no 401, p. 383-401.
- Madlener, R. et Alcott, B. (2009) Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs. *Energy*, vol. 34, no3, p. 370-376.
- Mairet, N. et Decellas, F. (2009). Determinants of energy demand in the French service sector: A decomposition analysis. *Energy Policy*, vol. 37, no 7, p. 2734-2744.
- Marchand, C., Laurent, M.-H., et Bamberg, Y. (2008). Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050 ? *Futuribles*, n° 343, p. 79-100.
- Mata, E., Kalagasidis, A.S., et Johnsson, F. (2014). Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. *Building and Environment*, vol. 81, p. 270-282.
- Mendiluce, M. et Schipper, L. (2011). Trends in passenger transport and freight energy use in Spain. *Energy Policy*, vol. 39, no 10, p. 6466-6475.
- Mills, E. (2009). Building commissioning: A golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse-gas emissions. Rapport pour la California Energy Commission Public Interest Energy Research (PIER)
- MIQPC (2008). Mission Interministérielle des Constructions Publiques 2000-2004. *Marché public de maîtrise d'œuvre. Bâtiments neufs, Partie 2-Cahier des Clauses, Administratives Particulières, Partie 3: Cahier des Clauses Techniques Particulières Contenu des éléments de mission, Annexe: Mission du mandataire du groupement de maîtrise d'œuvre*.

MTES (2017a). Présentation du Plan Climat, Ministère de la Transition écologique et solidaire.
2017b. Plan climat de paris. *Annexe de la délibération DEVE*, vol. 116.

MTES (2017b) Plan rénovation énergétique des bâtiments. Disponible en ligne :
https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20de%20r%C3%A9novation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique_0.pdf

MTES (2017c). Référentiel Energie-Carbone pour les bâtiments neufs : Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs.

Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E., *et al.* (2010). Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models. *Annual review of environment and resources*, vol. 35, p. 305-344.

Naucmér, T. et Enkvist, P.-A. (2009). Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. *McKinsey & Company*, vol. 192.

Nauleau, M.-L. (2015) *L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel français : analyse des déterminants d'investissement et des politiques publiques*. Thèse de doctorat. Paris, EHESS.

Nässén, J. et Holmberg, J. (2013). On the potential trade-offs between energy supply and end-use technologies for residential heating. *Energy policy*, vol. 59, p. 470-480.

Négawatt (2017). Scénario négaWatt 2017-2050 : Hypothèses et résultats. Disponible en ligne :
https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_hypotheses-et-resultats.pdf

Observ'ER (2016). Le baromètre 2016 des énergies renouvelables en France. *Publications Observ'ER*.

Orselli, J. (2008). *Economie et substitution d'énergie dans les bâtiments, Conseil général des ponts et Chaussées, rapport n°004831-01 pour le ministère de l'Ecologie, du développement et de l'Aménagement durables*.

Papagiannaki, K. et Diakoulaki, D. (2009). Decomposition analysis of CO2 emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark. *Energy Policy*, vol. 37, no 8, p. 3259-3267.

Profil (2017). Tâche 3. Prix de la Rénovation et Organisation de la Filière : Analyse quantitative des travaux de rénovation énergétique en résidentiel. Présentation de restitution.

Quinet, E. et Baumstark, L. (2013) *L'évaluation socioéconomique des investissements publics : Commissariat général à la stratégie et à la prospective*. Rapports & Documents, 351 p.

RAGE (2012). Analyse détaillée du parc résidentiel existant. *Règles de l'Art Grenelle Environnement*, 2012. Disponible en ligne :

<https://media.xpair.com/pdf/reglementation/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf>

Reddy, B.S. et Ray, B.K. (2010). Decomposition of energy consumption and energy intensity in Indian manufacturing industries. *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no 1, p. 35-47.

Robinet A., Hainaut, H. et Postic, S. (2018). Ménages et rénovation énergétique : une vue d'ensemble du cadre législatif et réglementaire en France. *Finance, Investissement et Climat*, Point Climat. Disponible en ligne : <https://www.i4ce.org/download/menages-et-renovation-energetique-une-vue-densemble-du-cadre-legislatif-et-reglementaire-en-france/>

Ribas Portella, J. M. (2012). Bottom-up description of the french building stock, including archetype buildings and energy demand. *Master's thesis*, Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden.

Rolfsman, B. et Gustafsson, S.-I. (2003). Energy conservation conflicts in district heating systems. *International journal of energy research*, vol. 27, no 1, p. 31-43.

Rolfsman, B. (2004). Combined heat-and-power plants and district heating in a deregulated electricity market. *Applied energy*, vol. 78, no 1, p. 37-52.

Rouquette, C. (2015). L'enquête Performances de l'habitat, équipements, besoins et usages de l'énergie (Phébus) : quel dispositif pour quels enseignements ? *La Revue du CGDD*, p. 47.

Rydén, B., Johnsson, J., et Wene, C.-O. (1993). CHP production in integrated energy systems examples from five Swedish communities. *Energy Policy*, vol. 21, no 2, p. 176-190.

Shahiduzzaman, MD. et Alam, K. (2013). Changes in energy efficiency in Australia: a decomposition of aggregate energy intensity using logarithmic mean Divisia approach. *Energy Policy*, vol. 56, p. 341-351.

Sidler, O. (2012). La rénovation thermique des bâtiments en France Enjeux et stratégie. *Enertech, Ingénieurs conseils, France*.

SNCU (2017). Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid édition 2017, Restitution des statistiques sur les données 2016. Disponible en ligne : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-29857-enquete-sncu-2017.pdf>.

Swan, L.G. et Ugursal, V.I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, no 8, p. 1819-1835.

- Terés-Zubiaga, J., Campos-Celador, A. González-Pino, I. et Escudero-Revilla, C. (2015). Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in northern Spain. *Energy and Buildings* 86, 194–202.
- Teissier, O. et Meunier, L. (2008). Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l’horizon 2050. *Notes de synthèse du SESP*, no 170, p. 5-15.
- Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, p. 411-419.
- Timilsina, G.R. et Shrestha, A. (2009) Transport sector CO2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options. *Energy policy*, vol. 37, no 11, p. 4523-4539.
- Train, K. (1985). Discount rates in consumers' energy-related decisions: A review of the literature. *Energy*, vol. 10, no 12, p. 1243-1253.
- Traisnel, J.-P. (2001). Habitat et développement durable, bilan rétrospectif et prospectif. *Les cahiers du CLIP*, vol. 13, p. 5-72.
- Tuominen, P. et Seppänen, T. (2017). Estimating the Value of Price Risk Reduction in Energy Efficiency Investments in Buildings. *Energies* 10(10), 1545.
- Uniclima (2015). Le marché du génie climatique : statistiques, 2015. Disponible en ligne : <https://www.uniclima.fr/statistiques.html>
- UNFCCC (1997). United Nations framework convention on climate change. *Kyoto Protocol, Kyoto*, vol. 19.
- Ürge-Vorsatz, D., Petrichenko, K., et Butcher, A.C. (2011). How far can buildings take us in solving climate change? A novel approach to building energy and related emission forecasting. Dans : *European Council for an Energy Efficient Economy (eceee): Energy Efficiency First: The Foundation of a Low Carbon Society. Conference Proceedings*. p. 1343-1354.
- Wene, C.O. (1980). The optimum mix of conservation and substitution: an example from retrofitting of old buildings. *International Journal of Energy Research*, vol. 4, no 3, p. 271-282.
- Wene, C.O. et Andersson, O. (1981). The optimum mix of supply and conservation of energy in average size cities: Methodology and results. In : *Proceedings of IEA Conference on New Energy Conservation Technologies and their Commercialisation*. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Wilkinson, P., Smith, K.R., Davies, M., et al. (2009). Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: household energy. *The Lancet*, vol. 374, no 9705, p. 1917-1929.

