



Transition Énergétique

Les clés pour financer
l'évolution de la demande en France

Méthode et résultats



Avec l'appui des
Cabinet de conseil :

ylis **frontier**
economics

Le présent document constitue la note complète de méthodologie et des résultats du modèle technico-économique développé pour les besoins de l'étude les clés du financement de l'évolution de la demande d'énergie en France, réalisée par l'UFE avec l'appui du cabinet de conseil Ylios.

SOMMAIRE

Sommaire	3
Table des figures	6
Introduction générale	9
1 Objectifs de l'étude	10
2 Le cadre macroéconomique de référence	12
2.1 Etat des lieux	12
2.1.1 <i>Consommation d'énergie finale</i>	12
2.1.2 <i>Emissions de CO₂</i>	13
2.2 Evolution du cadre macroéconomique entre 2015 et 2030.....	14
2.2.1 <i>Evolution de l'offre d'énergie</i>	14
2.2.2 <i>Démographie et croissance économique</i>	15
2.2.3 <i>Evolution du résidentiel</i>	16
2.2.4 <i>Evolution du tertiaire</i>	18
2.2.5 <i>Evolution du transport</i>	20
2.2.6 <i>Evolution de l'industrie</i>	22
2.2.7 <i>Evolution de l'agriculture</i>	24
2.3 Bilan du cadre macroéconomique de référence en 2030.....	25
2.3.1 <i>Bilan sur la consommation d'énergie finale</i>	25
2.3.2 <i>Bilan sur les émissions de CO₂</i>	26
3 Cadre de mise en œuvre de la trajectoire optimisée	28
3.1 Les actions disponibles pour atteindre l'objectif climatique de la transition énergétique	28
3.1.1 <i>Actions dans le résidentiel</i>	28
3.1.2 <i>Actions dans le tertiaire</i>	31
3.1.3 <i>Actions dans le transport</i>	34
3.1.4 <i>Actions dans l'industrie</i>	34
3.2 Contenus carbone et prix des énergies	36

4	Méthodologie du calcul de la trajectoire.....	40
4.1	Construction de l'interclassement des mesures par secteur	40
4.1.1	<i>Calcul du surcoût d'investissement de la mesure.....</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Calcul du gain en économie d'énergie</i>	<i>42</i>
4.1.3	<i>Calcul du volume de CO₂ évité par an</i>	<i>43</i>
4.1.4	<i>Calcul final de la rentabilité climatique</i>	<i>44</i>
4.2	Déploiement des mesures dans une trajectoire optimisée	45
4.2.1	<i>Définition du volume de déploiement de la mesure</i>	<i>45</i>
4.2.2	<i>Cadencement du déploiement et cible de l'objectif politique</i>	<i>47</i>
4.3	Indicateurs de sortie.....	47
5	Analyse des résultats.....	48
5.1	Description de la trajectoire.....	48
5.1.1	<i>Evolution des émissions de CO₂</i>	<i>48</i>
5.1.2	<i>Evolution du mix de consommation d'énergie.....</i>	<i>48</i>
5.2	10 actions-clés permettent d'atteindre 75 % de l'objectif	49
5.3	La transition énergétique est, une fois optimisée, capitalistique mais soutenable.....	50
5.4	Toutes les actions nécessaires ne sont pas rentables	51
5.5	Le bon déploiement des actions dépend de la capacité d'adaptation des filières industrielles	52
6	Annexes	54
6.1	Données de cadrage du parc.....	54
6.1.1	<i>Résidentiel</i>	<i>54</i>
6.1.2	<i>Tertiaire.....</i>	<i>55</i>
6.1.3	<i>Transport.....</i>	<i>57</i>
6.1.4	<i>Industrie</i>	<i>58</i>
6.2	Coûts d'achat et d'installation	60
6.2.1	<i>Bâtiment</i>	<i>60</i>
6.2.2	<i>Transport.....</i>	<i>61</i>
6.2.3	<i>Industrie</i>	<i>61</i>
6.3	Coûts d'entretien	62
6.3.1	<i>Bâtiment</i>	<i>62</i>

