

Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) UMR 8568

Evaluation prospective des politiques de réduction de la demande d'énergie pour le chauffage résidentiel

Louis-Gaëtan Giraudet, Cyril Bourgeois, Philippe Quirion, David Glotin

21 décembre 2018

Cette étude a été financée par des conventions de recherche entre le CIRED – via ses tutelles de l'Ecole des Ponts ParisTech et du CNRS – et l'ADEME (Convention 14 10 C 0001), TOTAL S.A. et l'ATEE (Convention DS N°3136) et le CGDD (Convention 2101763372). Elle a été pilotée par des membres de l'ADEME, du CGDD et des entreprises adhérentes à l'ATEE au sein du programme d'évaluation économique des politiques publiques d'efficacité énergétique (EEPPEE). Les scénarios de politiques publiques évalués ont été définis de façon collégiale au sein du comité de pilotage. Les travaux ont été conduits par Louis-Gaëtan Giraudet (Ecole des Ponts ParisTech, CIRED), Cyril Bourgeois (Ecole des Ponts ParisTech, CNRS, CIRED), Philippe Quirion (CNRS, CIRED) et David Glotin (Ecole des Ponts ParisTech, CIRED). Les auteurs remercient Franck Nadaud pour son apport sur le calcul des élasticités-prix et Dominique Osso pour les échanges relatifs aux certificats d'économie d'énergie. Ils remercient également Jean-Sébastien Broc, Daniel Cappe, Christian Deconninck, Silvano Domergue, Alexandre Dozières, Catherine Guermont, Marie-Laure Nauleau, Elodie Trauchessec et Bruno Vermont pour leur suivi étroit tout au long du projet et Thierry Roque pour ses commentaires détaillés sur une version préliminaire du rapport. Les résultats et interprétations présentés ici n'engagent que les auteurs. A la fin du document figure une annexe méthodologique spécifique aux certificats d'économies d'énergie rédigée par Marie-Laure Nauleau (ADEME), Elodie Trauchessec (ADEME) et Christian Deconninck (ATEE).

Résumé court

L'exercice présenté ici évalue, à l'aide du modèle technico-économique Res-IRF, l'effet des principales subventions à l'efficacité énergétique (crédit d'impôt pour la transition énergétique, éco-prêt à taux zéro, TVA à taux réduit, certificats d'économies d'énergie), de la taxe carbone et de la réglementation thermique sur la demande d'énergie pour le chauffage des logements en France. La taxe carbone est l'instrument qui génère le plus d'économies d'énergie ; en contre-partie, il ralentit la diminution de la précarité énergétique. Les subventions permettent de réduire la consommation d'énergie à un coût de 4 à 12 centimes d'euro par kilowattheure économisé (cumulé actualisé) et induisent un effet levier de 1 à 1,4 en 2015, qui diminue à mesure que se réduit le gisement d'économies d'énergie. Le ciblage des subventions sur les ménages à bas revenus, qui sont sur-représentés dans les logements les moins performants, accroît l'effet levier, permettant ainsi de concilier efficacité économique et équité sociale. Les dépenses totales de rénovation énergétique des logements s'élèvent à 10 milliards d'euros en 2013, dont 3 milliards sont couverts par les diverses subventions considérées. Les recettes de la taxe carbone dépassent le coût public des subventions à partir de 2025. L'atteinte des objectifs d'économie d'énergie fixés par la Stratégie nationale bas-carbone nécessite de maintenir les subventions jusqu'en 2050 et de les étendre au parc locatif privé. Enfin, une différence d'un ordre de grandeur entre le nombre d'éco-prêts à taux zéro simulé et observé met en évidence des barrières au niveau de l'offre et la demande de l'instrument qui nécessitent des recherches plus approfondies.

Using an energy-economy model that integrates behavioural and technological detail, we evaluate the impact of key policies – energy efficiency subsidies (tax credits, zero-interest loans, reduced VAT, white certificates), the carbon tax and building codes – on residential energy demand for space heating in France. We find that the carbon tax is the most effective, yet most regressive, instrument. Subsidies save energy at a cost of 0.04-0.12 euro per lifetime discounted kilowatt-hour, with a leverage of 1 to 1.4 in 2015, decreasing over time as the potential for energy-saving opportunities is being tapped. Targeting subsidies towards low-income households, who tend to live in energy inefficient dwellings, increases leverage, thus reconciling economic efficiency and equity. Total expenditures for home energy retrofits amount to 10 billion euros in 2013, including 3 billion euros covered by subsidies. The public cost of subsidies is outweighed by carbon tax receipts from 2025 onwards. Meeting the long-term energy saving targets set by the French Government however requires maintaining subsidies through 2050 and extending them to rented dwellings. In particular, an order-of-magnitude discrepancy between simulated and observed numbers of zero-interest loans points to demand- and supply-side barriers that need to be removed to increase policy effectiveness.

Synthèse

La présente étude évalue l'impact entre 2012 et 2050 des principales politiques d'amélioration énergétique du parc de logements privés et sociaux en France. Elle utilise Res-IRF, modèle de prospective de la demande d'énergie pour le chauffage développé au CIRED depuis 2008. L'évaluation porte sur les politiques suivantes : taxe carbone (TC), crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE), certificats d'économies d'énergie (CEE), éco-prêt à taux zéro (EPTZ), TVA à taux réduit (TVAr) et réglementation thermique 2020 (RT 2020).

Cadre de modélisation

Le modèle Res-IRF intègre une description fine de la performance énergétique du parc de logements – basée sur les étiquettes énergie du diagnostic de performance énergétique (DPE) pour les consommations d'électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie pour le chauffage – et des caractéristiques des ménages – différenciés par type d'habitat, niveau de revenu et statut d'occupation.

Res-IRF détermine de façon endogène la dynamique de construction neuve, la dynamiquede rénovation thermique des logements existants et les écarts entre consommation d'énergie réelle et conventionnelle, notamment dus à « l'effet rebond ». Ces mécanismes sont modulés par des paramètres reflétant différentes barrières à l'efficacité énergétique, telles les contraintes de financement, les attributs non-énergétiques des rénovations, les incitations contradictoires entre propriétaire et le locataire d'un même logement et les freins à la décision collective en copropriété.

La version 3.0 du modèle, développée spécialement pour l'exercice, est paramétrée sur les données de l'enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et USages de l'énergie (Phébus). Le comportement de Res-IRF 3.0 peut se résumer par des élasticités-prix de la demande d'énergie de -0,2 à court terme et -0,4 à long terme. Le modèle reproduit l'évolution des consommations d'énergie (hors bois) sur la période 1984-2012 avec une erreur moyenne qui n'excède pas 4%.

Efficacité des politiques combinées

L'évaluation des politiques est basée sur une hypothèse d'évolution des prix des énergies (hors taxes environnementales) retenue dans les scenarios de la Stratégie Nationale Bas Carbone, équivalente à un taux de croissance annuel moyen de 1,5%. En combinant l'ensemble des politiques considérées, les différents objectifs fixés par le gouvernement dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte semblent diversement atteignables :

1. ***La demande d'énergie pour le chauffage résidentiel diminue de 30% en 2030 et 50% en 2050 par rapport à 2012. Un tiers de ces réductions est attribuable aux politiques considérées ; le reste est dû à des progrès autonomes et à l'augmentation (hors taxes environnementales) du prix des énergies.*** *L'objectif de réduire la demande totale d'énergie finale de 20% en 2030 et 50%*

en 2050 s'inscrit donc dans l'évolution tendancielle des consommations pour le chauffage résidentiel.

2. ***Le nombre annuel de rénovations thermiques – définies comme un saut d'au moins une étiquette du DPE – est de l'ordre de 530 000 dans le parc privé et 40 000 dans le parc social en référence ; les politiques considérées ajoutent respectivement 100 000 et 10 000 rénovations à ces effectifs.*** *Ces réalisations sont nettement au-dessus des 380 000 rénovations visées dans le parc privé et nettement en-dessous des 120 000 visées dans le parc social. La portée de cette comparaison est cependant limitée par l'absence de définition claire d'une rénovation énergétique dans les textes gouvernementaux. Le faible nombre de rénovations produit par le modèle dans le logement social s'explique la moindre profondeur du gisement sur ce segment, qui est de relativement bonne performance énergétique.*
3. ***L'objectif d'une disparition des logements de performance énergétique G et F, préconisé pour 2025, ne semble pas atteignable avant 2040 et nécessite une extension des aides au parc locatif privé.***
4. ***L'objectif de rénover l'intégralité du parc de logements au niveau « bâtiment basse consommation ou assimilé » – exigence interprétée ici comme une performance minimale égale à l'étiquette B du DPE – à l'horizon 2050 ne semble atteignable qu'aux deux tiers.***
5. ***L'objectif de réduire la précarité énergétique de 15% à l'horizon 2020 nécessite une politique volontariste, avec des aides plus élevées et étendues au parc locatif privé.***

En complément, les dépenses annuelles totales de rénovation énergétique s'élèvent à 10 milliards d'euros en 2013, dont 3 milliards couverts par les diverses subventions considérées. Les recettes de la taxe carbone collectées sur le périmètre du modèle dépassent le coût public de ces subventions à partir de 2025.

Efficience des politiques

Les différentes subventions évaluées – CITE, CEE, EPTZ et TVAr – présentent un **coût de l'ordre de 0,04 à 0,12€ d'aide par kilowattheure évité (cumulé actualisé) et un effet levier (i.e., euro investi par euro d'aide perçu) de l'ordre de 1 à 1,4 en 2015**. Ces indicateurs se dégradent mécaniquement au cours du temps sous l'effet de la réduction du gisement d'économies d'énergie. Le ciblage des subventions sur les opérations les plus performantes et sur les ménages en situation de précarité énergétique (qui sont sur-représentés dans les logements les moins performants, dont l'amélioration est la plus efficiente) accroît leur efficience. Les interactions entre les différents instruments génèrent des effets sur-additifs, de l'ordre de 5 à 10% de l'effet propre des instruments.

La taxe carbone apparaît comme le principal moteur de réduction des consommations d'énergie à long terme. Par rapport aux subventions, elle a l'intérêt supplémentaire d'encourager la sobriété énergétique.

Effets distributifs

La part des ménages consacrant plus de 10% de leur revenu aux dépenses conventionnelles de chauffage, qui s'élève en 2012 à 2,7 millions de logements, diminue progressivement, et ce principalement sous l'effet d'améliorations autonomes liées aux prix des énergies et au renouvellement naturel du parc. Les subventions à l'efficacité énergétique ont tendance à accélérer cette diminution tandis que les taxes sur l'énergie la retardent. Le niveau de confort thermique augmente à un rythme comparable pour toutes les catégories de ménages ; la réduction de la précarité énergétique ne se confond donc pas avec une réduction des inégalités de confort.

Effets spécifiques

Les subventions considérées agissent toutes en majeure partie sur le segment des propriétaires occupants. **Il semble impératif d'orienter ces aides vers le gisement mal ciblé du parc locatif privé, qui représente 28% du parc total.**

Plus spécifiquement :

- **Le CITE apparaît comme la subvention la plus *efficace***, au sens où elle est celle qui génère le plus d'économies d'énergie ; son *efficience* (telle que mesurée par les indicateurs de coût-efficacité et d'effet levier) peut être améliorée en restreignant son éligibilité aux travaux les plus performants et aux ménages en situation de précarité énergétique.
- **L'EPTZ présente une efficience supérieure à celle du CITE, mais le modèle surestime nettement son taux de recours.** Cet écart avec la réalité met en lumière de possibles barrières à l'offre et la demande de prêts bonifiés qui méritent des recherches complémentaires.
- **Les CEE présentent également une efficience supérieure à celle du CITE, qui s'améliore au cours du temps sous l'effet conjugué des composantes subvention et taxe de l'instrument. Les volumes simulés entre la troisième et la quatrième période sont comparables.** Ce résultat est peu sensible aux variations de prix des CEE, sauf sur le segment des CEE précarité. Il implique que la diminution du secteur résidentiel dans la réalisation des obligations observée jusqu'à maintenant pourrait se poursuivre en quatrième période.

Table des matières

1 Contexte de l'étude 12
1.1 Vue d'ensemble du modèle Res-IRF 13
1.2 Données utilisées 13
1.3 Objectifs et politiques évalués 15
2 Paramétrage de Res-IRF 3.0 15
2.1 Parc de logements 15
2.1.1 Définition du périmètre 16
2.1.2 Niveau de performance énergétique 16
2.1.3 Type de logement et d'occupation 17
2.1.4 Energie de chauffage 18
2.1.5 Revenu des décideurs 19
2.2 Consommations d'énergie 20
2.2.1 Consommations d'énergie conventionnelles 20
2.2.2 Consommations d'énergie réelles 22
2.2.3 Consommations d'énergie agrégées 25
2.3 Dynamique d'amélioration énergétique 26
2.3.1 Evolution des effectifs 26
2.3.2 Choix d'amélioration énergétique – cas général 27
2.3.3 Construction de logements neufs 28
2.3.4 Rénovation des logements existants 29
2.3.5 Progrès technique endogène 32
3 Comportement élémentaire de Res-IRF 3.0 33
3.1 Paramétrage de référence 33
3.2 Analyse de sensibilité sur les scénarios prospectifs 34
3.2.1 Variantes sur les variables d'entrée 34
3.2.2 Variantes sur la « valeur verte » 37
3.2.3 Variante sur les contraintes budgétaires 39
3.2.4 Variantes sur l'évolution des inégalités 41
3.3 Simulations rétrospectives 42
3.3.1 Reconstitution de la performance passée du parc 43
3.3.2 Scénarios d'évolution 43

4 Méthodologie d'évaluation des politiques publiques 45
4.1 Principes généraux 46
4.2 Paramétrage des politiques publiques 46
4.2.1 Taxe carbone (TC) 46
4.2.2 Eco-prêt à taux zéro (EPTZ) 47
4.2.3 Crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE) 48
4.2.4 Certificats d'économies d'énergie (CEE) 48
4.2.5 Réglementation thermique (RT 2020) 51
4.2.6 TVA à taux réduit (TVAr) 51
4.3 Indicateurs d'évaluation 51
4.3.1 Efficacité 51
4.3.2 Efficience 52
4.3.3 Précarité énergétique 54
5 Résultats d'évaluation des politiques publiques 54
5.1 Efficacité des politiques combinées 54
5.1.1 Economies d'énergie 54
5.1.2 Dynamique de rénovation 56
5.1.3 Précarité énergétique 61
5.2 Efficience comparée des politiques 62
5.2.1 Coût 62
5.2.2 Coût-efficacité 63
5.2.3 Effet levier 64
5.2.4 Effets distributifs 66
5.3 Interactions entre politiques 66
5.4 Effets spécifiques 69
5.4.1 CEE 69
5.4.2 CITE 73
5.4.3 EPTZ 76
6 Conclusion 77
ANNEXE 1 : Reconstitution du revenu des propriétaires bailleurs 78
ANNEXE 2 : Eléments complémentaires sur le calcul des forfaits CEE 80
ANNEXE 3 : Résultats numériques détaillés 82

ANNEXE 4 : Eléments méthodologiques pour comparer les volumes de CEE simulés et réalisés, par Marie-Laure Nauleau (ADEME), Elodie Trauchessec (ADEME) et Christian Deconninck (ATEE) 90
Présentation des statistiques publiques 90
Commentaires sur les CEE « Classique » 91
Commentaires sur les CEE « Précarité » 92
Bibliographie 97

Liste des abréviations

ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ANAH: Agence nationale de l'habitat
ANIL: Agence nationale pour l'information sur le logement
ATEE: Association technique énergie environnement
BBC: Bâtiment basse consommation
BEPOS: Bâtiment à énergie positive
CEE: Certificats d'économies d'énergie
CEREN: Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
CGDD: Commissariat général au développement durable
CGEDD: Conseil général de l'environnement et du développement durable
CIRED: Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITE : Crédit d'impôt pour la transition énergétique
CNRS : Centre national de la recherche scientifique
cumac : cumulé actualisé (kWh, MWh, TWh)
DGEC : Direction générale de l'énergie et du climat
DPE : diagnostic de performance énergétique
DPL : dilemme propriétaire-locataire
EP : énergie primaire
EF : énergie finale
EPTZ : Eco-prêt à taux zéro
GPL : Gaz de pétrole liquéfié
IGF : Inspection générale des finances
Insee : Institut national de la statistique et des études économiques
LC : logement collectif
LS : logement social
MI : maison individuelle
LTECV : Loi de transition énergétique pour la croissance verte
OPEN : Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement
ONPE : Observatoire national de la précarité énergétique
PB : propriétaire bailleur
Phébus : Performance de l'habitat, équipements, besoins et usages de l'énergie
PO : propriétaire occupant
PT : progrès technique
PUCA : Plan urbanisme construction architecture
RT : réglementation thermique
SGFGAS : Société de gestion des financements et de la garantie de l'accession sociale à la propriété
SNBC : Stratégie nationale bas-carbone
TECV (loi) : loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

TC : taxe carbone
TCAM : taux de croissance annuel moyen
TEE : taux d'effort énergétique
TP : toutes politiques (scénario)
TVAr : taxe sur la valeur ajoutée à taux réduit
VAN : valeur actuelle nette
ZP : zéro politique (scénario)

Etude complète

1 Contexte de l'étude

La présente étude évalue l'impact entre 2012 et 2050 des principales politiques d'amélioration énergétique du parc de logement français. Elle utilise le modèle Res-IRF[1], développé au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) depuis 2008 pour simuler l'évolution des consommations résidentielles d'énergie pour le chauffage en tenant compte des principales barrières connues à l'efficacité énergétique.

Les travaux présentés ici actualisent et approfondissent un exercice conduit entre 2009 et 2011 avec le soutien du Commissariat général au développement durable (CGDD) pour évaluer l'impact des politiques du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements (Giraudet et al., 2011). Deux opportunités de recherche ont motivé son renouvellement: (i) l'accès, à partir de 2015, aux données de l'enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et USages de l'énergie (Phébus)[2], qui permet d'accroître la finesse des mécanismes décrits dans Res-IRF ; (ii) l'élaboration à partir de 2015 par le gouvernement d'une stratégie nationale bas-carbone (SNBC) redéfinissant les objectifs d'amélioration énergétique des logements et les politiques qui les accompagnent.

Ce nouveau contexte a permis deux avancées principales. D'abord, la finesse des mécanismes modélisés s'est accrue. La dernière version du modèle – Res-IRF 3.0 – inclut en particulier une différenciation des ménages par niveau de revenus permettant de quantifier les problèmes liés à la précarité énergétique dans les logements. Ensuite, les simulations couvrent un éventail plus large de politiques : à celles considérées dans l'étude de 2011 – la taxe carbone (TC), le crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE), l'éco-prêt à taux zéro (EPTZ) et la réglementation thermique (RT) – s'ajoutent désormais les certificats d'économies d'énergie (CEE) et la TVA à taux réduit (TVAr). L'effet propre de ces politiques et leurs interactions sont désormais quantifiés à travers des critères variés – coût-efficacité, effet levier et effets distributifs – quand l'étude de 2011 se limitait au critère d'efficacité.

L'étude présentée ici a été conduite entre décembre 2015 et juin 2018. Elle a bénéficié du soutien financier de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), TOTAL S.A. et l'Agence technique énergie environnement (ATEE) et le CGDD. Elle a été pilotée par un comité réunissant, à une fréquence mensuelle à bimestrielle, des représentants des pouvoirs publics – l'ADEME et le CGDD – et des acteurs privés du secteur de l'énergie – les entreprises membres de l'ATEE. Si la conduite de l'étude a grandement bénéficié de la collégialité des vues des membres du Comité de pilotage, ses résultats finaux n'engagent que les chercheurs du CIRED qui l'ont réalisée.

[1] Le sigle Res-IRF désigne le module Résidentiel d'IMACLIM-R France, modèle d'équilibre général également développé au CIRED. Res-IRF est ici utilisé indépendamment d'IMACLIM-R France. Pour un couplage des deux modèles, voir Mathy et al. (2015).

[2] http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1541/0/enquete-performance-lhabitat-equipements-besoins-usages.html

1.1 Vue d'ensemble du modèle Res-IRF

Le modèle Res-IRF est un outil de simulation des consommations d'énergie – électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie – pour le chauffage dans le parc de logements, qui couvre 16% de la consommation d'énergie finale en France[3]. Res-IRF combine des informations économiques sur les décisions des ménages et des informations techniques sur la performance énergétique du parc de logements, segmentée par étiquette du diagnostic de performance énergétique (DPE). Le développement du modèle, initié au CIRED en 2008, a donné lieu à plusieurs publications scientifiques[4].

A partir de variables exogènes – croissance de la population, croissance du revenu des ménages et prix des énergies – le modèle simule de façon endogène les dynamiques de construction neuve et de rénovation énergétique des logements existants. La consommation résidentielle d'énergie résulte de décisions des ménages à trois niveaux : la marge extensive d'investissement – décision de rénover –, la marge intensive d'investissement – ampleur du saut d'étiquette DPE – et l'intensité d'utilisation de l'infrastructure de chauffage après rénovation. Les décisions d'investissement sont basées sur un calcul classique de valeur actuelle nette (VAN), modifié par un certain nombre d'écarts à l'information et la rationalité parfaites : anticipation myope des prix des énergies, coûts non-énergétiques de la rénovation (par exemple le dérangement lié aux travaux), difficultés liées à la prise de décision en copropriété, dilemme propriétaire-locataire et contraintes de financement. Ces mécanismes contribuent à l'*Energy efficiency gap* – l'écart observé entre les progrès d'efficacité énergétique mesurés et ceux prédits par un modèle élémentaire de rentabilité financière (Jaffe et Stavins, 1994 ; Allcott et Greenstone, 2012).

Le modèle fournit des résultats en énergie dite « conventionnelle », i.e., telle que prédite par la méthode de calcul du DPE, et « réelle », i.e., telle que mesurée sur les factures d'énergie. L'écart entre ces deux métriques s'explique entre autres par « l'effet rebond », c'est-à-dire les changements de comportements qui réduisent l'ampleur des économies d'énergie par rapport aux gains d'efficacité énergétique.

1.2 Données utilisées

Les versions 1.0 et 2.0 de Res-IRF ont été paramétrées sur des données publiées en 2008 par l'Agence nationale de l'habitat (ANAH, 2008). Cette base de travail, qui constituait une avancée majeure pour l'époque, agrégeait des données parcellaires issues de différentes sources. Des données manquantes, comme les effectifs de logements construits avant 1975, ou imprécises, comme le statut d'occupation des décideurs, y faisaient l'objet d'extrapolations.

La version 3.0 du modèle sur laquelle s'appuie la présente étude est paramétrée pour l'essentiel à partir des données de l'enquête Phébus, dont la mise à disposition en 2014 constitua une amélioration substantielle de la connaissance du parc de logements et de ses occupants. Outre la précision accrue des données permise par l'ampleur de l'enquête, cette nouvelle base combine des informations physiques et

[3] Rappelons que le bâtiment résidentiel représente 26% des consommations totales, dont 67% sont consacrés au chauffage, couverts à 91% par l'électricité, le gaz naturel, le fioul domestique et le bois-énergie (ADEME, 2015).

[4] La version 1.0 utilisée pour le rapport CGDD de 2011 a donné lieu à deux publications dans des revues d'économie de l'énergie (Giraudet et al., 2011b, 2012). La version 2.0 a été soumise à une analyse de sensibilité globale publiée dans une revue de modélisation (Branger et al., 2015).

socio-économiques, ouvrant la voie à une évaluation des effets distributifs des politiques d'amélioration énergétique.

L'enquête Phébus comporte deux volets :

- Le volet dit « Clode » porte sur les caractéristiques du logement, des occupants et des dépenses d'énergie. Il recueille les caractéristiques socio-économiques des ménages enquêtés, en incluant notamment une mesure de leur consommation d'énergie réelle à partir des factures énergétiques. Des poids sont affectés à chaque type de ménage pour assurer la représentativité de l'échantillon au regard de la population française.
- Le volet dit «DPE » complète, pour un sous-ensemble de 44% des ménages du volet Clode, les données socio-économiques par certaines données physiques du logement, notamment les consommations d'énergie conventionnelles définies par le DPE. Dans Res-IRF, des poids spécifiques sont affectés à ce sous-échantillon, d'après les travaux de Denjean (2014).

Outre les données Phébus, les sorties du modèle Res-IRF sont mises en cohérence avec les données produites par le Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie (CEREN). Bien que générées sur un périmètre différent de celui de Phébus et selon une méthodologie propre, ces données servent de référence à la plupart des exercices français de modélisation prospective.

Tableau 1: Descriptif général des bases de données

	Phébus-Clode	**Phébus-DPE**	**CEREN**
Sources des données	Enquête au domicile des ménages, incluant plus de 500 questions et des relevés de consommation et factures d'énergie.	Diagnostic DPE réalisé chez des ménages volontaires parmi ceux ayant participé au volet Clode.	Recensement et enquêtes logements de l'Insee, complété par des enquêtes auprès de ménages et d'installateurs d'équipement.
Taille de l'échantillon	5 405 logements	2 389 logements (parmi les 5 405 du volet Clode)	3 000 (2 000 dans l'ancien et 800 dans le neuf)
Parties prenantes	Réalisation : SoeS, Veritas pour DPE, Ipsos pour Clode. Financement : EDF, Total, Leclerc, ANAH, ADEME.		CEREN

Tableau 2: Contenu synthétique des bases de données

	Phébus-Clode	**Phébus-DPE**	**CEREN**
Surface du logement	Disponible	Disponible	Non disponible
Année de construction	Disponible	Disponible	Non disponible
Statut d'occupation	Propriétaires occupants, propriétaires bailleurs et logement social	Propriétaires occupants et bailleurs	Propriétaires occupants et bailleurs
Type de logement	Individuel et collectif	Individuel et collectif	Individuel et collectif
Couverture	Résidences principales en France métropolitaine, par zones et sous-zones climatiques	Résidences principales en France métropolitaine, par départements	Résidences principales en France métropolitaine
Revenu	Disponible pour les occupants	Non disponible	Non disponible
Consommation d'énergie	Réelle, issue de factures énergétiques (avec redressements)	Conventionnelle, issue du DPE	Réelle, issue de mesures et estimations

Les Tableaux 1 et 2 recensent les principales différences entre les bases de données utilisées.

1.3 Objectifs et politiques évalués

L'exercice présenté ici vise à évaluer la faisabilité des objectifs nationaux d'amélioration énergétique des logements et la contribution des différentes politiques mises en place pour les atteindre.

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (loi n° 2015-992 du 17 août 2015, dite TECV) fixe un certain nombre d'objectifs environnementaux, économiques et sociaux aux niveaux national et sectoriel[5]. On évalue ici les objectifs qui portent spécifiquement sur la consommation d'énergie[6] des logements, soit :

1. ***Baisse de la consommation d'énergie finale de 20% d'ici 2030 et 50% d'ici 2050 par rapport à 2012*** – cet objectif est appliqué ici aux consommations de chauffage résidentiel ;
2. ***Rénovation énergétique de 500 000 logements par an, dont 120 000 dans le parc social ;***
3. ***Disparition des logements de performance énergétique G et F d'ici 2025 ;***
4. ***Rénovation de l'intégralité du parc de logements au niveau « bâtiment basse consommation ou assimilé » à l'horizon 2050*** – exigence interprétée ici comme une performance minimale égale à l'étiquette B du DPE ;
5. ***Diminution de 15% de la précarité énergétique à l'horizon 2020.***

L'évaluation conduite ici se concentre sur les politiques les plus pérennes et au périmètre d'éligibilité le plus large. Ce périmètre recouvre des instruments de nature réglementaire – la RT 2020 –, incitative – la TC, le CITE, l'EPTZ et la TVAr – et hybride – les CEE. Ces instruments sont appliqués ici au parc social et au parc privé. Les instruments à l'éligibilité plus restreinte, comme les aides de l'ANAH, la prime rénovation énergétique (dont la durée fut limitée à un an), l'éco-prêt logement social ou la campagne de mobilisation « FAIRE » ne sont pas pris en compte.

2 Paramétrage de Res-IRF 3.0

La version 3.0 de Res-IRF a été développée entre décembre 2015 et décembre 2017 avec le soutien de l'ADEME, du CGDD et de l'ATEE. L'accès aux données de l'enquête Phébus[7] a permis de désagréger la structure existante par catégories de revenu et de re-paramétrer le modèle dans son intégralité.

2.1 Parc de logements

Le parc décrit dans Res-IRF compte 1 080 types de logement répartis en :

- **neuf niveaux de performance énergétique** – étiquettes A à G du DPE, niveaux Bâtiment basse consommation (BBC) et Bâtiment à énergie positive (BEPOS) ;

[5] Pour une présentation détaillée de ces objectifs, voir le rapport de l'IGF et du CGEDD (2017).

[6] En l'absence de couplage avec un modèle d'offre d'énergie, le modèle de demande d'énergie utilisé ici ne permet pas de quantifier de façon pertinente les émissions de CO_2 induites par ces consommations. L'atteinte des objectifs formulés en émissions de CO_2 n'est donc pas étudiée ici.

[7] Pour les besoins de l'exercice, les volets Clode et DPE de l'enquête Phébus ont été croisés dans une base unique. C'est cette base qui est désignée lorsque « Phébus » est mentionné sans précision.

- **quatre énergies de chauffage principal** – électricité, électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie ;
- **six types de décideur** – propriétaires occupants (PO), propriétaires bailleurs (PB) ou logement social (LS), chacun en maison individuelle (MI) ou logement collectif (LC) ;
- **cinq catégories de revenu des ménage**s, définies selon les quintiles de l'Insee.

2.1.1 Définition du périmètre

Res-IRF 3.0 couvre un périmètre de 23,9 millions de résidences principales de France métropolitaine parmi les 27,1 millions couverts par l'enquête Phébus-Clode pour l'année 2012. La différence entre ces deux périmètres, illustrée à la Figure 1 en comparaison avec les autres bases de données et version précédentes de Res-IRF, provient de contraintes et choix de modélisation. En particulier :

- Les énergies minoritaires comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou déterminées par des décisions centralisées comme les réseaux de chaleur ne sont pas prises en compte dans Res-IRF.
- La procédure d'attribution d'une énergie principale à chaque logement – détaillée au paragraphe 2.1.4 – a conduit à éliminer certains logements de l'échantillon Phébus.
- Certaines données incomplètes dans Phébus (DPE ou statut d'occupation manquant, revenu nul, etc.) n'ont pu être prises en compte.

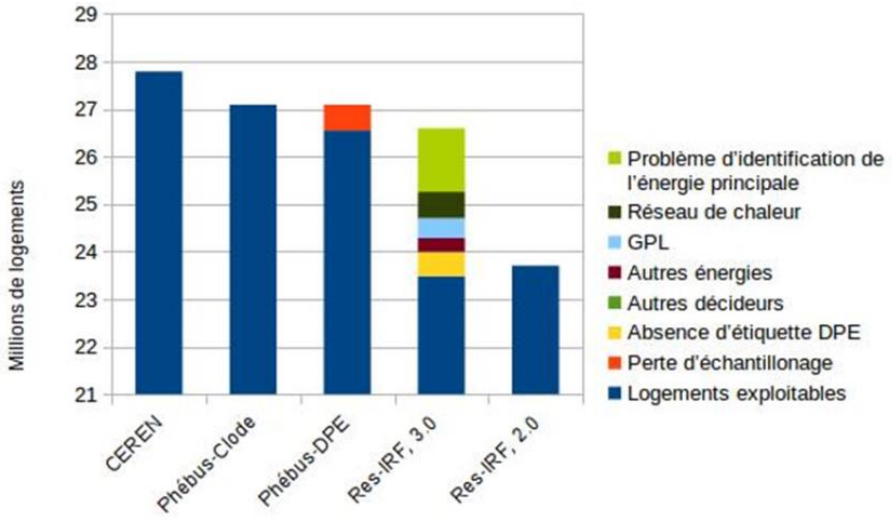


Figure 1: Effectifs du parc dans les différentes bases de données

2.1.2 Niveau de performance énergétique

Les effectifs par étiquette DPE sont directement donnés par Phébus-DPE. La Figure 2 compare les stocks de logements sur lesquels sont calibrées les versions 2.0 et 3.0 de Res-IRF. Elle révèle que l'amélioration de l'information permise par l'enquête Phébus aboutit à une image moins efficace du parc (pour l'année 2012) que celle proposée par l'ANAH (pour l'année 2008), avec davantage de logements dans les basses étiquettes (G-E) et moins dans les hautes étiquettes (D-A).

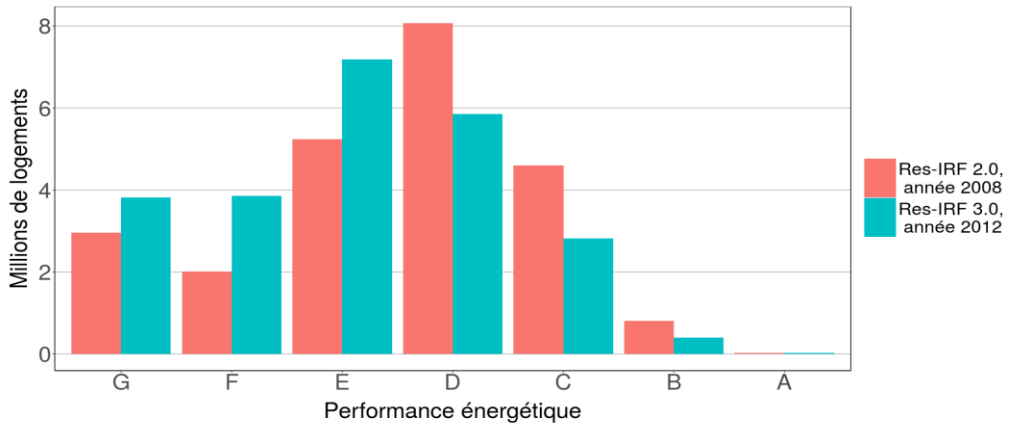


Figure 2: Distribution des étiquettes DPE dans Res-IRF, version 3.0 (paramétrage Phébus) et 2.0 (paramétrage ANAH)

2.1.3 Type de logement et d'occupation

La base Phébus permet de dissocier les logements individuels et collectifs au sein du parc social, qui faisait auparavant l'objet d'une catégorie unique. La Figure 3 révèle des différences assez minces entre les deux paramétrages (le logement social y est représenté comme une catégorie unique afin de faciliter la comparaison). Le Tableau 3 précise les parts de chaque segment dans Res-IRF 3.0.

Tableau 3: Parts des différents statuts des décideurs dans Res-IRF 3.0

	Maison individuelle	**Logement collectif**	***Total***
Propriétaire occupant	49,0%	11,9%	***60,9%***
Propriétaire bailleur	8,8%	15,6%	***24,4%***
Logement social	3,2%	11,5%	***14,7%***
Total	***61,0%***	***39,0%***	***100%***

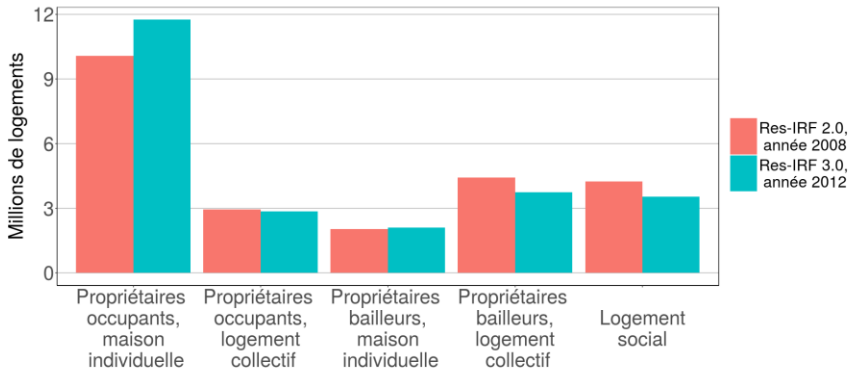


Figure 3: Effectifs par statut des décideurs dans Res-IRF, version 3.0 (paramétrage Phébus) et 2.0 (paramétrage ANAH)

2.1.4 Energie de chauffage

Res-IRF attribue à chaque logement une énergie de chauffage principale parmi quatre sources possibles : électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie. La sélection d'un mode de chauffage dominant et d'une source d'énergie associée s'appuie sur Phébus-Clode et procède de la façon suivante :

- Lorsqu'une installation de chauffage est déclarée comme principale, on retient la source d'énergie qui lui est associée.
- Lorsque plusieurs types de chauffage principaux sont déclarés, on attribue au logement la source d'énergie associée à l'installation la plus centrale, déterminée selon l'ordre de priorité suivant (en reprenant les termes du questionnaire de l'enquête Phébus-Clode) : *chauffage urbain > chaudière collective > chaudière individuelle > tout électrique > pompe à chaleur > autres*.
- Si aucune installation principale n'est déclarée, on retient l'installation utilisée comme « appoint régulier » et on attribue au logement la source d'énergie associée. S'il en existe plusieurs, on sélectionne la principale selon l'ordre de priorité suivant (en reprenant les termes du questionnaire de l'enquête Phébus-Clode) : *chaudière électrique > tout électrique > mixte base > fixe non électrique > cheminée*.