Annexes

Annexes du Chapitre II

Annexe 2.1 : Prix et performance des différents matériaux d'isolation modélisés pour les logements individuels et les logements collectifs.

Tableau 7.1- Matériaux d'isolation et prix d'achat pour les maisons (en EUR/m²)

	Technologies	Coefficient de transfert thermique U (W.K ⁻¹ m ⁻²)	Prix des matériaux et de l'installation, TVA incluse (en EUR/m ²)
Murs	ITI Laine verre 4cm	0.77	71.74 €
	ITI Laine verre 6cm	0.50	73.85 €
	ITI Laine verre 8cm	0.38	75.96 €
	ITI Laine verre 10cm	0.30	78.07 €
	ITE L verre vêtture 10cm	0.35	194.12 €
	ITE L verre vêtture 12cm	0.29	195.18 €
	ITE L verre vêtture 14cm	0.25	196.23 €
	ITE L roche ss enduit 8cm	0.45	169.86 €
	ITE L roche ss enduit 10cm	0.36	177.24 €
	ITE L roche ss enduit 12cm	0.30	182.52 €
	ITE L roche ss enduit 14cm	0.26	192.01 €
	ITE L roche ss enduit 16cm	0.23	200.45 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 6cm	0.65	151.92 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 8cm	0.48	163.53 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 10cm	0.38	168.80 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 12cm	0.32	175.13 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 14cm	0.27	180.41 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 15cm	0.26	183.57 €
	ITE (roche 20) + ITI (minérale 10)	0.11	288.02 €
Fenêtre	4/16/4 double vitrage	2	380.00 €
	4/16/4 double vitrage argon	1.7	420.00 €
	4/16/4/16/4 triple	1.2	480.00 €
Toiture	Laine minérale chevrons 10cm	0.35	85.46 €
	Laine minérale chevrons 12cm	0.29	86.51 €
	Laine minérale chevrons 16cm	0.22	87.57 €
	L min plan combles perdus 20cm	0.2	20.05 €
	L min plan combles perdus 30cm	0.13	22.16 €
	L roche soufflée plaf leger 20.5cm	0.22	34.82 €
	La roche soufflée plaf leger 29.5cm	0.15	53.81 €
Plancher	L roche sous face 10cm	0.34	128.71 €
	L roche sous face 12cm	0.29	133.99 €
	L roche sous face 14cm	0.25	139.26 €

Sources : données issues de Batiprix

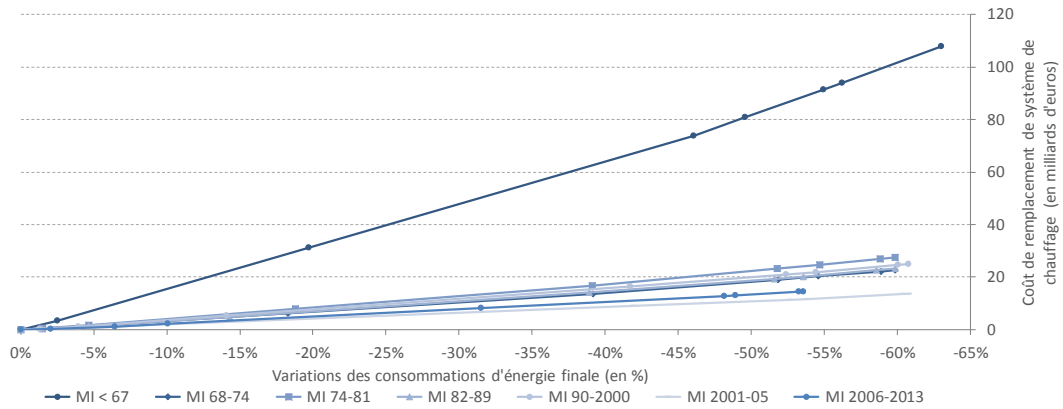
Tableau 7.2- Matériaux d'isolation et prix d'achat pour les immeubles (en EUR/m²)

	Technologies	Coefficient de transfert thermique U (W.K ⁻¹ m ⁻²)	Prix des matériaux et de l'installation, TVA incluse (en EUR/m ²)
Murs	ITI Laine verre 4cm	0.77	71.74 €
	ITI Laine verre 6cm	0.50	73.85 €
	ITI Laine verre 8cm	0.38	75.96 €
	ITI Laine verre 10cm	0.30	78.07 €
	ITE L verre vêtue 10cm	0.35	194.12 €
	ITE L verre vêtue 12cm	0.29	195.18 €
	ITE L verre vêtue 14cm	0.25	196.23 €
	ITE L roche ss enduit 8cm	0.45	169.86 €
	ITE L roche ss enduit 10cm	0.36	177.24 €
	ITE L roche ss enduit 12cm	0.30	182.52 €
	ITE L roche ss enduit 14cm	0.26	192.01 €
	ITE L roche ss enduit 16cm	0.23	200.45 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 6cm	0.65	151.92 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 8cm	0.48	163.53 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 10cm	0.38	168.80 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 12cm	0.32	175.13 €
	ITE Polyst. Exp ss enduit 14cm	0.27	180.41 €
ITE Polyst. Exp ss enduit 15cm	0.26	183.57 €	
Fenêtre	4/16/4 double vitrage	2	380.00 €
	4/16/4 double vitrage argon	1.7	420.00 €
	4/16/4/16/4 triple	1.2	480.00 €
Toiture	Polyuréthane sur toit terrasse 6cm	0.38	100.23 €
	Polyuréthane sur toit terrasse 12cm	0.19	113.94 €
	Polyuréthane sur toit terrasse 16cm	0.14	123.44 €
Plancher	L roche sous face 6cm	0.63	119.22 €
	L roche sous face 8cm	0.43	124.49 €
	L roche sous face 10cm	0.34	128.71 €
	L roche sous face 12cm	0.29	133.99 €
	L roche sous face 14cm	0.25	139.26 €