6.3.2 <i>Transport</i>	62
6.4 Impacts des actions sur la consommation énergétique.....	62
6.4.1 <i>Résidentiel</i>	62
6.4.2 <i>Tertiaire</i>	64
6.4.3 <i>Transport</i>	64
6.5 Capacités des filières	65
6.5.1 <i>Bâtiment</i>	65
6.5.2 <i>Transport</i>	66
6.6 Compatibilité et gisements disponibles.....	67
6.6.1 <i>Bâtiment</i>	67
6.6.2 <i>Industrie</i>	68

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution des émissions de CO ₂ en France.....	10
Figure 2 : Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2014	12
Figure 3 : Mix énergétique final de la France en 2014.....	13
Figure 4 : Répartition des émissions de CO ₂ en France en 2015.....	14
Figure 5 : Contenus carbone des énergies	15
Figure 6 : Parts de marché des énergies de chauffage dans le résidentiel neuf.....	16
Figure 7 : Evolution de la consommation d'énergie dans le résidentiel dans le cadre macroéconomique de référence.....	17
Figure 8 : Evolution des émissions de CO ₂ dans le résidentiel dans le cadre macroéconomique de référence .	18
Figure 9 : Evolution de la consommation d'énergie dans le tertiaire dans le cadre macroéconomique de référence.....	19
Figure 10 : Evolution des émissions de CO ₂ dans le tertiaire dans le cadre macroéconomique de référence ...	19
Figure 11 : Répartition de la demande de mobilité pour le transport de voyageurs.....	20
Figure 12 : Répartition du volume de marchandises transporté	21
Figure 13 : Evolution de la consommation d'énergie dans le transport dans le cadre macroéconomique de référence.....	21
Figure 14 : Evolution des émissions de CO ₂ dans le transport dans le cadre macroéconomique de référence ..	22
Figure 15 : Segmentation de l'industrie selon la nomenclature NCE de l'INSEE.....	23
Figure 16 : Evolution de la consommation d'énergie dans l'industrie dans le cadre macroéconomique de référence.....	23
Figure 17 : Evolution des émissions de CO ₂ dans l'industrie dans le cadre macroéconomique de référence	24
Figure 18 : Evolution de la consommation d'énergie dans l'agriculture dans le cadre macroéconomique de référence.....	24
Figure 19 : Evolution des émissions de CO ₂ dans l'agriculture dans le cadre macroéconomique de référence..	25
Figure 20 : Evolution de la consommation d'énergie finale dans le cadre macroéconomique de référence.....	26
Figure 21 : Evolution des émissions de CO ₂ dans le cadre macroéconomique de référence.....	27
Figure 22 : Liste des actions disponibles dans le résidentiel.....	29
Figure 23 : Exemple de jeu d'hypothèses associé à une action	29
Figure 24 : Décomposition du parc de logements	30
Figure 25 : Niveau de consommation d'énergie par type de logement.....	31
Figure 26 : Liste des actions disponibles dans le tertiaire.....	32
Figure 27 : Décomposition du parc tertiaire	33
Figure 28 : Consommation surfacique par type de tertiaire	33
Figure 29 : Liste des actions disponibles dans le transport.....	34
Figure 30 : Liste des actions disponibles dans l'industrie	35
Figure 31 : Consommation de l'industrie agroalimentaire par usage et par combustible	36

