

Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France

Jérémy El Beze

Sous la direction de Christian De Perthuis

*CGEMP, Université Paris Dauphine
Chaire Économie du Climat*

20 décembre 2018



Sommaire

Problématique et méthodologie retenue

Résultats clefs

Conclusion

Introduction

- Le bâtiment : un secteur clef dans la réalisation de la transition énergétique
- Secteur hétérogène et diffus...
- ...mais disposant du potentiel d'efficacité énergétique et de réduction d'émission le plus accessible et le plus rentable (*Levine et al., 2007*)
- Les technologies actuellement disponibles permettraient de réduire drastiquement les émissions de CO_2 (*Friesen et al., 2012* ; *Li et al., 2013*)
- Un tropisme des pouvoirs publics marqué vers l'efficacité énergétique
- Deux vecteurs de réduction d'émissions de CO_2 :
 - L'efficacité énergétique
 - La substitution énergétique

Substitution et efficacité

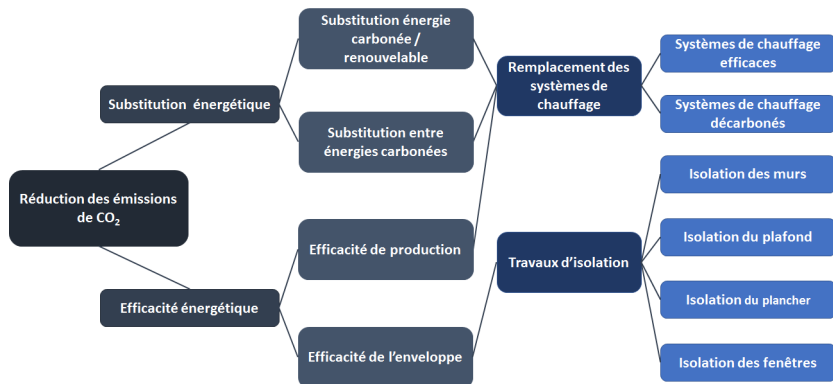


Figure: Efficacité, substitution et opérations de rénovation énergétique

L'analyse rétrospective

- Quelles contributions de la substitution et de l'efficacité énergétiques entre 1990 et 2010 ?

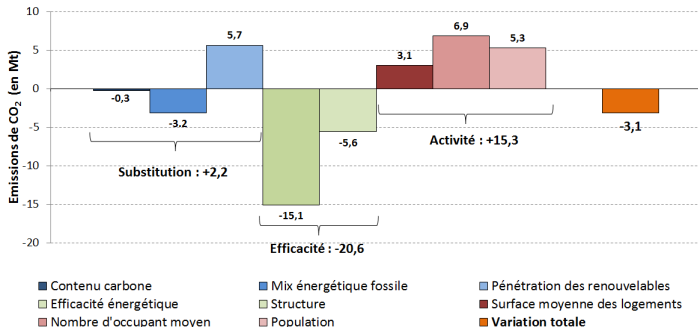


Figure: Décomposition des émissions associées à l'usage chauffage entre 1990 et 2010 (Méthode *LMDI* sur la base des données du CEREN)

Question de recherche

Comment articuler substitution et efficacité énergétiques afin de minimiser les coûts de décarbonation du parc de logements en France ?

La modélisation prospective du secteur résidentiel dans la littérature

- Des travaux souvent centrés sur un des types de mesures pris séparément
- Différents types de scénarios (*Börjeson et al., 2006*)
 - Les scénarios **prédictifs** (*Giraudet, 2011 ; Nauleau, 2015*)
 - Les scénarios **exploratoires** (*Traisnel, 2001 ; Teissier et Meunier, 2008 ; Orselli, 2008*)
 - Les scénarios **normatifs** (*Rolfsman, 2004 ; Nässén et Holmberg, 2013*)
- Différents types de modèles (*Mundaca et al., 2010*)
 - Les modèles de **simulation** (*Charlier et Risch, 2012*)
 - Les modèles de **comptabilité** (*Marchand et al., 2008*)
 - Les modèles d'**optimisation** (*Cayla, 2011*)

Approche et choix méthodologiques

- Une **approche normative** centrée sur la minimisation des coûts
 - Une logique de **planificateur social**
 - La recherche d'un **optimum technologique**
 - Un critère d'arbitrage : **la minimisation des coûts**
- Une modélisation **technico-économique bottom-up**
 - Une représentation **fine du parc de logements**
 - Une modélisation **explicite des technologies de chauffage et des options d'isolation**
 - Une demande de chauffage déterminée **par un modèle thermique**