Sources : données issues de Batiprix

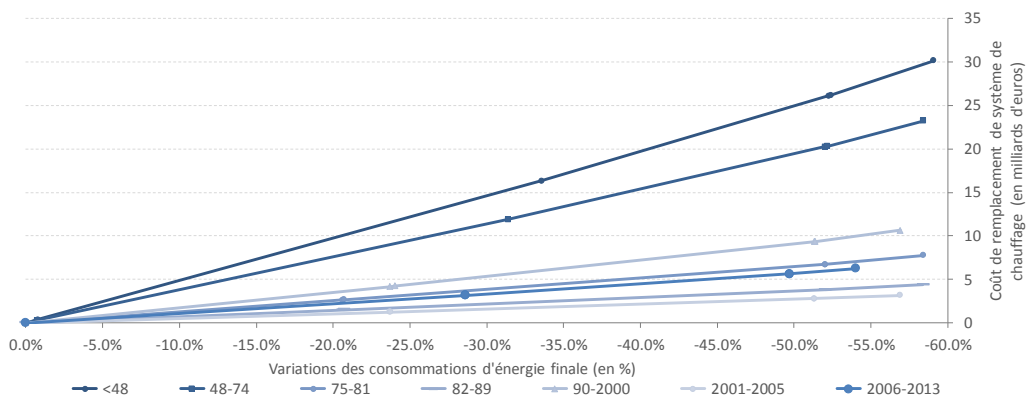
Annexe 2.2 : Estimation des coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production par catégorie de logements

Figure 7.1- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les maisons-types



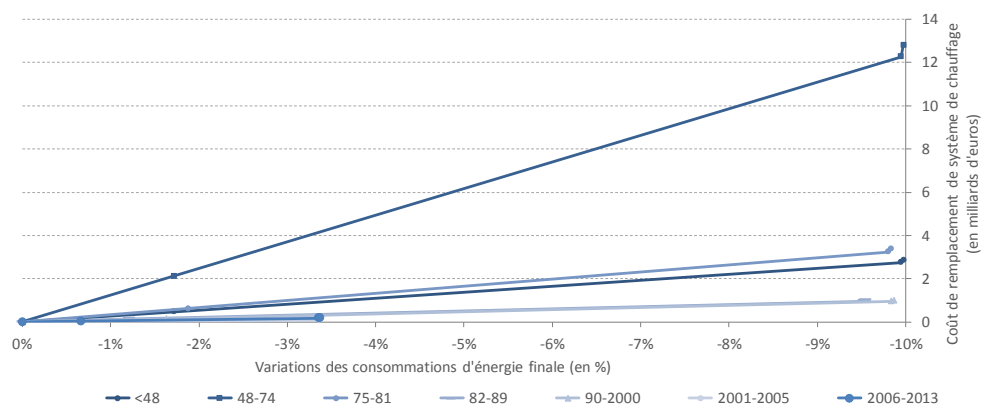
Sources : calculs de l'auteur à partir des données coûts

Figure 7.2- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les appartements-types dotés d'un système de chauffage individuel



Sources : calculs de l'auteur à partir des données coûts

Figure 7.3- Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité énergétique pour les appartements-types dotés d'un système de chauffage collectif



Sources : calculs de l'auteur à partir des données coûts

Annexe 2.3 : Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie par catégorie de logements et période de construction

Tableau 7.3- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les appartements-types chauffés individuellement

	Rendement énergétique moyen initial	Rendement énergétique moyen maximum	Réduction de consommation d'énergie finale maximum
<48	0.91	2.21	-59.1 %
48-74	0.91	2.18	-58.4 %
75-81	0.91	2.18	-58.4 %
82-89	0.91	2.18	-58.4 %
90-2000	0.92	2.13	-56.9 %
2001-2005	0.92	2.13	-56.9 %
2006-2013	0.95	2.06	-54.0 %
Ensemble	0.91	2.19	-58.4 %

Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

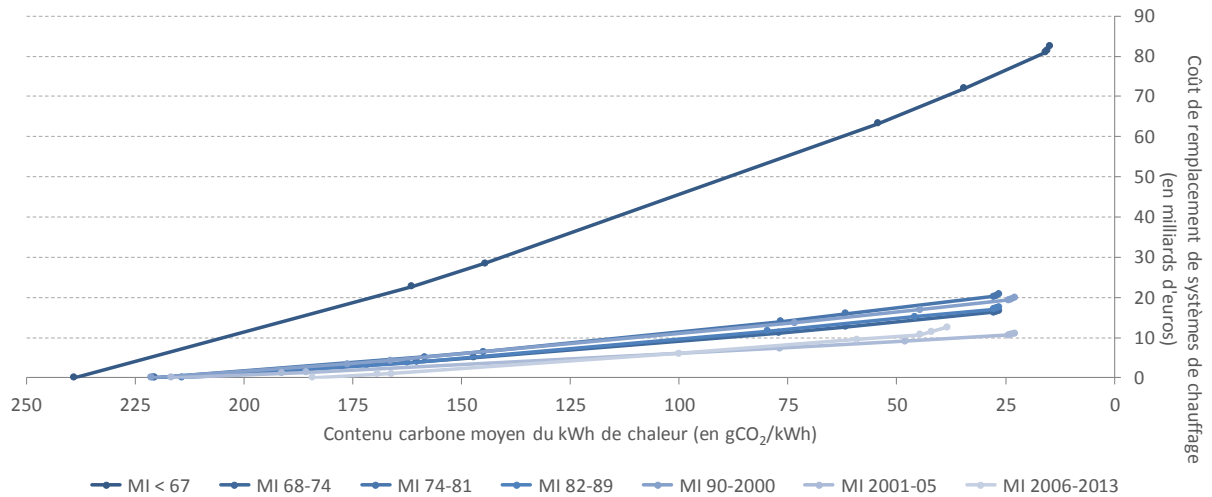
Tableau 7.4- Rendement énergétique moyen et réduction maximale des consommations d'énergie pour les appartements-types chauffés collectivement

	Rendement énergétique moyen initial	Rendement énergétique moyen maximum	Réduction de consommation d'énergie finale maximum
<48	0.86	0.96	-10.0 %
48-74	0.86	0.96	-10.0 %
75-81	0.87	0.96	-9.8 %
82-89	0.87	0.96	-9.5 %
90-2000	0.87	0.96	-9.9 %
2001-2005	0.93	0.96	-3.4 %
2006-2013	0.93	0.96	-3.4 %
Ensemble	0.87	0.96	-9.8 %

Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de performance des systèmes

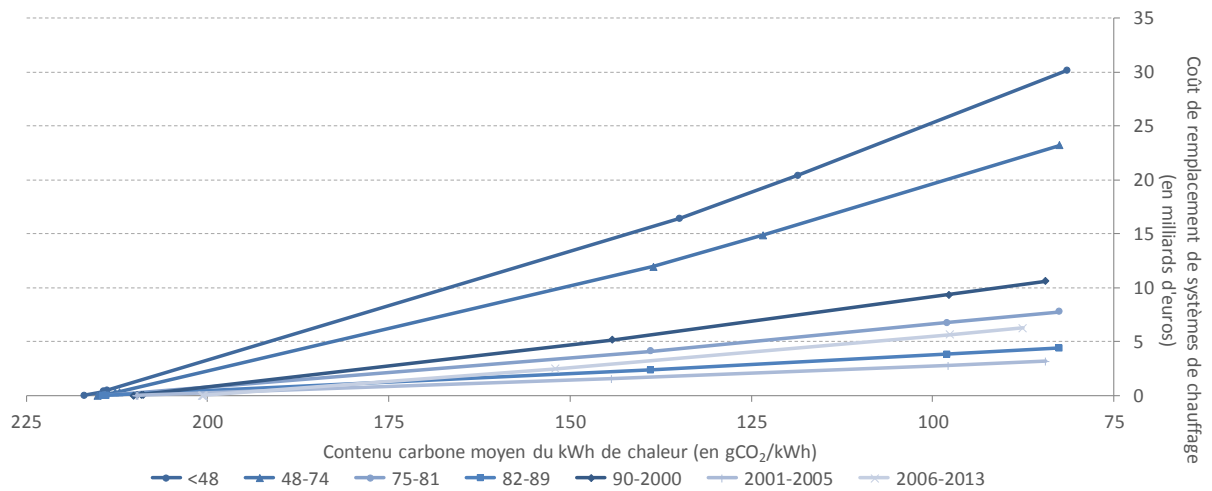
Annexe 2.4 : Estimation des coûts minimums d'amélioration de contenu carbone pour chaque catégorie de logements

Figure 7.4- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des maisons par période de construction



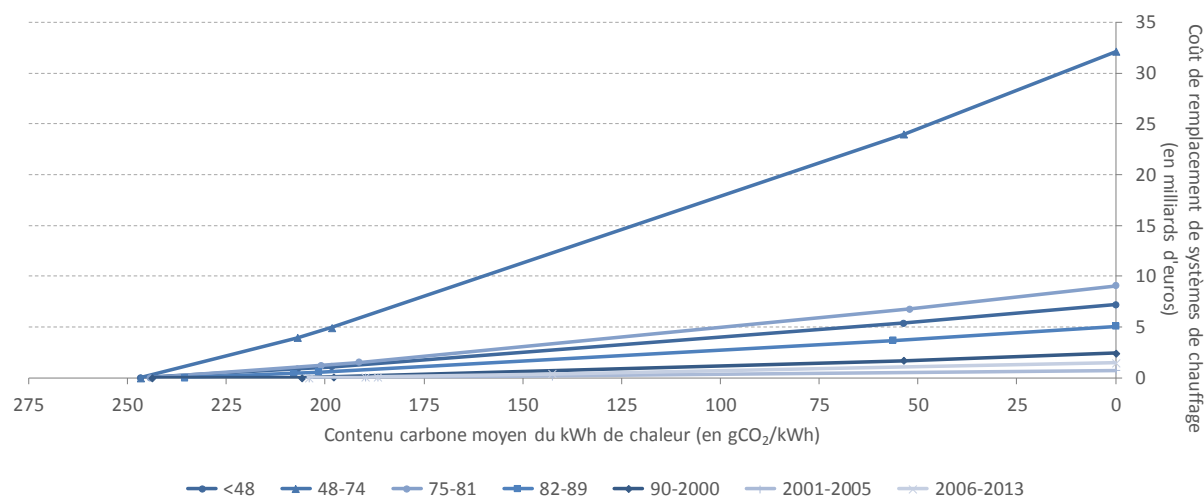
Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de caractéristiques des systèmes

Figure 7.5- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des appartements chauffés individuellement par période de construction



Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de caractéristiques des systèmes

Figure 7.6- Coûts minimums d'amélioration de contenu carbone des appartements chauffés collectivement par période de construction



Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de caractéristiques des systèmes

Annexe 2.5 : Estimations des coûts minimums d'amélioration de contenu carbone pour chaque catégorie de logements

Tableau 7.5- Contenu carbone initial et minimal pour les appartements-types chauffés individuellement (en gr de CO₂/kWh de chaleur)

	Contenu carbone initial	Contenu carbone minimal	Réduction maximale du contenu carbone
<48	217.0	81.4	62.5 %
48-74	215.2	82.5	61.7 %
75-81	214.4	82.5	61.5 %
82-89	214.4	82.5	61.5 %
90-2000	210.2	74.5	64.6 %
2001-2005	209.8	74.5	64.5 %
2006-2013	200.7	75.9	62.2 %
Ensemble	215.0	80.4	62.6 %

Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de caractéristiques des systèmes

Tableau 7.6- Contenu carbone initial et minimal pour les appartements-types chauffés collectivement (en gr de CO₂/kWh de chaleur)

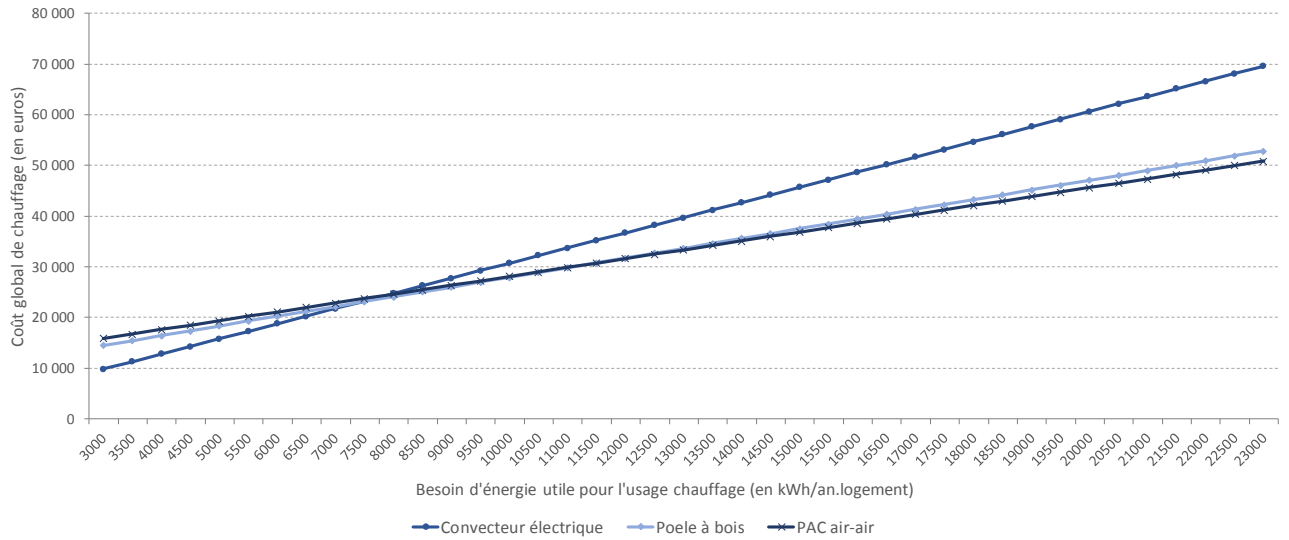
	Contenu carbone initial	Contenu carbone minimal	Réduction maximale du contenu carbone
<48	246.8	0.0	100 %
48-74	246.8	0.0	100 %
75-81	244.2	0.0	100 %
82-89	235.5	0.0	100 %
90-2000	243.7	0.0	100 %
2001-2005	204.2	0.0	100 %
2006-2013	204.2	0.0	100 %
Ensemble	245.24	0.0	100 %