Figure 32 : Contenus carbone des énergies	37
Figure 33 : Evolution du niveau de la contribution climat énergie	38
Figure 34 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans le bâtiment	38
Figure 35 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans l'industrie	39
Figure 36 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans le transport	39
Figure 37 : Vision d'ensemble du modèle développé	40
Figure 38 : Exemples de la rentabilité de quelques mesures dans une maison individuelle au fioul en 2023	45
Figure 39 : Exemple de matrice de compatibilité utilisée	46
Figure 40 : Contribution à l'atteinte de l'objectif CO ₂ de chacun des secteurs	48
Figure 41 : Evolution du mix de demande énergétique final entre 2015 et 2030	49
Figure 42 : Top 10 des actions (contribution à l'objectif de réduction des émissions de CO ₂	50
Figure 43 : Bilan total du financement de la transition énergétique	51
Figure 44 : Exemples de déploiement des actions dans la trajectoire optimisée	53
Figure 45 : Répartition du parc de résidences principales en 2015	54
Figure 46 : Surface moyenne des parcs considérés	54
Figure 47 : Consommation chauffage et eau chaude sanitaire par logement	55
Figure 48 : Parc tertiaire en 2015 et surface moyenne des logements	56
Figure 49 : Consommations surfaciques moyennes par usage	56
Figure 50 : Parc de véhicules pour le transport de voyageurs en 2015	57
Figure 51 : Parc de véhicules pour le transport de marchandises	57
Figure 52 : Durée de vie des actions dans le transport	57
Figure 53 : Parcours moyen annuel par type de transport	58
Figure 54 : Taux de remplissage pour le transport de voyageurs	58
Figure 55 : Volume moyen de marchandises transportées	58
Figure 56 : Consommations d'énergie de l'industrie	59
Figure 57 : Coûts d'investissement des actions dans le résidentiel	60
Figure 58 : Evolution des coûts d'investissement dans le transport	61
Figure 59 : Surcoûts d'investissement des actions dans l'industrie	61
Figure 60 : Coûts de maintenance des actions du bâtiment	62
Figure 61 : Coûts de maintenance des actions du transport	62
Figure 62 : Réductions de la consommation d'énergie des actions dans les maisons individuelles	63
Figure 63 : Réductions de la consommation d'énergie des actions dans les logements collectifs	63
Figure 64 : Evolution des rendements des technologies entre 2015 et 2030	64
Figure 65 : Réductions de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire	64
Figure 66 : Consommations unitaires du transport	65
Figure 67 : Capacités initiales et évolution des filières dans le résidentiel	66

Figure 68 : Capacités initiales des filières pour le transport	67
Figure 69 : Taux d'évolution des filières dans le transport	67
Figure 70 : Matrice de compatibilité entre actions et énergies de chauffage	68
Figure 71 : Matrice de compatibilité entre actions et types de logements	68
Figure 72 : Part des usages dans le gisement disponible	69

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adoptée en août 2015, fixe à la France un objectif de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030. L'analyse de l'évolution de la demande d'énergie est un préalable indispensable pour évaluer l'efficacité des politiques menées au regard de l'atteinte de cet objectif climatique. En effet, **la demande d'énergie est le premier levier de la transition énergétique** : elle structure l'offre d'énergie et ses réseaux de transport et de distribution.

Les analyses sur les trajectoires d'évolution de la demande d'énergie menant à cet objectif demeurent néanmoins partielles ou peu détaillées. Un certain nombre d'entre elles se limite en effet à l'étude d'un secteur d'activité économique ou d'une seule énergie. Les scénarios gouvernementaux sur lesquels se base la LTECV sont, quant à eux, le résultat d'une vision macroéconomique peu explicite sur le déclenchement et le financement des investissements nécessaires à l'atteinte de l'objectif de la loi au niveau microéconomique.

Or, le succès de la transition énergétique repose sur la connaissance approfondie de ses enjeux à tous les niveaux :

- Les gisements accessibles de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂¹
- Les impacts et les coûts des actions disponibles d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies
- La capacité des acteurs à financer les investissements de transition énergétique
- La capacité des filières à déployer les technologies les plus efficaces

La maîtrise de ces enjeux est le préalable incontournable de la mise en place d'une stratégie de pilotage de la transition énergétique.

Cette étude est née du souhait de l'UFE de verser dans le débat public des éléments de réflexion sur les enjeux du pilotage et du financement de la transition énergétique. Elle cherche ici à **quantifier l'ensemble des actions qui seront nécessaires à la réalisation de l'objectif fixé par la loi** et appréhende la question de l'efficacité énergétique et climatique dans la posture d'un planificateur social, économiquement rationnel et disposant d'une information fiable.

L'objectif de l'étude est ainsi de construire une trajectoire optimisée économiquement qui permettrait de réaliser la transition énergétique au moindre coût pour la collectivité. **Cette trajectoire priorise le déploiement d'actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies sous une contrainte de minimisation des coûts**, de façon à atteindre l'objectif de réduction de 40 % des émissions de CO₂ entre 1990 et 2030. Une fois cette trajectoire définie, l'UFE s'interroge sur son financement pour chaque acteur économique.