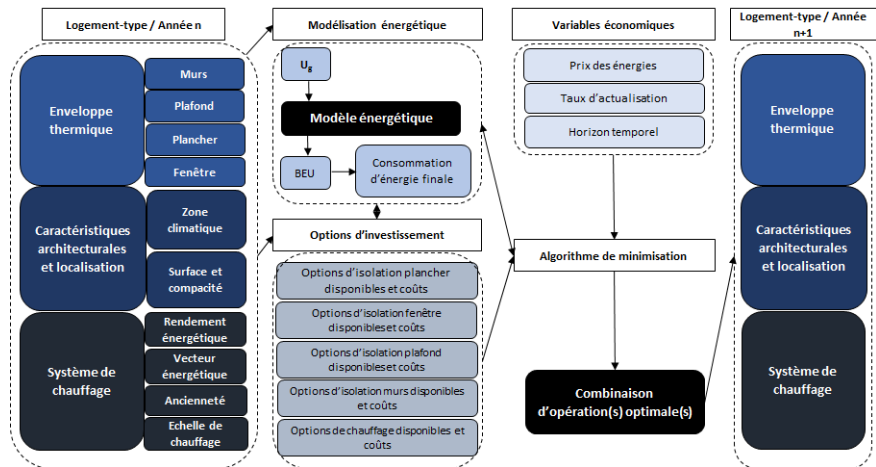


Figure: Principes de modélisation

L'incompatibilité entre déploiement des systèmes efficaces et/ou renouvelables et travaux d'isolation

- Les système de chauffage efficace et/ou décarbonés sont caractérisés par :
 - un coût d'investissement élevé
 - un coût marginal de production de chaleur réduit
- Des systèmes décarbonés compétitifs pour des niveaux de consommation de chauffage élevés
- Des incitations d'autant plus faibles à isoler que le coût marginal de production est faible
- Efficacité et substitution énergétiques sont donc partiellement incompatibles dans une optique de minimisation des coûts

Les caractéristiques du modèle Zephyr-Chaleur

- Modèle de simulation prospective
 - approche technico-économique
 - centré sur la minimisation annuelle du CGC entre 2015 et 2035
 - représentation fine du parc de logements et de systèmes de chauffage (35 000 logements types)
- Simule la mise en oeuvre des travaux d'isolation et des remplacements de systèmes de chauffage permettant d'atteindre une cible de réduction d'émissions à moindre coût
- Tient compte des dynamiques de renouvellement des systèmes de chauffage et de réalisation des travaux de rénovation

Contribution des facteurs dans le scénario BAU

- Contribution des différents facteurs dans le scénario BAU ?

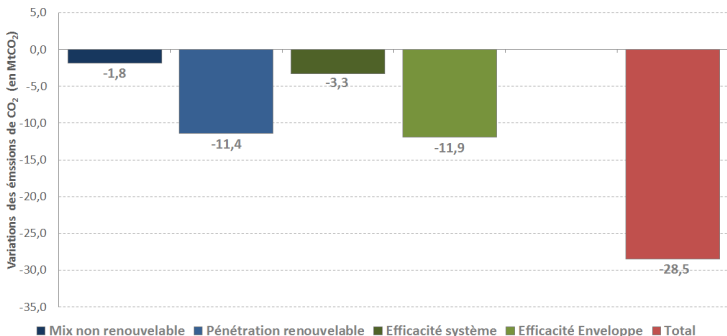


Figure: Contribution de la substitution et de l'efficacité énergétiques à la décarbonation du parc dans le scénario BAU

Évolution de l'efficacité de l'enveloppe thermique (1)

- Comment évolue le niveau moyen d'isolation lorsque les objectifs de décarbonation s'élèvent ?

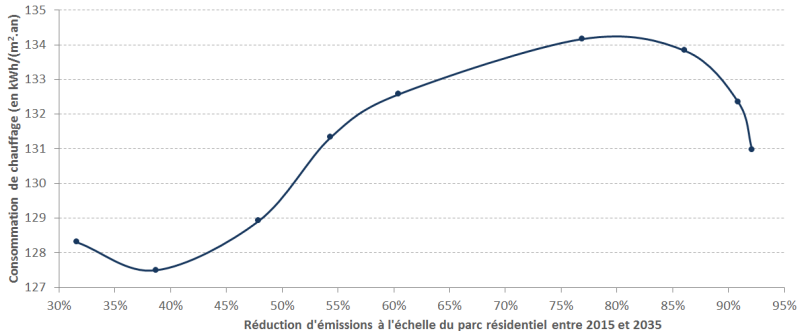


Figure: Évolution de l'efficacité de l'enveloppe thermique scénario BAU

Évolution de l'efficacité de l'enveloppe thermique (2)

- Quelle évolution par catégorie de logements ?