Sources : calculs de l'auteur sur la base des hypothèses de coûts et de caractéristiques des systèmes

Annexes du Chapitre III

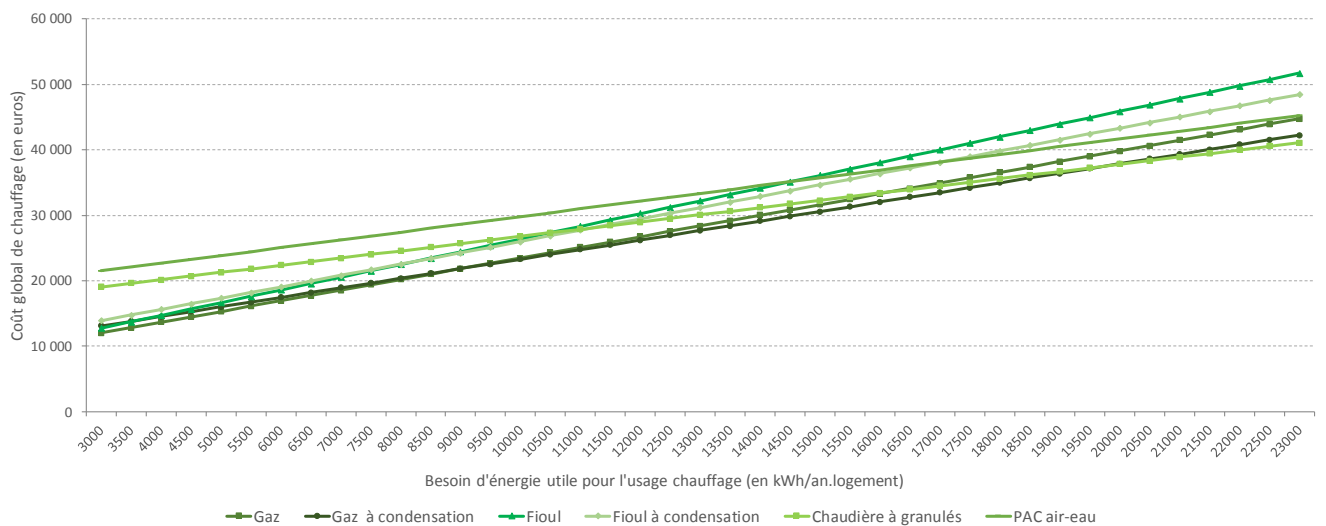
Annexe 3.1 : Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage individuels et collectifs en fonction du besoin d'énergie utile

Figure 7.7- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage décentralisés individuels en fonction du besoin d'énergie utile



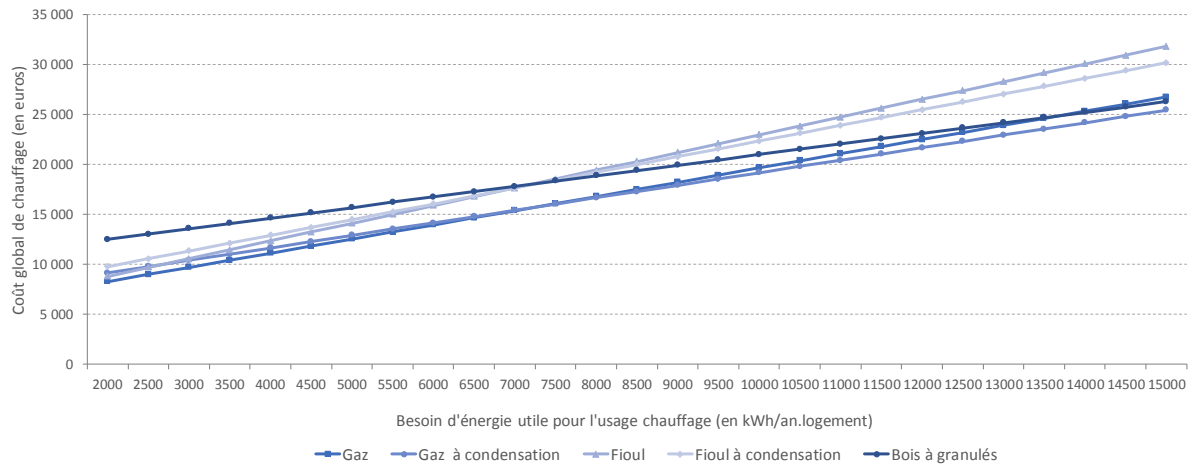
Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Figure 7.8- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage centralisés individuels en fonction du besoin d'énergie utile



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Figure 7.9- Evolution du coût global de chauffage associé aux systèmes de chauffage collectifs en fonction du besoin d'énergie utile



Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Annexe 3.2 : Coût global de chauffage et classement des technologies de chauffage individuels et collectifs pour les appartements-types

Tableau 7.7- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage individuel par appartement-type (en euros)

	LC <48	LC 48-74	LC 75-81	LC 82-89	LC 90-2000	LC 2001-2005	LC 2006-2013
BEU annuel (en KWh/(m ² .an))	9 102	8 917	4 419	3 373	2 982	2 869	2 869
Systèmes décentralisés							
Convecteur électricité	28 073	27 519	14 068	10 939	9 770	9 432	9 432
PAC air-air	26 697	26 372	18 483	16 648	15 963	15 764	15 764
Systèmes centralisés							
Gaz	22 009	21 706	14 351	12 640	12 001	11 816	11 816
Gaz à condensation	21 986	21 716	15 158	13 632	13 062	12 897	12 897
Fioul	24 660	24 299	15 549	13 514	12 754	12 534	12 534
Fioul à condensation	24 452	24 131	16 355	14 546	13 870	13 675	13 675
PAC air-eau	28 735	28 515	23 176	21 934	21 470	21 336	21 336

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.8- Coût global de chauffage associé à l'adoption de chaque technologie de chauffage collectif par appartement-type (en euros)