Le scénario proposé est volontariste, ambitieux et guidé par la volonté d'atteindre l'objectif. Il ne s'agit pas ici de réaliser une étude prévisionnelle, mais bien de **rendre compte des efforts qu'il serait nécessaire de mettre en œuvre sur la demande d'énergie pour respecter la cible fixée par la LTECV.**

En établissant et en analysant cette trajectoire d'atteinte de l'objectif climatique de la LTECV à travers des actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies, **cette étude quantitative offre un éclairage unique sur la mise en œuvre et le financement de la transition énergétique.**

¹ L'énergie étant le cœur de métier de l'UFE, le périmètre de l'étude est restreint aux émissions de CO₂. Les émissions de CO₂ représentent 75 % des émissions de GES en France. Les autres GES (CH₄, N₂O...) sont essentiellement d'origine agricole.

1 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Atteindre l'objectif climatique de la loi relative à transition énergétique à l'horizon 2030 exige, comparativement à la tendance historique, des actions ambitieuses à court, moyen et long termes. Pour cela, plusieurs approches et plusieurs trajectoires d'évolution de la demande d'énergie peuvent être adoptées entre aujourd'hui et 2030.

Dans ce contexte, cette étude quantitative vise à apporter des réponses à plusieurs questions essentielles :

- **Quelle serait la trajectoire optimale d'évolution de la demande d'énergie pour réussir la transition énergétique ?**
- **Comment piloter cette évolution de façon rationnelle dans un contexte de contraintes économiques, budgétaires et financières ?**
- **Comment aider les acteurs économiques à investir dans les actions les plus efficaces ?**

L'étude est constituée de deux volets :

1. **La définition d'un cadre macroéconomique de référence**, permettant de déterminer l'évolution « hors effort climatique » des émissions de CO₂ sur la période 2015-2030.
2. **L'optimisation de la trajectoire de déploiement des actions d'efficacité climatique** permettant de respecter l'objectif climatique de la LTECV.

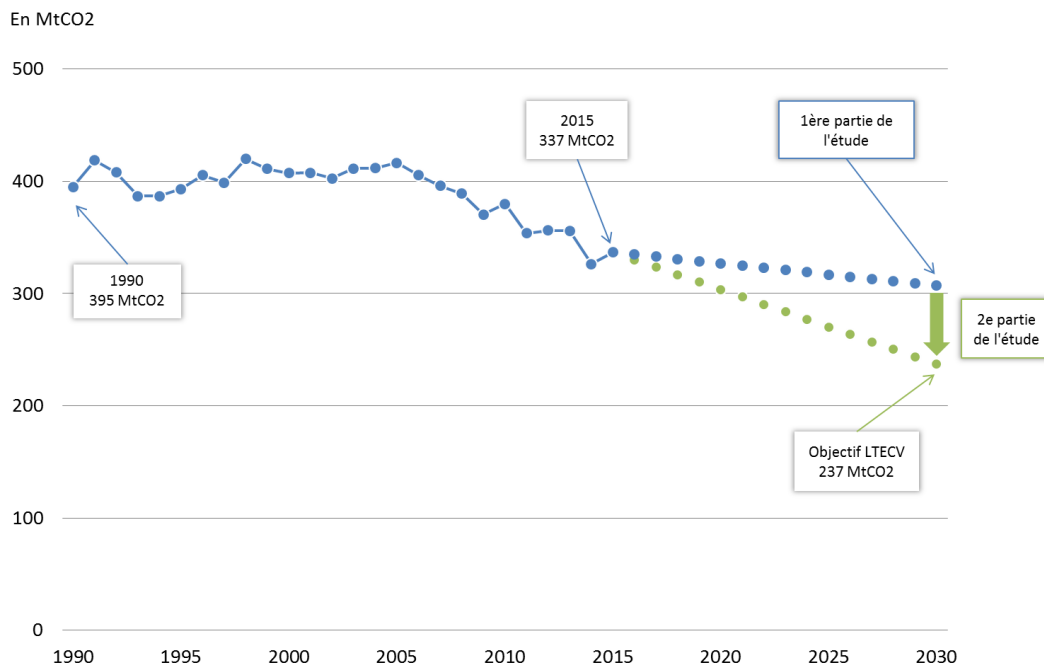


Figure 1 : Evolution des émissions de CO₂ en France
(Source : CITEPA, Analyse UFE)

L'évaluation des tendances d'évolution des émissions de CO₂ à l'horizon 2030 représente la première partie de l'étude. Elle prend en compte les changements démographiques, la croissance et le changement de structure de l'activité économique, le renouvellement des parcs de logements et de véhicules, les normes en vigueur ou encore l'évolution des comportements.