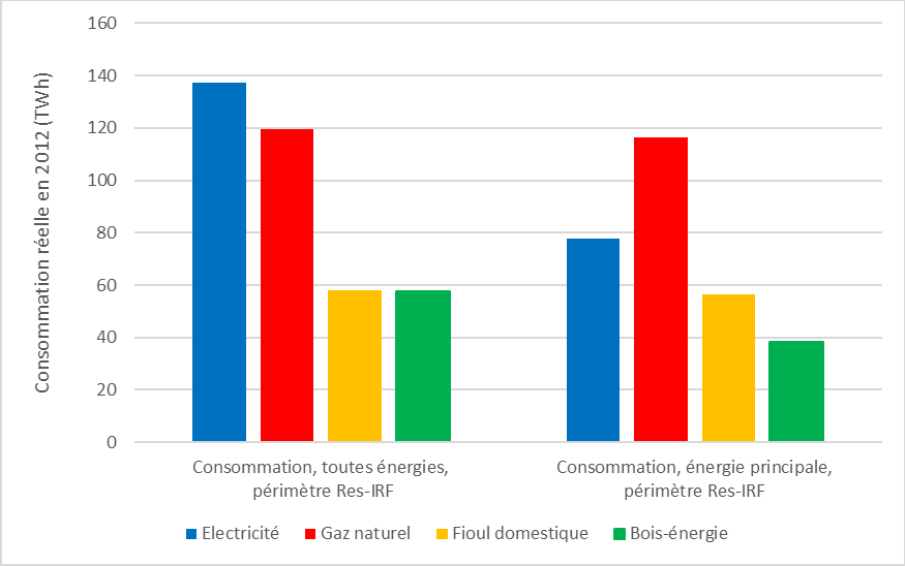


Figure 4: Consommations d'énergie dans les différentes bases de données

La Figure 4 compare, pour chaque logement inclus dans Res-IRF, les consommations de chauffage toutes énergies qui lui sont associées dans la base Phébus à celles qui résultent de la procédure de sélection d'une énergie principale. On observe d'abord une moindre consommation de bois-énergie qui peut s'expliquer par la perte des consommations de bois-énergie comme source de chauffage secondaire. On observe ensuite une moindre consommation d'électricité, qui peut s'expliquer par la perte des consommations spécifiques d'électricité dans les logements chauffés au gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie et des consommations de chauffage électrique secondaire ou d'appoint.

2.1.5 Revenu des décideurs

L'introduction de catégories de ménages dans Res-IRF, enjeu majeur du développement de la version 3.0, visait à prendre en compte l'influence du revenu sur (i) la propension des propriétaires[8] à investir dans la rénovation énergétique et (ii) l'intensité d'utilisation de l'infrastructure de chauffage par les occupants. La richesse de la base Phébus a permis de mener à bien ces développements. Dans la mesure où les données de revenu qu'elle contient ne portent que sur les occupants, des données complémentaires ont néanmoins été nécessaires pour paramétrer le revenu des propriétaires bailleurs.

2.1.5.1 Occupants

Le revenu disponible des occupants – propriétaires dans le segment PO et locataires dans le segment PB – est segmenté en cinq[9] catégories définies à partir des bornes de revenu des quintiles de l'Insee pour l'année 2012. L'utilisation des quintiles Insee plutôt que des quintiles propres à l'échantillon Phébus facilite les ajustements décrits au paragraphe suivant, sans introduire de biais trop prononcés, comme l'illustre le Tableau 4. Chaque logement se voit ensuite attribuer le revenu moyen de sa catégorie. La Figure 5 illustre la distribution du revenu des occupants dans les différentes classes de performance énergétique. Elle fait apparaître une nette corrélation entre le revenu des ménages et l'efficacité énergétique du logement qu'ils occupent.[10]

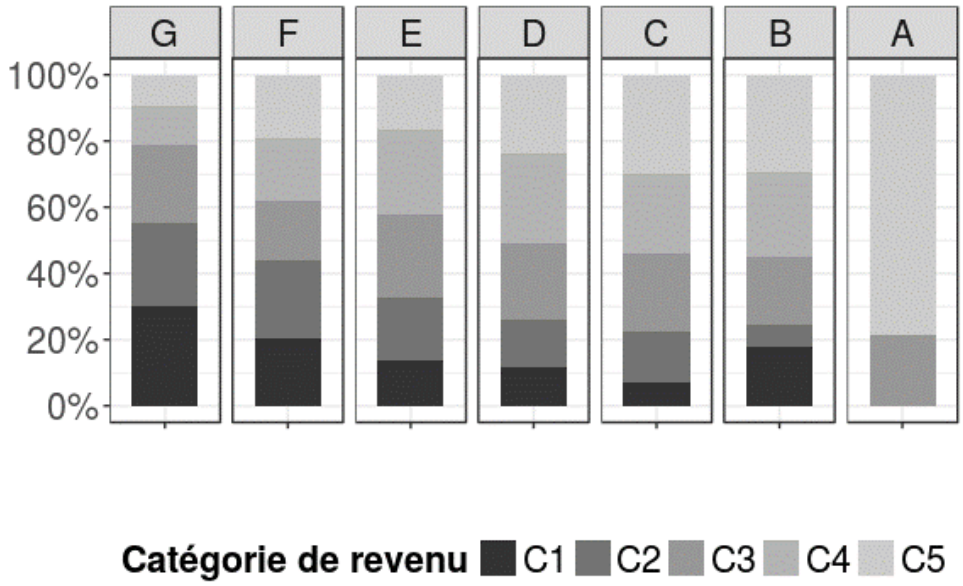


Figure 5: Distribution des classes de revenu par niveau de performance énergétique (d'après Phébus)

[8] Dans Res-IRF, les investisseurs sont les propriétaires des logements. Ce choix est motivé par le fait que d'après les données OPEN, les rénovations ne sont réalisées par des locataires que dans 10% des cas, voire 2% dans le cas de rénovations énergétiques performantes et très performantes.

[9] Cette granularité offre un nombre suffisant d'observations par unité de logement, définie par un quadruplet (niveau de performance, énergie de chauffage, type de décideur, niveau de revenu).

[10] Le faible nombre de logements de performance A et B dans Phébus rend les statistiques de distribution des revenus moins précises dans ces classes.

Tableau 4: Catégories de revenu des ménages utilisées dans Res-IRF 3.0

Catégories	Bornes des quintiles Insee (€)	Part des ménages occupants dans Res-IRF
C1	0 – 16 830	17%
C2	16 831 – 24 470	19%
C3	24 471 – 34 210	23%
C4	34 211 – 48 680	22%
C5	> 48 681	19%

2.1.5.2 Propriétaires

Le revenu des propriétaires recoupe celui des occupants sur le segment PO. En revanche, Phébus ne contient aucune information sur le revenu des propriétaires bailleurs, qu'il a fallu reconstituer par d'autres moyens. Pour ce faire, les données de Phébus-DPE ont été croisées avec des données Insee prétraitées par l'Agence nationale pour l'information sur le logement (ANIL, 2012). La procédure est décrite en Annexe 1. La répartition des revenus qui en résulte entre propriétaires et locataires est décrite à la Figure 6. On observe là encore de fortes disparités, puisque les ménages ayant un revenu annuel inférieur à 34 210€ représentent 80% des locataires mais seulement 20% des propriétaires.

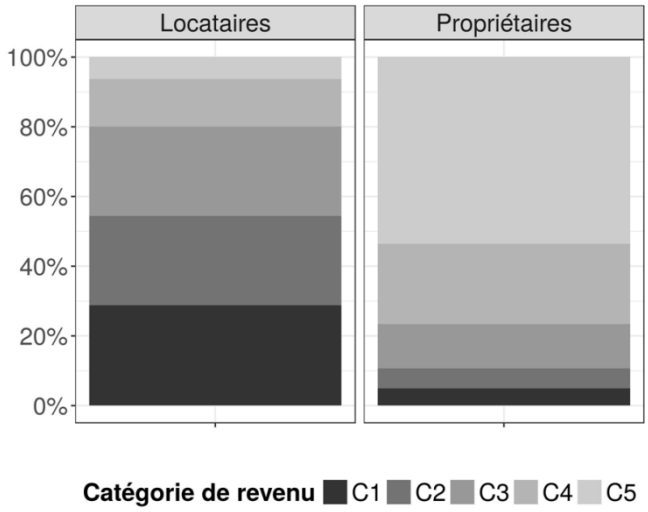


Figure 6: Distribution des catégories de revenu des propriétaires bailleurs et des locataires dans le parc locatif

2.2 Consommations d'énergie

2.2.1 Consommations d'énergie conventionnelles

L'intégration des nouvelles données de consommation unitaire ($kWh_{EP}/m^2/an$) et de surface des logements (m^2) a permis d'accroître la précision des consommations conventionnelles (kWh_{EP}/an).

2.2.1.1 Consommations unitaires

La consommation d'énergie conventionnelle unitaire d'un logement existant est directement donnée par son étiquette DPE[11]. Dans Res-IRF 2.0, on attribuait à chaque étiquette une consommation énergétique égale au milieu de l'intervalle défini par le DPE. La base Phébus-DPE, qui inclut une mesure précise de la consommation d'énergie conventionnelle de chaque logement, a permis d'affiner ces valeurs en

[11] Les consommations d'énergie finales sont déduites des consommations d'énergie primaire par un coefficient de 1 pour le gaz naturel, le fioul domestique et le bois-énergie et par le coefficient usuel de 1/2,58 pour l'électricité.

attribuant à chaque étiquette la moyenne des consommations observées. La Figure 7 compare les résultats obtenus aux valeurs précédentes.

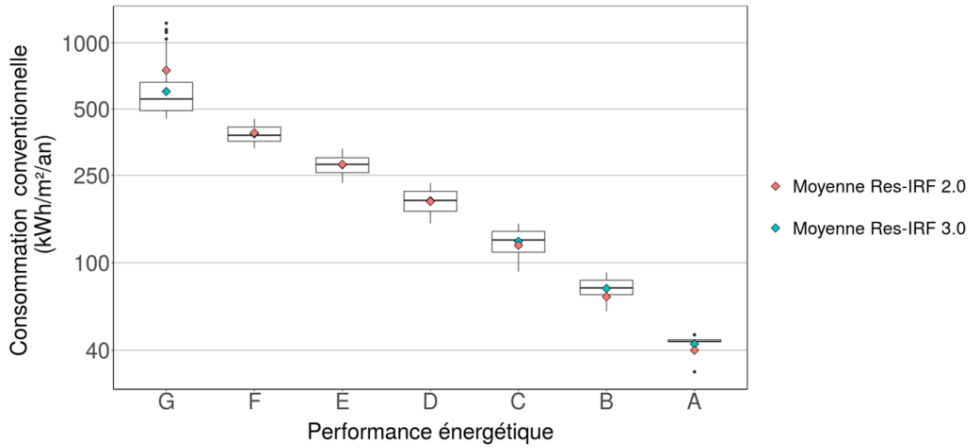


Figure 7: Distribution des consommations des étiquettes DPE dans Phébus (axe vertical en échelle logarithmique)

Rappelons que le DPE couvre les consommations de chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation. Dans Res-IRF 2.0, un coefficient unique de 0,8, calculé à partir de données CEREN, était appliqué à chaque consommation DPE pour isoler la part dédiée spécifiquement au chauffage. La base Phébus-DPE, qui distingue trois types d'usage – chauffage, eau chaude et production photovoltaïque –, permet d'affiner cette valeur en attribuant à chaque étiquette un coefficient spécifique basé sur la moyenne des observations.

Tableau 5: Consommations conventionnelles (consommation et correction pour étiquettes G à A d'après Phébus)

Etiquette DPE	Consommation moyenne, ($kWh_{EP}/m^2/an$)	Correction appliquée dans Res-IRF pour le chauffage	Consommation dédiée au chauffage dans Res-IRF ($kWh_{EP}/m^2/an$)
G	596	0,85	**507**
F	392	0,82	**321**
E	280	0,77	**216**
D	191	0,74	**141**
C	125	0,72	**90**
B	76	0,77	**59**
A	40	1,12	**45**
BBC	50	0,40	**20**
BEPOS	40	0,40	**16**

Le parc de logements neufs comporte deux catégories de performance : niveau BBC, fixé par la réglementation thermique à 50 $kWh_{EP}/m^2/an$, et niveau BEPOS, dont la consommation, nette de l'auto-production d'énergie, est en théorie nulle. Afin de se concentrer sur les consommations brutes d'énergie, on attribue aux logements BEPOS une consommation de 40 $kWh_{EP}/m^2/an$. On applique aux consommations BBC et BEPOS le même coefficient de 0,4 afin d'isoler le chauffage des cinq usages

prescrits par la réglementation thermique (au lieu de trois usages dans le cas du DPE). Ces calculs sont détaillés au Tableau 5.

2.2.1.2 Surfaces chauffées

La même approche a été suivie pour re-paramétrer la surface moyenne des logements. Le niveau de détail élevé de la base Phébus a permis d'ajouter à la segmentation des surfaces par type d'habitation (logement collectif ou maison individuelle) une segmentation par statut du décideur. Les résultats sont détaillés sur la Figure 8.

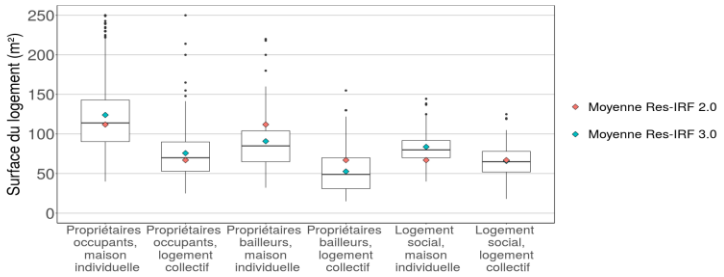


Figure 8: Moyenne des surfaces chauffées (axe vertical en échelle logarithmique)

2.2.2 Consommations d'énergie réelles

2.2.2.1 Intensité d'utilisation

Un nombre croissant de travaux académiques pointe un écart entre les consommations d'énergie conventionnelles indiquées par les certificats de performance énergétique (comme le DPE en France) et les consommations observées. L'intensification de l'utilisation de l'infrastructure de chauffage après un investissement d'amélioration – phénomène communément nommé « effet rebond » – est l'explication la plus communément avancée[12]. Dans la suite du rapport, on parle d'effet rebond lorsque l'intensité d'utilisation augmente et d'effet de sobriété lorsqu'elle diminue.

L'intensité d'utilisation était jusqu'à présent déterminée dans Res-IRF par la dépense conventionnelle de chauffage, sur la base de travaux d'EDF R&D (Allibe, 2015)[13]. Elle dépendait donc de deux variables : la performance énergétique du logement, mesurée par son étiquette DPE, et le prix de l'énergie. Dans Res-IRF 3.0, une troisième variable a été intégrée : le revenu des ménages. Cette avancée a été rendue possible par l'amélioration des données disponibles : la base Phébus, d'abord, qui a permis d'intégrer le revenu des ménages ; des travaux complémentaires d'EDF R&D (Cayla et Osso, 2013), ensuite, qui relient désormais l'intensité d'utilisation à la part budgétaire consacrée au chauffage, soit la dépense conventionnelle rapportée au revenu.

L'intensité d'utilisation obéit désormais dans Res-IRF à l'équation suivante :

[12] Voir par exemple Aydin et al. (2017). Une autre explication parfois avancée est le *pre-bound effect*, selon lequel les consommations avant rénovation à partir desquelles sont prédites les économies d'énergie sont surestimées (Sunikka-Blank et al., 2012).

[13] L'équation utilisée est intensité d'utilisation = 3.5309 *exp(-0.643 *log (depense_m2))

$$Intensité\ d'utilisation = -0{,}191 * \log(Part\ budgétaire) + 0{,}1105$$

avec $Intensité\ d'utilisation = \frac{Consommation\ réelle}{Consommation\ conventionnelle}$

et $Part\ budgétaire = \frac{Prix\ de\ l'énergie * Surface * Consommation\ conventionelle}{Revenu}$.

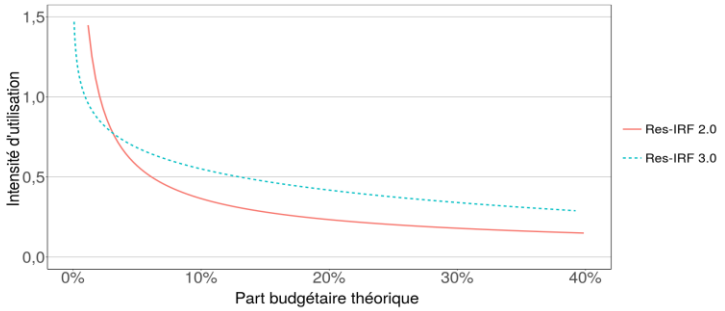


Figure 9: Courbes d'intensité d'utilisation utilisées dans les différentes versions de Res-IRF

La Figure 9 compare la relation utilisée dans Res-IRF version 3.0 à celle utilisée dans la version 2.0, rapportée à une surface moyenne de 85m² et un revenu annuel moyen de 30000 €. La nouvelle relation apparaît moins pentue, traduisant un effet stabilisateur d'une hausse du revenu sur une hausse du prix de l'énergie (conduisant toutes les deux à un déplacement vers la gauche sur l'axe des abscisses). L'application dans Res-IRF de la nouvelle formule conduit à une intensité d'utilisation agrégée de 0,74 à l'année initiale, contre 0,55 dans la précédente version.

2.2.2.2 Elasticité-prix de court terme

L'élasticité-prix de la demande d'énergie se déduit simplement de la formule précédente :

$$élasticité = \frac{\partial Consommation\ réelle}{\partial Prix\ de\ l'énergie} * \frac{Prix\ de\ l'énergie}{Consommation\ réelle} = \frac{-0{,}191}{Intensité\ d'utilisation}.$$

Cette expression traduit des ajustements de court terme, à performance énergétique du logement constante. La Figure 10 illustre les valeurs de l'élasticité pour différents niveaux de performance et catégories de revenu des ménages, avec un prix de l'énergie fixé à 0,10 €/kWh (prix moyen des énergies en 2012). Les élasticités obtenues avec le nouveau jeu de données diminuent (en valeur absolue) de façon non linéaire avec l'augmentation du revenu et de la performance énergétique du logement. L'élasticité moyenne s'établit à -0,23 et l'étendue des valeurs est conforme à celle relevée dans les études académiques (Gillingham et al., 2009).

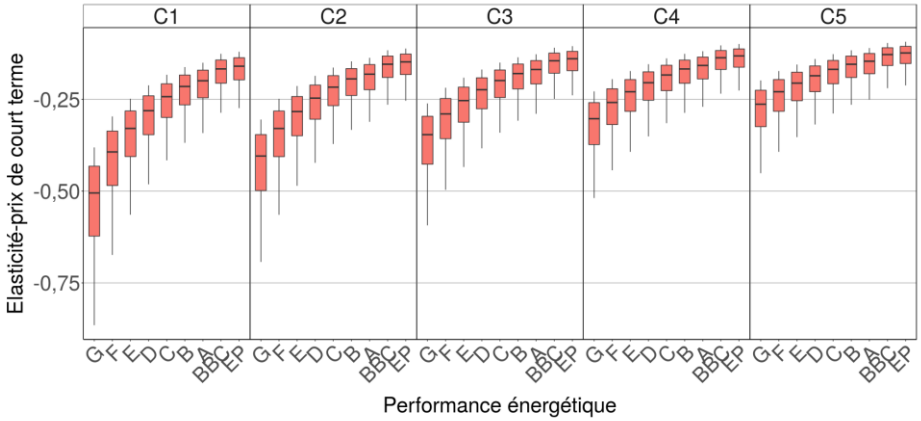


Figure 10: Elasticités-prix de court-terme estimées sur les sorties de Res-IRF 3.0

2.2.2.3 Elasticité-prix de long terme

Alors que les élasticités-prix de court terme prennent uniquement en compte les variations d'intensité d'utilisation induites par les variations de prix des énergies, les élasticités-prix de long terme intègrent l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc – sous l'effet de la construction neuve et de la rénovation des bâtiments existants – induite par les prix de l'énergie.

Les élasticités-prix de long terme de Res-IRF sont estimées sur un jeu de simulations[14]. Dans un premier temps, on génère des scénarios de prix de l'énergie P_t à partir du processus autorégressif suivant :

$$P_t = \lambda^1 * P_{t-1} + \lambda^2 * P_{t-2} + \mu + \epsilon_t$$

Les paramètres λ^1et λ^2 représentent l'inertie des prix des années $t-1$et $t-2$, respectivement, le paramètre μ représente un accroissement annuel calibré tel que $\mu = P_{2012} - \lambda^1 * P_{2011} - \lambda^2 * P_{2010}$ et le paramètre ϵ_t suit, pour chaque énergie, une loi normale centrée d'écart-type $P_{2012}/10$. On génère 160 scénarios de prix des énergies en croisant quatre valeurs $\lambda^1 \in [0{,}6; 0{,}65; 0{,}7; 0{,}75]$, quatre valeurs $\lambda^2 \in [0{,}85; 0{,}9; 0{,}95; 0{,}97]$ et 10 tirages aléatoires de ϵ_t.

Dans un deuxième temps, on simule les consommations d'énergie pour chaque scénario de prix avec le modèle. Afin d'identifier le plus nettement l'effet des prix des énergies, les simulations n'incluent aucune politique et sont réalisées à revenu constant. Pour chaque simulation, on régresse la chronique de consommation d'énergie sur la chronique de prix de l'énergie à l'aide du modèle économétrique suivant :

$$ln(C_t) = \alpha_0 + \alpha_1 * Time + \beta * ln(P_t) + \gamma_t$$

La variable temporelle permet d'isoler les effets autonomes des effets induits par les prix des énergies. L'estimation du paramètre β donne l'élasticité-prix de long terme associée au scenario considéré.

[14] Pour plus de détail sur la méthode, voir Labandeira et al. (2017).

Plusieurs paramètres β peuvent être estimés, en fonction de la date à laquelle la chronique de prix est interrompue (points de passage 2020, 2030, 2040 ou 2050).

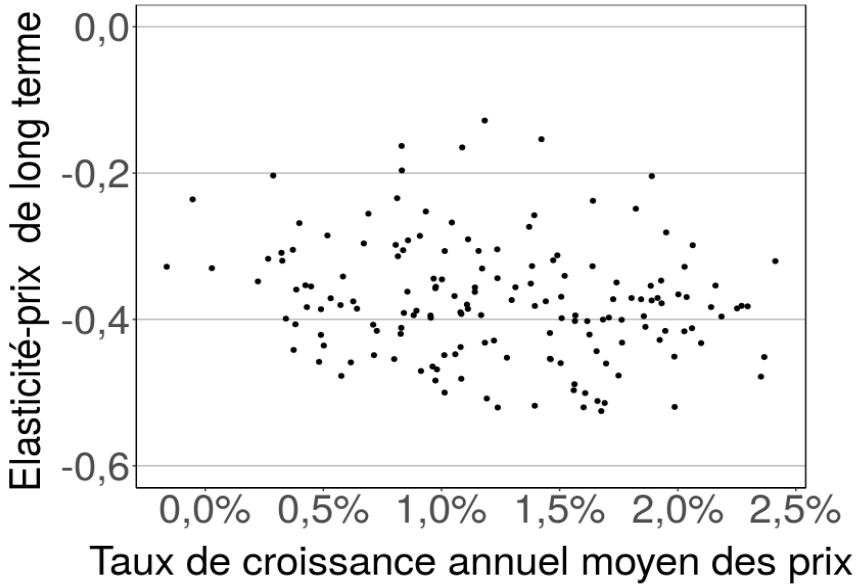


Figure 11: Elasticités-prix de long-terme estimées pour l'année 2050

Dans un troisième temps, on calcule la moyenne des paramètres β estimés sur les 160 scénarios, par type d'énergie, et pour différents points de passage. Sur l'ensemble de la période, l'élasticité moyenne s'établit à -0,35. La Figure 11 permet de visualiser le nuage de points pour l'année 2050 et le Tableau 6 détaille les points de passage intermédiaires. L'augmentation (en valeur absolue) de l'élasticité au cours du temps traduit les effets structurels d'amélioration énergétique du parc induite par les prix de l'énergie.

Tableau 6: Elasticités-prix de long-terme estimées pour différents points de passage

	2020	2030	2040	2050
Moyenne	-0,29	-0,31	-0,34	-0,38
Ecart-type	0,06	0,06	0,07	0,08

2.2.3 Consommations d'énergie agrégées

L'agrégation des consommations d'énergie réelle finale générées par Res-IRF à partir des données Phébus pour l'année initiale 2012 diffère des valeurs produites par le CEREN. Comme évoqué précédemment (cf. Figures 1 et 4), ces écarts proviennent d'une part des différences de périmètre entre les bases Phébus et CEREN, d'autre part des ajustements réalisés pour paramétrer Res-IRF sur la base Phébus (notamment la sélection de l'énergie principale de chauffage).

Afin d'assurer une cohérence avec les données CEREN, qui constituent une référence commune à de nombreux exercices de modélisation, le modèle est calibré de manière à reproduire les consommations

d'énergie finale par type d'énergie données par le CEREN pour l'année initiale 2012. Les coefficients de conversion qui en résultent, recensés dans le Tableau 7, montrent que Res-IRF prédit assez finement les consommations de gaz naturel et de fioul domestique, avec une erreur de l'ordre de 5%. Les consommations d'électricité sont en revanche nettement sur-estimées et les consommations de bois-énergie grandement sous-estimées. La documentation de la base de données CEREN n'a pas permis d'identifier clairement les raisons de ces biais. On peut toutefois formuler l'hypothèse qu'ils tiennent à la procédure de sélection d'une énergie de chauffage principale dans Res-IRF, qui conduit probablement à substituer de l'électricité à du bois dans les logements chauffés principalement à l'électricité mais utilisant le bois en chauffage d'appoint. Les difficultés inhérentes à la conversion des différentes formes de bois (stère, granulé, etc.) en TWh peuvent également contribuer à expliquer les écarts observés sur les consommations de bois.

Tableau 7: Calibrage des consommations agrégées Res-IRF sur les données CEREN

	Electricité	Gaz naturel	Fioul domestique	Bois-énergie	*TOTAL*
Consommation CEREN 2012 (TWh_{EF})	44,4	119,7	55,5	73,3	***292,9***
Facteur correctif appliqué à Res-IRF	0,79	1,06	1,03	2,14	***1,14***

2.3 Dynamique d'amélioration énergétique

2.3.1 Evolution des effectifs

Le nombre et la surface des logements sont déterminés chaque année dans Res-IRF à partir d'une projection exogène de population, basée sur des travaux de l'Insee (2006), et d'une projection de revenu agrégé des ménages. En l'absence de scénario faisant autorité, cette dernière est basée sur une hypothèse de croissance de 1,2%/an, qui prolonge la tendance donnée par l'Insee[15] pour la période 2009-2013. A partir des besoins annuels ainsi déterminés, le parc total de logements se décompose en deux blocs :

- Le stock « existant », qui correspond au parc total de l'année initiale, s'érode à un rythme de 0,35%/an sous l'effet de destructions[16], qui sont distribuées en priorité sur les plus basses étiquettes de performance énergétique[17].
- Les constructions neuves couvrent le solde des besoins de logements (c'est-à-dire les besoins projetés nets du stock existant résiduel). Le cumul des constructions neuves depuis l'année initiale constitue le stock « neuf ».

Dans Res-IRF 2.0, la part des logements individuels et collectifs était maintenue constante dans les stocks neuf et existant, mais à des niveaux différents ; elle évoluait donc dans le parc total par un simple effet de composition. Cette dynamique est à présent paramétrée de façon plus fine dans Res-IRF 3.0 grâce à des travaux empiriques récents reliant l'augmentation de la part des logements collectifs dans le parc

[15] Sur la base d'un revenu disponible brut des ménages de 1 318,3 milliards d'euros en 2012 (https://www.insee.fr/fr/statistiques/2569356?sommaire=2587886).
[16] D'après les travaux de Allaire et al. (2008)
[17] D'après les travaux de Traisnel (2001).

total au taux de croissance des logements et reflétant des effets d'urbanisation (Fisch et al., 2015) (Figure 12).

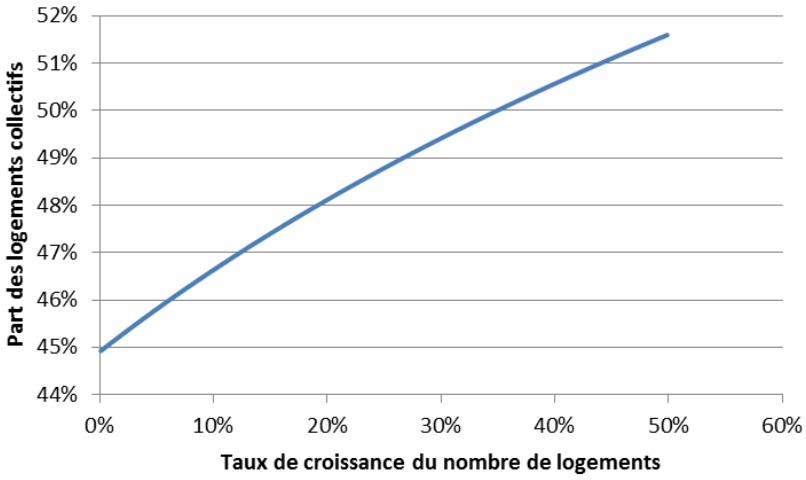


Figure 12: Fonction de pénétration des logements collectifs

Ces éléments de paramétrage conduisent à un flux de constructions neuves de 365 000 en 2013, 357 000 en 2014 et 348 000 en 2015, du même ordre que la moyenne de 374 000 établie par l'Insee (2018) sur un périmètre légèrement plus large incluant les DOM-TOM sauf Mayotte.

2.3.2 Choix d'amélioration énergétique – cas général

La performance énergétique des logements évolue dans Res-IRF sous l'effet de la construction de logements neufs et de la rénovation des logements existants. Les deux effets sont modélisés par des fonctions de choix discret. De façon générale, le propriétaire d'un logement de performance initiale $i \in \{1 \dots n\}$, considéré comme l'investisseur de référence, choisit une option d'efficacité énergétique finale $f \in \{i+1, \dots, n\}$, caractérisée par son coût sur le cycle de vie $CCV_{i,f}$ résultant de la somme de trois termes :

$$CCV_{i,f} = CINV_{i,f} + \gamma * CENER_f + CI_{i,f}$$

avec $CINV$ le coût d'investissement, $CENER$ le coût d'utilisation de l'énergie actualisé sur le cycle de vie, produit de la consommation d'énergie conventionnelle finale caractérisant l'option, du prix de l'énergie associée pour l'année considérée, et d'un facteur d'actualisation, et CI des coûts dits « intangibles », représentant l'ensemble des déterminants non-financiers de l'investissement (bénéfices esthétiques ou acoustiques, dérangement liés aux travaux, etc.).

En appliquant le facteur d'actualisation au prix de l'année considérée, on fait l'hypothèse d'une anticipation myope du prix des énergies, justifiée par des travaux économétriques[18]. Le facteur d'actualisation γ dépend de deux paramètres, le taux d'actualisation r et l'horizon d'investissement l selon l'équation suivante :

[18] Voir par exemple Anderson et al. (2013).

$$\gamma(r,l) = \sum_{t=0}^{l} (1+r)^{-t} = \frac{1-(1+r)^{-l}}{r}$$

Ces deux paramètres traduisent dans Res-IRF diverses barrières à la rénovation énergétique :

- Le taux d'actualisation prend à la fois en compte (i) les contraintes hétérogènes d'accès au crédit qui pèsent sur les différentes classes de revenu et (ii) les contraintes de décision qui pèsent sur les logements collectifs en copropriété.
- L'horizon d'investissement traduit l'intensité de la « valeur verte » vénale ou locative des logements, c'est-à-dire l'étendue de la prime à la location ou à la revente pour un bien qui vient de subir des travaux d'amélioration énergétique.

La part de marché $PM_{i,f}$ d'une transition, résultant de l'agrégation des choix individuels, est déduite de son coût sur le cycle de vie par l'équation suivante :

$$PM_{i,f} = \frac{{CCV_{i,f}}^{-v}}{\sum_{k=i+1}^{n} {CCV_{i,k}}^{-v}}$$

Le paramètre v caractérise l'hétérogénéité des préférences et est fixé à 8 dans le modèle[19]. Les coûts intangibles sont calibrés de manière à ce que les parts de marché observées soient reproduites à l'année initiale.

Les paragraphes qui suivent décrivent en détail le paramétrage de la dynamique d'amélioration énergétique, qui requiert deux types de données techniques – les parts de marché des différentes options à l'année initiale et leur coût d'investissement – et deux types de données comportementales – le taux d'actualisation et l'horizon d'investissement.

2.3.3 Construction de logements neufs

Les coûts de construction aux niveaux BBC et BEPOS ont été re-paramétrés dans Res-IRF 3.0 à un niveau plus fin qu'auparavant en exploitant une publication récente du CGDD (2015)[20] (Tableau 8).

Tableau 8: Coûts de construction (€/m² surface de plancher)

	Maisons individuelles		Logement collectif	
	BBC	**BEPOS**	**BBC**	**BEPOS**
Electricité	979	1 112	1 199	1 308
Gaz naturel	1 032	1 059	1 242	1 253
Fioul domestique	1 032	1 059	1 242	1 253
Bois-énergie	1 094	1 121	1 323	1 350

[19] En l'absence de données permettant une estimation précise, cette valeur est paramétrée de façon *ad hoc*. Les analyses conduites par le passé ont montré que les consommations d'énergie simulées par le modèle étaient peu sensibles à ce paramètre (Branger et al., 2015).

[20] L'étude ne contient pas d'information sur les logements chauffés au fioul domestique ni sur les logements collectifs chauffés au bois. On attribue donc aux premiers les coûts des constructions neuves chauffées au gaz naturel, et aux seconds les coûts des maisons individuelles chauffées au bois, auquel on ajoute le surcoût moyen des logements collectifs.

Les parts de marché utilisées pour calibrer les coûts intangibles ont également été re-paramétrées à un niveau plus fin, à partir des tendances fournies par le CEREN (Figure 13).

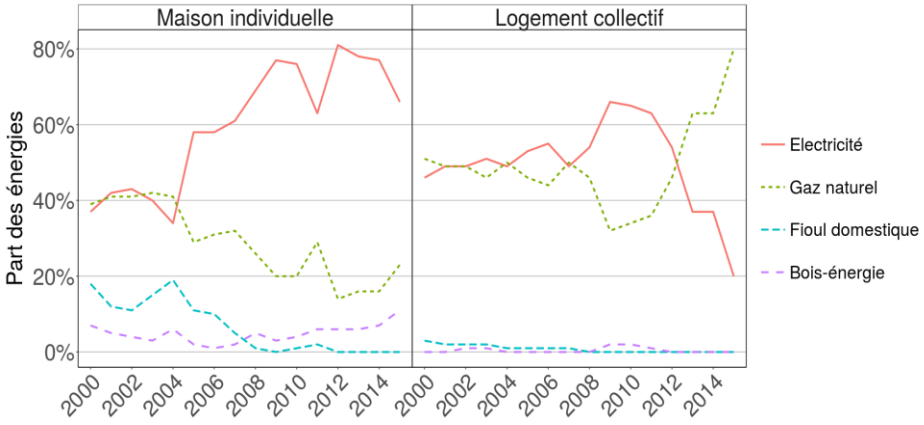


Figure 13: Evolution des parts des énergies dans les logements neufs (source : CEREN)

La pénétration massive du gaz naturel au détriment du chauffage électrique observée depuis une dizaine d'année dans les logements collectifs est, de l'avis des membres du Comité de pilotage de l'étude, principalement due à l'anticipation puis l'entrée en vigueur de la réglementation thermique de 2012. Afin toutefois de s'affranchir des variations de court terme, les parts de marché de 2012 sont paramétrées dans Res-IRF sur la moyenne des années 2012-2015 (Tableau 9).

Tableau 9: Répartition des énergies de chauffage dans la construction neuve pour l'année 2012

	Électricité	Gaz naturel	Fioul domestique	Bois-énergie	*Total*
Maisons individuelles	75,3%	18,5%	0,5%	5,8%	*100%*
Logements Collectif	19,5%	79,5%	0,0%	1,0%	*100%*

On fait enfin l'hypothèse que la construction neuve, dont la qualité résulte davantage de décisions prises par les professionnels du bâtiment et de l'immobilier que par les futurs propriétaires, obéit à des critères de décision privée, reflétés par un taux d'actualisation de 7% et une durée de vie de 35 ans.

2.3.4 Rénovation des logements existants

Le modèle détermine simultanément le nombre de rénovations et leur efficacité. Le mécanisme est donc plus complexe qu'en construction neuve, où ces deux processus sont distincts. Par souci de clarté, nous les décrivons ici de façon séquentielle.