	LC <48	LC 48-74	LC 75-81	LC 82-89	LC 90-2000	LC 2001-2005	LC 2006-2013
BEU annuel (en KWh/(m ² .an))	9 102	8 917	4 419	3 373	2 982	2 869	2 869
Gaz	18 352	18 089	11 701	10 215	9 660	9 500	9 500
Gaz à condensation	18 027	17 795	12 162	10 852	10 363	10 221	10 221
Fioul	21 361	21 033	13 073	11 222	10 530	10 330	10 330
Fioul à condensation	20 915	20 624	13 564	11 922	11 309	11 131	11 131
Chaudière à granulés	21 732	21 536	16 772	15 664	15 250	15 130	15 130

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.9- Classement des technologies de chauffage individuel par ordre de compétitivité pour les appartements-types

	Systèmes décentralisés		Systèmes centralisés				
	Convecteur électricité	PAC air-air	Gaz	Gaz à condensation	Fioul	Fioul à condensation	PAC air-eau
LC <48	2	1	2	1	4	3	5
LC 48-74	2	1	1	2	4	3	5
LC 75-81	1	2	1	2	3	4	5
LC 82-89	1	2	1	3	2	4	5
LC 90-2000	1	2	1	3	2	4	5
LC 2001-2005	1	2	1	3	2	4	5
LC 2006-2013	1	2	1	3	2	4	5

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.10- Classement des technologies de chauffage collectif par ordre de compétitivité pour les appartements-types

	Gaz	Gaz à condensation	Fioul	Fioul à condensation	Chaudière à granulés
LC <48	2	1	4	3	5
LC 48-74	2	1	4	3	5
LC 75-81	1	2	3	4	5
LC 82-89	1	2	3	4	5
LC 90-2000	1	2	3	4	5
LC 2001-2005	1	2	3	4	5
LC 2006-2013	1	2	3	4	5

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Annexe 3.3 : Evolution du CGC et des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces

Tableau 7.11- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces

		Initial (en milliards d'euros)	Systèmes de chauffage coûts-efficaces (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	322	261	-18,8 %
	68-74	68	54	-19,8 %
	74-81	69	57	-16,3 %
	82-89	52	45	-13,6 %
	90-2000	49	44	-11,0 %
	2001-05	23	22	-8,4 %
	2006-2013	31	28	-11,6 %
	Total	614	511	-16,8 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	58	54	-8,3 %
	48-74	45	42	-8,1 %
	75-81	9	9	-5,6 %
	82-89	4	4	-5,5 %
	90-2000	11	10	-6,3 %
	2001-2005	3	3	-6,1 %
	2006-2013	7	6	-8,4 %
	Total	138	127	-7,8 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	13	12	-8,7 %
	48-74	58	53	-8,6 %
	75-81	11	10	-7,6 %
	82-89	6	5	-11,0 %
	90-2000	3	3	-8,6 %
	2001-2005	1	1	-13,1 %
	2006-2013	2	1	-13,2 %
	Total	93	85	-8,7 %
Total	845	723	-14,5 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.12- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas d'adoption des technologies de chauffage coûts-efficaces

		Initiales (en Mt de CO ₂)	Systèmes de chauffage coûts-efficaces (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	35,0	2,8	-92,0 %
	68-74	6,3	4,4	-31,2 %
	75-81	6,2	4,2	-31,4 %
	82-89	4,5	3,0	-32,5 %
	90-2000	4,2	3,0	-30,2 %
	2001-05	1,9	1,6	-19,4 %
	2006-2013	2,0	2,1	5,8 %
	Total	60,1	21,0	-65,0 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	4,7	3,3	-29,6 %
	48-74	3,6	2,7	-24,3 %
	75-81	0,6	0,6	-6,2 %
	82-89	0,3	0,3	-6,1 %
	90-2000	0,6	0,6	-5,9 %
	2001-2005	0,2	0,2	-5,9 %
	2006-2013	0,4	0,4	-4,1 %
	Total	10,4	8,0	-23,0 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	1,6	1,3	-19,9 %
	48-74	7,0	5,6	-19,9 %
	75-81	1,0	0,9	-5,5 %
	82-89	0,4	0,4	5,8 %
	90-2000	0,2	0,2	-2,9 %
	2001-2005	0,0	0,1	13,7 %
	2006-2013	0,1	0,1	13,7 %
	Total	10,4	8,7	-16,7 %
Total	80,9	37,7	-53,4 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Annexe 3.4 : Evolution du CGC et des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces

Tableau 7.13- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces

		Initial (en milliards d'euros)	Mise en œuvre des opérations d'isolation coûts-efficaces (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	322	279	-13,4 %
	68-74	68	63	-6,5 %
	74-81	69	69	0,0 %
	82-89	52	52	0,0 %
	90-2000	49	49	0,0 %
	2001-05	23	23	0,0 %
	2006-2013	31	31	0,0 %
	Total	614	566	-7,8 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	58	48	-17,9 %
	48-74	45	37	-17,4 %
	75-81	9	9	0,0 %
	82-89	4	4	0,0 %
	90-2000	11	11	0,0 %
	2001-2005	3	3	0,0 %
	2006-2013	7	7	0,0 %
	Total	138	120	-13,3 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	13	12	-5,1 %
	48-74	58	56	-3,7 %
	75-81	11	11	0,0 %
	82-89	6	6	0,0 %
	90-2000	3	3	0,0 %
	2001-2005	1	1	0,0 %
	2006-2013	2	2	0,0 %
	Total	93	90	-3,0 %
Total	845	776	-8,1 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.14- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre des travaux d'isolation coûts-efficaces

		Initiales (en Mt de CO ₂)	Mise en œuvre des opérations d'isolation coûts-efficaces (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	35,0	21,0	-40,0 %
	68-74	6,3	5,0	-20,4 %
	74-81	6,2	6,2	0,0 %
	82-89	4,5	4,5	0,0 %
	90-2000	4,2	4,2	0,0 %
	2001-05	1,9	1,9	0,0 %
	2006-2013	2,0	2,0	0,0 %
	Total	60,1	44,4	-26,1 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	4,7	2,3	-51,9 %
	48-74	3,6	1,7	-52,4 %
	75-81	0,6	0,6	0,0 %
	82-89	0,3	0,3	0,0 %
	90-2000	0,6	0,6	0,0 %
	2001-2005	0,2	0,2	0,0 %
	2006-2013	0,4	0,4	0,0 %
	Total	10,4	6,0	-41,7 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	1,6	1,0	-38,9 %
	48-74	7,0	4,4	-37,7 %
	75-81	1,0	1,0	0,0 %
	82-89	0,4	0,4	0,0 %
	90-2000	0,2	0,2	0,0 %
	2001-2005	0,0	0,0	0,0 %
	2006-2013	0,1	0,1	0,0 %
	Total	10,4	7,1	-31,6 %
Total	80,9	57,6	-28,8 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Annexe 3.5 : Evolution du CGC et des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage coût-efficace

Tableau 7.15- Evolution du CGC par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage cout-efficace