Cette analyse permet de chiffrer l'objectif climatique réel fixé par la loi relative à la transition énergétique, indépendamment de l'évolution naturelle de l'économie française.

Une fois déterminé le niveau de réduction des émissions de CO₂ qui devra être atteint en 2030, **l'analyse consiste alors à déterminer la trajectoire de décarbonation la moins coûteuse.**

Grâce à un modèle annualisé et intégré sur l'ensemble des énergies (pétrole, électricité, gaz, biomasse, biocarburants....) et tous les secteurs économiques² (résidentiel, tertiaire, transport, industrie) en France, l'UFE établit une dynamique de transition sur une période allant de 2015 à 2030, optimisée selon la rationalité économique des acteurs.

Cette trajectoire visant à réduire les émissions de CO₂ au moindre coût est le résultat de l'interclassement et du déploiement d'actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies³ sur l'ensemble de l'économie française. Ce détail d'analyse permet de disposer d'une vision précise de l'étendue des actions qui permettent de mettre en œuvre la transition énergétique.

Suite au calcul de cette dynamique de transition, les travaux d'analyse permettent ensuite de mettre en évidence :

- La trajectoire de déploiement des actions les plus efficaces ;
- La contribution à l'atteinte de l'objectif de la loi de chacune des actions déployées ;
- La trajectoire de réduction des émissions de CO₂ ;
- La trajectoire de réduction de la consommation d'énergie ;
- Les niveaux d'investissements nécessaires à l'atteinte de l'objectif visé ;
- Les besoins de développement des filières des technologies bas carbone.

² Hors agriculture, dont la consommation d'énergie est évaluée dans la première partie de l'étude

³ Une substitution entre énergies, ou transfert d'usage, consiste à substituer une énergie finale par une autre pour un même usage. Il s'agit par exemple de remplacer une chaudière au fioul par une chaudière au gaz ou une voiture thermique fonctionnant avec un carburant fossile par une voiture électrique.

2 LE CADRE MACROECONOMIQUE DE REFERENCE

Afin de déterminer l'effort réel que représente l'objectif de la LTECV sur les émissions de CO₂ d'ici à 2030, il est nécessaire, dans un premier temps, d'estimer leur évolution **hors effort d'efficacité énergétique ou de substitution entre énergies**. Les émissions de CO₂ de l'économie française dépendent en effet d'un certain nombre de paramètres qu'il est nécessaire de prendre en compte pour mesurer l'importance des efforts de décarbonation à mettre en œuvre.

Dans cette première partie de l'étude, l'UFE a déterminé l'évolution de l'environnement macroéconomique de référence entre 2015 et 2030. Cette évolution implique la prise en compte des déterminants de l'évolution de la demande énergétique : la démographie, le niveau et la structure de l'activité économique ou encore l'évolution des comportements.

Les hypothèses retenues pour établir le cadre macroéconomique de référence sont principalement issues des scénarios de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2016 (PPE), d'institutions publiques (SOeS, INSEE ...) ou sont le prolongement de tendances récentes dans les autres cas.

2.1 Etat des lieux

2.1.1 Consommation d'énergie finale

La consommation d'énergie finale en France en 2014 s'est élevée à 1 742 TWh, répartis de la façon suivante :