2.3.4.1 Qualité de rénovation

Les coûts de rénovation $CINV_{i,f}$ sont décrits par une matrice diagonale supérieure reliant l'étiquette DPE initiale i du logement à son étiquette finale f (Tableau 10). Le paramétrage de la matrice s'appuie sur des données parcellaires complétées par des valeurs interpolées à partir des principes suivants :

- Rendements décroissants, i.e. coût incrémental de rénovation croissant : $CINV_{i,f+2} - CINV_{i,f+1} > CINV_{i,f+1} - CINV_{i,f}$.
- Economies d'échelle rendant la rénovation globale moins coûteuse qu'une succession de rénovations incrémentales :$CINV_{i,f} < CINV_{i,i+k} + CINV_{i+k,f}$ pour tout k tel que $1 \leq k < f - i$.

Tableau 10: Coûts de rénovation (€/m²)

		Etiquette finale					
		F	**E**	**D**	**C**	**B**	**A**
Etiquette initiale	**G**	76	136	201	271	351	442
	F		63	130	204	287	382
	E			70	146	232	331
	D				79	169	271
	C					93	199
	B						110

Cette matrice s'applique de façon identique aux logements individuels et collectifs, dans le parc privé comme dans le parc social. En l'absence d'une amélioration suffisante de la qualité des données, elle reste inchangée par rapport à la version précédente du modèle. Il en va de même pour la matrice de parts de marché servant à calibrer les coûts intangibles de rénovation, paramétrée à partir de données du PUCA (2015, p.4) (Tableau 11).

Tableau 11: Parts de marché des différentes transitions d'étiquette

		Etiquette finale						*Total*
		F	**E**	**D**	**C**	**B**	**A**	
Etiquette initiale	**G**	25,00%	27,00%	27,00%	20,98%	0,01%	0,01%	*100%*
	F		40,40%	26,30%	31,30%	1,99%	0,01%	*100%*
	E			66,00%	28,00%	5,99%	0,01%	*100%*
	D				95,00%	4,99%	0,01%	*100%*
	C					90,91%	9,09%	*100%*
	B						100%	*100%*

Les données de coût du tableau 10, pondérées par les parts fournies aux tableaux 11 et 12 (cf. supra), aboutissent à un coût moyen de rénovation de 112 €/m², très proche de la valeur de 110 €/m² donnée dans OPEN (9 978 € de dépense moyenne rapportée à 91 m²). Ces mêmes données de coût, rapportées aux économies d'énergie valorisées en kWh cumac (avec une hypothèse de durée de vie moyenne de 26 ans) conduisent à un « coût du négawatt-heure » moyen de 83 €/MWh cumac et des valeurs extrêmes de 25 et 446, qui sont conformes aux ordres de grandeur produits récemment par la DG Tresor (2017, Tableau 1).

2.3.4.2 Quantité de rénovation

Un projet de rénovation au départ d'une étiquette initiale i est caractérisé par sa valeur actuelle nette (VAN), calculée comme la somme du coût sur le cycle de vie des différentes options finales $f \in \{i + 1, \ldots, n\}$, pondérée par leur part de marché :

$$VAN_i = \sum_{f>i}^{n} PM_{i,f} * CCV_{i,f}.$$

Le taux de rénovation τ_i au départ de l'étiquette i est ensuite calculé comme une fonction logistique croissante de la VAN :

$$\tau_i = \frac{\tau_{max}}{1 + \left(\frac{\tau_{max}}{\tau_{min}} - 1\right) e^{-\rho(VAN_i - VAN_{min})}}$$

avec les valeurs $\tau_{min} = 0{,}001\%$, $VAN_{min} = -1\,000€$ et $\tau_{max} = 20\%$. Le paramètre ρ est calibré pour chaque type de décideur et chaque étiquette de départ (soit 6x6=36 valeurs) à partir des données de l'Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement (OPEN, 2016), de telle sorte que les VAN calculées avec les subventions en vigueur en 2012[21] reproduisent les taux de rénovation par décideur et par étiquette de départ décrits aux Tableaux 12 et 13 et que l'agrégation de ces rénovations représente 3% du parc de logements existants à l'année initiale, soit 686 757 logements.

Tableau 12: Taux de rénovation par étiquette de performance, d'après PUCA (2015)

Etiquettes initiale	Contribution au taux de rénovation total
G	36%
F	30%
E	15%
D	10%
C	8%
B	1%
Total	***100%***

Tableau 13: Taux de rénovation par segment du parc, d'après OPEN (2016) et USH (2017)

Type de décideur	Type de logement	Taux de rénovation
Propriétaire occupant	Maison individuelle	4,7%
	Logement collectif	3,6%
Propriétaire bailleur	Maison individuelle	2,0%
	Logement collectif	1,8%
Logement social	Maison individuelle	1,5%
	Logement collectif	2,0%

2.3.4.3 Paramètres comportementaux

Dans le parc privé, les taux d'actualisation sont différenciés par types de logement afin de simuler les contraintes hétérogènes auxquelles font face les investisseurs (Tableau 14). Ils diminuent avec le revenu des propriétaires, afin de traduire les difficultés d'accès au crédit qui pèsent sur les ménages les plus modestes. Ils sont par ailleurs plus élevés en logement collectif qu'en maison individuelle, afin de prendre en compte les difficultés liées à la prise de décision en copropriété. Dans le parc social, en revanche, le taux d'actualisation est fixé à la valeur de 4% couramment utilisée dans la décision publique.

[21] Le CITE, l'EPTZ, les CEE et la TVAr – voir le paragraphe 4.2 pour leur paramétrage.

Tableau 14: Taux d'actualisation

Catégorie de revenu	Maison individuelle	Logement collectif	Logement social
C1	15%	37%	4%
C2	10%	25%	4%
C3	7%	15%	4%
C4	5%	7%	4%
C5	4%	5%	4%
Taux pondéré par les parts du Tableau 4	**8%**	**17%**	**4%**

L'horizon d'investissement fait l'objet de variantes de scénarios, reflétant différentes intensités de valeur verte pour les investisseurs (cf. Tableau 15) :

- Dans le scénario de pleine valeur verte, l'investissement a pour horizon l'intégralité de la durée de vie des équipements soit 30 ans pour les travaux sur l'enveloppe et 16 ans pour l'amélioration des systèmes de chauffage. Les investisseurs jouissent des bénéfices de l'investissement tant qu'ils possèdent le logement (éventuellement sous forme de loyers plus élevés) et bénéficient d'une prime à la revente correspondant à la somme actualisée des économies monétaires résiduelles permises par l'investissement.
- Le scénario de référence correspond à une situation où l'horizon des propriétaires-bailleurs est réduit à la durée moyenne d'un bail, trois ans, qui traduit une incapacité à augmenter les loyers pour répercuter la valeur de l'investissement. Cette situation, qualifiée souvent de « dilemme propriétaire-locataire », est en pratique la plus courante (Giraudet, 2018).
- Dans le scénario sans valeur verte vénale, l'horizon d'investissement est limité à sept ans, équivalent à la durée moyenne de possession d'un logement. Cette hypothèse revient à ignorer totalement les bénéfices résiduels de l'investissement à la revente.
- Dans le scénario sans valeur verte vénale ni locative, le dilemme propriétaire-locataire s'ajoute à l'absence de capitalisation des bénéfices résiduels.

Tableau 15: Horizon d'investissement pour les travaux sur l'enveloppe (et les systèmes de chauffage)

Scénario	Logement social	Propriétaire occupant	Propriétaire bailleur
Pleine valeur verte	30 (16) ans	30 (16) ans	30 (16) ans
Référence	***30 (16) ans***	***30 (16) ans***	***3 ans***
Absence de valeur verte vénale	30 (16) ans	7 ans	7 ans
Absence de valeur verte vénale et locative	30 (16) ans	7 ans	3 ans

2.3.5 Progrès technique endogène

En construction neuve comme en rénovation, les coûts sur le cycle de vie des différentes options d'amélioration diminuent de façon endogène avec leur production cumulée. Ces mécanismes sont calibrés comme dans la version précédente du modèle (Giraudet et al., 2012) de la façon suivante :

- Les coûts d'investissements diminuent de façon exponentielle avec la quantité cumulée d'opérations afin de simuler un processus classique « d'apprentissage par la pratique ». Le taux de diminution des coûts pour un doublement de la production est fixé à 15% dans la construction neuve et 10% dans la rénovation, qui s'appuie sur des technologies plus matures.
- Les coûts intangibles de rénovation diminuent selon une courbe logistique avec la même production cumulée afin de simuler des effets de mimétisme et d'amélioration de l'information. Le taux de diminution pour un doublement de la production cumulée est fixé à 25%.

Dans les deux cas, la diminution des coûts sur le cycle de vie ainsi générée accroît la part de marché de l'option considérée par rapport à celle des options alternatives.

3 Comportement élémentaire de Res-IRF 3.0

3.1 Paramétrage de référence

Outre les politiques publiques, les résultats du modèle sont déterminés par trois variables exogènes : la population, le revenu des ménages et le prix des énergies. Les deux premières variables déterminent le nombre et la surface de constructions neuves, qui influencent la marge « extensive » de l'investissement. Les prix des énergies modifient les parts de marché des différentes options de rénovation et de construction, influençant ainsi la marge « intensive » de l'investissement. Enfin, le revenu des ménages et les prix des énergies influencent l'intensité d'utilisation du système de chauffage.

Le scénario de référence qui sert de base à la plupart des simulations présentées dans ce rapport est construit à partir des hypothèses suivantes :

- **Croissance de la population**[22] : reprend une projection de l'Insee (2006), équivalente à un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 0,3%/an sur la période 2012-2050.
- **Croissance du revenu des ménages** : prolonge de façon uniforme sur toutes les catégories de revenus la tendance moyenne de 1,2%/an donnée par l'Insee (cf. paragraphe 2.3.1).
- **Prix des énergies** : s'appuie sur un scénario de l'ADEME (cf. figure 14) reprenant des hypothèses de la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) établies sur la base d'un cadrage macroéconomique de la Commission Européenne pour le gaz naturel et le fioul domestique. Le scénario retenu équivaut à des TCAM des prix finaux toutes taxes comprises sur la période 2015-2050 de 1,42% pour le gaz naturel, 2,22% pour le fioul domestique, 1,10% pour l'électricité et 1,20% pour le bois-énergie. Dans le scénario dit TP (« toutes politiques », cf. définition ultérieure), ces hypothèses conduisent à un TCAM de l'indice de prix de l'énergie de 1,47%/an. On rappelle que dans Res-IRF, les investisseurs forment des anticipations myopes : ils valorisent les économies d'énergie futures au prix de l'énergie de l'année à laquelle ils prennent leur décision.

[22] La population est corrigée d'un facteur 23,9/27,1 pour prendre en compte l'écart de périmètre entre Res-IRF et Phébus. La taille moyenne des ménages qui en résulte est de 2,2 personnes par logement en 2013, valeur cohérente avec les données de l'Insee (2017) ; elle diminue avec le revenu pour atteindre 2,05 en 2050.

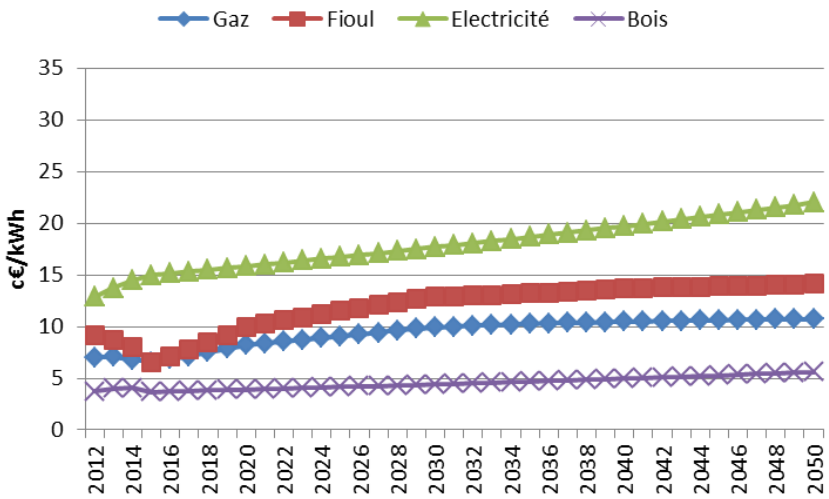


Figure 14: Scénario de prix des énergies (taxes comprises, sauf taxe carbone)

3.2 Analyse de sensibilité sur les scénarios prospectifs

Dans la partie qui suit, on évalue la sensibilité de Res-IRF à ses principaux facteurs. Il est important de rappeler que le calibrage du modèle prend en compte les politiques détaillées au chapitre suivant. Afin d'apprécier au mieux le comportement intrinsèque du modèle, on présente ici des scénarios contrefactuels où les politiques publiques sont ôtées du modèle à l'issue du calibrage (scénario « zéro politique », ZP). Les effets des différents scénarios sur la précarité énergétique sont évalués à l'aide de l'indicateur de taux d'effort énergétique (TEE), qui recense le nombre de ménages consacrant plus de 10% de leurs revenus aux dépenses de chauffage. (Pour une discussion plus approfondie sur les indicateurs de précarité, voir le paragraphe 4.3.3.)

3.2.1 Variantes sur les variables d'entrée

On compare d'abord un scénario de référence à trois alternatives, en gelant une à une les principales entrées du modèle : le progrès technique (PT), le prix des énergies et le revenu agrégé des ménages. Les hypothèses utilisées sont décrites dans le Tableau 16.

Tableau 16: Paramétrage des différents scénarios

Scénario	Progrès technique	Prix des énergies	Revenu des ménages
Référence	Taux d'apprentissage de 15% en construction neuve et 10% en rénovation	Prix croissants, d'après les hypothèses de l'ADEME	Taux de croissance de 1,2%/an
Sans PT	Taux d'apprentissage nuls		
Sans PT, prix constant		Prix constants	
Sans PT, prix et revenu constant			Revenu constant

La Figure 15 illustre l'effet de ces scénarios sur la consommation d'énergie finale agrégée pour le chauffage, principale sortie du modèle. On constate d'abord que la consommation d'énergie décroît de façon autonome de 15% à 30%, selon les scénarios considérés, entre 2012 et 2050. Par rapport au scénario de référence, le gel du progrès technique induit une hausse de la consommation d'énergie

d'environ 12% en 2050. Le gel additionnel des prix de l'énergie induit une nouvelle hausse d'environ 20% de la consommation d'énergie. Le gel des revenus induit enfin une baisse de la consommation d'environ 15%.

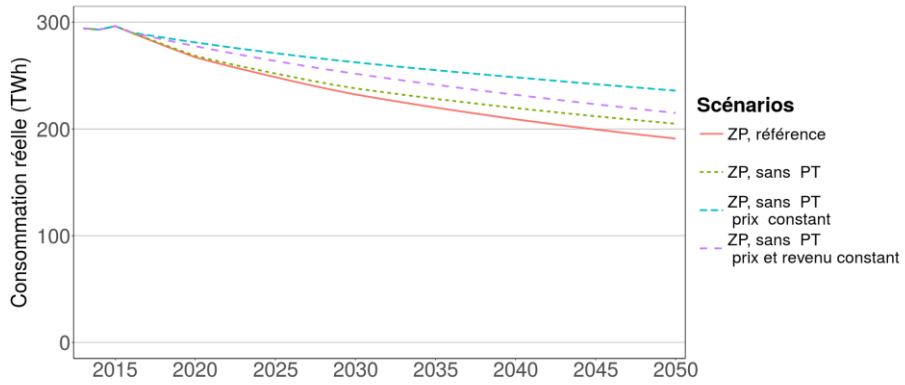


Figure 15: Evolution de la consommation finale réelle

Les Figures 16 et 17 permettent de décomposer ces effets sur le nombre et la qualité des rénovations. La Figure 16 montre que le gel du progrès technique diminue sensiblement le nombre annuel de rénovations. Le gel supplémentaire du prix des énergies renforce cet effet, tandis que le gel des revenus n'a pas d'effet additionnel. La décroissance tendancielle observée dans le dernier scénario, où tous les facteurs sont gelés, illustre l'épuisement du gisement de rénovations rentables sous l'effet des rénovations passées. La comparaison aux autres scénarios montre que le progrès technique et, dans une moindre mesure, l'augmentation du prix des énergies creusent ce gisement. La Figure 17 montre que les scénarios où les rénovations sont les plus nombreuses (ZP référence et sans PT) génèrent moins d'effectifs dans les basses étiquettes (G à C) et davantage dans les hautes (B et A).

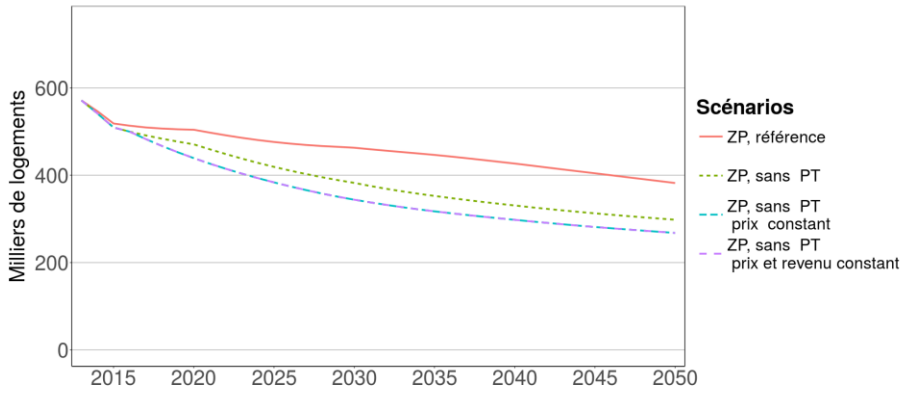


Figure 16: Evolution du nombre de rénovations

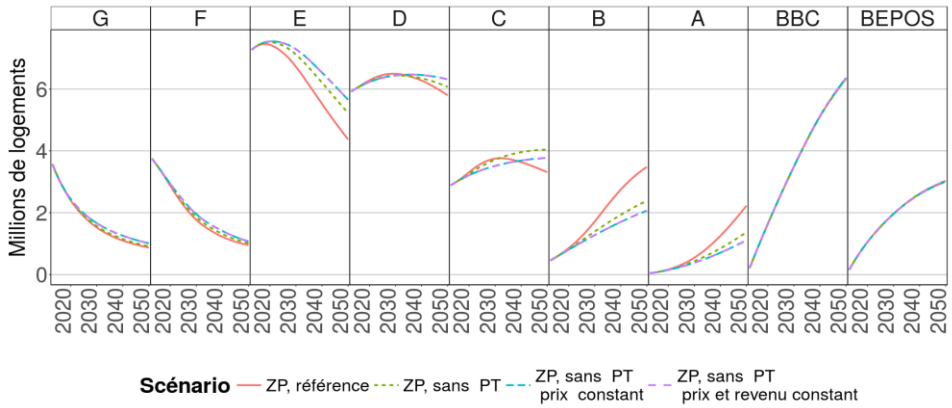


Figure 17: Evolution de la performance énergétique du parc

La Figure 18 montre l'évolution de l'intensité d'utilisation agrégée, dont on rappelle qu'elle diminue avec la part budgétaire théorique de chauffage, qui elle-même diminue avec la performance énergétique du logement et le revenu du ménage et augmente avec le prix de l'énergie. L'effet du prix de l'énergie sur cette grandeur est ambigu puisqu'à l'effet direct qui vient d'être évoqué s'ajoute l'effet indirect vu au paragraphe précédent par lequel le prix de l'énergie stimule les rénovations, générant ainsi une amélioration de la performance énergétique. Le croisement des courbes dans les scénarios avec prix des énergies variables et constants (tous deux sans PT) suggère que l'effet direct domine à court terme et l'effet indirect à long terme. La comparaison des deux premiers scénarios ZP révèle qu'un gel du progrès technique limite l'intensité d'utilisation, effet qui transite comme on l'a vu précédemment par une moindre amélioration de la performance énergétique. Enfin, la comparaison des deux derniers scénarios illustre l'effet positif de la croissance des revenus sur l'intensité d'utilisation. Il est important de préciser qu'en parallèle, la croissance du revenu agrégé augmente la surface des logements à chauffer.

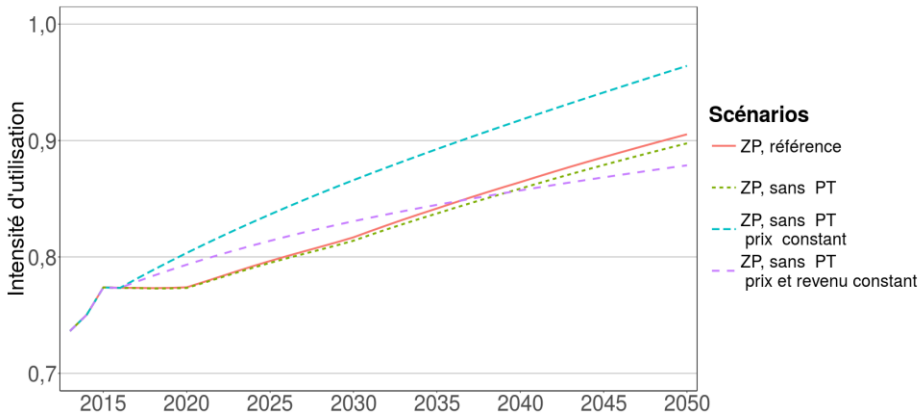


Figure 18: Evolution de l'intensité d'utilisation

En résumé :

- La diminution des consommations d'énergie est dans une large mesure autonome ;
- La croissance du prix des énergies stimule la rénovation et diminue l'intensité d'utilisation ; le premier effet a tendance à neutraliser le second à long terme ;
- Le progrès technique a un pur effet d'amélioration de la performance énergétique ;
- La croissance du revenu augmente les consommations d'énergie en augmentant à la fois la surface à chauffer et l'intensité d'utilisation du chauffage.

La Figure 19 décrit l'évolution de la part des logements en situation de précarité énergétique selon l'indicateur TEE. On voit qu'en l'absence de progrès technique, de hausse des prix des énergies et du revenu, les progrès d'efficacité énergétique autonomes permettent de réduire cette part. La hausse des revenus a pour effet naturel de renforcer cette baisse, tandis que la hausse du prix des énergies a un effet opposé, qui s'atténue à long terme. En comparaison, le progrès technique a un modeste effet de diminution de la précarité énergétique via l'amélioration de la performance.

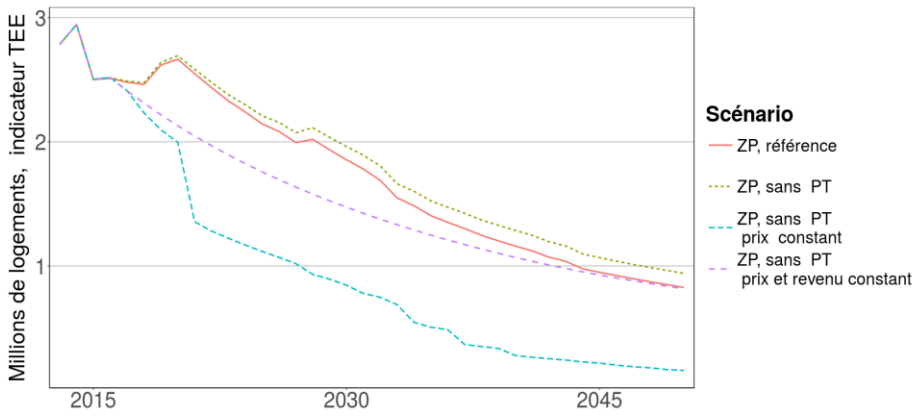


Figure 19: Evolution de la part des logements consacrant plus de 10% de leur revenu aux dépenses de chauffage

3.2.2 Variantes sur la « valeur verte »

On compare ici les quatre scénarios décrits au Tableau 15 (le scénario sans dilemme propriétaire-locataire correspondant à la pleine valeur verte). L'absence de valeur verte se manifeste par une réduction du nombre et de la qualité des rénovations (Figures 20 et 21) ; même si cette tendance induit un effet de sobriété (Figure 22), il en résulte une hausse de la consommation d'énergie agrégée (Figure 23). L'absence de valeur verte locative a des effets similaires bien que nettement plus modestes. Au contraire, sous l'hypothèse d'une pleine valeur verte, où les propriétaires bailleurs ont la même propension à investir que les propriétaires occupants, l'amélioration de la performance énergétique et, *in fine*, les économies d'énergie sont plus importantes qu'en référence.

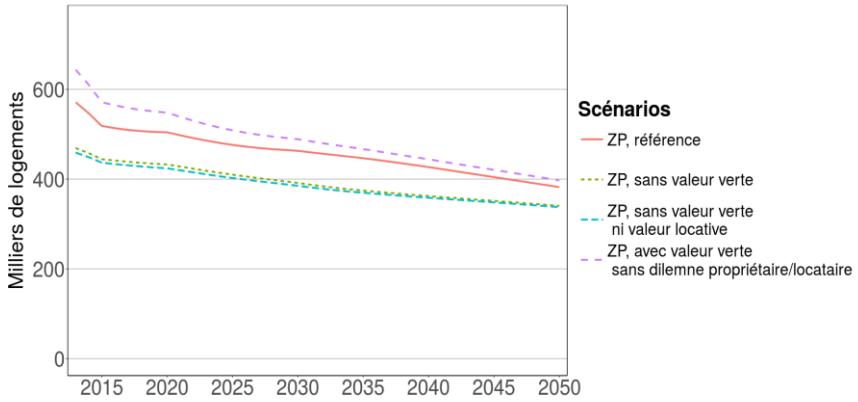


Figure 20: Evolution du nombre de rénovations – scénarios de valeur verte

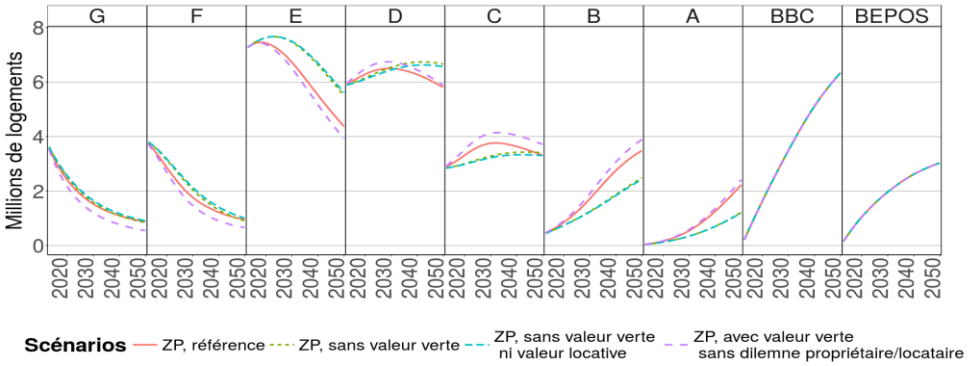


Figure 21: Evolution de la performance énergétique du parc – scénarios de valeur verte

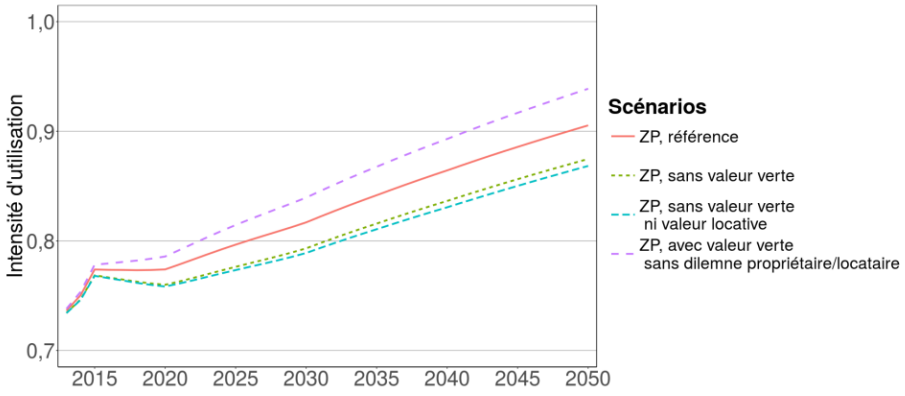


Figure 22: Evolution de l'intensité d'utilisation – scénarios de valeur verte

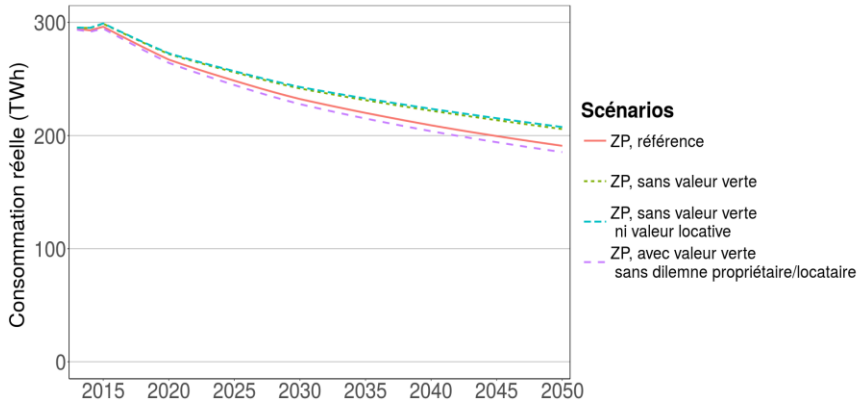


Figure 23: Evolution de la consommation finale réelle – scénarios de valeur verte

3.2.3 Variante sur les contraintes budgétaires

On compare ici différents scénarios de contraintes de financement. Les variantes portent sur le paramétrage des taux d'actualisation :

- **Référence** : les taux d'actualisation sont ceux décrits dans le Tableau 14 ;
- **Sans contrainte budgétaire** : tous les taux d'actualisation sont égaux à 7% ;
- **Investissement public** : tous les taux d'actualisation sont égaux à 4%.

Comme l'indiquent les Figures 24 à 27, ces variantes ont des effets relativement modestes sur la dynamique de rénovation et les consommations agrégées. Les contraintes de financement ne semblent donc pas jouer un rôle majeur dans le modèle. Ce résultat rejoint les conclusions de l'analyse de sensibilité à laquelle avait été soumis Res-IRF 2.0 (Branger et al., 2015).

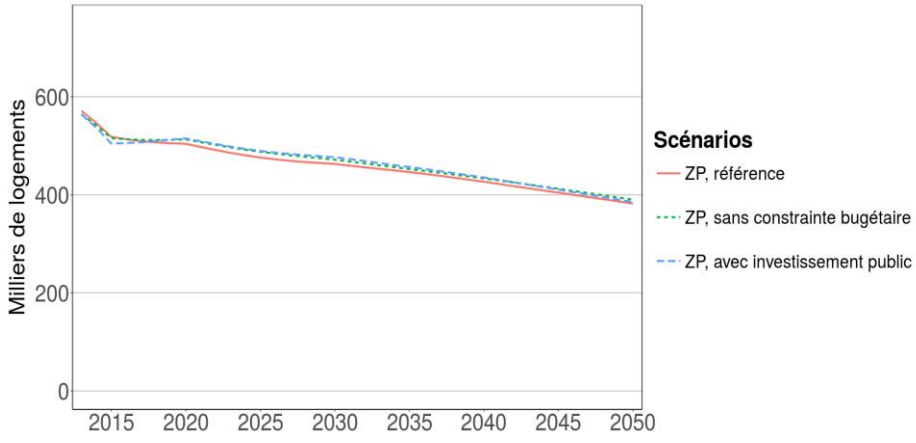


Figure 24: Evolution du nombre de rénovations – scénarios de contrainte budgétaire

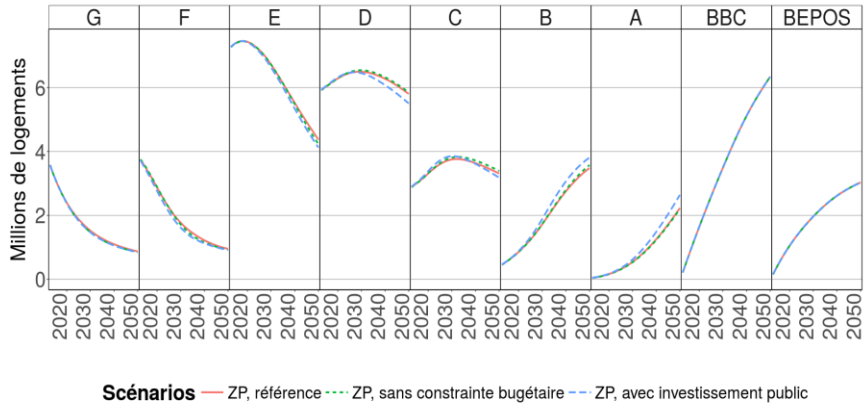


Figure 25: Evolution de la performance énergétique du parc – scénarios de contrainte budgétaire

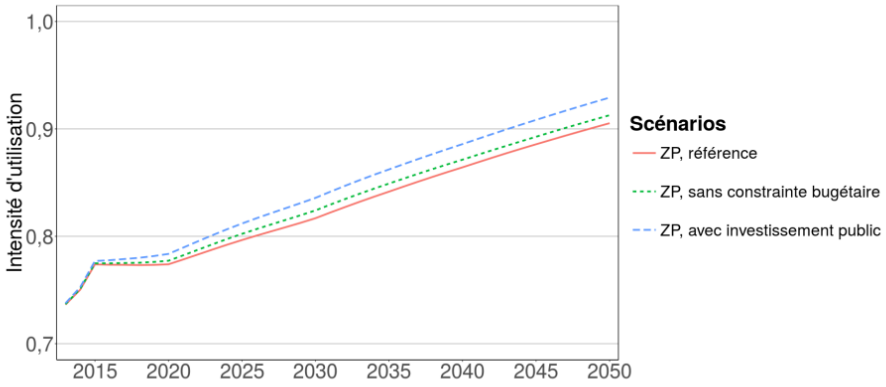


Figure 26: Evolution de l'intensité d'utilisation – scénarios de contrainte budgétaire

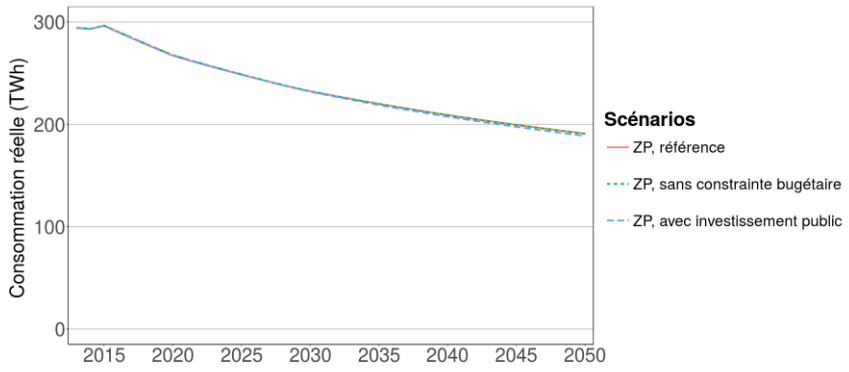


Figure 27: Evolution de la consommation finale réelle – scénarios de contraintes budgétaires

3.2.4 Variantes sur l'évolution des inégalités

On compare enfin le scénario de référence des variantes où la croissance des revenus est identique au niveau agrégé mais différenciée par catégories de revenu, de façon régressive (accroissement des inégalités) et progressive (réduction des inégalités).

Tableau 17: Paramétrage des scénarios d'évolution des inégalités

Scénario	Taux de croissance annuel du revenu, par catégorie de revenu				
	C1	C2	C3	C3	C5
Régressif	0,8%	1,0%	1,2%	1,4%	1,6%
Référence	**1,2%**	**1,2%**	**1,2%**	**1,2%**	**1,2%**
Progressif	1,6%	1,4%	1,2%	1,0%	0,8%

Ces variantes (cf. Tableau 17) induisent peu de différences en termes de consommations d'énergie agrégée (Figure 28). En revanche, le scénario d'accroissement des inégalités ralentit la réduction de la précarité énergétique tandis que le scénario de réduction des inégalités l'accélère (Figure 29). De même, les deux scénarios ont des effets opposés sur l'intensité d'utilisation – qui constitue une mesure indirecte du confort de chauffage – des ménages modestes (C1 et C2) et aisés (C4 et C5) (Figure 30).