		Initial (en milliards d'euros)	Remplacements de systèmes de chauffage et mesures d'isolation coût-efficaces (en milliards d'euros)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	322	242	-24,7 %
	68-74	68	50	-25,6 %
	74-81	69	53	-22,5 %
	82-89	52	42	-20,0 %
	90-2000	49	41	-16,3 %
	2001-05	23	20	-13,7 %
	2006-2013	31	26	-18,0 %
	Total	614	474	-22,7 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	58	46	-21,1 %
	48-74	45	36	-20,6 %
	75-81	9	9	-6,7 %
	82-89	4	4	-12,9 %
	90-2000	11	9	-15,3 %
	2001-2005	3	3	-16,1 %
	2006-2013	7	6	-16,4 %
	Total	138	112	-18,9 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	13	12	-10,1 %
	48-74	58	53	-8,8 %
	75-81	11	10	-7,6 %
	82-89	6	5	-11,0 %
	90-2000	3	3	-8,6 %
	2001-2005	1	1	-13,1 %
	2006-2013	2	1	-13,2 %
	Total	93	84	-9,1 %
Total	845	671	-20,6 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Tableau 7.16- Evolution des émissions de CO₂ par type et catégorie de logements en cas de mise en œuvre de la combinaison isolation/remplacement de systèmes de chauffage coût-efficace

		Initiales (en Mt de CO ₂)	Remplacements de systèmes de chauffage et mesures d'isolation coût-efficaces (en Mt de CO ₂)	Variation (en %)
Logements individuels	< 67	35,0	15,4	-55,9 %
	68-74	6,3	4,4	-31,2 %
	74-81	6,2	4,2	-31,4 %
	82-89	4,5	3,0	-32,5 %
	90-2000	4,2	3,0	-30,2 %
	2001-05	1,9	1,6	-19,4 %
	2006-2013	2,0	2,1	5,8 %
	Total	60,1	33,6	-44,0 %
Logements collectifs - chauffage individuel	<48	4,7	2,1	-54,6 %
	48-74	3,6	1,6	-55,3 %
	75-81	0,6	0,6	-6,2 %
	82-89	0,3	0,3	-6,1 %
	90-2000	0,6	0,6	-5,9 %
	2001-2005	0,2	0,2	-5,9 %
	2006-2013	0,4	0,3	-15,1 %
	Total	10,4	5,7	-45,4 %
Logements collectifs - chauffage collectif	<48	1,6	0,9	-42,3 %
	48-74	7,0	4,2	-41,1 %
	75-81	1,0	0,9	-5,5 %
	82-89	0,4	0,4	5,8 %
	90-2000	0,2	0,2	-2,9 %
	2001-2005	0,0	0,1	13,7 %
	2006-2013	0,1	0,1	13,7 %
	Total	10,4	6,8	-34,5 %
Total	80,9	46,1	-43,0 %	

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts et de prix

Annexe 3.6 : Résultats de l'analyse de sensibilité

Tableau 7.17- Evolution, en %, du CGC, des émissions de CO₂, et des facteurs de substitution et d'efficacité énergétiques en fonction des hypothèses de taux d'actualisation et de variation des prix des énergies retenues

		CGC	CO ₂	Besoin d'énergie utile	Rendement énergétique moyen	Contenu carbone moyen du mix énergétique
Scénario central	Système de chauffage	-14,5%	-53,4%	0,0%	24,5%	-42,0 %
	Isolation	-8,1%	-28,8%	-28,6%	0,3%	0,1 %
	Combinaison	-20,6%	-46,0%	-25,7%	18,7%	-8,9 %
Actualisation à 2%	Système de chauffage	-17,7%	-58,4%	0,0%	29,4%	-46,2 %
	Isolation	-15,3%	-34,6%	-34,1%	0,3%	-0,5 %
	Combinaison	-27,9%	-47,9%	-29,0%	24,1%	-5,5 %
Actualisation à 8%	Système de chauffage	-12,6%	-23,3%	0,0%	15,4%	-11,5 %
	Isolation	-3,8%	-13,9%	-13,7%	0,0%	-0,3 %
	Combinaison	-18,0%	-28,0%	-5,4%	8,5%	-17,4 %
Prix de l'énergie croissants	Système de chauffage	-18,8%	-58,5%	0,0%	31,1%	-45,6 %
	Isolation	-12,9%	-30,7%	-30,9%	0,2%	0,5 %
	Combinaison	-26,3%	-46,2%	-28,3%	28,0%	-4,0 %
Prix du carbone à 200 euros/tCO₂	Système de chauffage	-28,5%	-82,2%	0,0%	20,2%	-78,7 %
	Isolation	-13,8%	-34,0%	-33,2%	0,4%	-0,8 %
	Combinaison	-34,9%	-87,2%	-13,3%	10,1%	-83,8 %

Source : calculs de l'auteur à partir des données de coûts de prix

Annexes du Chapitre IV

Annexe 4.1 : Evolution des systèmes de chauffage collective dans le cadre de la simulation BAU

Tableau 7.18- Répartition des systèmes de chauffage au sein des logements individuels en fonction de la période de construction

	< 67	68-74	74-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013	Ensemble
Convecteurs électriques	1 057 065	443 045	567 911	488 361	448 720	248 359	487 014	3 740 475
Chaudières gaz classiques	2 393 948	427 616	534 165	555 742	677 733	438 853	366 774	5 394 831
Chaudières gaz à condensation	598 487	106 904	133 541	138 935	169 433	109 713	91 694	1 348 708
Chaudières fioul classiques	1 563 044	279 195	370 655	217 477	249 572	78 226	62 413	2 820 582
Chaudières fioul à condensation	390 761	69 799	92 663	54 369	62 393	19 556	15 601	705 142
PAC air-eau	40 275	12 220	15 666	13 471	15 872	8 786	53 111	159 401
Poêles à bois	264 266	110 761	141 978	122 090	112 180	62 089	126 952	940 316
Chaudières à granulés	140 447	25 087	33 645	35 012	20 959	6 807	5 432	267 389
PAC air-air	127 534	38 699	49 605	42 658	50 262	27 820	168 186	504 764
Total	6 575 827	1 513 326	1 939 830	1 668 115	1 807 124	1 000 210	1 377 177	15 881 608

Sources : calculs de l'auteur à partir des données PHEBUS, des données CEREN, de l'enquête logement de l'INSEE et des données d'Observ'Er

Tableau 7.19- Répartition des systèmes de chauffage individuels au sein des logements collectifs en fonction de la période de construction

	<48	48-74	75-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013	Ensemble
Convecteurs électriques	955 379	820 659	294 029	169 059	489 673	146 028	371 093	3 245 920
Chaudières gaz classiques	980 147	714 956	261 548	150 301	330 142	99 424	160 153	2 696 671
Chaudières gaz à condensation	245 037	178 739	65 387	37 575	82 535	24 856	40 038	674 168
Chaudières fioul classiques	22 999	16 775	620	434	3 734	144	231	44 937
Chaudières fioul à condensation	5 748	4 194	155	108	933	36	56	11 230
PAC air-eau	2 506	0	0	0	1 139	338	4 184	8 167
PAC air-air	7 943	0	0	0	3 604	1 074	13 250	25 871
Total	2 219 759	1 735 323	621 739	357 478	911 760	271 900	589 005	6 706 964