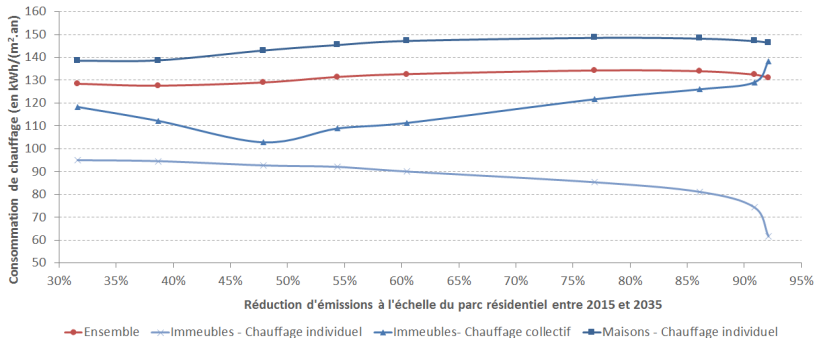


Figure: Évolution de l'efficacité de l'enveloppe thermique par catégorie de logements

Substitution, efficacité et objectif de décarbonation

- Contributions des facteurs de substitution et d'efficacité en fonction de l'objectif de décarbonation

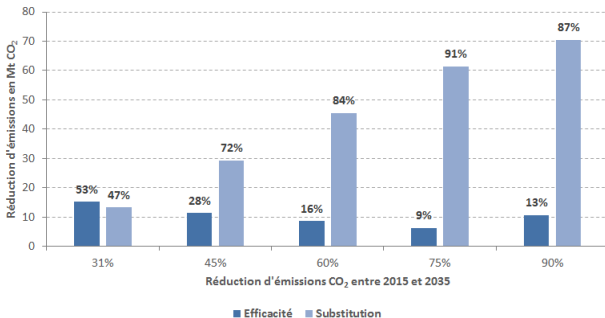


Figure: Évolution de l'efficacité de l'enveloppe thermique en fonction de la cible de décarbonation

Implications en termes de politique publique

- Un potentiel rééquilibrage des objectifs et des dispositifs incitatifs à opérer
 - La généralisation du standard BBC impliquerait des niveaux de consommation d'énergie finale deux à trois fois supérieurs aux niveaux coûts-efficaces à l'origine d'importants surcoûts
 - Réduire la contrainte d'isolation et introduire une incitation à la décarbonation pourrait réduire les coûts et renforcer la probabilité d'atteinte des objectifs de réduction d'émissions
- L'intérêt d'une segmentation des stratégies de décarbonation du parc en fonction de la catégorie de logements

Approfondissements et prolongements

- Prise en compte plus large des bénéfices et coûts associés aux différentes mesures de rénovations énergétiques : valorisation des coûts intangibles, des co-bénéfices et des externalités.
- Élargissement du spectre des technologies et des vecteurs énergétiques modélisés : réseaux de chaleur, biogaz, solaire thermique, etc.