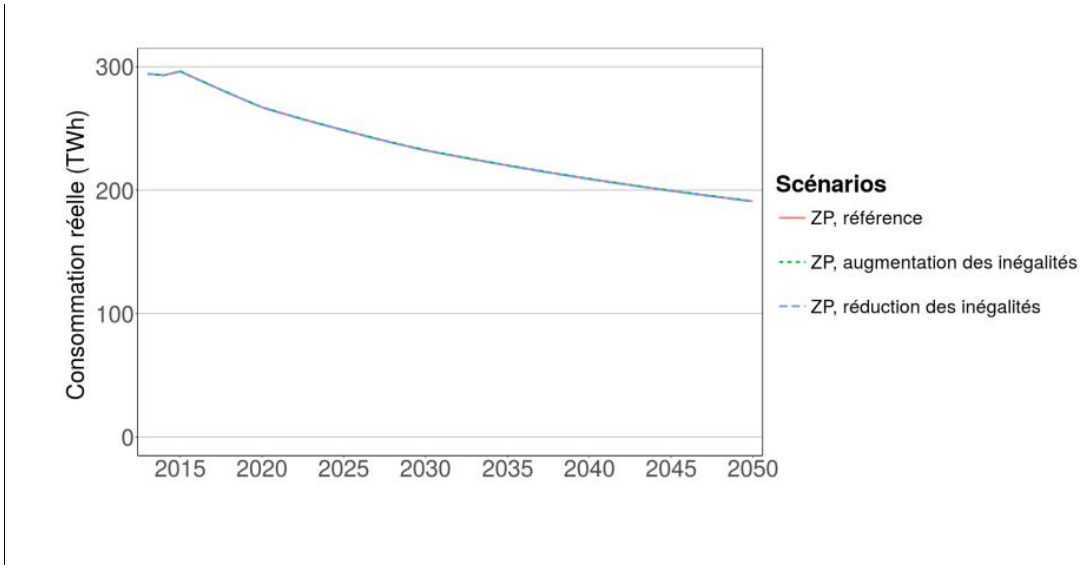


Figure 28: Evolution de la consommation finale réelle – scénarios d'inégalités

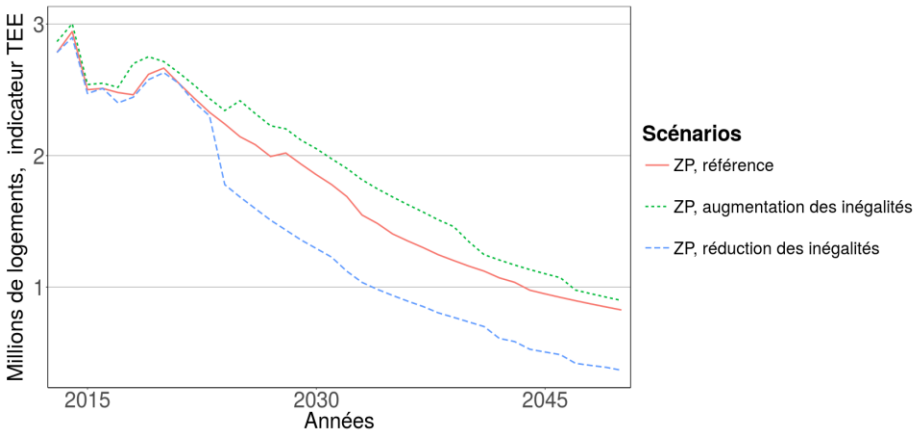


Figure 29: Evolution de la précarité énergétique – scénarios d'inégalités

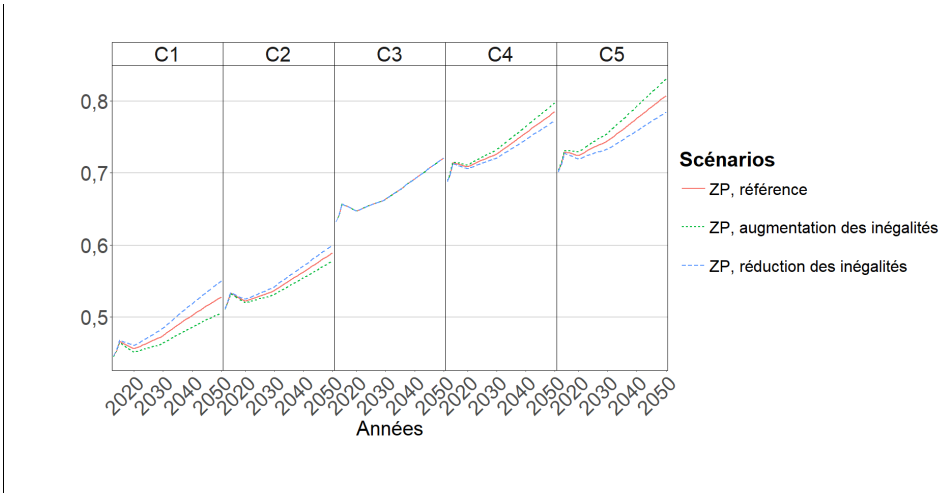


Figure 30: Evolution de l'intensité d'utilisation – scénarios d'inégalités

3.3 Simulations rétrospectives[23]

Des simulations rétrospectives ont été conduites pour évaluer l'acuité avec laquelle le modèle reproduit les tendances du passé. L'exercice consiste à calibrer le modèle à une année suffisamment ancienne puis simuler l'évolution des consommations entre cette date et l'année 2012, année de calibrage de la version actuelle du modèle.

L'exercice présente deux difficultés. D'abord, la distribution des étiquettes DPE dans le parc de logements n'est actuellement disponible que pour l'année 2012 (base Phébus), et de façon moins précise pour l'année 2008 (base ANAH). Reconstituer la performance du parc avant ces dates implique donc un important travail de collecte et traitement de données. Ensuite, de nombreuses données nécessaires au

[23] Ces travaux sont détaillés dans Glotin (2018).

paramétrage de la dynamique du modèle ne sont pas non plus disponibles et donc sujettes à des incertitudes importantes. Ces difficultés ont été abordées en deux temps.

3.3.1 Reconstitution de la performance passée du parc

La reconstitution de la performance du parc a mobilisé les enquêtes logement et budget des familles de l'Insee et les données de consommation d'énergie du CEREN. L'année 1984 a été retenue comme année de référence car (i) c'est la première année à être bien documentée et (ii) elle correspond à une époque d'institutionnalisation de la maîtrise de l'énergie, avec notamment la création de l'Agence française de la maîtrise de l'énergie (ancêtre de l'ADEME) en 1982.

La reconstitution de l'année 1984, illustrée à la Figure 31 (gauche) a procédé en 6 étapes :

1. Définition d'une première image du parc selon trois dimensions – type de décideur, énergie de chauffage et quintile de revenu – à partir de l'enquête logement ;
2. Appariement aux données de consommation d'énergie du CEREN pour les couples (décideur, énergie) ;
3. Transposition des consommations réelles en consommations conventionnelles via la courbe d'intensité d'utilisation (cf. Figure 9) ;
4. Transposition des niveaux continus de consommation conventionnelle en niveau discret de de performance énergétique DPE, avec une hypothèse de part des consommations de chauffage de 0,8. La procédure aboutit à un parc segmenté selon quatre dimensions : décideur, énergie, revenu, DPE, recouvrant, pour l'année 1984, 13,8 millions de logements ;
5. Application de facteurs de proportionnalité pour faciliter la comparaison avec les tendances du CEREN, établies sur un périmètre de 17 millions de logements[24] ;
6. Le revenu des locataires est enfin déduit du revenu des propriétaires par la procédure détaillée au paragraphe 2.1.5.2.

3.3.2 Scénarios d'évolution

L'évolution des consommations à partir de l'année 1984 est déterminée par les hypothèses suivantes :

- La chronique de prix des énergies et de revenu des ménages, qui sont les principales variables d'entrée du modèle, est basée respectivement sur la base de données Pégase et les données de l'Insee.
- La répartition des logements individuels et collectifs suit l'évolution observée dans l'enquête logement, caractérisée notamment par une rupture de tendance à partir des années 2000.
- Les réglementations thermiques de 1982, 1988, 2000 et 2005 ont été successivement appliquées. Si la transposition des réglementations est évidente pour la RT2005, qui pour la première fois instaure des seuils explicites de performance à atteindre, elle est sujette à interprétation pour les années antérieures. Les principes suivants ont été retenus :
    - La construction neuve est autorisée aux niveaux G à C jusqu'en 2004, puis restreinte aux niveaux E à C à partir de 2005. Le maintien de la classe G jusqu'en 2004 peut se justifier

[24] La différence de périmètre s'explique par la suppression en cours de procédure de certaines données ambiguës de l'enquête logement sur la nature de l'occupant (propriétaire ou locataire) et l'énergie de chauffage principale.

par la présence dans la base Phébus de plus d'1 million de logements construits entre 1971 et 1990 présentant une étiquette G en 2012.

- Les rénovations sont limitées aux logements existants dans le modèle (les 17 millions du parc initial). En faisant l'hypothèse que la qualité des rénovations est bornée au niveau du neuf prescrit par chaque RT, les logements rénovés ne dépassent pas l'étiquette C.

- La TVA à taux réduit est mise en place en 1999, le CITE en 2005, le dispositif des CEE en 2006 et l'EPTZ en 2009. Ces instruments sont paramétrés aux niveaux décrits ultérieurement (cf. Tableau 20).

Un certain nombre de paramètres importants – taux de rénovation initial, sa désagrégation par étiquette, les durées de vie, les paramètres d'hétérogénéité des préférences et les coûts – du modèle n'ont pu être fixés à partir de données disponibles. Pour prendre en compte cette incertitude, plusieurs variantes ont été simulées pour chacun de ces paramètres, avec une combinatoire aboutissant à 1 920 scénarios. Les Figures 31 et 32 comparent les résultats du modèle aux observations issues des données de Phébus pour la distribution par étiquettes du parc en 2012 et du CEREN pour l'évolution des consommations.

La Figure 31 détaille la performance du parc en 2012 qui résulte des simulations initiées en 1984. On observe que la distribution simulée est qualitativement comparable à la distribution observée. Les observations sont contenues dans l'écart-type des simulations pour les étiquettes F et E et légèrement en dehors pour les étiquettes G et D. Pour les étiquettes B et A, la faiblesse des effectifs dans l'échantillon Phébus rend de toute façon impossible toute tentative de reproduction fidèle.

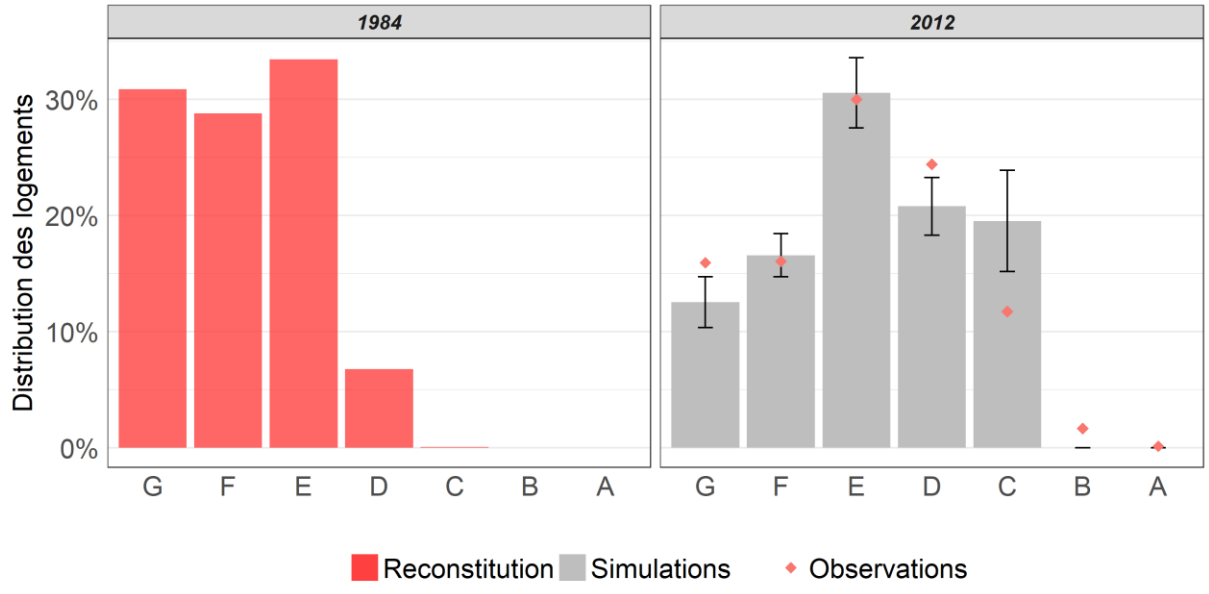


Figure 31: Performance du parc reconstruite (1984), simulée et observée (2012)

La Figure 32 compare les consommations d'énergie simulées et observées pour l'électricité, le gaz naturel et le fioul domestique[25]. La figure indique une bonne reproduction des niveaux et tendances, avec une tendance globalement à la hausse qui semble s'inverser au début des années 2000. En valeur absolue, l'écart entre les observations et la moyenne des simulations n'excède pas 9,3% (en 2010), avec une moyenne de 3,7% sur les 28 années considérées.

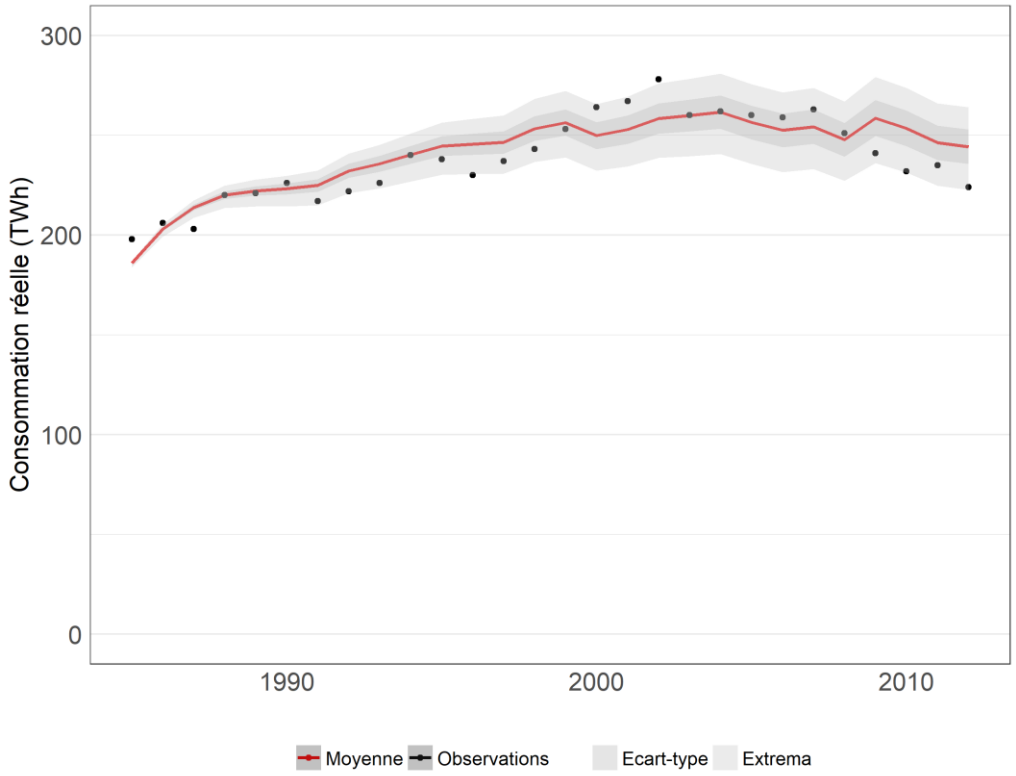


Figure 32: Evolution des consommations simulées et observées

Ces résultats indiquent que le modèle reproduit fidèlement l'ordre de grandeur des observations.

4 Méthodologie d'évaluation des politiques publiques

On procède à présent à l'évaluation de la contribution des différentes politiques– TC, CITE, EPTZ, CEE, TVAr et RT2020 – à l'atteinte des objectifs décrits au paragraphe 1.3. Chaque politique (hormis la TVAr et la RT2020) est simulée en deux variantes, la première reflétant son paramétrage actuel et la seconde correspondant à un paramétrage plus volontariste.

[25] Etant données les différences de périmètre, les simulations de bois-énergie ne peuvent pas être comparées aux observations du CEREN.

4.1 Principes généraux

Les simulations reposent sur les principes suivants :

1. Tous les instruments s'appliquent à partir de 2012 (sauf la taxe carbone qui s'applique à partir de 2014) et sont maintenus jusqu'en 2050 ; ils sont donc pris en compte dans le calibrage du modèle ;
2. Les différents instruments sont pleinement cumulables les uns avec les autres ;
3. Les instruments fonctionnent à plein régime ; en particulier, un ménage qui réalise une rénovation touche l'ensemble des aides auxquelles il est éligible ;
4. Les instruments s'appliquent de façon identique au parc privé et au parc social[26] ;
5. Les incitations sont parfaitement transmises aux ménages, sans être captées par les vendeurs d'efficacité énergétique sous forme d'augmentation du prix de base ; ce mécanisme repose sur une hypothèse de concurrence parfaite dans le secteur de la rénovation énergétique (Nauleau et al., 2015).

Ces hypothèses sont relativement optimistes. Comme le détaillent les paragraphes ci-dessous, des éléments de paramétrage spécifiques à chaque politique viennent toutefois modérer cet optimisme. Plus généralement, l'étude vise au moins autant à illustrer qualitativement les mécanismes par lesquels opèrent les différents instruments qu'à fournir une évaluation quantitative précise de leur impact.

Enfin, il est important de rappeler que la modélisation intégrée énergie-économie vise à comprendre des mécanismes et quantifier des ordres de grandeur plutôt qu'à fournir des résultats précis – comme résumé par la formule *modeling for insights, not numbers* préconisée par l'Energy Modeling Forum (Huntington et al., 1982). En particulier, les inexactitudes de la modélisation, c'est-à-dire les écarts qui peuvent exister entre simulations et observations, peuvent être riches d'enseignement au sens où ils mettent en lumière des manques dans la connaissance des processus, permettant ainsi d'orienter les priorités de recherche.

4.2 Paramétrage des politiques publiques

Les éléments de paramétrage détaillés ci-dessous sont résumés dans le Tableau 21.

4.2.1 Taxe carbone (TC)

La taxe carbone est appliquée à partir de 2014 aux consommations de gaz naturel et de fioul domestique[27]. Ses revenus ne sont pas recyclés aux ménages. L'instrument est paramétré de la façon suivante :

- Son taux (€/tCO_2) reprend celui figurant dans la loi TECV : 30,50€ en 2017, 39€ en 2018, 47,5€ en 2019 et 56€ en 2020. On applique à partir de 2021 un taux de croissance de 6%/an permettant d'atteindre la valeur cible de 100€ en 2030. Le taux de taxe évolue ensuite au rythme de 4%/an,

[26] Cette hypothèse est particulièrement optimiste, puisqu'en pratique le parc social n'est concerné que par les CEE et la TVAr. Elle a cependant peu d'influence, comme le montrent les résultats exposés plus loin à travers la faible sensibilité de la rénovation des logements sociaux au niveau des aides.

[27] L'impact éventuel des marchés de quotas d'émission de CO_2 sur le prix de détail de l'électricité n'est pas pris en compte.

selon la préconisation du rapport Quinet (2008). Ce taux est sujet à la même TVA à 20% qui s'applique sur les prix des énergies.

- Les contenus carbone auxquels s'applique la taxe sont 271 gCO_2/kWh PCI pour le fioul domestique et 206 gCO_2/kWh PCI pour le gaz naturel. Ce dernier diminue au rythme de 1%/an à partir de 2020 afin de prendre en compte les objectifs de pénétration du gaz renouvelable (aboutissant à une part de 26% en 2050).

La taxe carbone a pour vocation d'envoyer aux investisseurs un signal-prix permettant de réorienter les investissements de long-terme. Conformément à ce principe, son taux futur est annoncé plusieurs années à l'avance par le Gouvernement. Une telle taxe prend pleinement effet si les investisseurs forment des anticipations parfaites – ils prennent en compte la chronique de la taxe dans leurs calculs de rentabilité. En pratique, les comportements d'anticipation sont plus proches de la myopie qui prévaut dans le modèle Res-IRF. Aussi, on définit les variantes de scénario suivantes, qui bornent l'impact de l'instrument :

- **Scénario TC** : taxe carbone anticipée de façon myope
- **Scénario TC+** : taxe carbone anticipée de façon parfaite

4.2.2 Eco-prêt à taux zéro (EPTZ)

L'EPTZ est représenté à partir de 2012 comme une subvention égale aux intérêts d'un crédit à la consommation[28] utilisé pour un investissement d'un montant équivalent. Parmi les différentes subventions évaluées, l'EPTZ a la particularité de cibler des travaux générant des sauts de performance substantiels. Dans la modélisation, le ciblage reprend les exigences de « performance énergétique globale minimale », interprétés de la façon suivante :

- Plafond de consommation après travaux de 150 kWh/m²/an si la consommation avant travaux dépasse 180 kWh/m²/an → *Interprété comme une étiquette finale minimale D pour des sauts depuis l'étiquette initiale G à E.*
- Plafond de consommation après travaux de 80 kWh/m²/an si la consommation avant travaux est inférieure à 180 kWh/m²/an → *Interprété comme une étiquette finale minimale B pour des sauts depuis l'étiquette initiale D et C.*

Par construction, les hypothèses faites sur les termes du crédit à la consommation définissent le montant de la subvention. Deux variantes de scénario sont retenues :

- **Scénario EPTZ** : les termes du crédit à la consommation sont ceux donnés par OPEN (2016), soit un taux d'intérêt de 3% sur 5 ans. Par ailleurs, afin d'intégrer les contraintes de financement hétérogènes auxquelles font face les ménages, on ajoute à chaque catégorie de ménage un plafond d'emprunt correspondant au montant moyen emprunté au titre de l'EPTZ dans les données de la Société de Gestion du Fonds de Garantie à l'Action Sociale (SGFGAS), de 16 800€

[28] Une alternative consisterait à prendre comme référence les taux d'intérêt d'un crédit immobilier, généralement plus faibles que ceux d'un crédit à la consommation. Cette hypothèse n'est cependant pertinente que pour une minorité de situations où les travaux de rénovation sont couplés à l'achat du bien immobilier.

pour les catégories C1 à 21 000€ pour les catégories C5. Enfin, on ajoute un seuil minimum d'emprunt de 5 000€.

- **Scénario EPTZ+** : l'instrument est plus proche de son paramétrage théorique, défini par à un taux d'intérêt de 4% (tel que relevé par la Banque de France pour les crédits à la consommation en 2015[29]) sur une durée de vie de 10 ans (durée maximale autorisée d'un EPTZ), avec un montant d'emprunt plafonné à 30 000€ et sans seuil minimal.

Traduites en subvention *ad valorem*, ces deux variantes correspondent à des taux de subvention de 9% pour l'EPTZ et 23% pour l'EPTZ+.

4.2.3 Crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE)

Le CITE est représenté à partir de 2012 comme une subvention *ad valorem* au taux unique de 17%, qui correspond au taux moyen d'aide rapporté par l'OPEN[30]. L'écart entre cette valeur et le taux officiel de 30% traduit le fait que, dans le modèle, le taux de subvention s'applique au coût complet de la performance énergétique (fourniture et main d'œuvre) quand le taux officiel du CITE s'applique au coût de fourniture uniquement (sauf pour l'isolation des parois opaques). L'instrument est modélisé comme une subvention reçue immédiatement par le bénéficiaire, sans prendre en compte le délai maximum de 12 mois inhérent à tout crédit d'impôt[31].

Afin de prendre en compte les discussions actuelles sur la restriction de l'instrument aux mesures les plus performantes (en annulant par exemple l'éligibilité des fenêtres), deux variantes sont modélisées :

- **Scénario CITE** : subvention non ciblée
- **Scénario CITE+** : subvention ciblée à la manière de l'EPTZ

4.2.4 Certificats d'économies d'énergie (CEE)

Les CEE sont représentés à partir de 2012 comme un instrument hybride couplant une subvention à l'efficacité énergétique dont le coût est répercuté par les fournisseurs d'énergie obligés comme une taxe sur les ventes d'énergie. Ces deux composantes sont modélisées de la façon suivante :

- Le montant de subvention est défini pour chaque opération par un montant d'économies d'énergie cumulées actualisées (kWh cumac, cf. Tableau 18) multiplié par un prix du CEE (€/kWh cumac) ; les modalités de calcul du premier sont décrites en Annexe 2 tandis que le second fait l'objet d'une scénarisation décrite plus bas. Les opérations considérées sont celles relevant de l'enveloppe et des systèmes thermiques des bâtiments résidentiels (fiches BAR-EN et BAR-TH du dispositif[32]). Le Tableau 19 rapporte les montants ainsi calculés aux coûts d'investissement (cf. Tableau 10) pour l'année 2012 afin d'illustrer les taux *ad valorem* associés à une telle subvention. Si le taux moyen s'élève à 5%, le barème des CEE est « régressif », au sens où les taux de subvention les plus importants portent sur les opérations les moins coûteuses ; en effet,

[29] Voir http://webstat.banque-france.fr/fr/browse.do?node=5385583
[30] Ce taux intègre toutes les aides mais le CITE en constitue la majeure partie.
[31] Cette hypothèse conduit à surestimer, quoique faiblement, l'effet du CITE. Elle pourrait être supprimée en actualisant les montants d'aide sur une durée moyenne de 6 mois.
[32] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/operations-standardisees

bien que les montants octroyés augmentent avec la performance énergétique atteinte, cette augmentation est moins forte que l'augmentation sous-jacente des coûts d'investissement. Le montant de la subvention CEE est plafonné pour que le taux total de subvention, en incluant le CITE, la TVAr et l'EPTZ, n'excède pas 100%.

- La taxe (en € par kWh vendu) est calculée en multipliant les coefficients d'obligation officiels (kWh cumac par kWh vendu) par le prix des CEE (€/kWh cumac). Cette taxe est restreinte aux ventes de fioul domestique, gaz naturel et électricité et augmentée de la TVA à 20%. Pour la période post-2020, où les coefficients d'obligation ne sont pas encore définis, on considère une augmentation de 1%/an. Cette hypothèse équivaut à un montant d'obligation constant en supposant que les ventes d'énergie suivent la baisse tendancielle de 1%/an. La Figure 33 illustre la chronique des coefficients d'obligation.

Tableau 18: Forfait kWh cumac/m² par transition d'étiquette

	F	E	D	C	B	A
G	2 135	3 355	4 211	4 803	5 166	5 337
F		1 220	2 077	2 669	3 031	3 203
E			856	1 448	1 811	1 982
D				592	955	1 126
C					363	534
B						171

Tableau 19: Montant en €/m² par transition d'étiquette, pour un prix des CEE de 4€/MWh cumac

	F	E	D	C	B	A
G	9	13	17	19	21	21
F		5	8	11	12	13
E			3	6	7	8
D				2	4	5
C					1	2
B						1

Tableau 20: Taux de subvention (rapporté aux coûts du Tableau 10), pour un prix des CEE de 4€/MWh cumac

	F	E	D	C	B	A
G	11%	10%	8%	7%	6%	5%
F		8%	6%	5%	4%	3%
E			5%	4%	3%	2%
D				3%	2%	2%
C					2%	1%
B						1%

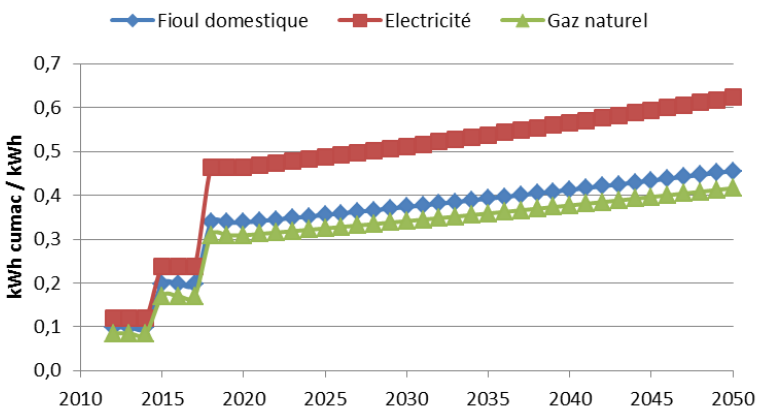


Figure 33: Scénario d'obligation des CEE

Les subventions au titre des CEE précarité sont attribuées en fonction du revenu du propriétaire dans le parc privé et en fonction du revenu de l'occupant dans le parc social[33]. Les taxes s'appliquent en revanche uniformément à tous les ménages.

Le prix des CEE est le déterminant principal de l'impact de l'instrument. Les CEE classiques s'appliquent aux ménages de catégorie C3 à C5 et les CEE précarité s'appliquent aux ménages C1 et C2. Le montant de subvention et les CEE produits sont doublés pour les ménages C1 afin de refléter la bonification accordée aux ménages très modestes. Les CEE précarité sont comptabilisés dès 2015 (et non 2016 comme en réalité) afin de faciliter la comparaison entre les périodes 3 et 4. Conformément aux tendances observées récemment, on fait l'hypothèse que le prix des CEE classique et précarité est identique et plafonné à 20 €/MWh cumac[34]. La chronique de prix fait l'objet de deux variantes de scénario :

- **Scénario CEE** : 4€ de 2012 à 2016, 5€ en 2017 puis augmentation de 2%/an à partir de 2018 jusqu'au plafond de 20 €/MWh cumac.
- **Scénario CEE+** : 4€ de 2012 à 2016, 5€ en 2017 puis 15€ en 2018, augmentant de 2%/an à partir de 2019 jusqu'au plafond de 20 €/MWh cumac.

La modélisation proposée ne couvrant que le secteur du bâtiment résidentiel, deux mécanismes de bouclage importants manquent à une évaluation plus complète de l'instrument :

- En théorie, le prix des CEE devrait résulter d'un équilibre de marché et refléter le coût d'opportunité de la contrainte associée à l'objectif. Prendre en compte ces mécanismes suppose de représenter tous les acteurs de marché, c'est-à-dire l'ensemble des secteurs couverts par le dispositif, y compris l'agriculture, l'industrie et les transports. Dans la mesure où l'exercice proposé ici se concentre sur le résidentiel, ces ajustements ne peuvent être pris en compte. Le

[33] En pratique, un propriétaire bailleur peut bénéficier de CEE précarité si son locataire est en situation de précarité énergétique. En concertation avec le Comité de pilotage de l'étude, nous avons choisi de ne pas intégrer cette modalité, a priori assez rare.

[34] Cette valeur prend en compte l'ensemble du coût d'opportunité d'un manquement à l'objectif, puisqu'en pratique les obligés doivent s'acquitter de taxes sur la pénalité libératoire de 15 €/MWh cumac.

prix des CEE est donc défini de façon exogène dans le secteur résidentiel, sans lien explicite avec l'objectif total.

- En théorie, la composante taxe des CEE est définie par chaque fournisseur obligé de façon à ce que les recettes qu'elle génère équilibre ses dépenses de subvention. Prendre en compte cet équilibre nécessite là encore de représenter l'ensemble des secteurs, puisqu'un obligé vendeur de carburant peut par exemple répercuter le coût des subventions octroyées dans le secteur résidentiel sur le prix du carburant. Dans l'exercice proposé ici, les subventions et taxes qui s'appliquent au secteur résidentiel sont définies de manière exogène et indépendante.

4.2.5 Réglementation thermique (RT 2020)

Les choix d'investissement dans la construction neuve sont limités aux niveaux BBC et BEPOS entre 2012 et 2019, puis au niveau BEPOS uniquement à partir de 2020.

4.2.6 TVA à taux réduit (TVAr)

Une TVA de 5,5% s'applique à partir de 2012 sur les coûts de la performance énergétique, contre un taux habituel de 10% dans le secteur de la construction.

Tableau 21: Principaux éléments de paramétrage des instruments

	Variante TP	Variante TP+
CITE	Subvention 17%, uniforme	Subvention 17%, ciblée performance
EPTZ	Subvention ~9%, ciblée performance	Subvention ~23%, ciblée performance
CEE	Subvention 4€/MWh cumac (doublée pour ménages C1), puis 5€ en 2017 croissant à 2%/an, + taxe sur l'énergie	Subvention 4€/MWh cumac (doublée pour ménages C1), puis 15€ en 2018 croissant à 2%/an, + taxe sur l'énergie
TC	Taxe profil LTECV, anticipation myope	Taxe profil LTECV, anticipation parfaite
TVA r	Taux de TVA de 5,5% au lieu de 10%	
RT 2020	Niveau BEPOS seul autorisé à partir de 2020	

4.3 Indicateurs d'évaluation

La version 3.0 de Res-IRF permet de conduire une évaluation multi-critère des politiques. L'efficacité d'une intervention – instrument ou bouquet d'instruments – est évaluée comme sa *capacité à atteindre les objectifs qui lui sont assignés* – en l'occurrence, les cinq objectifs définis au paragraphe 1.3. A cet indicateur, qui constituait le cœur de l'évaluation conduite en 2011 pour le CGDD, s'ajoute désormais l'efficience d'une intervention, évaluée comme sa capacité à atteindre un certain objectif *au moindre coût*. Cette notion ne s'applique qu'aux instruments incitatifs et donc pas à la réglementation thermique. Deux indicateurs d'efficience sont calculés : le coût-efficacité et l'effet levier. Enfin, la différenciation des ménages par catégorie de revenu permet d'évaluer les effets distributifs.

4.3.1 Efficacité

Evaluer l'effet additionnel d'une intervention nécessite de formuler un scénario contrefactuel, sans l'intervention considérée. Un des avantages de l'architecture de modélisation Res-IRF est la simplicité avec laquelle une intervention peut être ajoutée ou supprimée, facilitant la construction d'un scénario contrefactuel. Une difficulté importante, néanmoins, est que la multiplicité des instruments représentés ouvre la voie à une multiplicité de scénarios contrefactuels. Précisément, au sein d'un bouquet de n

instruments (à paramétrage donné), chaque instrument peut être évalué seul, ou en interaction avec 1 à $n-1$ instruments ; avec $n=6$, il est ainsi possible de simuler 64 scénarios[35].

Dans l'exercice présenté ici, quatre scénarios bénéficient d'une attention particulière :

- **Scénario tendanciel avec toutes les politiques** (TP) : inclut tous les instruments dans leur variante par défaut. C'est sur ce scénario qu'est calibré le modèle à l'année de départ (2012).
- **Scénario contrefactuel sans aucune politique** (ZP pour « zéro politique ») : tous les instruments sont supprimés[36], sans que le modèle ne soit recalibré. Les consommations d'énergie initiales ne sont donc pas reproduites exactement.
- **Scénario tendanciel +** (TP+) : inclut tous les instruments dans leur variante « + »[37].
- **Scénario TP sans dilemme propriétaire-locataire** (DPL) : le comportement des propriétaires bailleurs est calé sur celui des propriétaires occupants (scénario « pleine valeur verte », cf. Tableau 15). Cette variante vise à quantifier les économies d'énergie que généreraient les différents instruments s'ils ciblaient parfaitement le parc locatif[38].

Parmi les 64 combinaisons d'instrument possibles, l'effet additionnel de chaque politique peut être évalué de 32 façons différentes, selon la situation contrefactuelle considérée. Deux situations contrefactuelles, obtenues par deux méthodes différentes, présentent un intérêt particulier car elles permettent de borner l'impact de chaque instrument :

- **Méthode « TP-1 »** : on compare le scénario TP à un scénario alternatif sans l'instrument considéré. La différence entre les deux scénarios donne l'impact de l'instrument *en interaction avec tous les autres instruments*.
- **Méthode « ZP+1 »** : on compare le scénario ZP à un scénario alternatif avec l'instrument considéré. La différence entre les deux scénarios donne l'impact *pur* de l'instrument.

Pour chaque instrument, la comparaison des impacts obtenus par les deux méthodes permet d'évaluer l'importance de ses interactions avec tous les autres instruments. Cette comparaison est discutée dans le rapport au chapitre 5.3. Néanmoins, pour une meilleure lisibilité des résultats, on privilégie dans le reste du rapport les estimations en TP-1, qui correspondent à la situation contrefactuelle la plus proche de la réalité, au sens où elle repose sur un minimum d'hypothèses.

4.3.2 Efficience

L'efficience des instruments incitatifs est évaluée ici à travers les indicateurs de coût-efficacité et d'effet levier. Pour estimer l'effet marginal de l'instrument à une année t, on compare des scénarios avec ou sans l'instrument à l'année t. Cette méthode étant intensive en calcul, on se limite aux points de passage 2015, 2025 et 2035.

[35] Le nombre de combinaisons possibles est $\sum_{k=1}^{6} C_6^k = 62$, auxquelles il faut ajouter les scénarios TP et ZP.
[36] Sauf la TVA à taux réduit, qui est remplacée par une TVA au taux normal de 10%.
[37] Ce scénario conduit, en début de période, à quelques situations où des ménages occupant des logements classés en étiquette G ou F reçoivent un total de subventions supérieur à 100%.
[38] Cela suppose une promotion accrue des différentes aides auprès des propriétaires bailleurs et un accompagnement spécifique des travaux.

4.3.2.1 Coût-efficacité

L'indicateur coût-efficacité rapporte les coûts de l'incitation à son efficacité mesurée en termes d'économies d'énergie. Le coût considéré correspond aux dépenses fiscales dans le cas de subventions et aux recettes fiscales dans le cas de la taxe (i.e., coût négatif).