Sources : calculs de l'auteur à partir des données PHEBUS, des données CEREN, de l'enquête logement de l'INSEE et des données d'Observ'Er

Tableau 7.20- Répartition des systèmes de chauffage individuels au sein des logements collectifs en fonction de la période de construction

	<48	48-74	75-81	82-89	90-2000	2001-2005	2006-2013	Ensemble
Chaudières gaz classiques	385 734	1 722 422	485 469	291 636	152 918	13 944	27 571	3 079 694
Chaudières gaz à condensation	165 414	738 608	210 341	130 305	65 849	52 214	103 252	1 465 983
Chaudières fioul classiques	80 459	359 271	114 596	42 193	30 390	3 449	6 824	637 182
Chaudières fioul à condensation	20 115	89 818	28 649	10 548	7 595	862	1 707	159 294
Chaudières bois à granulés	9 348	41 734	25 383	22 338	6 422	8 013	15 841	129 079
Total	661 070	2 951 853	864 438	497 020	263 174	78 482	155 195	5 471 232

Sources : calculs de l'auteur à partir des données PHEBUS, des données CEREN, de l'enquête logement de l'INSEE et des données d'Observ'Er

Annexe 4.2 : Les coûts spécifiques associés au remplacement des différentes technologies de chauffage

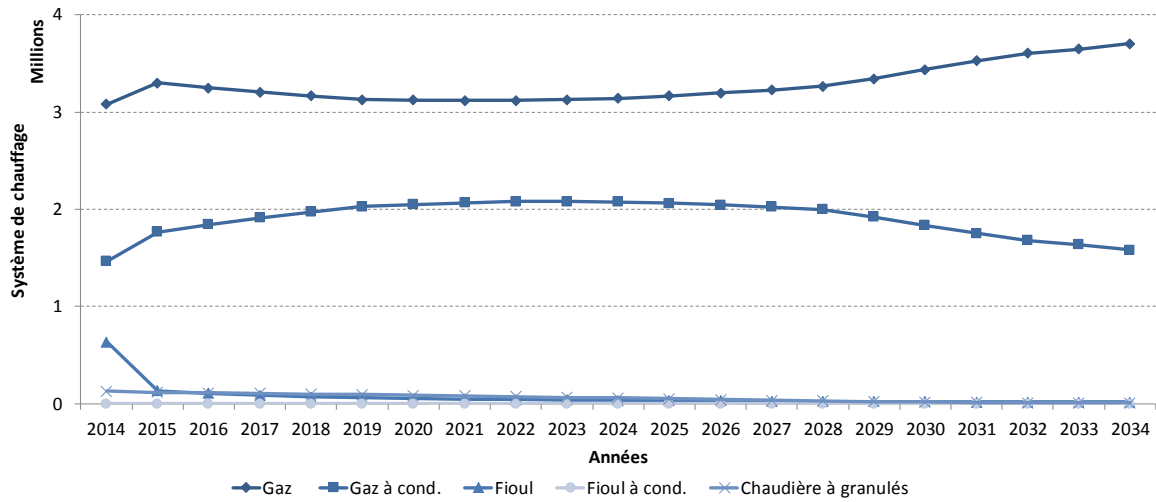
Tableau 7.21- Coûts spécifiques utilisés pour le remplacement des différents systèmes de chauffage en fonction de la technologie employée initialement

	En cas de vecteur énergétique différent	En cas de vecteur énergétique similaire
Systèmes de chauffage individuels		
Convecteurs électriques	0	0
Chaudières gaz classiques	600	0
Chaudières gaz à condensation	1200	400
Chaudières fioul classiques	1300	0
Chaudières fioul à condensation	2000	400
Pompes à chaleur air-eau	2200	200
Poêles à bois	600	600
Chaudières bois à granulés	2500	500
Pompes à chaleur air-air	1000	1000
Systèmes de chauffage collectifs		
Chaudières gaz classiques	480	0
Chaudières gaz à condensation	960	320
Chaudières fioul classiques	1040	0
Chaudières fioul à condensation	1600	320
Chaudières bois à granulés	2000	400

Sources : d'après données de coûts et hypothèses de modélisation

Annexe 4.3 : L'évolution des systèmes de chauffage collectif entre 2015 et 2035 dans la simulation BAU

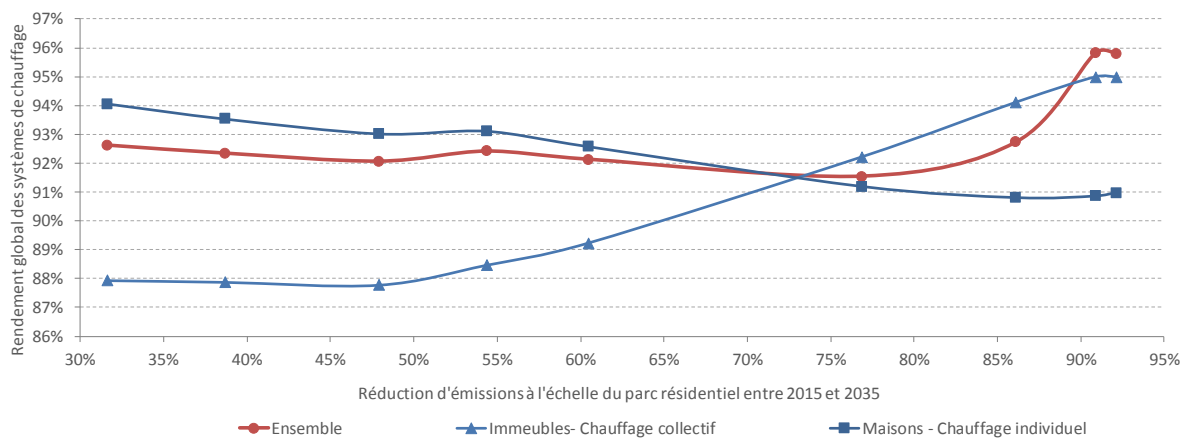
Figure 7.10- Evolution des technologies de chauffage équipant les immeubles chauffés collectivement entre 2015 et 2035 dans le cadre de la simulation BAU



Source : résultats de la simulation BAU

Annexe 4.4 : Efficacité moyenne des systèmes par catégorie de logements en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO₂ du parc résidentiel

Figure 7.11- Efficacité moyenne des systèmes des maisons et des immeubles chauffés collectivement en fonction de l'objectif de réduction d'émissions du parc de logements résidentiel



Sources : résultats de la simulation BAU

Résumé

Abstract

Mots Clés

Keywords