Merci beaucoup pour votre attention

Annexe 1.1

Consommations observées et consommation prédites maisons

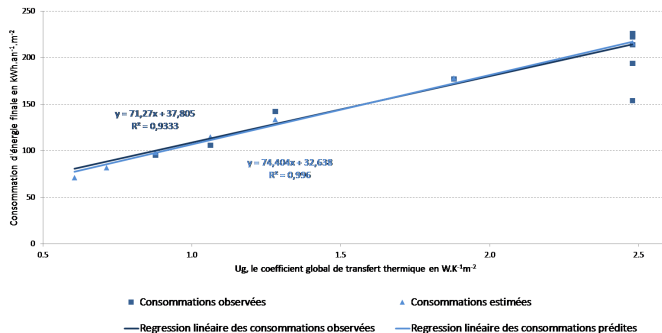


Figure: Consommations observées et consommations prédites maisons

Annexe 1.2

Consommations observées et consommation prédites appartements

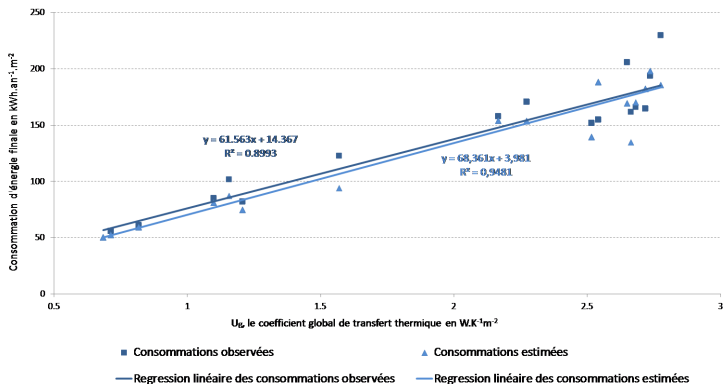


Figure: Consommations observées et consommations prédites appartements

Annexe 1.3

Les maisons types

	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

Figure: Caractéristiques des maisons-types

Annexe 1.4

Les appartements-types

	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

Figure: Caractéristiques des appartements-types

Annexe 1.5

Les systèmes de chauffage modélisés

	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

Figure: Systèmes de chauffage modélisés

Annexe 1.6

Ventilation des systèmes de chauffage dans la logements individuels

	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 %

Figure: Ventilation des systèmes de chauffage dans la logements individuels

Annexe 1.7

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

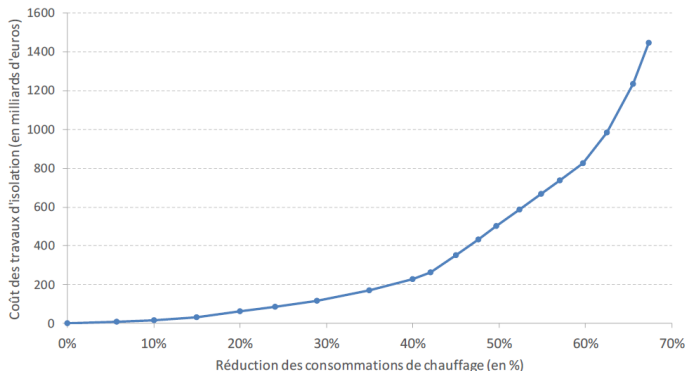


Figure: Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe du parc résidentiel

Annexe 1.8

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

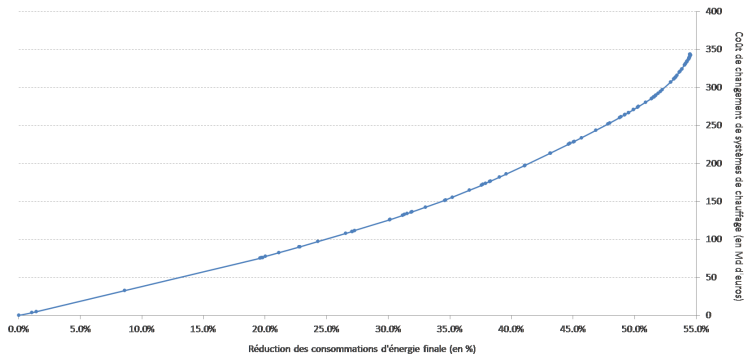


Figure: Coûts minimums d'amélioration de l'efficacité de production du parc résidentiel

Annexe 1.9

Coûts minimums d'amélioration du contenu carbone

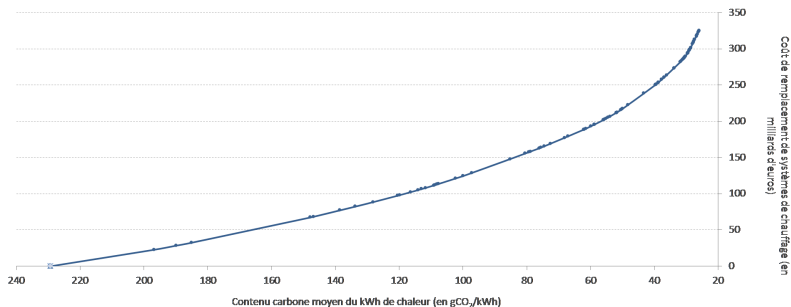


Figure: Coûts minimums d'amélioration du contenu carbone

Annexe 2.1

Matrice de coûts d'isolation pour les logements individuels

	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

Figure: Matrice de coûts d'isolation pour les logements individuels

Annexe 2.2

Matrice de coûts d'isolation pour les logements collectifs

	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

Figure: Matrice de coûts d'isolation pour les logements collectifs

Annexe 2.3

Coût de l'énergie et coût d'investissement des systèmes de chauffage

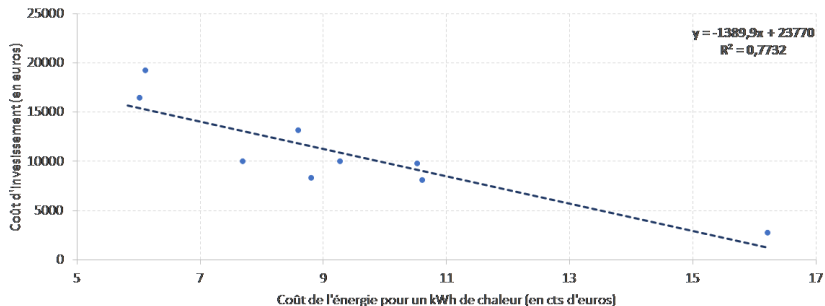


Figure: Coût de l'énergie et coût d'investissement des systèmes de chauffage

Annexe 2.4

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

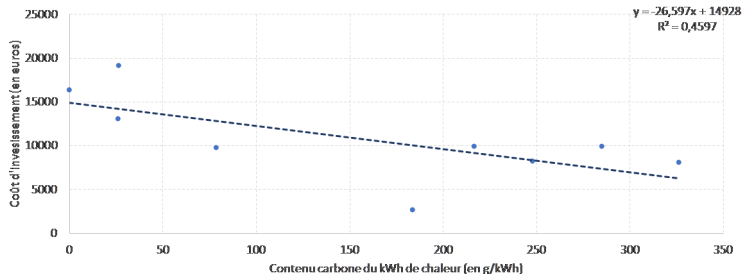


Figure: Contenu carbone du kWh de chaleur et coût d'investissement des systèmes de chauffage