L'indicateur est ici calculé en énergie conventionnelle et réelle. La métrique « énergie conventionnelle » permet de s'affranchir des effets comportementaux hétérogènes entre ménages, qui varient fortement d'une année à l'autre avec les fluctuations à court terme des prix des énergies. Par rapport à la métrique « énergie réelle », elle conduit à surestimer l'efficacité des subventions en ignorant l'effet rebond qu'elles génèrent et sous-estimer l'efficacité des taxes sur l'énergie, qui au contraire induisent un effet de sobriété. Les deux métriques doivent produire des résultats proches quant aux CEE, instrument hybride.

Pour calculer l'indicateur de coût-efficacité CE, on compare l'économie d'énergie ΔE_t entre les scénarios avec l'incitation présente ou absente à l'année t (mais dans les deux cas présente jusqu'à l'année $t-1$), en appliquant un facteur d'actualisation FA :

$$CE_t = \frac{Incitation_t}{\Delta E_t * FA}$$

En utilisant un taux d'actualisation de 4% et une durée de vie de 26 ans, qui correspond à la moyenne des opérations réalisées dans le cadre des CEE sur le périmètre du bâtiment résidentiel, le facteur FA est pris égal à 16,6.

4.3.2.2 Effet levier

L'effet levier EL rapporte l'efficacité de l'instrument, mesurée en termes de dépenses d'investissement, au coût de l'incitation. Un effet levier égal à 1 implique qu'un euro d'argent public (dépense de subvention ou recette de taxe) induit un surcroît d'investissement d'un euro. L'effet levier synthétise plusieurs effets, et sa valeur va dépendre de la part relative des participants « additionnels » et « non-additionnels » :

- L'incitation bénéficie à des participants « additionnels », qui n'auraient pas investi sans elle. Pour ces individus, l'effet levier est très supérieur à 1, puisque la subvention est littéralement le déclencheur de l'investissement. Par exemple, une subvention de 10% se traduit par un effet levier égal à 10 – un investissement de 100€ est déclenché par une subvention de 10€.
- L'incitation bénéficie également (et, dans notre modélisation, intégralement) aux participants « non-additionnels » (« infra-marginaux » en termes économiques), qui auraient investi sans incitation. Alors que cet effet est généralement désigné par le terme d' « effet d'aubaine », il ne constitue pas une pure perte dans notre modélisation, puisque les participants ajustent leurs choix d'investissement vers des options plus coûteuses en réponse à l'incitation. Les participants non-additionnels ayant des préférences hétérogènes, l'effet levier peut être supérieur à un pour certains et proche de zéro pour d'autres.

La formule utilisée s'applique à l'ensemble des participants et rapporte le coût de l'incitation au surplus d'investissement ΔInv_t induit par la politique, mesuré comme la différence entre deux scénarios avec l'incitation absente ou présente à l'année t (mais dans les deux cas présente jusqu'à l'année $t-1$) : :

$$EL_t = \frac{\Delta Inv_t}{Incitation_t}$$

4.3.3 Précarité énergétique

La précarité énergétique est mesurée selon l'indicateur de taux d'effort énergétique (TEE) qui a fait référence en Europe ces dernières années (Hills, 2012, p.30), en comptabilisant le nombre de ménages qui consacrent plus de 10% de leur revenu aux dépenses d'énergie pour le chauffage, mesurées par rapport à la consommation d'énergie conventionnelle, donnée en France par la méthode 3CL du DPE. Cet indicateur couvre 2,7 millions de ménages en 2012. A titre de comparaison, l'Observatoire de la précarité énergétique (ONPE, 2016) recense 2,8 millions de ménages selon un indicateur similaire mais appliqué aux consommations d'énergie réelle et restreint aux trois premiers déciles de la distribution des revenus. Dans le présent exercice, nous privilégions l'indicateur en consommation conventionnelle, au motif que l'indicateur en consommation réelle ne comptabiliserait pas certaines restrictions de comportement de chauffage qui constituent néanmoins une forme de précarité énergétique. En complément, nous examinons également comment l'intensité d'utilisation du système de chauffage, qui reflète le confort d'intérieur, varie avec les catégories de revenu. Cet indicateur peut être interprété comme une mesure indirecte de l'indicateur subjectif de froid (FR) de l'ONPE.

5 Résultats d'évaluation des politiques publiques

5.1 Efficacité des politiques combinées

L'efficacité des bouquets de politiques est évaluée en comparant les objectifs définis au paragraphe 1.3 aux sorties des scénarios TP et TP+ pour les points de passage propres à chaque objectif.

5.1.1 Economies d'énergie

La Figure 34 illustre la diminution de la consommation d'énergie réelle finale – la métrique la plus pertinente et la plus simple à confronter aux observations. La diminution dans le scénario TP – avec toutes les politiques fixées à leur paramétrage de référence – est d'environ 30% en 2020 et de 50% en 2050 par rapport à 2012. **L'objectif 1 qui consisterait à réduire la consommation d'énergie finale de 20% d'ici 2030 et 50% d'ici 2050 semble donc atteignable en maintenant les politiques à leur niveau actuel**. Environ deux tiers de ces gains sont dus à la baisse tendancielle de la consommation décrite par le scénario ZP, qui est notamment déterminée par deux éléments importants : la présence de la RT 2012 dans le scénario ZP et les prix des énergies, qui croissent en moyenne à 1,1% par an, fournissant une incitation naturelle à la sobriété énergétique. Il faut cependant préciser qu'appliquer l'objectif 1 aux consommations de chauffage relève d'une faible ambition, puisqu'il ne fait que s'inscrire dans la baisse tendancielle de la consommation d'énergie de l'ordre de 1%/an (ADEME, 2015, p.68). La Figure 35 détaille les réductions de consommation par énergie de chauffage. Elle révèle que les politiques affectent principalement les consommations de gaz naturel et de fioul domestique.

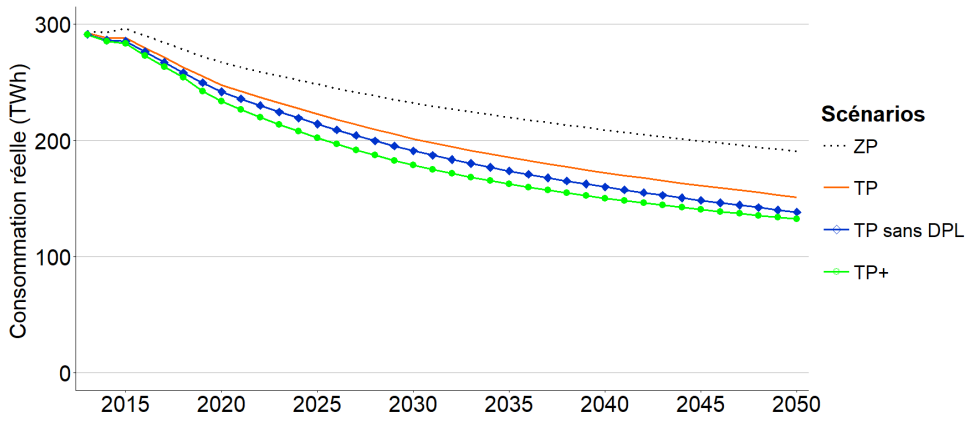


Figure 34: Consommation totale d'énergie réelle

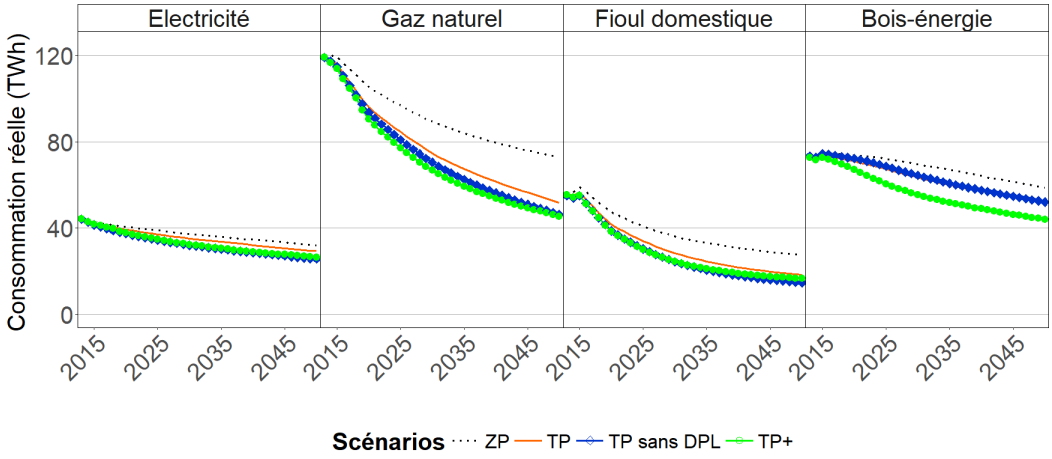


Figure 35: Consommation par énergie de chauffage

La Figure 36 traduit une diminution de la consommation agrégée d'énergie conventionnelle – de l'ordre de 50% en 2030 et 60% en 2050 – plus marquée que pour l'énergie réelle. Cette différence s'explique par une augmentation de l'intensité d'utilisation – qui peut s'interpréter comme un effet rebond – de l'ordre de 30%, visible sur la Figure 37. L'intensité d'utilisation est déterminée en grande partie par l'évolution des prix des énergies, comme l'indique la proximité avec le profil temporel de la Figure 14.

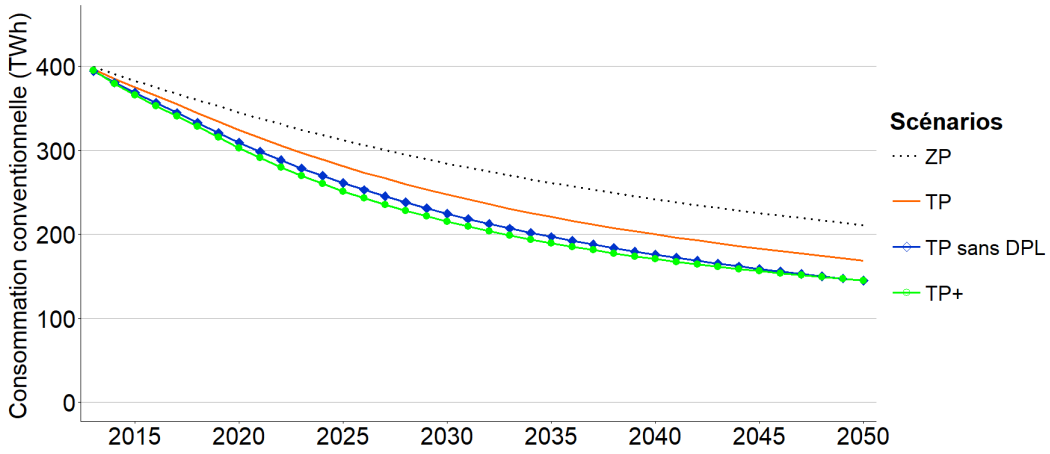


Figure 36: Consommation totale d'énergie conventionnelle

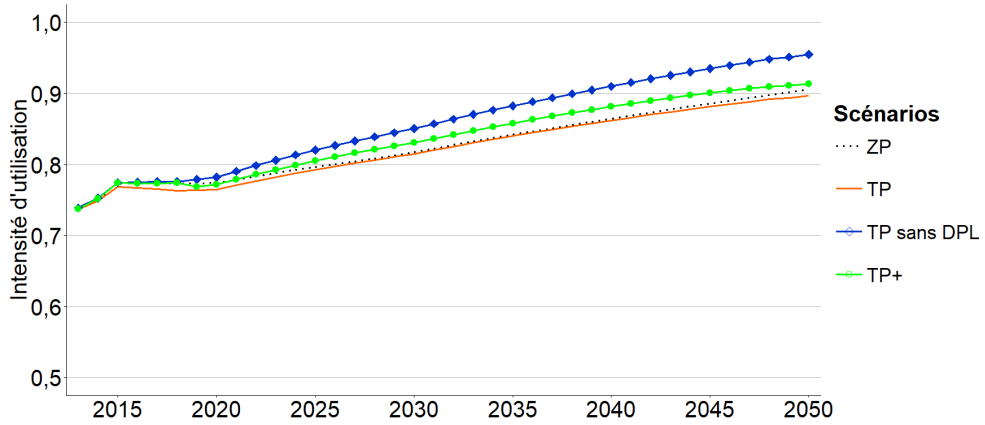


Figure 37: Evolution de l'intensité d'utilisation

5.1.2 Dynamique de rénovation

L'évolution du nombre de rénovations est décrite au niveau agrégé à la Figure 38 et par segment du parc à la Figure 39. Le nombre annuel de rénovations dans le scénario ZP est de 571 317 à l'année de départ, se décomposant en 533 579 dans le parc privé et 37 738 dans le parc social. Il diminue au cours du temps sous l'effet de l'épuisement du gisement. Les politiques simulées dans le scénario TP ajoutent 115 439 rénovations à l'année de départ, dont 104 128 dans le parc privé et 11 311 dans le parc social. Ce surcroît de rénovation correspond aux « participants additionnels » décrits au paragraphe 4.3.2. Les effectifs du scénario ZP peuvent s'interpréter comme les participants « non-additionnels », qui bénéficient des politiques (en vertu du principe 3 défini au paragraphe 4.1) en augmentant la performance de leurs travaux de rénovation.

Ainsi, **l'objectif 2 qui consiste à rénover chaque année 500 000 logements paraît atteignable, même en l'absence de politiques publiques**. **Cette conclusion optimiste s'accompagne néanmoins de deux nuances. D'abord, le sous-objectif propre au parc social est loin d'être atteint. Ensuite, l'objectif 2 est évalué à partir d'une définition large d'une rénovation énergétique comme un saut d'étiquette, qui n'est pas nécessairement la métrique pertinente pour la SNBC (qui reste à définir).** Le faible nombre de rénovations simulées par le modèle dans le parc social s'explique par la moindre profondeur du gisement sur ce segment, qui, d'après les données de Phébus sur lesquelles est paramétré le modèle, est de relativement bonne performance énergétique. Cette spécificité peut s'expliquer par les grands programmes publics de rénovation qui ont ciblé le parc social depuis plusieurs décennies.

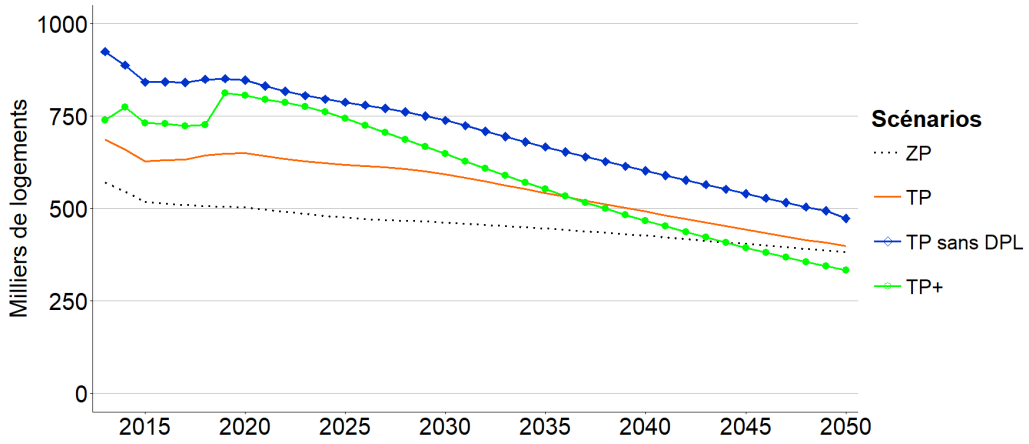


Figure 38: Dynamique de rénovation énergétique

Pour une trajectoire de consommation d'énergie très similaire (cf. Figure 34), les scénarios TP+ et TP sans DPL ont des effets très différents sur la dynamique de rénovation (cf. Figure 38). Cette comparaison révèle que le premier joue principalement sur la marge intensive d'investissement – la profondeur de chaque rénovation – tandis que le second joue davantage sur la marge extensive – le nombre de rénovation, qui atteint 875 994 en 2013 dans le parc privé. Ces rénovations génèrent des dépenses annuelles variant, selon les scénarios, de 7,5 à 12,5 milliards d'euros, avec une valeur de 10 milliards pour le scénario TP (Figure 39).

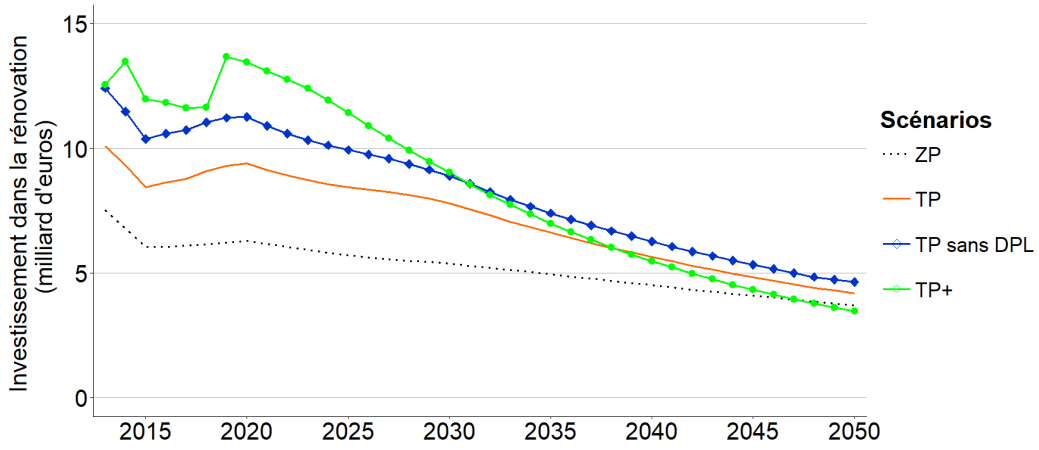


Figure 39: Dépenses consacrées à la rénovation énergétique

On observe sur la Figure 40 que l'essentiel des hausses de rénovation entres les scénarios ZP et TP proviennent du parc de propriétaires occupants, en particulier en maison individuelles. Ce résultat s'explique par les barrières entre propriétaires et locataires qui font la spécificité du modèle. La levée de ces barrières dans le scénario TP sans DPL a un effet net sur la rénovation du parc locatif privé.

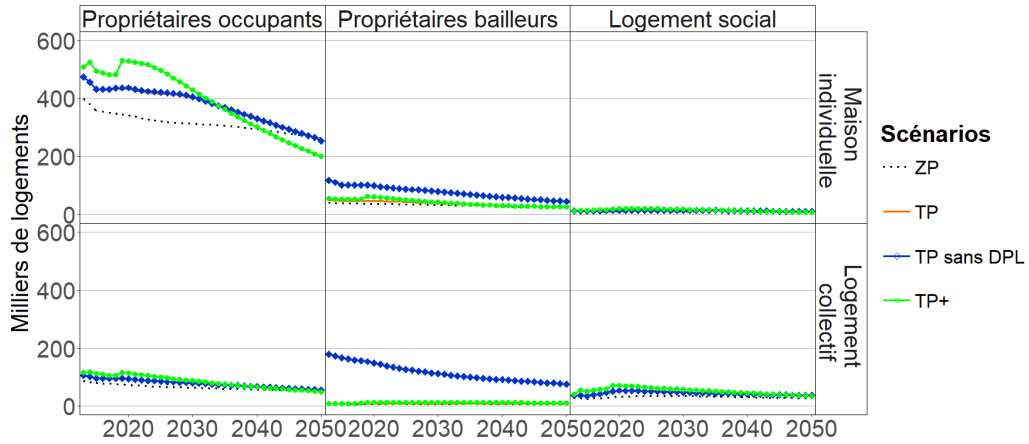


Figure 40: Nombre de rénovations, par segment du parc

La Figure 41 illustre l'évolution des effectifs des différents niveaux de performance énergétique au cours du temps. Les effectifs des étiquettes G et F diminuent d'environ 75% à l'horizon 2025, puis diminuent plus lentement. Là encore, il s'agit d'une diminution naturelle sur lesquelles les politiques ont peu d'action, principalement déterminée par les destructions de logement (typiquement 0,35% du parc de logement chaque année), qui portent dans le modèle en priorité sur les plus mauvaises étiquettes. Le

scénario TP sans DPL est le seul à infléchir nettement cette tendance, en conduisant à une quasi-disparition des étiquettes G et F à l'horizon 2040. **Malgré d'importants progrès autonomes, l'objectif 3 qui préconise une disparition des logements G et F en 2025 ne semble pas atteignable avant 2040 et nécessite un ciblage spécifique du parc locatif privé.**

A l'autre bout du spectre de performance, on observe que la somme des logements B, A, BBC et BEPOS représente en 2050 environ 50% du parc total en scénario ZP, 60% en scénario TP et 70% en scénario TP+. **L'objectif 4 qui vise un parc BBC à l'horizon 2050 semble donc difficile à atteindre avec les différentes politiques modélisées**[39].

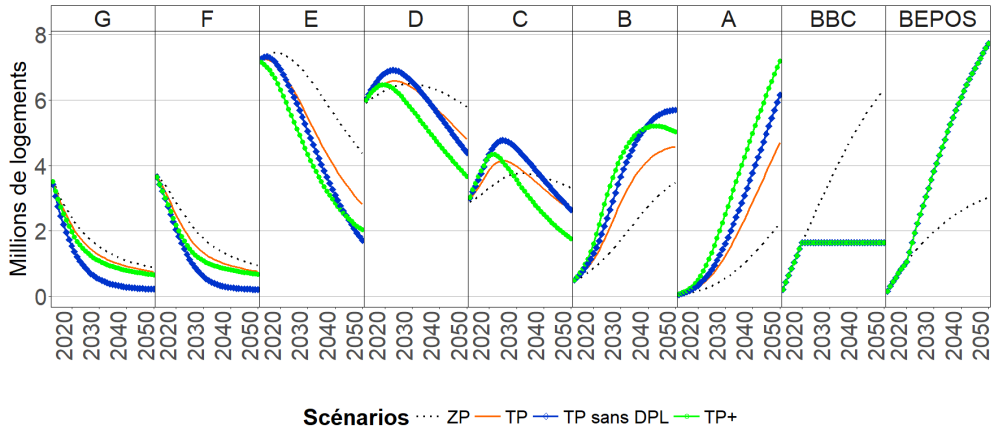


Figure 41: Evolution de la performance énergétique du parc de logements

La Figure 42 détaille l'évolution des effectifs en précisant le nombre de transitions entre étiquettes d'origine (en ligne) et d'arrivée (en colonne). L'importance des effectifs sur la diagonale traduit une prépondérance des sauts d'une étiquette (quelle que soit l'étiquette de départ) par rapport aux sauts de plus grande ampleur.

[39] Rappelons que le modèle intègre un stock minimal de 5% de logements non rénovables dans chaque classe de performance, représentant par exemple des bâtiments historiques. Par construction, il ne permet donc pas d'atteindre les objectifs 3 et 4 à 100%.

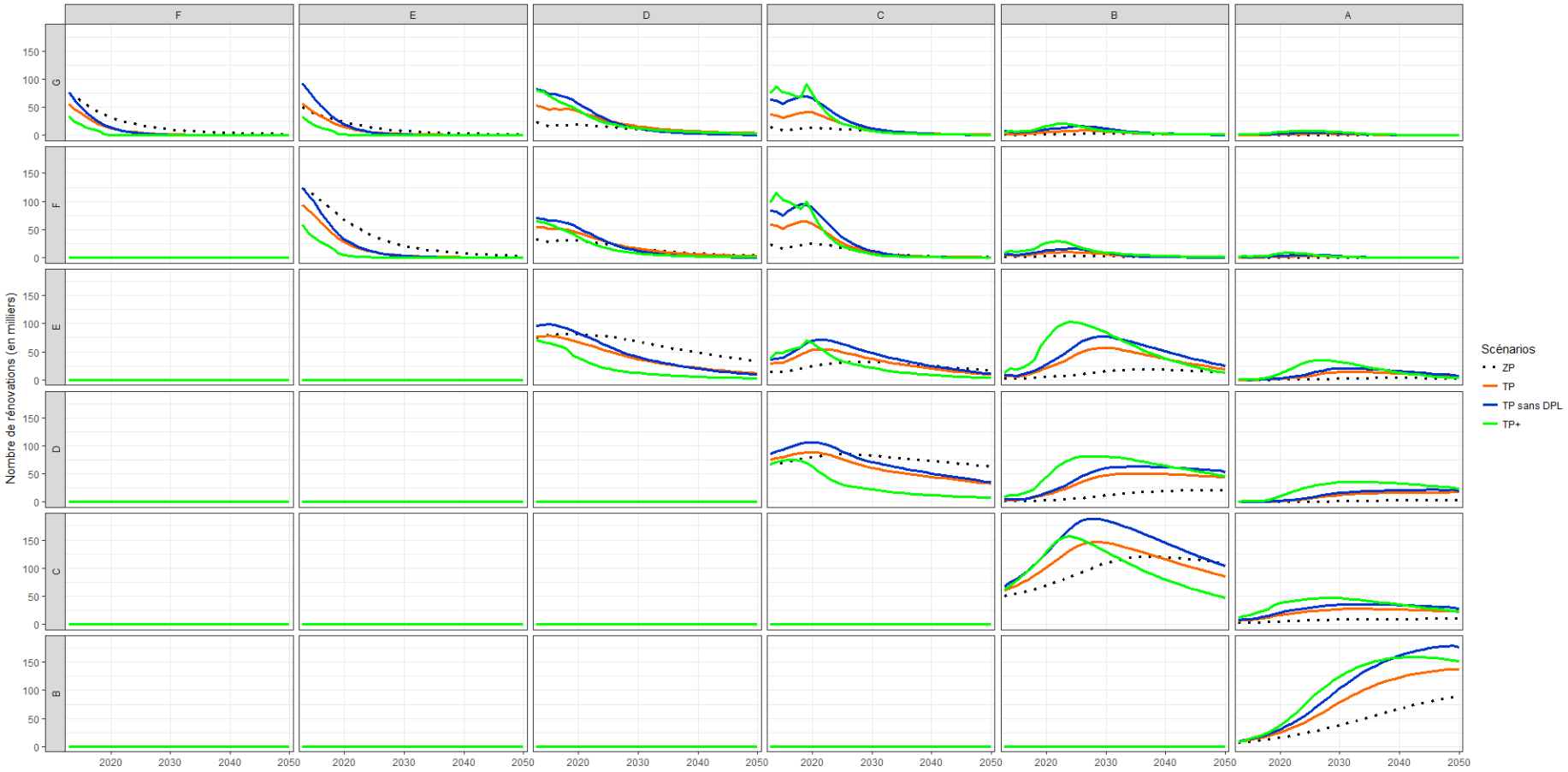


Figure 42: Transitions d'étiquette

5.1.3 Précarité énergétique

La Figure 43 illustre l'évolution du nombre de ménages consacrant plus de 10% de leur revenu aux dépenses de chauffage. L'indicateur connaît d'importantes fluctuations de court terme liées aux variations des prix des énergies, avant de diminuer continument. Le paramétrage des variables pertinentes pour cet indicateur – population, prix des énergies, revenu –, tel que défini au chapitre 3.1, induit une tendance haussière d'environ 0,6%/an de l'indicateur (obtenue à partir des taux de croissance respectif 0,3%+1,5%-1,2%). La décroissance observée relève que l'amélioration continue de la performance énergétique fait plus que compenser cette hausse. Alors que le scénario TP retarde la sortie de la précarité énergétique pour certains ménages par rapport au scénario ZP, le scénario TP+ l'accélère. Dans les deux cas, les dépenses induites par la taxe carbone sont très proches et seul le niveau des subventions diffère. La comparaison illustre donc l'effet retardateur de la taxe carbone d'une part et l'effet accélérateur des subventions d'autre part. A l'horizon 2020, la réduction de la précarité énergétique par rapport à 2012 atteint 7% en ZP et TP contre 17% en TP+. On remarque également qu'un ciblage des aides permettant de résoudre le dilemme propriétaire-locataire accélérerait la réduction de la précarité énergétique, en améliorant notamment la qualité des logements occupés par les locataires. **L'atteinte de l'objectif 5, qui vise à réduire la précarité énergétique de 15% d'ici 2020, nécessite de fixer les différentes politiques à des niveaux ambitieux, avec des niveaux d'aide relevés et ciblés sur la précarité et le parc locatif.**

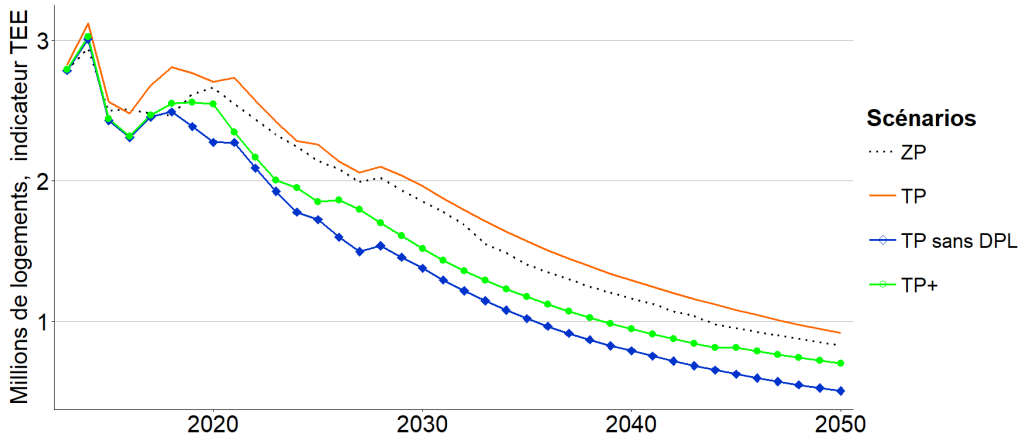


Figure 43: Evolution de la précarité énergétique

La Figure 44 illustre les différences d'intensité d'utilisation – qui peuvent s'interpréter comme des différences de confort – entre les différentes catégories de ménage, de la plus modeste (C1) à la plus aisée (C5). On observe que le confort augmente à un rythme comparable entre les différentes catégories, traduisant une perpétuation des inégalités.

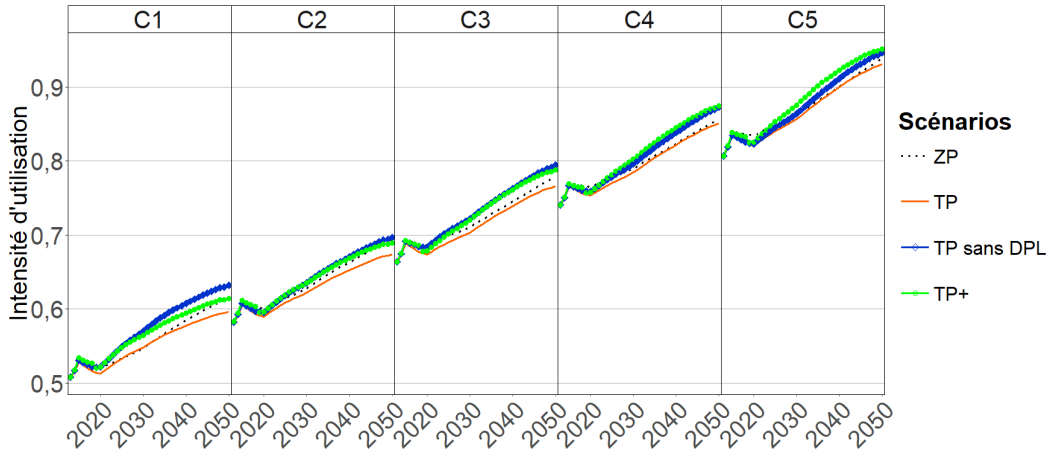


Figure 44: Evolution comparée du confort au sein des ménages modestes (C1) et aisés (C5)

5.2 Efficience comparée des politiques

On rappelle que l'efficience est évaluée pour les instruments incitatifs uniquement.

5.2.1 Coût

Le coût des différentes incitations correspond aux dépenses générées par les subventions[40] et aux recettes générées par les taxes (carbone et CEE). La Figure 45 illustre l'évolution de ces différents coûts sur l'ensemble de la période. Elle traduit l'importance croissante que prennent les recettes des taxes dans le futur, avec un point d'équilibre dépassé en 2025.

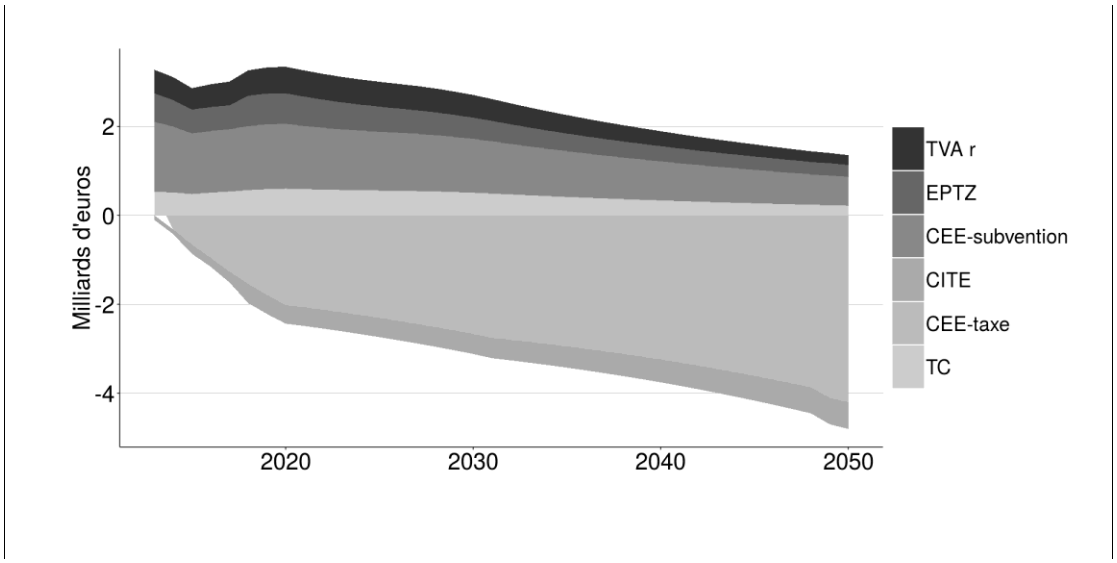


Figure 45: Evolution du coût des différentes politiques

[40] Pour la TVA à taux réduit, on applique aux coûts du modèle (qui incluent une taxe de 5,5%) un coefficient égal à 1,10/1,055-1=4,3%. Ce taux est très proche de la différence de 4,5% qui s'appliquerait au coût hors taxe.

La Figure 46 compare le coût simulé par Res-IRF pour les différentes politiques aux coûts observés par I4CE (2017, p.18) et IGF-CGEDD (2017) pour les dernières années. Si la différence est importante pour les années 2013 et 2014, les ordres de grandeur des différentes évaluations sont comparables pour 2015 et 2016, notamment pour le CITE et la TVAr. Les écarts observés ont des origines différentes :

- Le coût relativement élevé du CITE en 2013 et 2014 dans Res-IRF s'explique par le paramétrage constant de l'instrument sur le barème du crédit d'impôt rehaussé en 2014. Ce paramétrage surestime donc l'efficacité du crédit d'impôt pour 2013 et 2014[41].
- Le coût relativement élevé des CEE dans Res-IRF s'explique par le maintien de leur prix à 4€/MWh cumac de 2013 à 2016, alors que ce prix a plutôt fluctué à la baisse sur la même période. Là encore, ce paramétrage surestime l'efficacité des CEE sur les périodes antérieures.
- Le coût nettement plus élevé de l'EPTZ dans Res-IRF[42]peut s'expliquer par des éléments non modélisés, sur lesquels nous reviendront au paragraphe 5.4.3.

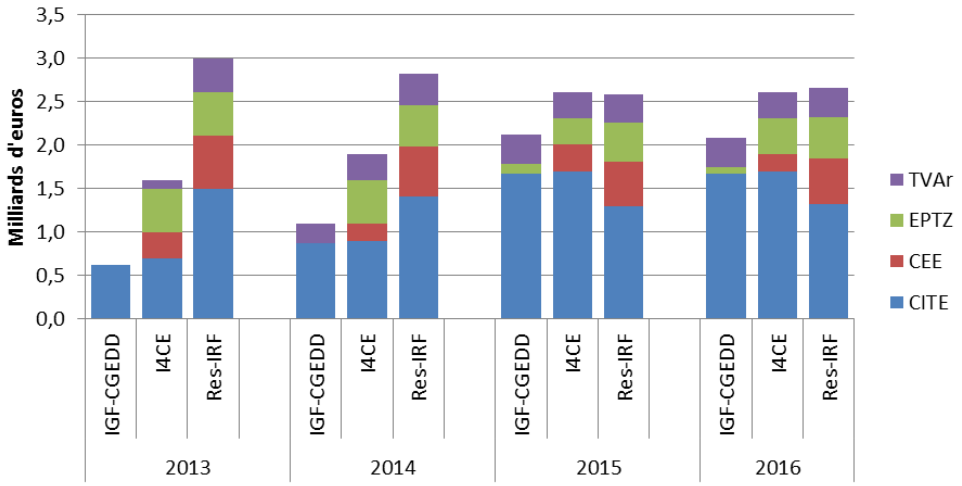


Figure 46: Comparaison des coûts simulés par Res-IRF aux coûts reportés par IGF-CGEDD et I4CE

5.2.2 Coût-efficacité

La Figure 47 compare le coût-efficacité des différents instruments pour trois points de passage : 2015, 2025 et 2035. Dans le cas des CEE, les économies d'énergie induites par les composantes subvention et taxe de l'instrument sont rapportées au montant des subventions uniquement. A court terme (2015), le rapport coût-efficacité en énergie conventionnelle s'établit, par ordre d'efficience décroissant, à 0,05€/kWh cumac pour les CEE et l'EPTZ, 0,07€/kWh cumac pour le CITE et à 0,09€/kWh cumac pour la TC. Ces valeurs augmentent au cours du temps, reflétant l'épuisement du gisement le plus rentable et la nécessité de mobiliser des gisements plus coûteux.