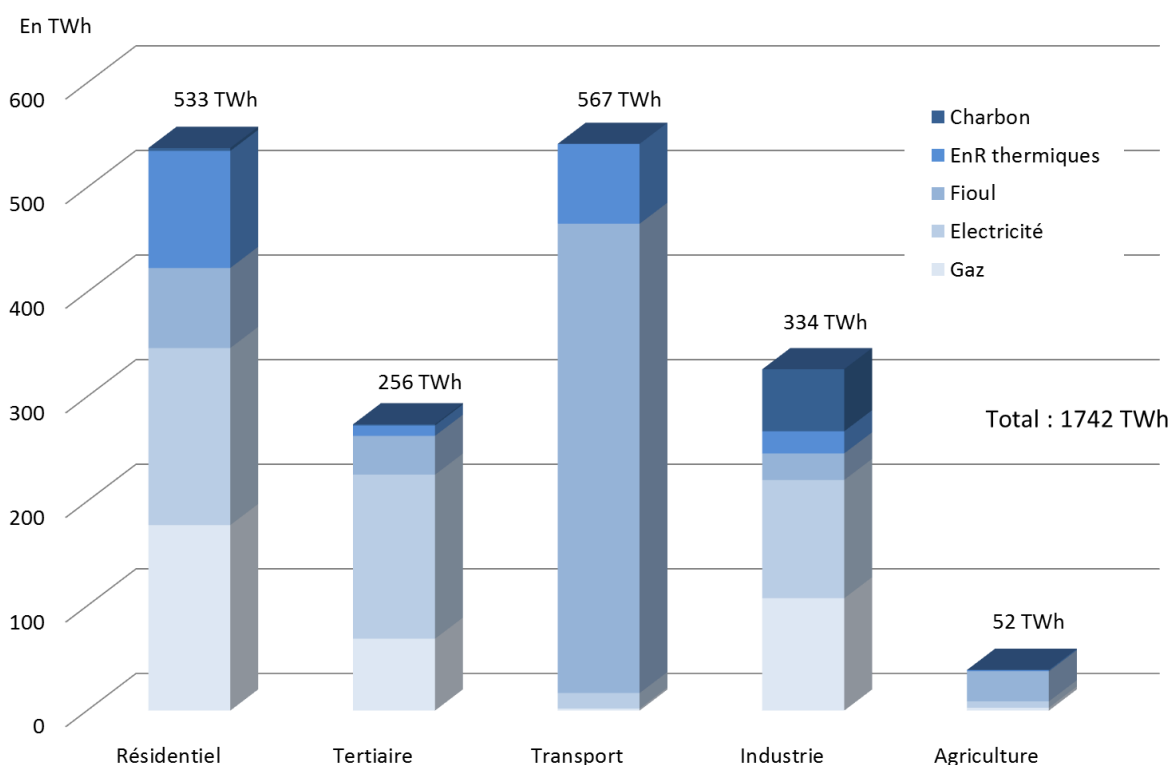


Figure 2 : Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2014
(Source : SOeS)

Le secteur du bâtiment (résidentiel/tertiaire) est le principal consommateur d'énergie finale en France. Le transport vient ensuite, avec 33 % de l'énergie finale totale consommée.

La décomposition du mix énergétique français est la suivante :

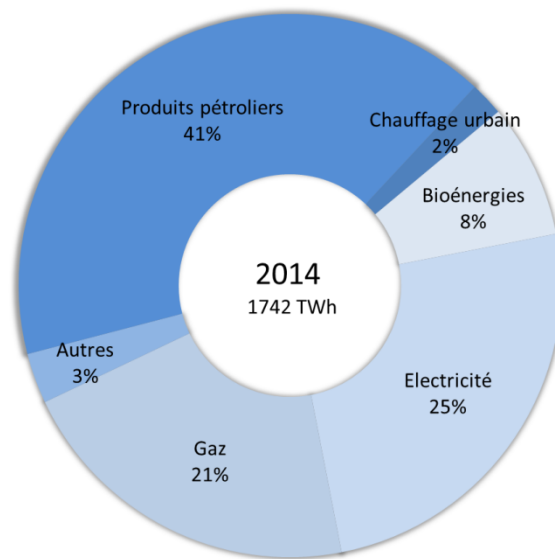


Figure 3 : Mix énergétique final de la France en 2014
(source : SOeS)

Le pétrole est l'énergie la plus consommée en France, avec plus de 40 % du total.

2.1.2 Emissions de CO₂

Les émissions totales de CO₂ de la France s'élevaient à 337 MtCO₂ en 2015⁴ :

⁴ Ces chiffres sont issus de l'inventaire 2016 du CITEPA sur les rejets de CO₂ en France. Le périmètre utilisé est celui du total des émissions hors UTCAF (Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des terres et Foresterie). Les émissions liées à la transformation d'énergie ont été intégrées dans les différents secteurs économiques concernés.