Annexe 2.5

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

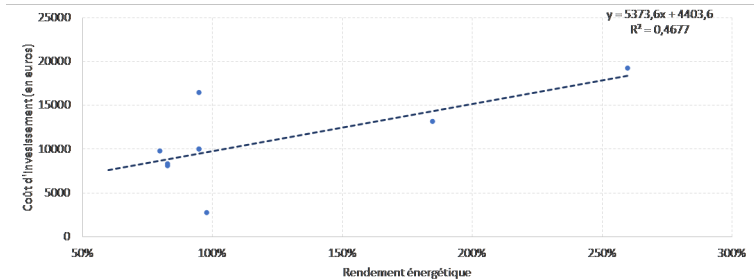


Figure: Rendement énergétique et coût d'investissement des systèmes de chauffage

Annexe 2.6

Coût marginal de production d'un kWh de chaleur par technologie de chauffage

	Prix d'un kWh de chaleur $\left(\frac{p_e}{\eta_h}\right)$	Prix d'un kWh de chaleur additionnel sur la période $\left(\frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_h^t}{(1+r)^t}\right)$	Coût marginal de production $\left(a_h + \frac{a_h^t}{(1+r)^t} + \frac{1}{\eta_h} \sum_{t=1}^n \frac{p_h^t}{(1+r)^t}\right)$
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

Figure: Coût marginal de production d'un kWh de chaleur par technologie de chauffage

Annexe 2.7

CGC associé à un appartement-type construit avant 1967 en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation

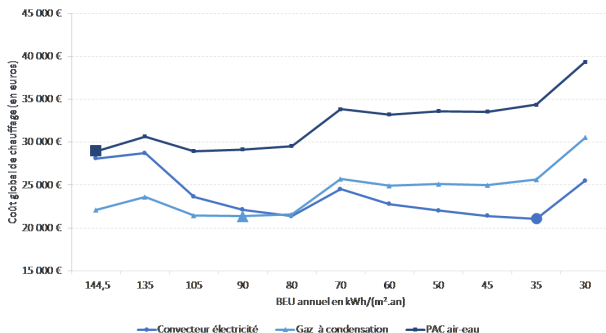


Figure: CGC associé à un appartement-type construit avant 1967 en fonction de l'ampleur des travaux d'isolation

Annexe 2.9

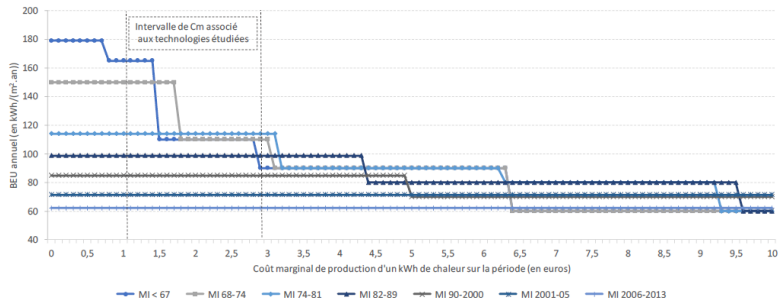


Figure: Niveau de consommation de chauffage optimal en fonction du coût marginal de production du kWh de chaleur pour les maisons-types

Annexe 2.9

Niveau de consommation de chauffage optimal en fonction du coût marginal de production du kWh de chaleur pour les appartements-types

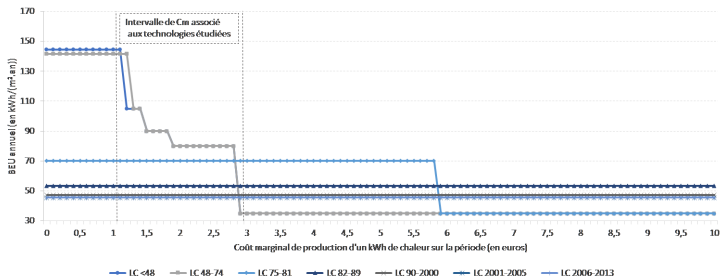
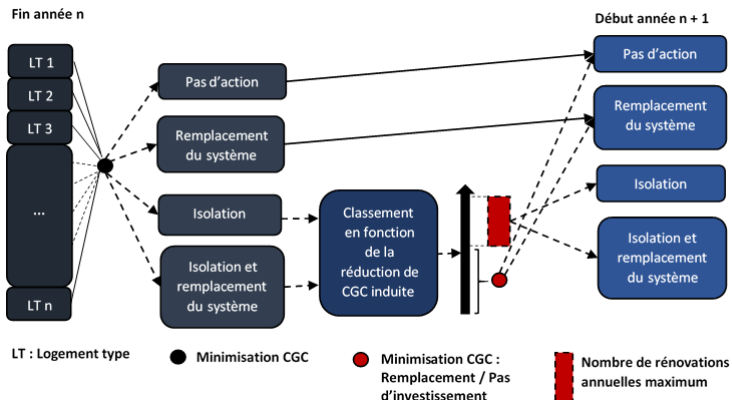