[41] Le nombre de bénéficiaires s'établit en revanche à 686 757 en 2012, chiffre qui correspond aux ordres de grandeurs donnés par l'IGF et le CGEDD (2017, pp.69-70 : 800 000 en 2012, 668 000 en 2013 et 661 000 en 2014).

[42] L'écart relativement faible avec l'estimation d'I4CE n'est qu'un artefact, puisque cette dernière est basée sur les montants totaux empruntés, métrique qui gonfle substantiellement les estimations par rapport au montant des intérêts contrefactuels considéré dans Res-IRF pour un même prêt.

Les rapports coût-efficacité plus bas des CEE et de l'EPTZ par rapport au CITE s'expliquent différemment. L'efficience de l'EPTZ s'explique par son ciblage sur les opérations les plus performantes, qui augmentent les économies d'énergie tout en diminuant la dépense de subvention. L'efficience des CEE relève de deux effets. D'une part, leur barème de subventionnement « régressif » (cf. Tableau 19) cible les opérations présentant le meilleur rapport coût-efficacité. D'autre part, les CEE opèrent également par le biais d'une taxe, dont le coût n'est pas comptabilisé dans l'indicateur. Le fait que la composante taxe devienne plus importante au cours du temps est la raison pour laquelle l'efficience des CEE diminue moins rapidement – c'est-à-dire que son coût-efficacité augmente plus lentement – que celle de l'EPTZ.

La taxe carbone présente le niveau d'efficience le plus bas. Cette caractéristique s'explique par le fait que les recettes fiscales prises en compte pour la taxe n'incitent pas directement, comme les subventions, l'investissement dans l'efficacité énergétique. L'effet de premier ordre de la taxe consiste plutôt en une diminution de l'intensité d'utilisation. L'indicateur de coût-efficacité exprimé en énergie conventionnelle est donc d'une pertinence limitée pour évaluer l'efficience de la taxe. On remarque néanmoins que l'indicateur s'améliore au cours du temps, à mesure que l'instrument monte en puissance.

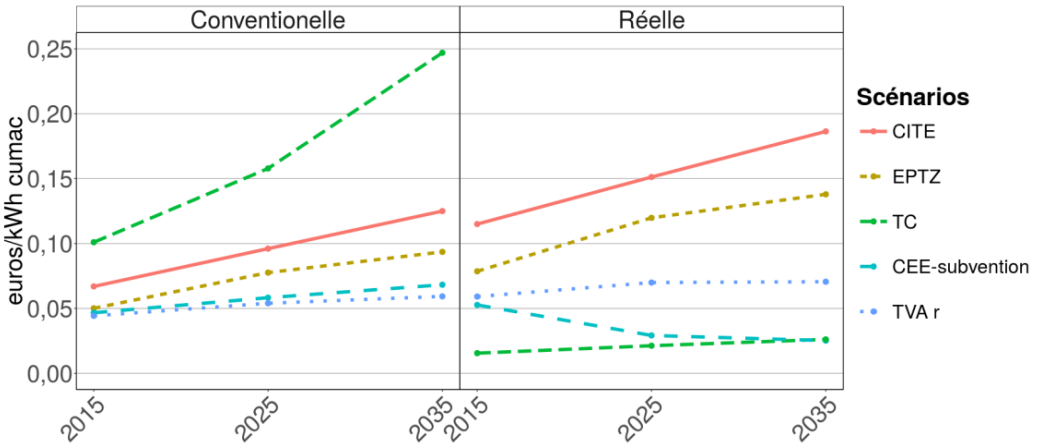


Figure 47: Cout-efficacité des politiques

Par rapport à l'indicateur en énergie conventionnelle, à l'année de départ, l'indicateur en énergie réelle augmente pour les subventions, diminue pour les taxes et varie peu pour les différentes composantes des CEE. Ces effets sont conformes aux mécanismes décrits au paragraphe 4.3.2.1. La diminution de l'indicateur pour la subvention CEE s'explique par là encore par des économies d'énergie réelle dues à un effet de sobriété généré par la composante taxe de l'instrument.

5.2.3 Effet levier

La Figure 48 présente l'effet levier des différentes politiques. A l'inverse du rapport coût-efficacité, un effet levier élevé traduit une efficience élevée. A cette différence de représentation près, les effets décrits par les deux indicateurs sont similaires : l'effet levier traduit une hiérarchie d'efficience entre politiques très semblable ; il tend également à diminuer au cours du temps, reflétant une efficience

décroissante. Comme le coût-efficacité mesuré en énergie conventionnelle, l'effet levier met l'accent sur l'investissement, et n'est donc que peu pertinent pour juger de l'efficience des taxes.

La principale différence avec les résultats en termes de coût-efficacité est l'efficience élevée de l'EPTZ au début de la période. Cet effet s'explique par construction de l'indicateur, qui intègre au numérateur les variations de dépenses d'investissement, élevées avec l'EPTZ en raison de son ciblage. Une seconde différence importante réside dans le profil temporel des CEE, à rebours de celui des autres politiques. Cet effet peut être attribué à la composante taxe de l'instrument, non prise en compte dans l'indicateur et qui monte en puissance au cours du temps.

Les valeurs observées – autour de 1,3 pour les CEE et l'EPTZ et autour de 1 pour le CITE – sont dans la lignée des valeurs couramment observées en évaluation des politiques publiques[43]. Cet ordre de grandeur est cohérent avec le fait que le coût-efficacité des aides discuté au paragraphe précédent est proche du rapport €/kWh cumac moyen de la matrice de coûts utilisée dans le modèle (ou « coût du négawatt-heure »), qui s'établit en moyenne à 0,08€/kWh cumac.

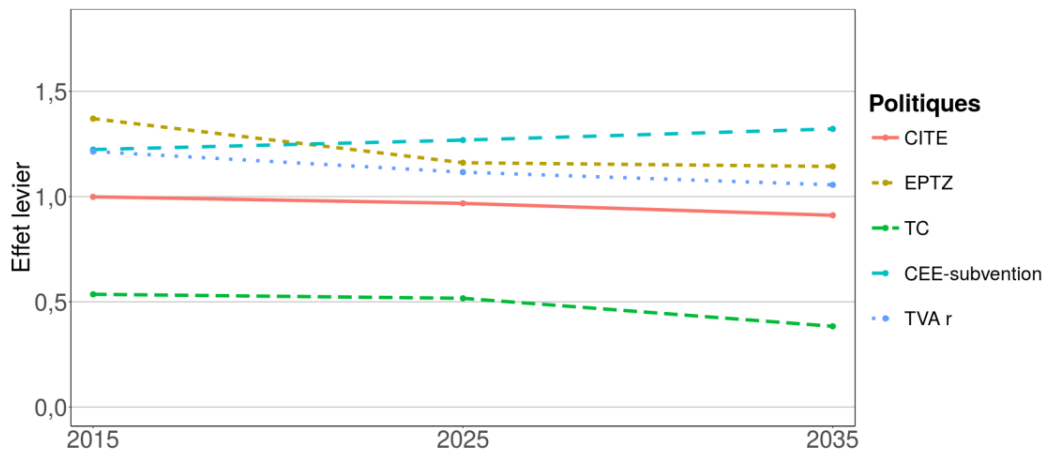


Figure 48: Effet levier des différentes politiques

La Figure 49 montre comment les effets levier varient, pour l'année 2015, entre les différentes méthodes de calcul. Ces résultats suggèrent des interactions sur-additives qui sont détaillées dans le chapitre 5.3.

[43] A titre de comparaison, l'effet levier du Prêt à Taux Zéro est estimé à 1,3 (Gobillon et al., 2005). L'effet levier moyen des crédits d'impôt à la R&D est estimé à partir de 33 études à 1,1 (écart-type 0,7), avec des valeurs comprises entre 0,26 et 2,96 (Lentile & Mairesse, 2009).

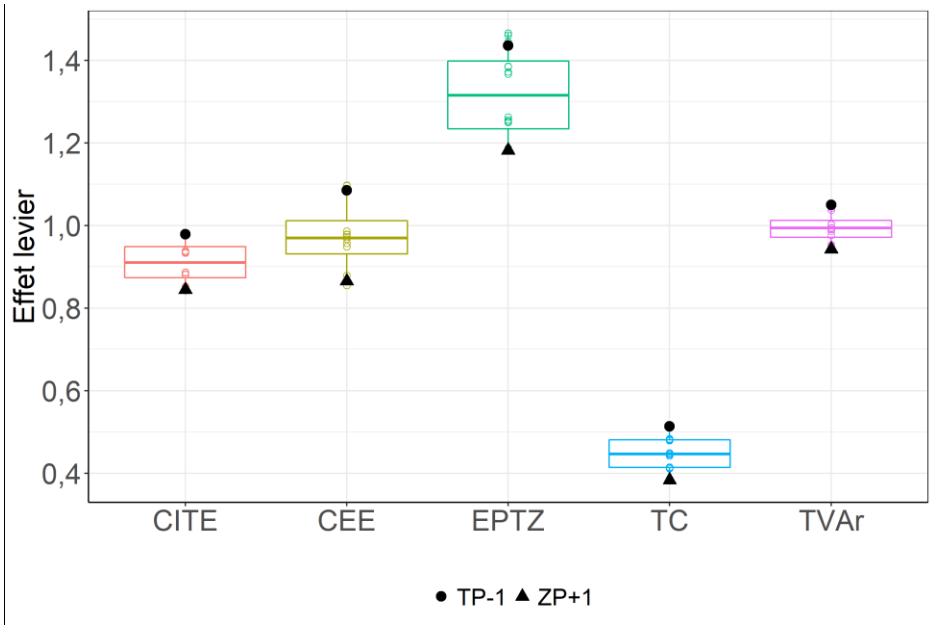


Figure 49: Effets levier détaillés pour l'année 2015

5.2.4 Effets distributifs

La Figure 50 illustre les effets des différents instruments sur la précarité énergétique, visualisés avec la méthode « TP-1 ». On constate que les subventions ont tendance à réduire la précarité énergétique dans des proportions comparables, tandis que la taxe carbone l'augmente nettement. Cette **caractéristique régressive de la taxe carbone conforte la recommandation faite plus haut de rehausser et cibler les aides pour atteindre l'objectif 5**.

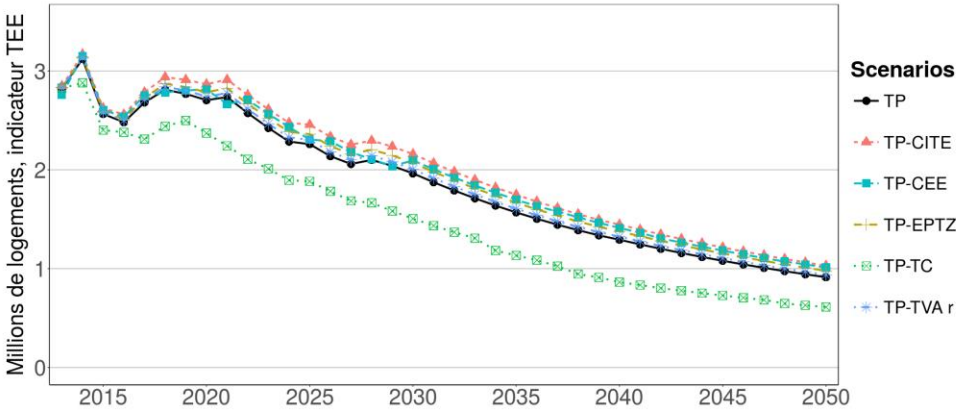


Figure 50: Evolution de la précarité énergétique avec les différentes politiques

5.3 Interactions entre politiques

Les Figures 51 et 52 illustrent l'effet propre de chaque politique à différents points dans le temps. Les flux annuels moyens d'économies d'énergie sont calculés sur 32 estimations couvrant toutes les

interactions de l'instrument avec les autres instruments. L'écart-type associé peut être interprété comme une moyenne des interactions de cette politique avec toutes les autres. Parmi les 32 estimations, celles obtenues par les méthodes ZP+1 et TP-1 qui, comme expliqué au chapitre 4.3.1 bornent l'impact de chaque instrument, sont spécifiquement identifiées.

La Figure 51, formulée en énergie conventionnelle, montre que le CITE est l'instrument qui a l'effet le plus net sur la structure du parc à court et moyen terme. A plus long terme, la montée en puissance de la TC fait de cette dernière le plus gros générateur d'économies d'énergie. Ce constat est valable sur toute la période lorsque l'on considère les économies d'énergie réelle (Figure 52). Dans quasiment tous les cas, l'impact mesuré est maximal avec l'estimation TP-1, ce qui suggère que les interactions entre instruments sont dans l'ensemble sur-additives. Cet effet peut s'expliquer par la non-linéarité de la relation qui lie la rentabilité des opérations de rénovation à leur réalisation (cf. chapitre 2.3.4.2).

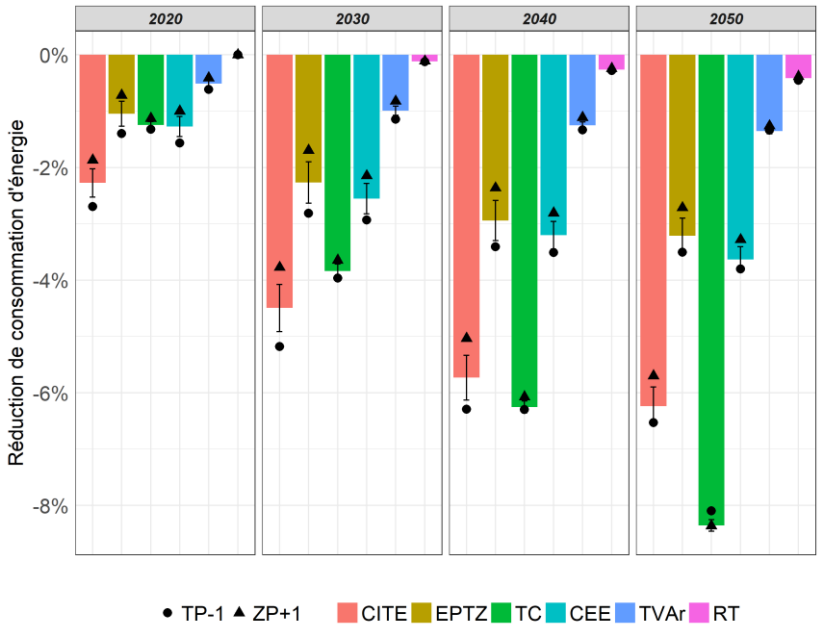


Figure 51: Effet propre des politiques en énergie conventionnelle (moyenne et écart-type sur 32 scénarios)

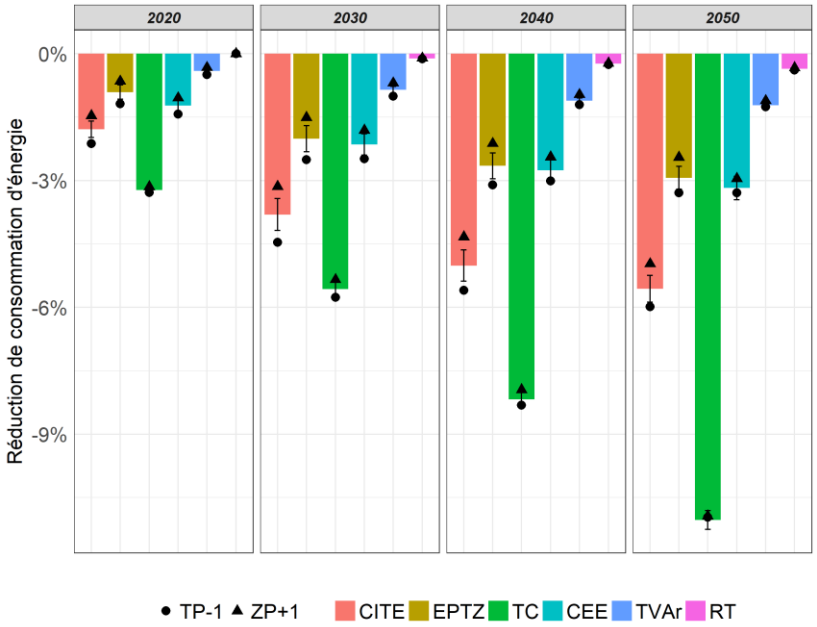


Figure 52: Effet propre des politiques en énergie réelle (moyenne et écart-type sur 32 scénarios)

Les Figures 53 et 54 illustrent l'évolution des coefficients de variation – écart-type divisé par la moyenne – des effets des politiques, qui expriment les interactions en valeur relative. De façon générale, les interactions induisent une variation de l'effet propre des politiques de l'ordre de 5 à 10%. On observe que les subventions sont les instruments qui subissent le plus d'influence de la part d'autres politiques, en particulier la taxe carbone. L'EPTZ est l'instrument le plus sensible, ce qui s'explique par son ciblage sur les opérations les plus performantes. En comparaison, les autres subventions subissent moins d'interactions. Pour toutes les politiques, à mesure que le gisement d'économies d'énergie s'épuise au cours du temps et que les trajectoires se resserrent, les interactions s'amenuisent. La seule différence notable entre les estimations en énergie réelle et conventionnelle est attribuable aux CEE ; comme discuté au paragraphe précédent, elle peut s'expliquer par la composante taxe de l'instrument, qui génère des économies d'énergie réelle supplémentaires.

Les faibles interactions subies par la TC s'expliquent par le fait que l'effet de premier ordre de l'instrument réside dans l'intensité d'utilisation plutôt que l'incitation à investir, qui est le levier sur lequel opèrent les subventions. La réglementation thermique n'interagissant qu'avec la taxe carbone, son coefficient est au départ nul puis augmente à mesure que la taxe carbone monte en puissance.

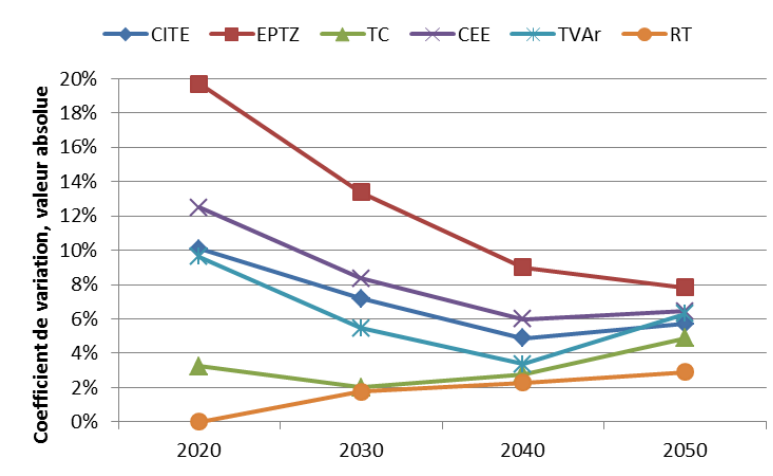


Figure 53: Coefficients de variation en énergie conventionnelle

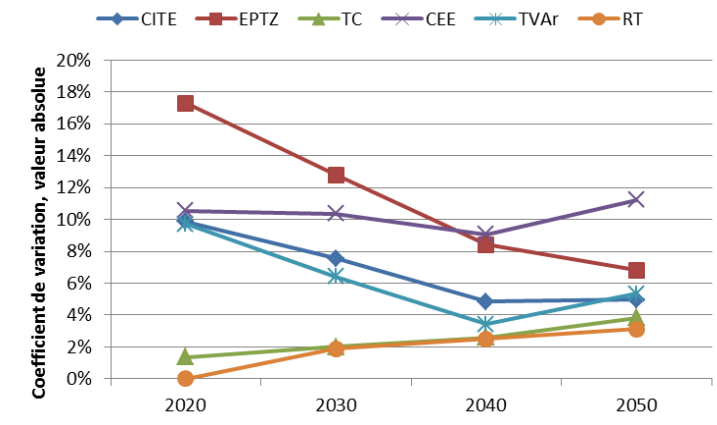


Figure 54: Coefficients de variation en énergie réelle

5.4 Effets spécifiques

La partie qui suit discute des résultats complémentaires sur trois instruments d'intérêt particulier.

5.4.1 CEE

On évalue ici la performance de l'instrument CEE au regard des objectifs qui lui sont fixés. En l'absence de rétroaction endogène du montant de l'obligation sur le prix des CEE, la démarche adoptée consiste à évaluer l'écart entre le montant de l'obligation et les économies d'énergie produites sous les scénarios CEE et CEE+ (ce dernier étant évalué indépendamment des autres politiques du « bouquet + »). Les économies d'énergie sont comptabilisées avec la méthode détaillée à l'Annexe 2[44].On rappelle en outre

[44] Le lecteur peut aisément évaluer la sensibilité des résultats à la méthode utilisée par une simple règle de trois entre coefficients d'actualisation. Par exemple, pour évaluer les économies d'énergie produites sur une durée de vie effective de 26 ans (au lieu des 15 ans pris comme hypothèse pour refléter l'hétérogénéité des références parc et marché), il suffit de multiplier les réalisations par 16,6/11,5= 1,44. Il s'agit là d'une approximation, puisque l'effet additionnel des CEE reste généré par des subventions paramétrées avec une durée de vie de 15 ans. Mais étant

qu'en l'absence de bouclage du dispositif, les recettes de taxe CEE (qui ici s'exercent uniquement sur les consommations d'électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie) et dépenses de subvention n'ont pas de raison de coïncider. Par exemple, les subventions distribuées par un fournisseur de carburant pour des économies d'énergie réalisées dans les logements sont ici comptabilisées, alors que les taxes que ce même fournisseur exercerait sur ses ventes de carburant pour répercuter le coût des subventions ne le sont pas. La Figure 55 illustre le déséquilibre de la balance budgétaire du dispositif CEE sur le périmètre considéré dans le modèle[45].

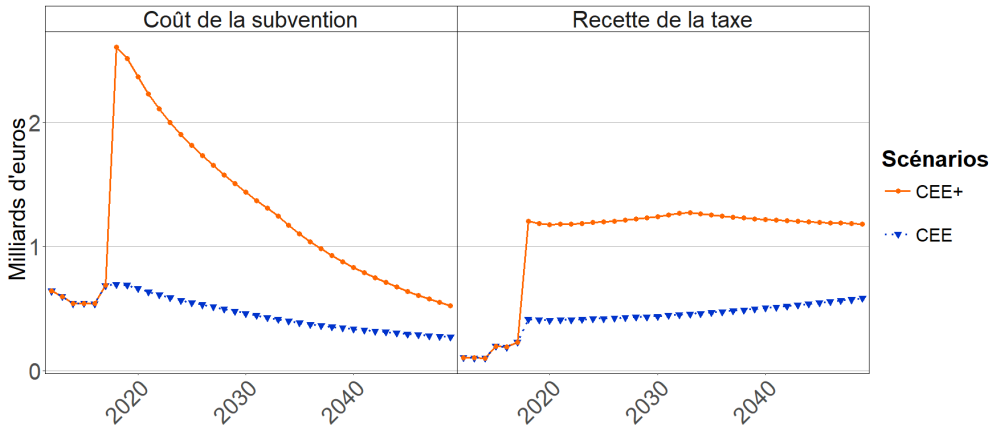


Figure 55: Balance budgétaire des CEE sur le périmètre du bâtiment résidentiel

La Figure 56 présente les CEE « classiques » (affectant les ménages de catégorie C3 à C5) et « précarité » (affectant les ménages de catégorie C1 à C2) produits au cours de la troisième période (P3, 2015-2017) et de la quatrième période (P4, 2018-2020) du dispositif et calculés avec la méthode « TP-1 », prenant en compte les interactions avec les autres instruments. La production naturelle indique les économies d'énergie non-additionnelles, qui seraient produites sans l'instrument. Autrement dit, il s'agit d'économies produites par les autres déterminants de la demande d'énergie même en l'absence du dispositif CEE (remplacement naturel des équipements, hausse des prix des énergies, autres politiques), mais pour autant valorisées en CEE par les obligés. Cette hypothèse de couverture intégrale des économies d'énergie non-additionnelles est difficile à vérifier en l'état des connaissances[46].

---

donnée la prépondérance des réalisations autonomes par rapport à l'effet additionnel des CEE, le biais associé à cette approximation est faible.

[45] On rappelle que la subvention CEE est plafonnée pour éviter que le taux de subvention total n'excède pas 100%. Ce plafond joue en réalité relativement peu. Sans plafonnement, les dépenses totales de subvention CEE n'augmentent que de 0,005% en 2018, par exemple.

[46] Là encore, le lecteur peut aisément réaliser ses propres estimations à partir de nos résultats en formulant d'autres hypothèses de couverture de la production naturelle par les obligés. Par exemple, une hypothèse de couverture de 80% des opérations naturelles conduira en P3 à une production non-additionnelle de CEE classiques de 242*80% = 194 TWh.

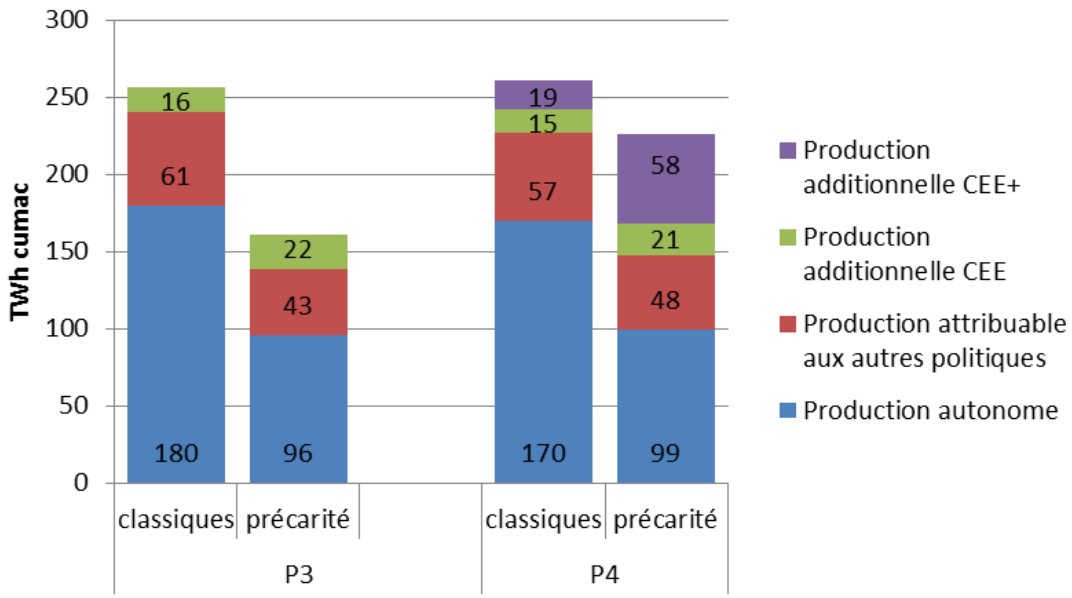


Figure 56: CEE produits en P3 et P4 (méthode TP-1)

En période P3, 257 TWh cumac sont produits en CEE classiques et 161 TWh cumac en CEE précarité, soit des flux annuels de 86 et 54, respectivement. Ces résultats sont à comparer aux flux annuels estimés par l'Ademe et l'ATEE (cf. Annexe 3), qui s'élèvent à 53 TWh cumac pour les CEE classiques et 56 à 108 pour les CEE précarité. Le modèle semble donc sur-estimer la production de CEE classiques et sous-estimer la production de CEE précarité, dans des proportions qui sont proches de se compenser.

Les CEE produits en P4 sur le même périmètre sont du même ordre de grandeur – 242 TWh cumac classiques et 168 TWh cumac en précarité. Cette proximité entre les résultats P3 et P4 s'explique par la relative constance du paramétrage de l'instrument entre les deux périodes dans le scénario CEE. La multiplication par 3 du prix dans le scénario CEE+ – qui passe de 5 à 15 €/MWh cumac en 2018, soit un taux de subvention *ad valorem* passant d'environ 6% à 18%[47], ce dernier taux étant proche de celui du CITE – multiplie par 3,1 le total des CEE additionnels – qui passe de 15+21=36 TWh cumac à 15+21+19+58=113. Alors que l'effet multiplicateur n'est que de 2,3 sur le segment classique, il est de 3,8 sur le segment précarité. Cette différenciation s'explique par le barème « régressif » du taux de subvention-équivalent des CEE (cf. 4.2.4), qui fait porter les taux les plus élevés sur les plus petits sauts de performance : comme ces sauts sont majoritairement effectués par des ménages aux revenus modestes (cf. Figure 5) et que la relation entre la rentabilité des rénovations et leur réalisation est non-linéaire (cf. chapitre 2.3.4.2), les taux de subvention élevés induisent des réalisations plus-que-proportionnelles chez les ménages modestes. Le doublement des subventions et volumes produits pour les ménages de catégorie C1 renforce d'autant cet effet.

[47] Le taux moyen de 6% est obtenu en pondérant les taux du Tableau 20 (multiplié par 5/4) par les transitions du Tableau 11, elles-mêmes pondérées par les parts des étiquettes de départ données au Tableau 12. Le taux de 18% correspond à une multiplication par 3 de ce taux qu'implique une multiplication par 3 du prix des CEE.

Pour cette période comme pour la précédente, la majeure partie des CEE provient d'opérations qui auraient eu lieu en l'absence du dispositif. En P3, le taux atteint 91%, dont trois quarts sont attribuables à des progrès autonomes (180 TWh cumac classiques et 96 TWh cumac précarité produits dans le scénario ZP) et un quart aux autres politiques (61 TWh cumac classiques et 43 TWh cumac précarité produits dans le scénario TP-CEE et additionnels par rapport au scénario ZP).

La Figure 57 montre qu'un meilleur ciblage des différentes aides sur le parc locatif privé augmenterait nettement les CEE produits en P4, en particulier les CEE classiques additionnels.

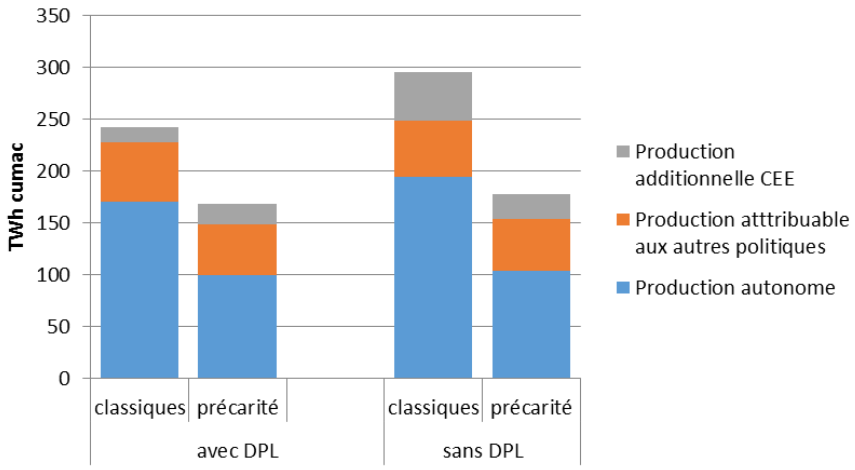


Figure 57: CEE produits en P4 avec et sans dilemme propriétaire-locataire (méthode TP-1)

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que la production de CEE dans le secteur résidentiel devrait s'établir en P4 à un niveau comparable à celui de la P3. Une augmentation nette des CEE précarité est toutefois possible en cas de forte hausse du prix des CEE. Dans la mesure où les montants d'obligation augmentent, eux, fortement – 1 200 TWh cumac classiques et 400 TWh cumac précarité en P4 –, cette conclusion implique que si les objectifs de la P4 sont atteints, la part du bâtiment résidentiel dans les réalisations – qui s'élevait à 83% en P1, 72% en P2 et 50% en P3[48] – pourrait continuer à diminuer, en particulier sur les postes enveloppe et thermique.

Malgré les écarts observés entre les simulations et les observations, les variations de paramétrage de l'instrument, en particulier le prix des CEE, ne semblent pas avoir un impact majeur sur cette projection. D'autres éléments mal connus méritent également d'être discutés :

- Une augmentation du taux de couverture des opérations non-additionnelles par les obligés pourrait être envisagée entre la P3 et la P4. L'hypothèse que ce taux est actuellement significativement inférieur à 100% reste néanmoins à démontrer.
- Par rapport aux autres aides, les CEE ont la spécificité d'amener les obligés à accompagner la structuration des filières de rénovation énergétique, avec à la clé des baisses structurelles de coût (hors subvention CEE) qui fournissent une incitation supplémentaire aux économies

[48] Diapositive 15, http://jt-cee.ademe.fr/Data/ElFinder/s29/jt%20cee%202017/JTCEE-Presentations-05-12-plenieres.pdf.

d'énergie. Si ces effets ont été décrits qualitativement (Giraudet et Finon, 2015), ils n'ont en revanche jamais été quantifiés. Aussi, il est aujourd'hui difficile de les intégrer dans notre modélisation et apprécier leur influence future.

5.4.2 CITE

Les figures 58 à 62 comparent différents variantes de scénario pour le CITE, à partir de son paramétrage de référence :

- **Ciblage performance** : on applique au CITE le ciblage de l'EPTZ (pour les étiquettes de départ G à E, étiquette minimale d'arrivée D ; pour les étiquettes de départ D et C, étiquette minimale d'arrivée B).
- **Ciblage précarité** : on restreint le CITE aux propriétaires des catégories de revenu C1 et C2.
- **Ciblage performance + précarité** : combine les deux précédents ciblages.
- **Taux à 8,5%** : correspond à une division par deux du taux de référence.

L'exercice permet plus généralement d'étudier l'effet du barème d'une subvention – quelle qu'elle soit – sur les indicateurs d'efficience, en particulier de distinguer les effets de taux absolu et de ciblage. On constate qu'une diminution du taux et un ciblage performance ou précarité conduisent tous à accroître l'efficience (Figures 58 et 59). Si les deux premiers effets sont qualitativement similaires à ceux décrits au paragraphe 5.2.3, la manière dont le ciblage précarité opère a trait à la corrélation entre niveau de revenu et efficacité énergétique du logement illustrée à la Figure 5 : en ciblant les ménages pauvres, on cible par la même occasion les logements inefficaces, qui présentent le coût du négawatt-heure le plus faible.[49] Des trois effets, celui du ciblage performance est le plus net et le plus durable. L'interaction des ciblages performance et précarité augmente fortement l'efficience, pour une efficacité (mesurée à la fois en termes de coût et d'économies d'énergie) naturellement plus faible (Figures 58 et 59). Les figures 60 et 61 décomposent ces effets, en montrant que les différents ciblages ont un net impact sur les finances publiques et un impact comparativement plus faible sur la consommation d'énergie. La figure 62 montre que les différents ciblages ont un impact également faible sur la précarité, hors – de façon contre-intuitive – les ciblages précarité, qui excluent des aides les ménages qui n'appartiennent pas aux deux premiers quintiles mais dont le TEE excède néanmoins 10%.

[49] Ce résultat milite pour des aides ciblées comme celles du programme « Habiter mieux » de l'ANAH (non représentées ici), dont les résultats sont jugés encourageants par le Cour des Comptes (2018).