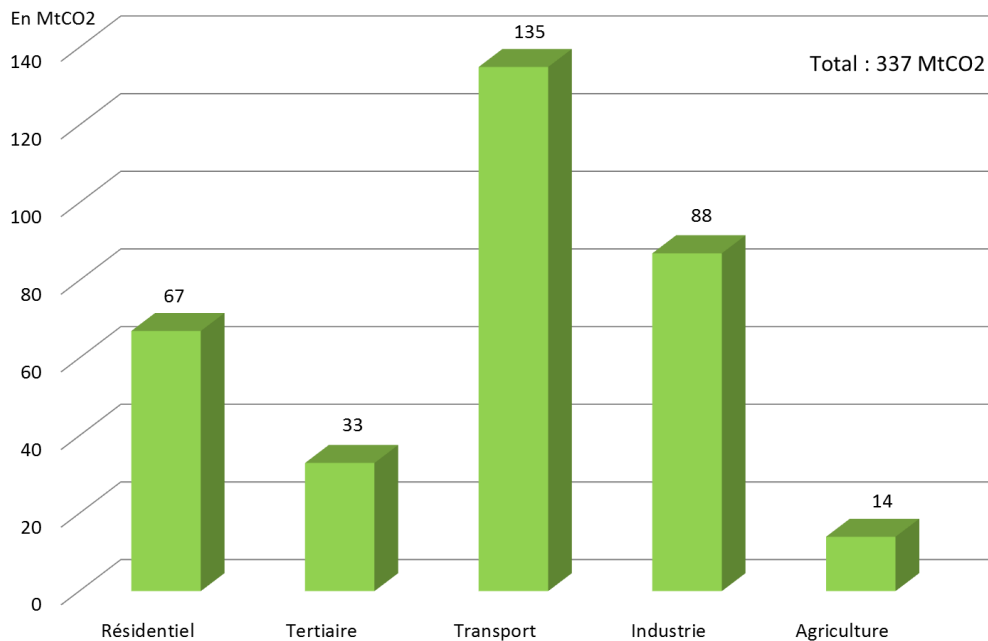


Figure 4 : Répartition des émissions de CO₂ en France en 2015
(Source : CITEPA)

Le transport est le secteur le plus émetteur de CO₂, avec plus de 40 % du total en France. Par ailleurs, le pétrole est à lui seul responsable de près de 60 % du CO₂ rejeté dans l'atmosphère sur le territoire français.

2.2 Evolution du cadre macroéconomique entre 2015 et 2030

2.2.1 Evolution de l'offre d'énergie

L'étude n'intègre pas une modélisation détaillée de l'appareil d'offre énergétique. En revanche, les contenus carbone des énergies permettent de déterminer l'évolution des émissions de CO₂.

Les contenus carbone des énergies en 2015 sont tous issus de la Base Carbone de l'ADEME publiée en novembre 2014⁵.

Pour le contenu CO₂ de l'électricité, la loi fixe un objectif de 40 % de production d'énergies renouvelables en 2030. Toutefois, afin de prévenir les difficultés méthodologiques liées à une évolution du contenu CO₂ de l'électricité sur la période 2015-2030, qui n'est pas le sujet de cette étude, **l'UFE prend le parti de considérer comme stable les contenus par usage de l'électricité définis dans la Base Carbone de l'ADEME⁶.**

Les objectifs fixés par la PPE d'insertion d'énergies renouvelables sur l'offre des énergies fossiles ont été intégrés à l'évolution du contenu carbone de ces énergies :

- 15 % de biocarburants dans les carburants pétroliers (contre 7 % actuellement)
- 10 % de biogaz dans l'ensemble de l'offre de gaz

⁵ Le périmètre retenu est celui du contenu carbone pour la combustion.

⁶ Cette hypothèse est à considérer comme particulièrement conservatrice pour l'électricité, compte tenu que différents facteurs auront tendance à faire baisser le contenu CO₂ de l'électricité, comme la moindre utilisation de centrales thermiques à flamme notamment.

Pour le chauffage urbain, le contenu retenu est celui de l'enquête menée par le SNCU⁷. La PPE prévoit une multiplication par 5 de la production de chaleur renouvelable à l'horizon 2030. Cela correspond à une diminution annuelle de 6 % du contenu carbone des réseaux de chaleur. Cette évolution est conforme à celle observée ces 5 dernières années dans cette même enquête.