Figure: Niveau de consommation de chauffage optimal en fonction du coût marginal de production du kWh de chaleur pour les appartements-types

Annexe 3.1

Fonctionnement du modèle Zephyr-Chaleur sur une année



Annexe 3.2

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

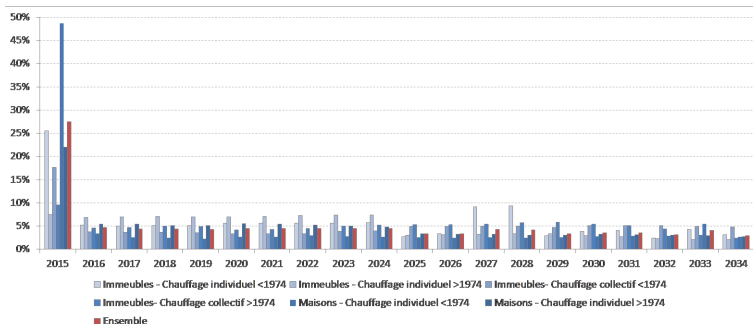


Figure: Taux de remplacement annuel des systèmes de chauffage par catégorie de logements et par période de construction

Annexe 3.3

Évolution des technologies de chauffage équipant les maisons entre 2015 et 2035

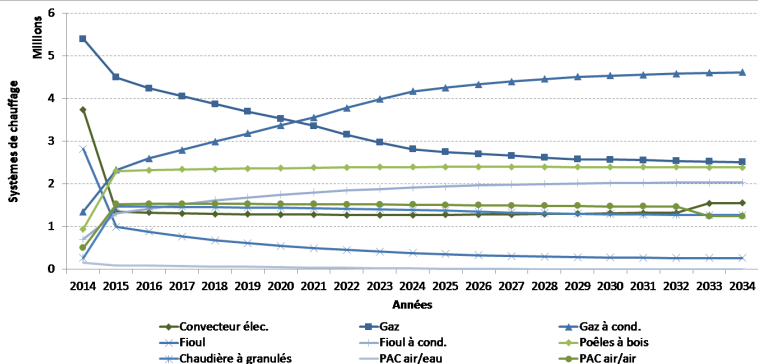


Figure: Évolution des technologies de chauffage équipant les maisons entre 2015 et 2035

Annexe 3.4

Résultat de l'analyse de décomposition des émissions sur les périodes 2015-2025 et 2025-2035

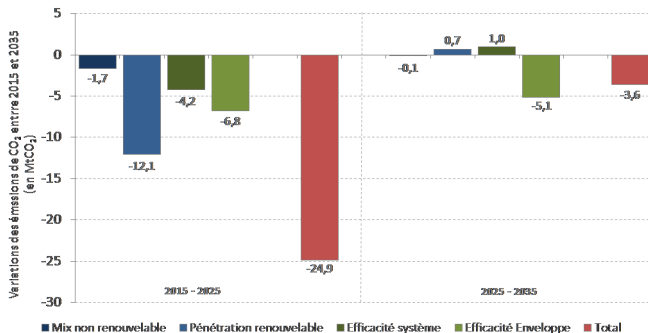


Figure: Évolution des technologies de chauffage équipant les maisons entre 2015 et 2035

Annexe 3.5

Évolution de l'efficacité moyenne des bâtiments par catégorie de logements entre 2015 et 2035

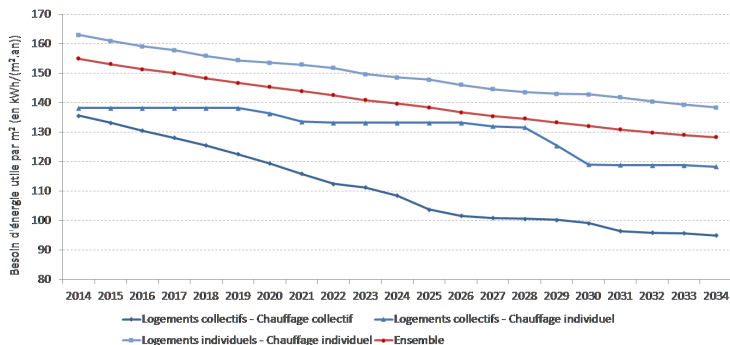


Figure: Évolution de l'efficacité moyenne des bâtiments par catégorie de logements entre 2015 et 2035