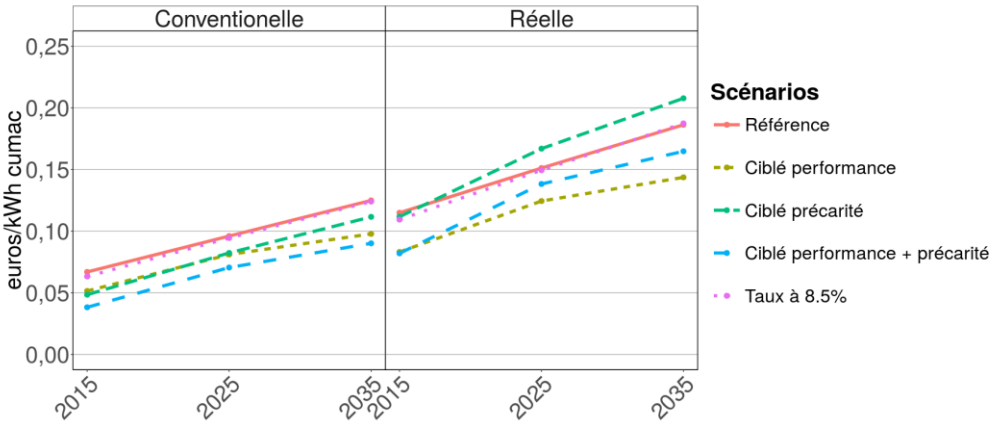


Figure 58: Coût-efficacité comparé des différents scénarios de CITE

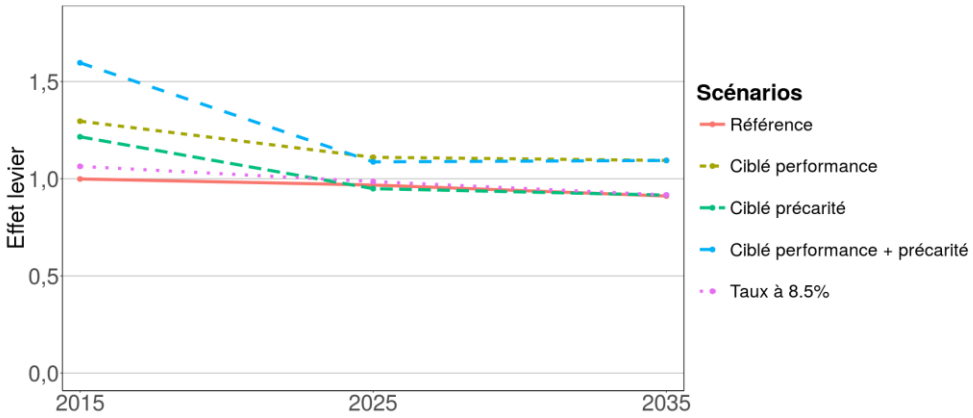


Figure 59: Effet levier comparé des différents scénarios de CITE

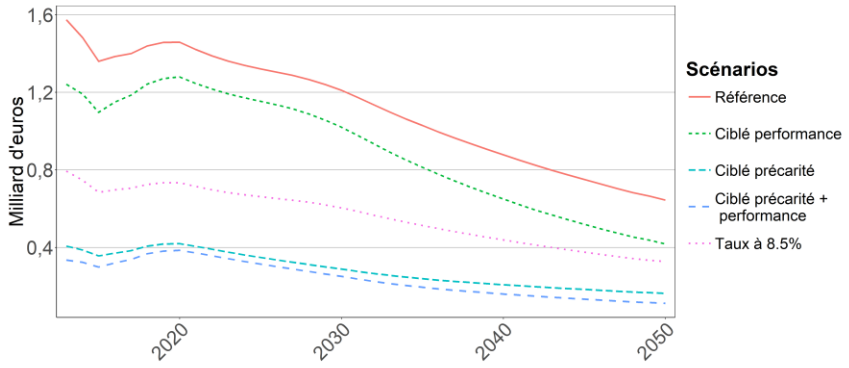


Figure 60: Coût public des différents scénarios de CITE

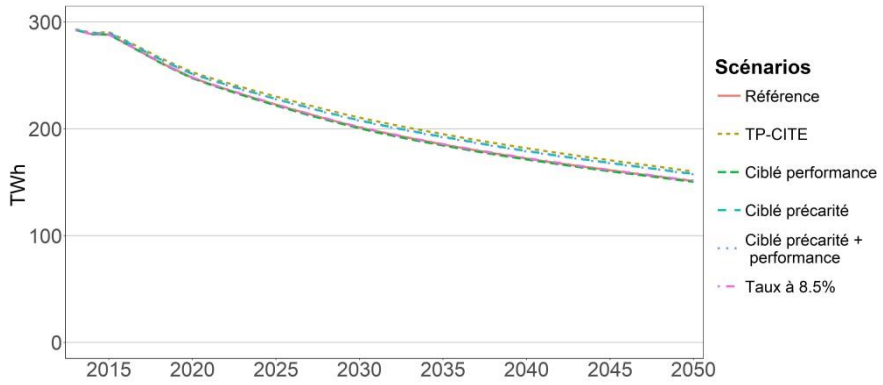


Figure 61: Consommations des différents scénarios de CITE

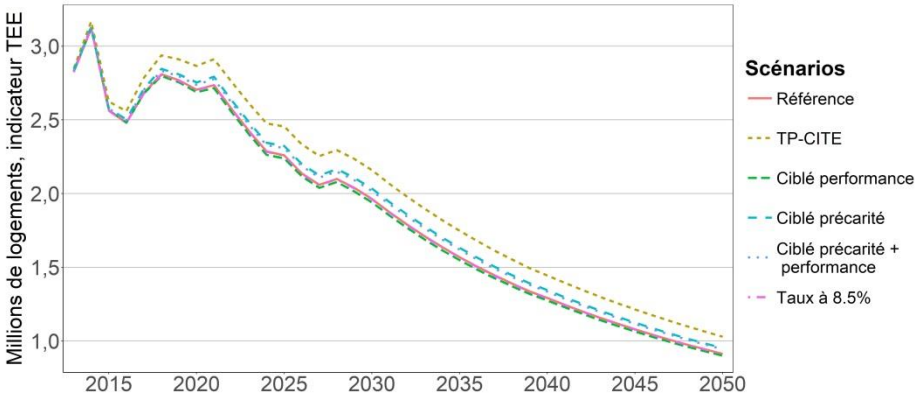


Figure 62: Effets des différents scénarios de CITE sur la précarité énergétique

5.4.3 EPTZ

La Figure 45 a établi que les simulations surestimaient grandement le coût public de l'EPTZ. La Figure 62 complète ce résultat en montrant que les simulations surestiment également le nombre d'EPTZ, d'environ un ordre de grandeur si l'on compare au scénario EPTZ et plus encore si l'on compare au scénario EPTZ+. On peut donc conclure que le recours à l'EPTZ et les économies d'énergie qui s'ensuivent (cf. Figures 51 et 52) sont nettement surestimées[50]. On remarque cependant que les simulations sont en droite ligne avec l'objectif de 400 000 EPTZ réalisés en 2013 qui avait été fixé par l'Etat lors de la mise en œuvre du dispositif[51].

L'écart important entre simulations et observations implique que des mécanismes fondamentaux n'ont pas été pris en compte dans la modélisation. Modéliser l'EPTZ comme une subvention est en effet une simplification qui fait abstraction de possibles barrières à la demande et l'offre de crédit :

- Les ménages peuvent avoir des difficultés cognitives à appréhender l'instrument comme une subvention, en particulier à calculer son montant, égal à la somme actualisée des intérêts d'un prêt ; en conséquence, leur propension à profiter de l'instrument est probablement faible.
- Les organismes de crédit peuvent avoir des réticences à informer les emprunteurs de l'instrument, dont le coût d'opportunité n'est pas nécessairement couvert en intégralité par les compensations offertes par l'Etat.

Les résultats présentés ici suggèrent que des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre ces barrières et étudier comment les surmonter afin de permettre à l'instrument de fonctionner au maximum de son potentiel.

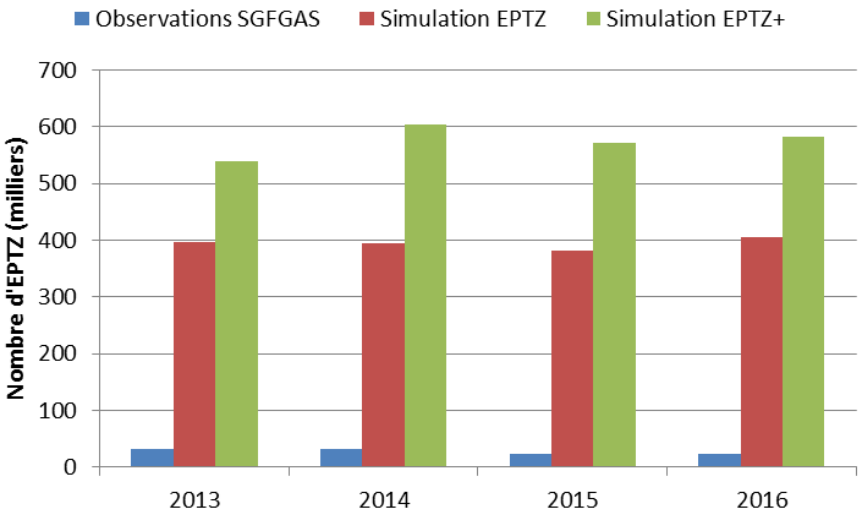


Figure 63: Comparaison du nombre d'EPTZ observé et simulé

[50] En revanche, cela n'implique pas nécessairement que les indicateurs d'efficience soient biaisés.
[51] https://www.senat.fr/commission/fin/pjlf2009/articles/45/451.html

6 Conclusion

La présente étude a été réalisée sur un périmètre couvrant 61% des consommations d'énergie du parc résidentiel, soit 16% de la consommation d'énergie finale totale en France. Malgré certains dispositifs non pris en compte, comme le programme « Habiter mieux » de l'ANAH, l'éco-prêt logement social ou la campagne de mobilisation « FAIRE », elle offre un panorama relativement complet de la panoplie des politiques de rénovation énergétique des logements. Si la plupart des effets estimés sur la période 2012-2017 correspondent aux ordres de de grandeurs observés, l'écart important qui s'observe sur l'EPTZ met en évidence la nécessité d'approfondir les recherches sur cet instrument.

La principale conclusion des travaux est qu'une augmentation des taux d'aide et une amélioration du recours aux aides dans le parc locatif privé semblent nécessaires pour atteindre les divers objectifs de la SNBC. En cas d'arbitrage budgétaire, un ciblage des aides sur les ménages modestes est à privilégier car il permet de concilier efficience économique et réduction de la précarité énergétique.

Ces travaux seront prochainement suivis d'approfondissements sur la comparaison des différents indicateurs de précarité énergétique et sur la mise en cohérence du prix des CEE et du niveau de l'obligation. Dans un second temps, d'autres instruments régulièrement discutés mais non mis en œuvre, comme l'obligation de rénovation (Giraudet et al., 2011a) ou la modulation de la fiscalité immobilière (Fuk Chun Wing et Kiefer, 2015) pourronnt être réévalués en profitant des derniers développements du modèle.

ANNEXE 1 : Reconstitution du revenu des propriétaires bailleurs

Un certain nombre d'ajustements sont nécessaires pour les transposer en niveaux de revenu les données ANIL (2012), exprimées en déciles de niveau de vie[52] :

1. les déciles de niveau de vie sont d'abord regroupés en quintile (vecteur ligne A) ;
2. les quintiles de niveau de vie sont ensuite convertis en quintiles de revenu (vecteur ligne C) à l'aide d'une matrice de passage (matrice B), construite à partir de la base « Budget des familles » pour les ménages percevant un loyer ;
3. la transposée du vecteur C est multipliée par un vecteur ligne D décrivant la part des logements loués par niveau de performance énergétique dans Phébus ;
4. la matrice résultante E est multipliée par une matrice F décrivant la part des logements loués par type d'énergie de chauffage dans Phébus, opération qui aboutit à l'hypermatrice finale G.

Les matrices A à F sont détaillées ci-dessous. Le revenu attribué à chaque propriétaire bailleur correspond au revenu moyen de sa catégorie.

Catégorie de niveau de vie	Part des logements
C1	4,7%
C2	5,8%
C3	11,2%
C4	17,3%
C5	61,0%

Matrice A : Distribution des catégories de niveau de vie, d'après les données ANIL

		Niveau de vie				
		C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**
Niveau de revenu	**C1**	0,67	0,30	0,00	0,00	0,00
	C2	0,18	0,22	0,19	0,09	0,00
	C3	0,11	0,26	0,37	0,21	0,05
	C4	0,04	0,21	0,33	0,49	0,15
	C5	0,00	0,00	0,12	0,21	0,80

Matrice B : Correspondance entre niveau de vie et revenu, d'après la base « Budget des familles » de l'Insee

[52] Cette mesure rapporte le revenu à la somme des unités de consommations du ménage – 1 pour l'adulte référent, 0,5 pour toute autre personne de plus de 14 ans et 0,3 pour toute personne de moins de 14 ans. Elle est plus représentative de la capacité de financement d'un ménage que le revenu simple.

Catégorie de niveau de vie	Part des logements
C1	4,92%
C2	5,76%
C3	12,70%
C4	22,99%
C5	53,63%

Matrice C : Distribution des catégories de revenu (produit des matrices A et B)

Etiquette de performance	Part des logements
G	27,4%
F	21,2%
E	29,2%
D	14,5%
C	7,0%
B	0,7%
A	0,0%

Matrice D : Distribution des étiquettes de performance, d'après Phébus

		Niveau de performance						
		G	F	E	D	C	B	A
Niveau de revenu	C1	78 624	60 781	83 778	41 648	20 130	2 021	0
	C2	92 040	71 153	98 074	48 755	23 565	2 366	0
	C3	203 100	157 009	216 414	107 584	52 001	5 220	0
	C4	367 655	284 220	391 756	194 750	94 132	9 449	0
	C5	857 593	662 973	913 811	454 275	219 573	22 041	0

Matrice E : Effectifs des étiquettes DPE par catégorie de revenu (produit des matrices C et D)

		Niveau de performance						
		G	F	E	D	C	B	A
Maisons individuelles	Electricité	15,80%	15,40%	13,65%	12,81%	5,44%	0,00%	0,00%
	Gaz naturel	5,00%	5,08%	12,26%	8,69%	37,70%	36,04%	0,00%
	Fioul domestique	9,30%	12,39%	8,98%	5,85%	3,06%	0,00%	0,00%
	Bois-énergie	3,73%	2,38%	2,57%	6,06%	0,00%	0,00%	0,00%
Logements collectifs	Electricité	53,94%	40,06%	41,80%	36,54%	24,65%	0,00%	0,00%
	Gaz naturel	7,73%	12,88%	19,52%	28,41%	27,22%	63,96	0,00%
	Fioul domestique	3,31%	7,99%	1,21%	1,64%	1,95%	0,00%	0,00%
	Bois-énergie	1,18%	3,83%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Matrice F : Parts de logements par énergie de chauffage et statut des décideurs

ANNEXE 2 : Eléments complémentaires sur le calcul des forfaits CEE

Le modèle Res-IRF propose une représentation agrégée de l'amélioration énergétique par saut d'étiquette. Chaque transition vers une étiquette supérieure correspond à une combinaison implicite de mesures sur l'enveloppe et le système de chauffage. En pratique, les fiches CEE préconisent un mode de calcul différent pour les économies d'énergie réalisées sur l'enveloppe, qui doivent être confrontées à la référence du parc et celles réalisées sur les systèmes de chauffage, qui doivent être confrontées à la référence du marché. Dans le modèle, les économies d'énergie sont calculées à partir du Tableau 5 en effectuant les soustractions qui s'imposent ; cette procédure se base implicitement sur la référence du parc. Pour calculer les montants d'économies d'énergie cumac nécessaires au calcul des subventions propres à chaque saut d'étiquette (cf. Tableau 18), il est donc nécessaire d'effectuer des corrections reflétant la composition des mesures sous-jacentes. Pour ce faire, on « cumacise » les économies d'énergie annuelles (calculées à partir du Tableau 5) en appliquant à chaque transition une durée de vie qui reflète l'hétérogénéité des durées de vie des mesures sous-jacentes.

En concertation avec Dominique Osso (EDF R&D), cette durée de vie a été construite à partir de l'exemple de la rénovation d'une maison individuelle présentant les éléments suivants :

1. 80 m² de toiture, dont l'isolation génère 1,4 MWh cumac/m² d'après les fiches CEE
2. 100 m² de murs, dont l'isolation génère 3 MWh cumac/m² d'après les fiches CEE
3. 10 fenêtres, donc l'isolation génère 7 MWh cumac par unité d'après les fiches CEE
4. une pompe à chaleur, dont l'installation génère 70 MWh cumac d'après les fiches CEE
5. un chauffe-eau thermodynamique, dont l'installation génère 15 MWh cumac d'après les fiches CEE

On formule les hypothèses suivantes :

- Les économies d'énergie réalisées sur l'enveloppe (éléments 1 à 3) sont valorisées sur 30 ans, soit un coefficient d'actualisation à 4% de 17,98. Dans la mesure où ces économies sont construites dans les fiches CEE à partir d'une référence parc, elles sont valorisées dans le modèle à 100%.
- Les économies d'énergie réalisées sur les systèmes de chauffage (éléments 4 et 5) sont valorisées sur 17 ans, soit un coefficient d'actualisation à 4% de 12,65. Dans la mesure où elles sont calculées dans les fiches CEE à partir d'ue référence marché, elles ne sont valorisées dans le modèle qu'à 30%.

Ces hypothèses permettent de calculer un coefficient d'actualisation composite de la façon suivante :

$$\frac{(1{,}4 * 80 + 3 * 100 + 7 * 10) * 100\% + (70 + 15) * 30\%}{\frac{1{,}4 * 80 + 3 * 100 + 7 * 10}{17{,}98} + \frac{70 + 15}{12{,}65}} = 11{,}53$$

En « décumacisant » ce coefficient (c'est-à-dire en inversant la formule donnée au paragraphe 2.3.2 pour un coefficient d'actualisation de 4%), on aboutit à une durée de vie de **15 ans**. Cette durée de vie composite, qui on le rappelle ne vise qu'à refléter l'hétérogénéité des modes de calcul des CEE, est

nettement plus faible que la durée de vie moyenne des opérations ; en considérant que les économies d'énergie proviennent à 85% de l'enveloppe et à 15% des systèmes de chauffage, cette dernière s'élève typiquement à 26 ans (soit un coefficient d'actualisation de 16,6).

Quelques remarques s'imposent quant à ces hypothèses :

- Le fait d'appliquer une durée de vie composite unique à toutes les cellules de la matrice est une simplification importante, puisqu'en pratique chaque transition repose sur des compositions de mesures différentes.
- Le maintien de cette durée de vie à un niveau constant est une autre simplification, puisque la composition des mesures pour chaque transition est endogène au dispositif CEE et peut évoluer au cours du temps.

Prendre en compte ces détails supposerait de faire de nouvelles hypothèses *ad hoc* et irait à l'encontre du principe de parcimonie qui doit présider à toute démarche de modélisation. Enfin, si la sensibilité des résultats à cette hypothèse de durée de vie n'a pas été directement examinée dans l'exercice proposé, elle peut être discutée à la lumière de l'analyse de sensibilité réalisée sur le prix des CEE, puisque ces deux variables entrent dans le calcul des montants de subvention. A cet égard, la faible sensibilité des résultats au prix des CEE, évaluée sur une gamme de variation (5 à 15 €/MWh cumac) proportionnellement plus large que celle couverte par l'incertitude relative à la durée de vie retenue (15 à 26 ans, soit des coefficients d'actualisation de 11,5 à 16,6), suggère que cette dernière à peu d'impact sur les économies d'énergie additionnelles.

ANNEXE 3 : Résultats numériques détaillés

Tableau 22: Variables d'entrée du modèle dans le scénario de référence

		2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Population totale	millions	56,2	56,7	57,8	58,9	59,9	60,8	61,5	62,4
Prix de bois-énergie	c€/kWh	4,02	3,69	3,92	4,16	4,42	4,69	4,98	5,61
Prix de l'électricité	c€/kWh	13,74	15,01	15,85	16,75	17,69	18,68	19,73	22,01
Prix du fioul domestique	c€/kWh	8,71	6,54	10,00	11,50	12,87	13,21	13,70	14,11
Prix du gaz naturel	c€/kWh	7,07	6,56	8,22	9,05	9,93	10,28	10,48	10,75
Revenu des ménages	milliards d'euros	1 161	1 189	1 262	1 340	1 422	1 510	1 602	1 806
Nombre de logements	millions	24,3	24,8	26,0	27,0	28,0	28,8	29,5	30,4
Surface totale	milliards de m²	2,32	2,37	2,50	2,62	2,72	2,81	2,89	3,01

Tableau 23: Détail des sorties du modèle, scénario ZP (sans aucune politique)

				2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consommation d'énergie finale, réelle			**TWh**	**294**	**296**	**267**	**248**	**232**	**220**	**209**	**200**	**191**
dont	électricité		TWh	45	43	41	39	37	36	35	33	32
	gaz naturel		TWh	120	119	106	97	89	84	80	76	73
	fioul domestique		TWh	56	59	47	41	36	33	31	29	28
	bois-énergie		TWh	74	75	74	72	70	67	64	61	59
Intensité d'utilisation du système de chauffage				**0,75**	**0,78**	**0,80**	**0,83**	**0,86**	**0,89**	**0,91**	**0,94**	**0,96**
dont	ménages C1			0,58	0,62	0,64	0,68	0,71	0,74	0,77	0,79	0,81
	ménages C2			0,65	0,69	0,71	0,74	0,77	0,80	0,82	0,85	0,87
	ménages C3			0,76	0,80	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,94	0,96
	ménages C4			0,84	0,87	0,89	0,92	0,94	0,97	0,99	1,01	1,03
	ménages C5			0,86	0,90	0,92	0,96	0,98	1,01	1,04	1,07	1,09
Nombre de logements			**milliers**	**24 254**	**24 793**	**26 003**	**27 048**	**27 971**	**28 793**	**29 475**	**29 989**	**30 381**
dont	construits avant 2012		milliers	23 889	23 723	23 313	22 911	22 517	22 130	21 750	21 377	21 010
	dont	*Etiquette G*	*milliers*	*3 573*	*3 163*	*2 402*	*1 881*	*1 522*	*1 273*	*1 097*	*969*	*871*
		Etiquette F	*milliers*	*3 745*	*3 519*	*2 870*	*2 246*	*1 770*	*1 450*	*1 221*	*1 060*	*952*
		Etiquette E	*milliers*	*7 269*	*7 388*	*7 429*	*7 176*	*6 719*	*6 133*	*5 520*	*4 927*	*4 371*
		Etiquette D	*milliers*	*5 918*	*6 030*	*6 285*	*6 453*	*6 495*	*6 424*	*6 274*	*6 060*	*5 800*
		Etiquette C	*milliers*	*2 883*	*2 996*	*3 310*	*3 602*	*3 750*	*3 741*	*3 635*	*3 484*	*3 310*
		Etiquette B	*milliers*	*456*	*558*	*854*	*1 237*	*1 717*	*2 251*	*2 750*	*3 162*	*3 479*
		Etiquette A	*milliers*	*44*	*69*	*163*	*316*	*544*	*858*	*1 253*	*1 714*	*2 228*
	construits après 2012		milliers	365	1 071	2 690	4 137	5 455	6 663	7 725	8 612	9 370
	dont	*Niveau BBC*	*milliers*	*211*	*631*	*1 640*	*2 590*	*3 490*	*4 343*	*5 112*	*5 768*	*6 339*
		Niveau BEPOS	*milliers*	*155*	*440*	*1 050*	*1 547*	*1 964*	*2 320*	*2 613*	*2 844*	*3 031*
Nombre de rénovations annuelles			**milliers**	**571**	**518**	**504**	**476**	**463**	**447**	**427**	**404**	**382**
dont	Saut d'une étiquette DPE		milliers	399	387	346	332	329	327	321	312	301
dont	*Propriétaires occupants*	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*398*	*359*	*343*	*321*	*314*	*306*	*294*	*279*	*263*
		Logement collectif	*milliers*	*88*	*79*	*74*	*67*	*64*	*60*	*58*	*55*	*53*
	Propriétaires bailleurs	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*40*	*38*	*37*	*35*	*33*	*30*	*28*	*26*	*24*
		Logement collectif	*milliers*	*7*	*7*	*7*	*7*	*7*	*7*	*7*	*6*	*6*
	Logement social	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*10*	*9*	*10*	*10*	*10*	*10*	*10*	*9*	*8*
		Logement collectif	*milliers*	*28*	*26*	*33*	*35*	*36*	*33*	*31*	*29*	*27*
Dépenses annuelles de rénovation			**milliards d'euros**	**7,5**	**6,0**	**6,3**	**5,7**	**5,4**	**5,0**	**4,5**	**4,1**	**3,7**
Dépenses annuelles d'énergie pour le chauffage			**milliards d'euros**	**22,5**	**20,9**	**22,7**	**23,0**	**23,2**	**22,9**	**22,6**	**22,3**	**22,0**
Part des ménages en précarité énergétique (TEE>10%)				**11%**	**10%**	**10%**	**8%**	**7%**	**5%**	**4%**	**3%**	**3%**

Tableau 24: Détail des sorties du modèle, scénario TP (avec toutes les politiques)

				2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consommation d'énergie finale, réelle			**TWh**	**292**	**288**	**248**	**223**	**201**	**185**	**172**	**161**	**151**
dont	électricité		TWh	44	42	39	37	35	34	32	31	29
	gaz naturel		TWh	119	116	96	84	75	67	61	56	52
	fioul domestique		TWh	56	56	42	34	28	25	22	20	18
	bois-énergie		TWh	73	74	71	67	63	60	57	54	52
Intensité d'utilisation du système de chauffage				**0,75**	**0,78**	**0,79**	**0,83**	**0,86**	**0,89**	**0,91**	**0,93**	**0,94**
dont	ménages C1			0,58	0,61	0,64	0,68	0,71	0,74	0,77	0,79	0,80
	ménages C2			0,65	0,68	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82	0,84	0,85
	ménages C3			0,76	0,79	0,80	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,94
	ménages C4			0,84	0,87	0,88	0,91	0,94	0,97	0,99	1,01	1,03
	ménages C5			0,86	0,90	0,91	0,95	0,98	1,01	1,04	1,06	1,08
Nombre de logements			**milliers**	**24 254**	**24 793**	**26 003**	**27 048**	**27 971**	**28 792**	**29 473**	**29 986**	**30 377**
dont	construits avant 2012		milliers	23 889	23 722	23 313	22 911	22 516	22 128	21 747	21 374	21 007
		dont Etiquette G	*milliers*	*3 533*	*3 059*	*2 164*	*1 598*	*1 263*	*1 055*	*918*	*819*	*745*
		Etiquette F	*milliers*	*3 694*	*3 369*	*2 491*	*1 770*	*1 328*	*1 080*	*933*	*834*	*752*
		Etiquette E	*milliers*	*7 226*	*7 240*	*6 913*	*6 270*	*5 463*	*4 650*	*3 924*	*3 310*	*2 809*
		Etiquette D	*milliers*	*5 961*	*6 153*	*6 505*	*6 571*	*6 379*	*6 049*	*5 656*	*5 235*	*4 808*
		Etiquette C	*milliers*	*2 949*	*3 192*	*3 849*	*4 149*	*3 981*	*3 651*	*3 291*	*2 941*	*2 614*
		Etiquette B	*milliers*	*474*	*619*	*1 119*	*1 918*	*2 873*	*3 643*	*4 156*	*4 450*	*4 571*
		Etiquette A	*milliers*	*50*	*91*	*272*	*634*	*1 229*	*2 000*	*2 869*	*3 784*	*4 709*
	construits après 2012		milliers	365	1 071	2 690	4 137	5 455	6 663	7 725	8 612	9 370
		dont Niveau BBC	*milliers*	*211*	*631*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*
		Niveau BEPOS	*milliers*	*155*	*440*	*1 050*	*2 497*	*3 815*	*5 023*	*6 085*	*6 972*	*7 731*
Nombre de rénovations annuelles			**milliers**	**687**	**628**	**651**	**619**	**594**	**542**	**492**	**443**	**398**
dont	Saut d'une étiquette DPE		milliers	371	355	321	327	326	319	306	288	267
dont	*Propriétaires occupants*	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*474*	*430*	*433*	*416*	*403*	*368*	*331*	*295*	*260*
		Logement collectif	*milliers*	*106*	*96*	*94*	*85*	*80*	*73*	*67*	*62*	*56*
	Propriétaires bailleurs	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*49*	*47*	*47*	*43*	*39*	*34*	*31*	*28*	*26*
		Logement collectif	*milliers*	*8*	*8*	*9*	*9*	*9*	*9*	*9*	*9*	*9*
	Logement social	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*12*	*11*	*15*	*15*	*15*	*14*	*12*	*11*	*10*
		Logement collectif	*milliers*	*37*	*35*	*54*	*51*	*48*	*44*	*41*	*39*	*37*
Dépenses annuelles de rénovation			**milliards d'euros**	**10,1**	**8,4**	**9,4**	**8,4**	**7,8**	**6,6**	**5,6**	**4,8**	**4,2**
Dépenses annuelles d'énergie pour le chauffage			**milliards d'euros**	**22,4**	**21,2**	**23,5**	**23,3**	**23,2**	**22,7**	**22,4**	**22,2**	**22,4**
Part des ménages en précarité énergétique (TEE>10%)				**12%**	**10%**	**10%**	**8%**	**7%**	**5%**	**4%**	**4%**	**3%**

Tableau 25: Détail des sorties du modèle, scénario TP+ (avec toutes les politiques paramétrées dans leur variante « + »)

				2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consommation d'énergie finale, réelle			**TWh**	**291**	**283**	**234**	**202**	**179**	**163**	**150**	**141**	**132**
dont	électricité		TWh	44	42	38	35	32	30	29	28	26
	gaz naturel		TWh	119	114	91	77	67	59	54	49	45
	fioul domestique		TWh	55	55	38	30	24	21	19	18	16
	bois-énergie		TWh	73	73	67	60	55	52	49	46	44
Intensité d'utilisation du système de chauffage				**0,75**	**0,78**	**0,80**	**0,84**	**0,87**	**0,90**	**0,93**	**0,95**	**0,96**
dont	ménages C1			0,58	0,62	0,65	0,70	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82
	ménages C2			0,65	0,69	0,70	0,75	0,78	0,81	0,83	0,85	0,87
	ménages C3			0,76	0,80	0,81	0,85	0,88	0,90	0,93	0,95	0,96
	ménages C4			0,84	0,87	0,88	0,92	0,96	0,99	1,01	1,03	1,04
	ménages C5			0,86	0,90	0,92	0,96	1,00	1,03	1,05	1,07	1,09
Nombre de logements			**milliers**	**24 254**	**24 793**	**26 002**	**27 046**	**27 968**	**28 788**	**29 469**	**29 981**	**30 372**
dont	construits avant 2012		milliers	23 889	23 722	23 312	22 909	22 513	22 125	21 744	21 369	21 002
		dont Etiquette G	*milliers*	*3 513*	*2 967*	*1 962*	*1 380*	*1 078*	*905*	*794*	*714*	*651*
		Etiquette F	*milliers*	*3 654*	*3 216*	*2 177*	*1 441*	*1 081*	*907*	*805*	*728*	*676*
		Etiquette E	*milliers*	*7 157*	*7 008*	*6 312*	*5 325*	*4 339*	*3 501*	*2 852*	*2 372*	*2 030*
		Etiquette D	*milliers*	*5 992*	*6 222*	*6 472*	*6 202*	*5 707*	*5 161*	*4 626*	*4 133*	*3 656*
		Etiquette C	*milliers*	*3 022*	*3 463*	*4 282*	*4 121*	*3 560*	*2 991*	*2 503*	*2 096*	*1 766*
		Etiquette B	*milliers*	*494*	*717*	*1 612*	*3 105*	*4 249*	*4 905*	*5 177*	*5 185*	*5 025*
		Etiquette A	*milliers*	*57*	*129*	*495*	*1 335*	*2 499*	*3 755*	*4 986*	*6 142*	*7 199*
	construits après 2012		milliers	365	1 071	2 690	4 137	5 455	6 663	7 725	8 612	9 370
		dont Niveau BBC	*milliers*	*211*	*631*	*1 639*	*1 639*	*1 639*	*1 639*	*1 639*	*1 639*	*1 639*
		Niveau BEPOS	*milliers*	*155*	*440*	*1 051*	*2 497*	*3 815*	*5 024*	*6 086*	*6 973*	*7 731*
Nombre de rénovations annuelles			**milliers**	**740**	**732**	**806**	**744**	**648**	**553**	**468**	**394**	**333**
dont	Saut d'une étiquette DPE		milliers	301	286	274	290	288	275	256	233	209
dont	*Propriétaires occupants*	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*508*	*493*	*528*	*496*	*430*	*361*	*301*	*247*	*201*
		Logement collectif	*milliers*	*115*	*111*	*113*	*100*	*88*	*76*	*66*	*58*	*50*
	Propriétaires bailleurs	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*54*	*52*	*61*	*51*	*42*	*35*	*31*	*28*	*26*
		Logement collectif	*milliers*	*9*	*9*	*13*	*13*	*13*	*13*	*12*	*12*	*11*
	Logement social	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*12*	*15*	*20*	*20*	*18*	*15*	*12*	*10*	*8*
		Logement collectif	*milliers*	*41*	*51*	*71*	*64*	*58*	*52*	*46*	*40*	*36*
Dépenses annuelles de rénovation			**milliards d'euros**	**12,6**	**12,0**	**13,5**	**11,4**	**9,0**	**7,0**	**5,5**	**4,3**	**3,5**
Dépenses annuelles d'énergie pour le chauffage			**milliards d'euros**	**22,3**	**20,8**	**22,9**	**21,9**	**21,4**	**20,7**	**20,3**	**20,1**	**20,3**
Part des ménages en précarité énergétique (TEE>10%)				**12%**	**10%**	**10%**	**7%**	**5%**	**4%**	**3%**	**3%**	**2%**

Tableau 26: Détail des sorties du modèle, scénario TP sans DPL (avec toutes les politiques, sans dilemme propriétaire-locataire)

				2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consommation d'énergie finale, réelle			**TWh**	**291**	**285**	**242**	**214**	**191**	**174**	**160**	**148**	**138**
dont	électricité		TWh	44	41	37	34	32	30	29	27	26
	gaz naturel		TWh	119	115	94	81	70	62	56	51	46
	fioul domestique		TWh	55	55	39	30	24	21	18	16	15
	bois-énergie		TWh	73	74	72	69	64	61	57	55	52
Intensité d'utilisation du système de chauffage				**0,75**	**0,78**	**0,81**	**0,85**	**0,88**	**0,92**	**0,94**	**0,96**	**0,98**
dont	ménages C1			0,58	0,62	0,66	0,72	0,75	0,79	0,81	0,83	0,85
	ménages C2			0,65	0,69	0,71	0,76	0,79	0,83	0,85	0,88	0,89
	ménages C3			0,76	0,80	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,98
	ménages C4			0,84	0,87	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,03	1,05
	ménages C5			0,86	0,90	0,92	0,96	0,99	1,03	1,05	1,07	1,09
Nombre de logements			**milliers**	**24 254**	**24 793**	**26 003**	**27 048**	**27 971**	**28 792**	**29 473**	**29 986**	**30 377**
dont	construits avant 2012		milliers	23 889	23 722	23 313	22 911	22 516	22 128	21 747	21 373	21 006
	dont	*Etiquette G*	*milliers*	*3 416*	*2 747*	*1 537*	*860*	*523*	*359*	*278*	*236*	*215*
		Etiquette F	*milliers*	*3 641*	*3 208*	*2 043*	*1 127*	*604*	*355*	*265*	*223*	*204*
		Etiquette E	*milliers*	*7 266*	*7 325*	*6 927*	*6 084*	*5 051*	*4 027*	*3 098*	*2 330*	*1 711*
		Etiquette D	*milliers*	*6 014*	*6 305*	*6 822*	*6 875*	*6 555*	*6 067*	*5 517*	*4 947*	*4 384*
		Etiquette C	*milliers*	*3 009*	*3 369*	*4 346*	*4 767*	*4 519*	*4 059*	*3 561*	*3 080*	*2 637*
		Etiquette B	*milliers*	*489*	*666*	*1 307*	*2 386*	*3 655*	*4 632*	*5 259*	*5 593*	*5 696*
		Etiquette A	*milliers*	*54*	*103*	*332*	*813*	*1 609*	*2 629*	*3 770*	*4 964*	*6 161*
	construits après 2012		milliers	365	1 071	2 690	4 137	5 455	6 663	7 725	8 612	9 370
	dont	*Niveau BBC*	*milliers*	*211*	*631*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*	*1 640*
		Niveau BEPOS	*milliers*	*155*	*440*	*1 050*	*2 497*	*3 815*	*5 023*	*6 085*	*6 972*	*7 731*
Nombre de rénovations annuelles			**milliers**	**925**	**842**	**848**	**788**	**739**	**667**	**602**	**540**	**474**
dont	Saut d'une étiquette DPE		milliers	459	436	393	403	404	395	378	355	326
dont	*Propriétaires occupants*	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*474*	*431*	*436*	*421*	*405*	*368*	*330*	*293*	*253*
		Logement collectif	*milliers*	*106*	*96*	*94*	*86*	*80*	*73*	*67*	*61*	*55*
	Propriétaires bailleurs	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*118*	*102*	*99*	*88*	*79*	*68*	*60*	*52*	*44*
		Logement collectif	*milliers*	*178*	*167*	*149*	*127*	*112*	*99*	*91*	*83*	*75*
	Logement social	*Maison d'individuelle*	*milliers*	*12*	*11*	*15*	*15*	*15*	*14*	*12*	*11*	*10*
		Logement collectif	*milliers*	*37*	*35*	*54*	*52*	*48*	*44*	*41*	*39*	*37*
Dépenses annuelles de rénovation			**milliards d'euros**	**12,4**	**10,4**	**11,3**	**9,9**	**8,9**	**7,4**	**6,3**	**5,3**	**4,6**
Dépenses annuelles d'énergie pour le chauffage			**milliards d'euros**	**22,3**	**20,9**	**22,7**	**22,0**	**21,5**	**20,7**	**20,2**	**19,8**	**19,8**
Part des ménages en précarité énergétique (TEE>10%)				**11%**	**10%**	**9%**	**6%**	**5%**	**4%**	**3%**	**2%**	**2%**

Tableau 27: Détail des différentes politiques

				2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CITE	Nombre de bénéficiaires	milliers	TP	687	628	651	619	594	542	492	443	398
		milliers	TP sans DPL	925	842	848	788	739	667	602	540	474
		milliers	TP+	740	732	806	744	648	553	468	394	333
	Dépense publique	millions d'euros	TP	1 574	1 360	1 459	1 321	1 210	1 029	878	751	644
		millions d'euros	TP sans DPL	1 937	1 671	1 750	1 559	1 383	1 152	975	828	716
		millions d'euros	TP+	2 050	1 967	2 166	1 836	1 422	1 094	851	667	529
TVAr	Nombre de bénéficiaires	milliers	TP	687	628	651	619	594	542	492	443	398
		milliers	TP sans DPL	925	842	848	788	739	667	602	540	474
		milliers	TP+	740	732	806	744	648	553	468	394	333
	Dépense publique	millions d'euros	TP	412	345	384	345	319	271	231	198	171
		millions d'euros	TP sans DPL	508	424	461	406	364	303	256	218	190
		millions d'euros	TP+	514	490	551	468	369	286	224	177	142
EPTZ	Nombre de bénéficiaires	milliers	TP	397	381	482	474	446	381	322	270	227
		milliers	TP sans DPL	537	522	644	617	559	466	389	323	261
		milliers	TP+	539	572	698	628	502	388	297	226	174
	Dépense publique	millions d'euros	TP	529	480	598	558	508	414	335	271	220
		millions d'euros	TP sans DPL	671	610	740	674	588	466	372	297	238
		millions d'euros	TP+	2 311	2 323	2 723	2 258	1 648	1 176	843	605	439
CEE	Nombre de bénéficiaires	milliers	TP	687	628	651	619	594	542	492	443	398
		milliers	TP sans DPL	925	842	848	788	739	667	602	540	474
		milliers	TP+	740	732	806	744	648	553	468	394	333
	Dépenses subventions CEE classiques	millions d'euros	TP	411	340	389	327	299	260	227	201	178
		millions d'euros	TP sans DPL	553	460	510	406	345	286	245	212	180
		millions d'euros	TP+	487	446	1 530	1 238	967	733	528	384	285
	Dépenses subventions CEE précarité	millions d'euros	TP	231	201	300	241	182	140	118	104	93
		millions d'euros	TP sans DPL	240	211	315	253	191	146	123	108	94
		millions d'euros	TP+	306	302	1 208	771	524	374	263	189	142
	Recettes taxes	millions d'euros	TP	105	206	418	431	448	477	512	554	600
		millions d'euros	TP sans DPL	105	202	400	402	410	429	454	485	521
		millions d'euros	TP+	105	101	1 138	1 127	1 149	1 174	1 137	1 117	1 104
Taxe carbone	Recette publique	millions d'euros	TP	0	660	2 019	2 309	2 671	2 950	3 245	3 615	4 205
		millions d'euros	TP sans DPL	0	649	1 933	2 157	2 443	2 648	2 866	3 149	3 624
		millions d'euros	TP+	0	646	1 886	2 085	2 357	2 576	2 831	3 170	3 727

Tableau 28: Efficacité comparée des politiques – réduction de consommation d'énergie conventionnelle par rapport à 2012, valeur « TP-1 » (cf. figure 51)

	2020	2030	2040	2050
CITE	-2,7%	-5,2%	-6,3%	-6,5%
EPTZ	-1,4%	-2,8%	-3,4%	-3,5%
TC	-1,3%	-4,0%	-6,3%	-8,1%
CEE	-1,6%	-2,9%	-3,5%	-3,8%
TVAr	-0,6%	-1,1%	-1,3%	-1,3%
RT	0,0%	-0,1%	-0,3%	-0,5%

Tableau 29: Efficacité comparée des politiques – réduction de consommation d'énergie réelle par rapport à 2012, valeur « TP-1 » (cf. figure 52)

	2020	2030	2040	2050
CITE	-2,1%	-4,5%	-5,6%	-6,0%
EPTZ	-1,2%	-2,5%	-3,1%	-3,3%
TC	-3,3%	-5,8%	-8,3%	-11,0%
CEE	-1,4%	-2,5%	-3,0%	-3,3%
TVAr	-0,5%	-1,0%	-1,2%	-1,3%
RT	0,0%	-0,1%	-0,3%	-0,4%

Tableau 30: Efficience comparée des politiques – effet levier, valeur « TP-1 » (cf. figure 48)

	2015	2025	2035
CITE	1,00	0,97	0,91
EPTZ	1,37	1,16	1,14
CEE	1,22	1,27	1,32
TC	0,54	0,52	0,38
TVA r	1,21	1,12	1,06

Tableau 31: Efficience comparée des politiques – coût-efficacité (€/kWh cumac), énergie conventionnelle, valeur « TP-1 » (cf. figure 47)

	2015	2025	2035
CITE	0,067	0,096	0,125
EPTZ	0,050	0,078	0,094
CEE	0,047	0,058	0,068
TC	0,101	0,158	0,247
TVA r	0,044	0,054	0,059

Tableau 32: Efficience comparée des politiques – coût-efficacité (€/kWh cumac), énergie réelle, valeur « TP-1 » (cf. figure 47)

	2015	2025	2035
CITE	0,115	0,151	0,186
EPTZ	0,079	0,120	0,138
CEE	0,053	0,029	0,025
TC	0,016	0,021	0,026
TVA r	0,059	0,070	0,071

ANNEXE 4 : Eléments méthodologiques pour comparer les volumes de CEE simulés et réalisés, par Marie-Laure Nauleau (ADEME), Elodie Trauchessec (ADEME) et Christian Deconninck (ATEE)

L'étude propose un modèle de dispositif CEE fonctionnant en « régime permanent » et à plein potentiel. Cette vision fait abstraction des fluctuations de court terme du prix liées à l'anticipation des futurs montants d'obligation d'une part, la mise en réserve des CEE d'autre part. Elle ne tient pas non plus compte des délais administratifs de validation des CEE. Ces éléments du réel rendent par nature l'attribution des CEE aux signaux économiques du moment (prix des CEE, montant de l'obligation) impossible. Dans ce contexte, comparer les résultats du modèle à une réalité difficilement quantifiable s'avère délicat. La tâche est d'autant plus compliquée que le faible nombre d'années simulées rétrospectivement empêche toute comparaison avec des séries longues de production de CEE qui permettraient de lisser les fluctuations inter-annuelles.

Compte tenu de ces difficultés, on compare ici les flux annuels de CEE générés par le modèle pour la troisième période aux réalisations d'une année jugée la plus représentative de cette même période. L'année retenue est considérée par le comité pilotage de l'étude comme la moins sujette aux effets de marché non pris en compte dans le modèle, permettant ainsi au dispositif de fonctionner à un régime proche de son potentiel naturel. L'exercice nécessite un travail préalable d'interprétation des derniers résultats complets diffusés par la DGEC[53].

Présentation des statistiques publiques

La DGEC publie les volumes de CEE délivrés par type d'opérations standardisées, date d'engagement, et département en distinguant le type de CEE (classique / précarité). La date d'engagement, qui correspond à la date de contractualisation de l'opération, est plus proche de la date de réalisation des travaux que ne l'est la date de délivrance, et est considérée ici comme la plus appropriée pour comparer les sorties du modèle aux réalisations (cf encadré 1. pour un rappel de ces différentes échéances et délais entre chacune d'elles).

La figure 63 présente les volumes CEE délivrés par date d'engagement pour les fiches BAR-EN et BAR-TH qui correspondent au périmètre couvert[54] par le modèle Res-IRF.

[53] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/comites-pilotage-lettres-dinformation-et-statistiques-du-dispositif-des-certificats-deconomies

[54] La correspondance n'est pas totale étant donné que le modèle identifie les rénovations selon un saut de classe DPE et non selon le type de geste de rénovation réalisé.

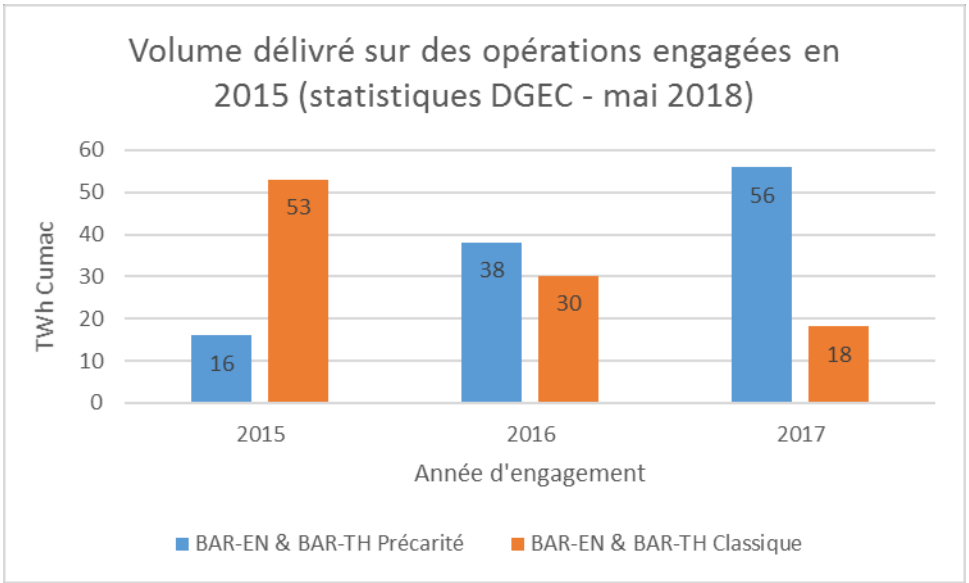


Figure 64: Volumes de CEE produits

Commentaires sur les CEE « Classique »

La baisse de production des CEE Classiques engagés (pour des CEE validés à mai 2018) provient d'abord du fait que les volumes délivrés à mai 2018 pour des opérations engagées en 2017, et même de 2016, sont sous-estimés du fait des délais entre l'engagement de l'opération et la délivrance des CEE correspondants.

Cette baisse a pu être amplifiée par une certaine démobilisation des acteurs, du fait qu'environ 130 TWh cumac de CEE engagés avant 2015 ont été utilisés pour atteindre l'obligation de CEE classiques de la 3ème période[55], ce qui a réduit le besoin de production de ces CEE au cours de cette période.

Cette démobilisation a probablement contribué à la baisse de la valeur d'échange du CEE Classique observée en 2015 et 2016[56], qui a été suivie d'une remontée en 2017 à l'approche du passage en 4ème période[57]. Cette baisse de la valeur d'échange du CEE Classique en 2015/2016 a provoqué l'arrêt de certaines offres à destination des particuliers, ce que révèlent les résultats de l'étude commanditée par l'Ademe « Etude des offres de services des acteurs du dispositif CEE » à paraître[58]. Cette instabilité des

[55] Le stock de CEE au PNCEE est passé d'environ 200 TWh cumac en début de 3ème période (en janvier 2015, diapositive 7 de la présentation du Comité de pilotage du dispositif des certificats d'économies d'énergie du 8 juin 2015) à 70 TWh cumac en fin de 3ème période (« Au 31 décembre 2017, le stock de demandes en cours d'instruction au PNCEE s'élève à 68,6 TWh cumacumac.», lettre d'information « certificats d'économies d'énergie » de janvier 2018).

[56] Baisse continue en 2015 de 3,15 €/MWhc à 2,26 €/MWhc, pour une moyenne 2015 de 2,68 €/MWhc, poursuite de la baisse en 2016 avec un point bas de 1,41 €/MWhc en août et un début de remontée en fin d'année à 1,80 €/MWhc, pour une moyenne 2016 de 1,80 €/MWhc (cf graphique en fin d'annexe).

[57] Valeur du CEE de 4,15 €/MWhc en décembre 2017, soit près de 3 fois le point bas d'août 2016. Moyenne 2017 à 3,21 €/MWhc (cf graphique en fin d'annexe). Ces valeurs sont à rapprocher des valeurs 2014 comprises entre 3 et 3,2 €/MWhc, l'année 2013 ayant vu le prix baisser de 4 à 3 €/MWhc.

[58] Chez les obligés : abandon de certains services auprès des ménages, recentrage sur les services web, concentration des réseaux de professionnels.

prix et de la mobilisation des acteurs rend difficile tout retraitement des années 2016 et 2017. On propose donc de prendre l'année 2015 comme référence de la période pour les engagements, en sachant que, dès cette année-là, la production est minorée par rapport à une situation sans déstockage de CEE comme simulée par le modèle Res-IRF.

En 2015, il y a donc eu 53 TWh cumac d'engagés, quand Res-IRF en produit 86 TWh cumac (moyenne annuelle sur la période). Ce décalage peut s'expliquer par :

- Des effets liés au déstockage : si l'on considère que 130 TWh cumac de CEE classiques ont été déstockés sur la période, en prenant un taux de conversion de 41%[59] entre les CEE BAR-TH et BAR-EN et les CEE totaux, ces 130 TWh cumac correspondent à 53 TWh cumac de CEE au périmètre du modèle sur la période de 3 ans, soit 17 TWh cumac par an, ce qui pourrait donc expliquer une partie des 33 TWh cumac d'écart constatés sur 2015, avec la supposition implicite que la démobilisation des acteurs soit homogène entre les différentes opérations et sur la période.
- Un prix CEE moyen constaté sur 2015 de 2,68 €/MWh cumac, alors que le prix CEE a été fixé à 4 €/MWh cumac dans le modèle (non prise en compte des fluctuations de court-terme).
- L'hypothèse du taux de couverture, qui suppose que 100% des opérations éligibles sont valorisées en CEE. Dans l'étude « Gisement » de l'ADEME pour la 4ème période du dispositif, les hypothèses sur les taux de recours sont toujours en deçà de 100% en 3ème période pour tenir compte des travaux non réalisés par des professionnels RGE ou dont les performances thermiques ne sont pas au niveau exigé par les fiches.
- Enfin le modèle prend pour principe que le prix du CEE est entièrement versé au bénéficiaire, alors qu'en réalité celui-ci ne reçoit qu'un solde après frais administratifs et marketing, qui peuvent s'établir entre 0,5 et 1 €/MWh cumac[60]. Ce prélèvement a sans doute plus d'impact sur les acteurs pour des prix bas des CEE. En outre, sans que l'on puisse en mesurer l'impact, un certain nombre d'acteurs ont pu ne pas répercuter immédiatement la baisse de la valeur CEE sur les primes aux consommateurs, les primes distribuées dépendant souvent de contrats dans la durée, en particulier à destination des ménages.

Commentaires sur les CEE « Précarité »

Pour les CEE précarité, le graphique ci-dessus montre au contraire une progression des montants engagés, ce qui correspond bien à la période de lancement du dispositif CEE Précarité, qui a démarré en 2016 (avec une possibilité d'anticiper sous conditions sur des opérations engagées avant 2016).

Pour les mêmes raisons que précédemment, on ne peut prendre en compte les CEE engagés en 2017, dont les volumes sont sous-estimés à cause du délai de validation, non plus que les montants 2015 ou 2016, qui ne sont pas représentatifs, le dispositif étant en démarrage.

[59] Ce ratio provient de la part du volume CEE délivré à mai 2018 issu de CEE engagés entre 2015 et 2017 sur des opérations standardisées BAR-EN et BAR-TH (soit 101 TWh cumac) sur le volume CEE délivré à mai 2018 issu de la totalité des CEE engagés entre 2015 et 2017 sur des opérations standardisées (245 TWh cumac). Cf statistiques DGEC – mai 2018.

[60] Source : ATEE

En revanche, comme on n'a pas ici d'effet stock antérieur, il est intéressant de regarder les CEE totaux déposés en 2017, qui sont de 154 TWh cumac[61], et qui devraient être assez proches d'une production annuelle de CEE. On peut prendre ce montant comme une estimation haute, une part des dossiers pouvant être rejetée, pour autant qu'on en retranche les opérations hors du périmètre de Res-IRF, qui sont :

- D'une part les opérations spécifiques et programme d'une part (hors opérations standard),
- D'autre part les opérations n'impactant pas le chauffage, comme les systèmes hydroéconomes (BAR EQ-112), communément appelés « mousseurs », et les LED (BAR EQ-111), qui ont joué un rôle important sur les CEE précarité de cette période, même si la BAR EQ-112 a été abrogée en mars 2016[62].

Pour pouvoir estimer le volume CEE Précarité au périmètre du modèle Res-IRF, il est nécessaire de prendre en compte les CEE délivrés (et non pas déposés), à partir desquels est obtenue la répartition par opération dans les lettres d'information « CEE» de la DGEC. En faisant l'hypothèse que les CEE déposés à partir du 1er janvier 2017 commencent à être validés à partir du 1er avril 2017[63], prendre en compte les CEE délivrés entre le 31 mars 2017[64] et le 30 juin 2018[65] permet de retrouver un volume de CEE Précarité équivalent au volume déposé sur l'année 2017, soit 152,2 TWh cumac validés durant cette période de 15 mois[66]. Le tableau ci-dessous montre que ces 152,2 TWh cumac délivrés correspondent à 108,2 TWh cumac une fois rapportés au périmètre du modèle Res-IRF, soit près du double du volume CEE Précarité délivré à mai 2018 sur les opérations BAR-EN et BAR-TH (56 TWh cumac, cf. graphique ci-dessus), l'écart entre les deux provenant principalement de CEE déposés mais non délivrés. Ces deux estimations fournissent donc un intervalle.

[61] D'après le Comité de pilotage du dispositif des certificats d'économies d'énergie du 6 juin 2018 qui indique également un montant de dépôt de CEE précarité de 87 TWh cumac en 2016 (diapositive 4 de la présentation).

[62] D'autres opérations standardisées, notamment des BAR-EQ, seraient à exclure mais les volumes CEE sont négligeables d'après les statistiques DGEC de mai 2018.

[63] Les CEE en opérations standards sont normalement validées sous deux mois, mais ils n'apparaissent sur le registre que lorsque les frais d'enregistrement sont payés, ce qui rajoute plus d'un mois de délai (à fin juillet 2018, on avait ainsi 22,2 TWh cumac en attente de paiement des frais d'enregistrement, soit un peu plus de 1 mois et demi de production), donc supposer que les CEE déposés en 2017 commencent à apparaître effectivement en avril 2017 est considéré comme une approximation acceptable par le Comité de pilotage.

[64] 90,7 TWh cumac validés à cette date selon la Lettre CEE d'avril 2017.

[65] 242,9 TWh cumac validés à cette date selon la Lettre CEE de juillet 2018.

[66] L'existence d'un stockage d'environ 40 TWh cumac sur la période rend nécessaire la prise en compte d'une période de validation plus longue que la période de dépôt.

	A fin mars 2017	A fin juin 2018	Variation
CEE Précarité délivrés	90,7	242,9	152,2
- dont opérations standardisées	76,2	213,8	137,6
- dont mousseurs[67]	8,46	9,62	1,16
- dont LED	22,25	50,45	28,2
- dont opérations standardisées hors mousseurs/LED	45,5	153,7	108,2
Source : Lettres d'information CEE de la DGEC de mars 2017 et de juin 2018.			

D'après les résultats du modèle Res-IRF, le volume CEE précarité sur 2015-2017[68] est de 161 TWh cumac, soit 54 TWh cumac par an, en deçà de l'intervalle de 56 à 108 évoqué plus haut. A l'inverse des CEE classiques, **le résultat du modèle Res-IRF sous-estime donc la production de CEE précarité en 3ème période**, et ce d'autant plus que les opérations standardisées n'incluent pas les travaux réalisés dans le cadre du programme Habiter Mieux de l'Anah.

Cette sous-estimation de la production des CEE précarité a sans doute au moins deux causes :

- D'une part, il n'est pas évident que le modèle puisse bien représenter les points singuliers pour lesquelles les opérations CEE se développent très fortement lorsque la prime CEE rend le coût net de l'opération nul ou très faible. C'est en particulier le cas de l'isolation des combles perdus, dont le volume est très significatif (à fin octobre 2018 l'isolation des combles, opération se faisant gratuitement chez les grands précaires d'après l'ATEE, représentait plus de 42%[69] des CEE précarité au périmètre de l'étude).
- D'autre part cela est sans doute lié à l'interprétation qui y est faite des règles d'éligibilité aux CEE Précarité. Dans le modèle Res-IRF, sont considérés comme éligibles les ménages appartenant aux deux premiers quintiles de revenu, avec un montant d'aide doublé pour les ménages du premier quintile pour prendre en compte la bonification « Grande Précarité » , tandis que les critères réels d'éligibilité reposent sur les seuils du programme Habiter Mieux de l'Anah[70]. Il n'est pas possible d'évaluer la correspondance exacte entre les deux définitions[71]. On note enfin que la définition des CEE précarité impacte mécaniquement celle des CEE classiques, qui concernent de fait les ménages des trois derniers quintiles. Il est donc possible que la sur-estimation des CEE classiques et la sous-estimation des CEE précarité aient pour origine commune une sous-estimation des ménages éligibles aux CEE précarité dans le modèle.

[67] Opération abrogée en mars 2016, mais continuant à avoir un peu d'effet sur les dossiers déposés tout début 2017.

[68] Le modèle ne fait pas de différence entre CEE Classique et Précarité et suppose que les CEE Précarité existent en 2015.

[69] Source lettre d'information CEE de la DGEC Octobre 2018

[70] Des seuils d'éligibilité en fonction des revenus fiscaux du ménages, du nombre de personnes dans le ménage et de la localisation (Ile de France vs autres régions).

[71] Pour rappel : d'un côté, le modèle Res-IRF représente les rénovations sous forme d'au minima un saut de classe DPE, sans expliciter le type de gestes de rénovation sous-jacents. De l'autre côté, il n'existe pas à ce jour de statistiques publiées sur les CEE en termes de nombre d'opérations, d'où l'importance de l'évaluation du dispositif CEE à venir afin de comparer les opérations valorisées en CEE avec la totalité des opérations réalisées.

Concernant le prix des CEE Précarité sur l'année 2017, celui-ci a lentement progressé de 4,5 €/MWhc en janvier à 5,0 €/MWhc en décembre, avec une moyenne à 4,74 €/MWhc, soit un niveau très proche du prix retenu dans le modèle, qui est de 5,1 €/MWhc sur 2017.

Encadré 1 : Les différentes dates d'une opération CEE et durée des différentes phases du traitement d'un dossier, sous les modalités de la 3ème période

- Date d'engagement : La date d'engagement est définie par l'arrêté du 4 septembre 2014 : sauf dispositions particulières prévues par la fiche d'opération standardisée, il s'agit de la date d'acceptation du contrat de réalisation de l'opération par le bénéficiaire (par exemple : date d'acceptation du devis ou du bon de commande), matérialisée par la date de signature de ce contrat.
- Date de fin de réalisation de l'opération : correspond en général à la date de facture ou de PV de réception
- Date de dépôt de l'opération CEE dans EMMY : Pour rappel, le 1er dépôt de la demande CEE doit avoir lieu au maximum un an après la date de fin de réalisation de l'opération. Il peut y avoir plusieurs versions de dossier (ex : besoin de pièces complémentaires).
- Date de délivrance de l'opération CEE par le PNCEE : Concernant les délais entre dépôt et délivrance, d'après la FAQ de la DGEC : « Le principe du « Silence vaut accord » (SVA) s'applique à toutes les demandes de certificats d'économies d'énergie depuis la troisième période. Le délai d'acceptation implicite s'applique à partir de la date de l'accusé de réception d'un dossier complet par l'administration. À défaut d'accusé de réception du dossier complet ou de demande de complément de l'administration dans le délai d'acceptation implicite, ce délai court à compter de la réception de la demande par le service compétent (et non de l'envoi du dossier). À l'issue de ce délai d'acceptation implicite, le demandeur peut solliciter une attestation établissant l'acceptation implicite de sa demande. L'administration dispose cependant d'un délai de retrait de 4 mois pour revenir sur cette décision implicite. Elle peut retirer toute décision créatrice de droit si celle-ci est illégale, c'est-à-dire non conforme au cadre législatif et réglementaire. Une décision implicite n'est donc définitive qu'en l'absence de réponse de l'administration à l'issue d'un délai de 6 mois ou de 10 mois, suivant la nature des opérations, après réception du dossier par le PNCEE. Toutefois, ce délai est suspendu automatiquement si en application de l'article R. 222-9 du code de l'énergie, une mise en demeure a été adressée au demandeur à la suite d'un contrôle diligenté en application des articles R. 222-3 et suivants de ce même code. »

Dans les statistiques de mai 2018, il est donc probable que toutes les opérations engagées en 2017 ne soient pas comptabilisées.

Encadré 2 : Rappel de certaines hypothèses de l'étude « Gisement » de l'ADEME pour la 4ème période du dispositif CEE

Pour chaque opération (ex : isolation de combles BAR-EN-101), l'étude estime, sur le périmètre de la 3ème période, à partir de différentes sources, dont l'enquête OPEN 2016, les statistiques CEE et d'autres études (BatiEtude, CEREN, etc.), le nombre total d'opérations réalisées en les décomposant en plusieurs catégories :

- La part du marché des opérations éligibles aux CEE car réalisées par des professionnels et respectant les critères de performance,
- La part du marché des opérations non éligibles car en deçà des critères d'éligibilité sur la performance, bien que réalisées par des professionnels,
- La part de marché des opérations non éligibles car réalisée en auto-production[72], bien que suffisamment performantes,
- Le reste des opérations.

Pour la 1ère catégorie, un taux de couverture de 80% est ensuite appliqué pour estimer le nombre d'opération effectivement valorisés en CEE en 3ème période. Sur les autres catégories non éligibles en 3ème période, l'étude fait d'autres hypothèses pour estimer le nombre d'opération qui deviendrait éligible (via un effet incitatif des CEE sur l'augmentation de la performance et le recours à un professionnel).

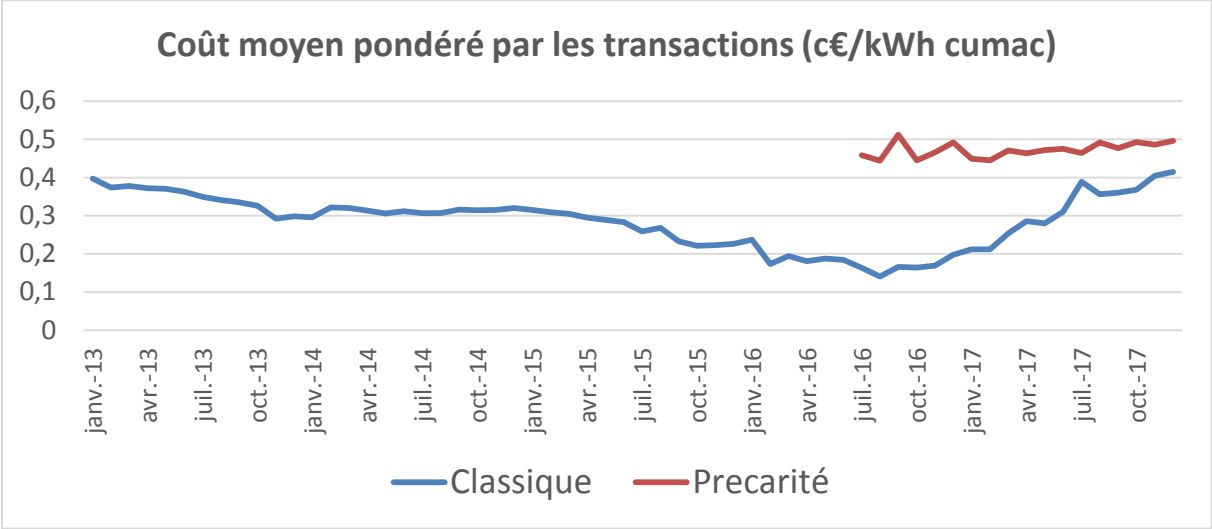


Figure 65: Prix des CEE (source: Registre EMMY https://www.emmy.fr/public/accueil[73])

[72] D'après OPEN 2016 par exemple, 68% des travaux sur Toiture sont niveau « optimum » ou « medium » (i.e. éligible au CEE sur le critère performance) et 83% des travaux sur Toiture sont réalisés par des professionnels.

[73] A noter que les valeurs d'échange des CEE lors des transactions ne sont que déclaratives.

Bibliographie

Allaire, D., G. Gaudière, Y. Majchrzak, C. Masi, 2008, « Problématique qualitative et quantitative de la sortie du parc national de bâtiments », Mémoire du Groupe d'Analyse d'Action Publique, ENPC.

Allcott, H., Greenstone, M., 2012. Is There an Energy Efficiency Gap? *Journal of Economic Perspectives* 26, 3–28. DOI : 10.1257/jep.26.1.3

Allibe, B., 2015, "Du normatif au réaliste : amélioration de l'évaluation technico-économique du bénéfice des rénovations énergétiques des logements", La Revue du CGDD, 37-46. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0081488&requestId=1&number=4

ADEME, 2015, Chiffres clé Climat, air, énergie. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf

ANAH, 2008, Modélisation des performances thermiques du parc de logements. http://www.anah.fr/fileadmin/anah/Mediatheque/Publications/Les_etudes/rapport_performances_energetiques.pdf

Anderson, S.T., Kellogg, R., Sallee, J.M., 2013. What do consumers believe about future gasoline prices? *Journal of Environmental Economics and Management* 66, 383–403. DOI: 10.1016/j.jeem.2013.07.002

ANIL, 2012, Bailleurs et locataires dans le parc privé. https://www.anil.org/documentation-experte/etudes-eclairages/etudes-et-eclairages-2012/bailleurs-et-locataires-dans-le-parc-prive/

Aydin, E., Kok, N., Brounen, D., 2017. Energy efficiency and household behavior: the rebound effect in the residential sector. *The RAND Journal of Economics* 48, 749–782. DOI: 10.1111/1756-2171.12190

Branger, F., L.-G. Giraudet, C. Guivarch, P. Quirion, 2015, Global sensitivity analysis of an energy-economy model of the residential building sector, *Environmental Modelling & Software*, 70:45-54. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.03.021

Cayla, J.-M., D. Osso, 2013. Does energy efficiency reduce inequalities ? Impact of policies in residential sector on household budget." Proceedings of the ECEEE Summer Study. https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2013/5a-cutting-the-energy-use-of-buildings-projects-and-technologies/does-energy-efficiency-reduce-inequalities-impact-of-policies-in-residential-sector-on-household-budget/

CGDD, 2015. Un habitat plus compact et moins énergivore : pour quels coûts de construction ? Etudes & Documents 135. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083375/22297.pdf

Cour des Comptes, 2018. Le programme « HABITER MIEUX » de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH). Communication à la commission des finances du Sénat http://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/commission/finances/Controle/enquete_habiter_mieux.pdf

DGEC, 2018. Lettre d'information « certificats d'économies d'énergie », mars 2018. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/201803%20lettre%20d%27infos.pdf

DG Trésor, 2017. Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ? Documents de travail de la DG Trésor n° 2017/02. https://www.tresor.economie.gouv.fr/Ressources/File/434150

Denjean, M., "Enquête sur la performance de l'habitat, équipements, besoins et usages de l'énergie. De la base de sondage aux données exploitables", Mémoire de Master 2 Statistique-Econométrie, Université de Rennes 1, septembre 2014

Fuk Chun Wing, D., N. Kiefer, 2015. "Quelles politiques pour atteindre les objectifs en matière de performance énergétique des logements ? Analyse de plusieurs mesures avec le modèle Res-IRF." La Revue du CGDD, http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0081488&requestId=0&number=1.

Fisch, V., C. Marfaing, C. Rognant, 2015, « Dynamique d'efficacité énergétique comparée dans le parc de logements individuel et collectif », Projet de modélisation, Master EDDEE.

Gillingham, K., Newell, R.G., Palmer, K., 2009. Energy Efficiency Economics and Policy. *Annual Review of Resource Economics* 1, 597–620. DOI: 10.1146/annurev.resource.102308.124234

Giraudet, L.-G., Finon, D., 2015. European experiences with white certifirecate obligations: A critical review of existing evaluations. Economics of Energy & Environmental Policy 4. DOI : 10.5547/2160-5890.4.1.lgir

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, L. Penot-Antoniou, P. Quirion, 2011a. Evaluation des mesures du Grenelle de l'Environnement sur le parc de logements. Rapport pour le CGDD. Études & documents 58. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00799740.

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011b, "Comparing and combining energy saving policies : will proposed residential sector policies meet French official targets ?", *The Energy Journal*, 32(SI1):213-242. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol32-SI1-12

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2012. Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modelling, *Energy Economics*, 34(2):426-445. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.07.010

Giraudet, L.-G., 2018. Energy efficiency as a credence good : A review of informational barriers to building energy savings. FAERE Working Paper 2018.07. http://faere.fr/pub/WorkingPapers/Giraudet_FAERE_WP2018.07.pdf

Glotin, D., 2018. Retrospective simulations of heating consumption in French dwellings. Master's Thesis – Sustainable Energy Engineering, Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm (KTH)

Gobillon, L., Blanc, D.L., 2005. Quelques effets économiques du prêt à taux zéro. Economie et statistique 381, 63–89. DOI : 10.3406/estat.2005.7209

Hills, J., 2012. Getting the measure of fuel poverty. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48297/4662-getting-measure-fuel-pov-final-hills-rpt.pdf

Huntington, H.G., Weyant, J.P., Sweeney, J.L., 1982. Modeling for insights, not numbers: the experiences of the energy modeling forum. Omega 10, 449–462. https://doi.org/10.1016/0305-0483(82)90002-0

I4CE, 2017. Panorama des financements climat. https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2017/12/17-12-06-Conf%C3%A9rence-Panorama-des-financements-climat_final-1.pdf

IGF et CGEDD, 2017. Revue des dépenses – Aides à la rénovation énergétique des logements privés. http://www.igf.finances.gouv.fr/files/live/sites/igf/files/contributed/IGF%20internet/2.RapportsPublics/2017/2016-M-114.pdf

Insee, 2006. Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050 : la population continue de croître et le vieillissement se poursuit. Insee Première n°1089. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280826

Insee, 2017. Des ménages toujours plus nombreux, toujours plus petits. Insee Première n° 1663. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3047266

Insee, 2018. 374 000 logements supplémentaires chaque année entre 2010 et 2015 – La vacance résidentielle s'accentue. Insee Première n° 1700. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3572689

Jaffe, A.B., Stavins, R.N., 1994. The energy-efficiency gap: What does it mean? *Energy Policy* 22, 804–810. DOI: 10.1016/0301-4215(94)90138-4

Labandeira, X., Labeaga, J.M., López-Otero, X., 2017. A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. Energy Policy 102, 549–568. 10.1016/j.enpol.2017.01.002

Lentile, D., J. Mairesse, J., 2009. A policy to boost R&D: Does the R&D tax credit work? EIB Papers, 14(1):144‑169. https://www.econstor.eu/handle/10419/44906

Mathy, S., Fink, M., Bibas, R., 2015. Rethinking the role of scenarios: Participatory scripting of low-carbon scenarios for France. Energy Policy 77, 176–190. DOI : 10.1016/j.enpol.2014.11.002

Nauleau, M.-L., Giraudet, L.-G., Quirion, P., 2015. Energy efficiency subsidies with price-quality discrimination. Energy Economics, Frontiers in the Economics of Energy Efficiency 52, Supplement 1, S53–S62. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.024

ONPE, 2016. Les chiffres-clés de la précarité énergétique. Edition n°2. http://www.onpe.org/sites/default/files/pdf/tableau_de_bord/chiffres-cles-precarite-energetique-novembre2016.pdf

OPEN, 2016. Campagne 2015. Travaux réalisés en 2014. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

PUCA, 2015. L'habitat existant dans la lutte contre l'effet de serre – Évaluer et faire progresser les performances énergétiques et environnementales des OPAH – Bilan de l'évaluation technique. http://www.urbanisme-puca.gouv.fr/IMG/pdf/bilan_final_opah.pdf

Quinet, 2008. La valeur tutélaire du carbone. Rapports et documents n°16. http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/094000195.pdf

Sunikka-Blank, M., Galvin, R., 2012. Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building Research & Information* 40, 260–273. 10.1080/09613218.2012.690952

Traisnel, J.-P., 2001, « Habitat et développement durable. Bilan rétrospectif et prospectif». Les cahiers du CLIP, n°13. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00098195/document

USH, 2017. Réhabilitation énergétique : 2017 sera une année record pour le secteur Hlm. Communiqué de presse, 19 juillet 2017. https://www.union-habitat.org/sites/default/files/communiques/documents/2018-01/CP%20-%20R%C3%A9habilitation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20%202017%20sera%20une%20ann%C3%A9e%20record%20pour%20le%20secteur%20Hlm_0.pdf