Annexe 3.6

Courbes de coût marginal d'abattement issue des résultats de simulations

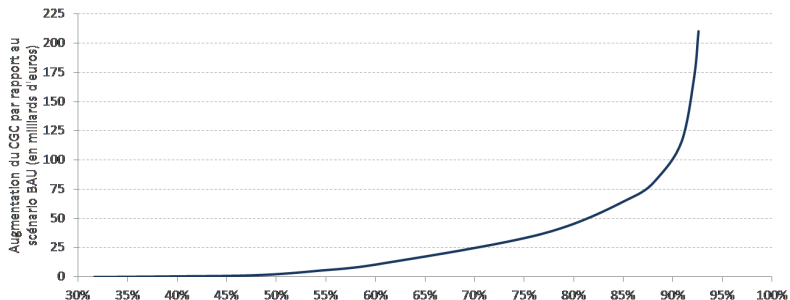


Figure: Coût marginal d'abattement, résultats de simulations

Annexe 3.7

Contenu carbone et objectif de décarbonation du parc

- Comment évolue le contenu carbone du kWh de chaleur lorsque les objectifs de décarbonation s'élèvent ?

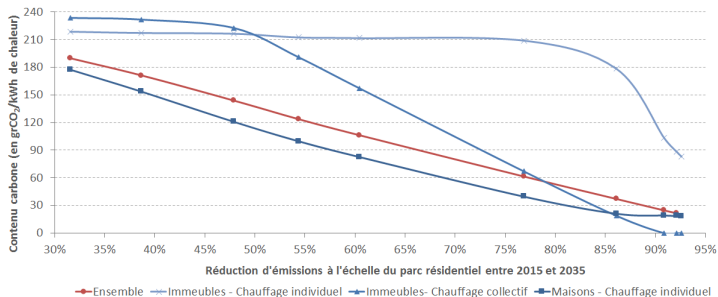


Figure: Evolution du contenu carbone de chaleur en fonction de l'objectif de décarbonation

Annexe 3.8

Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions

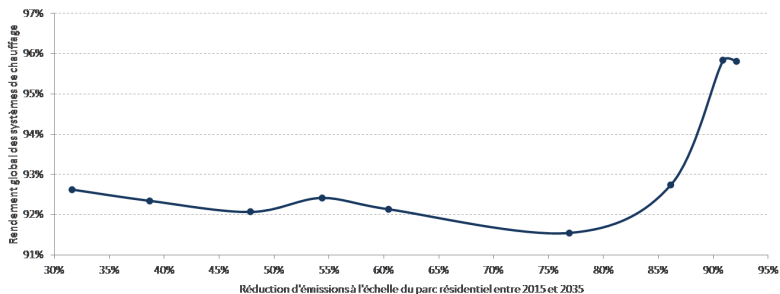


Figure: Efficacité moyenne des systèmes en fonction de l'objectif de réduction d'émissions

Annexe 3.9

Contenu carbone moyen du mix fossile en fonction de l'objectif de décarbonation

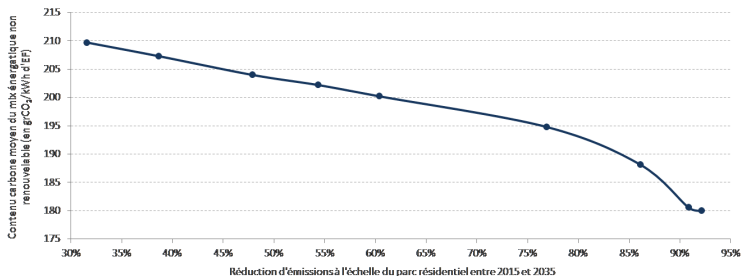


Figure: Contenu carbone moyen du mix fossile en fonction de l'objectif de décarbonation

Annexe 3.10

Contenu carbone moyen du mix fossile par catégorie de logements en fonction de l'objectif de décarbonation

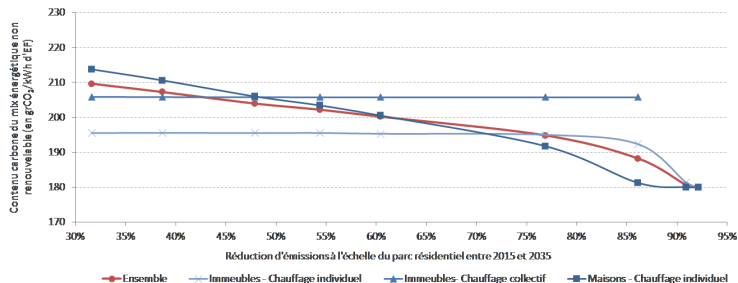


Figure: Contenu carbone moyen du mix fossile par catégorie de logements en fonction de l'objectif de décarbonation

Annexe 3.11

Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions

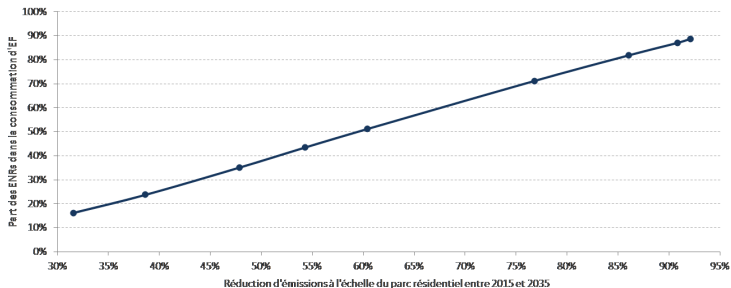


Figure: Part de la consommation d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en fonction de l'objectif de réduction d'émissions

Annexe 3.12

Évolution 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

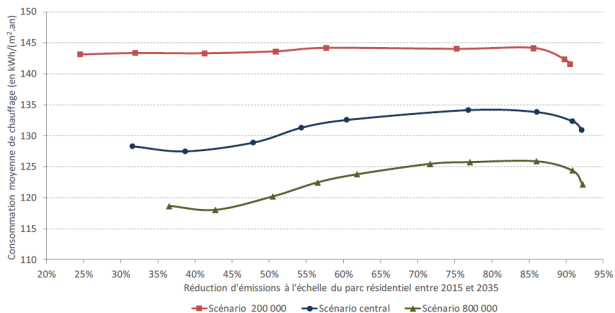


Figure: Besoins moyens de chauffage en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO_2 et du plafond annuel de rénovation

Annexe 3.13

Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions

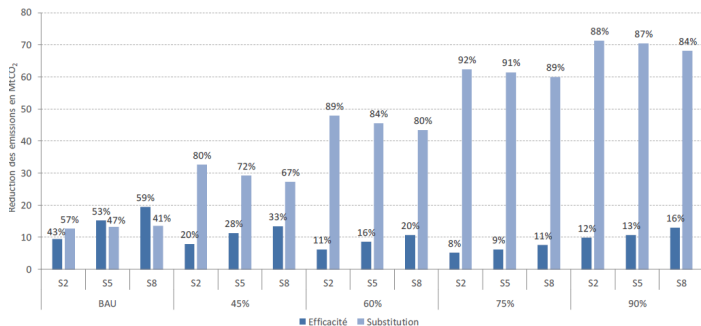


Figure: Part des contributions de l'efficacité et de la substitution énergétique à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions

Annexe 3.14

Évolution supposée du contenu carbone de l'électricité entre 2015 et 2050

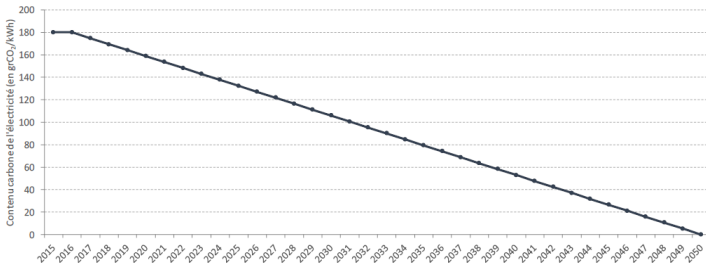


Figure: Évolution supposée du contenu carbone de l'électricité entre 2015 et 2050

Annexe 3.15

Évolution 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

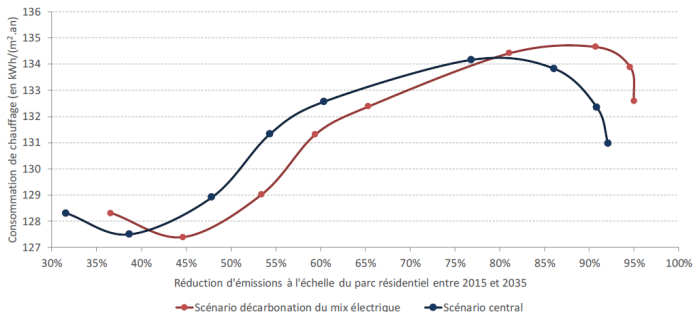


Figure: Évolution du besoin de chauffage en fonction de l'objectif de réduction d'émissions de CO_2 , scénario DME et scénario central

Annexe 3.16

Sensibilité des résultats à l'évolution du contenu carbone de l'électricité

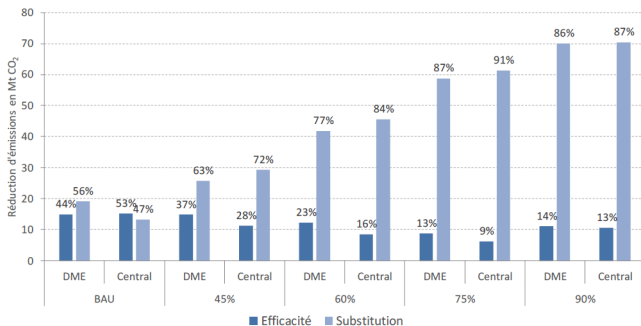


Figure: Sensibilité des résultats à l'évolution du contenu carbone de l'électricité