Le graphique suivant illustre les contenus en CO₂ des énergies utilisées :

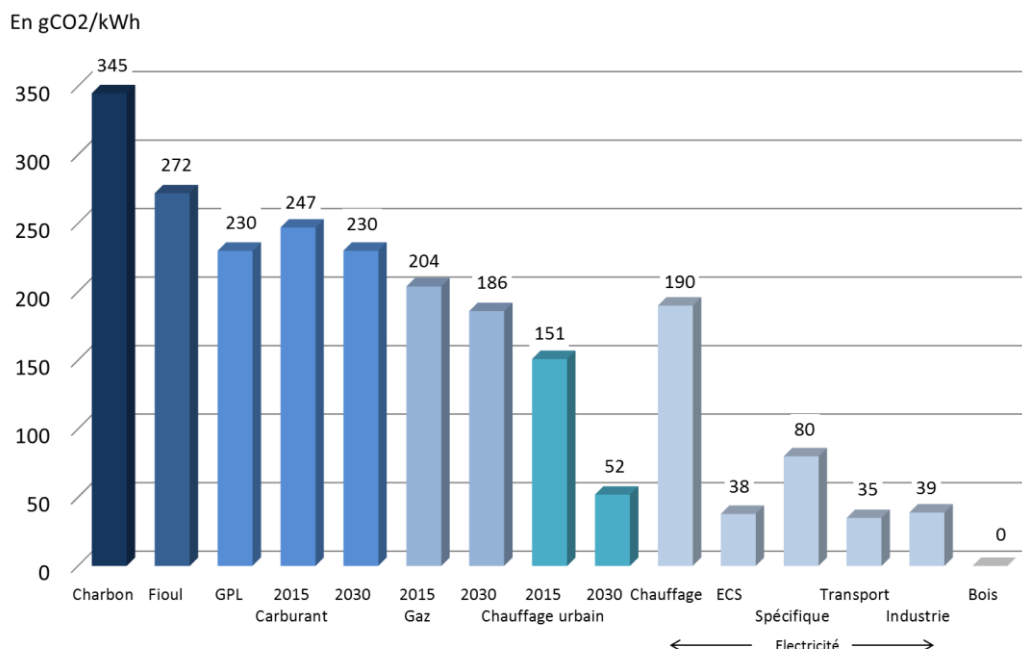


Figure 5 : Contenus carbone des énergies
(Source : ADEME, Base Carbone, 2014 et Calculs UFE)

2.2.2 Démographie et croissance économique

L'UFE a choisi comme hypothèse démographique le scénario de projection central de l'INSEE⁸. Dans cette estimation, **la population s'élèvera à 68 532 000 habitants⁹ en 2030**. Ceci représente une augmentation de plus de 6 % de la population en France entre 2015 et 2030.

L'étude se base par ailleurs sur une croissance constante du PIB de la France entre 2015 et 2030 égale à 1,5 % par an, c'est-à-dire la projection médiane de long terme de l'INSEE. Ce niveau de croissance est le niveau de croissance potentiel, c'est-à-dire le potentiel de croissance de long terme, influencé par la démographie d'une part, et les gains de productivité d'autre part.

Structurellement, cette croissance économique est essentiellement tirée par la hausse de l'activité dans le secteur tertiaire, à l'instar de l'évolution historique récente.



⁷ SNCU, Enquête annuelles sur les réseaux de chaleur et de froid, 2014.

⁸ INSEE, Evaluer la productivité globale des facteurs : l'apport d'une mesure de la qualité du capital et du travail, 2013.

⁹ Le périmètre géographique retenu est celui de la France métropolitaine.

2.2.3 Evolution du résidentiel

En 2015, le parc de résidences principales comptait plus de 27 millions de logements, qui sont répartis de la façon suivante¹⁰ : 15 millions de maisons individuelles et 12 millions de logements collectifs, pour une surface totale égale à 2,5 milliards de m².

Conformément à la tendance actuelle, le parc de logements se renouvelle. Les constructions de nouveaux logements s'élèvent à 1,2 % du parc par an, ce qui représente plus de 330 000 nouvelles habitations chaque année¹¹.

Tous les nouveaux logements construits entre 2015 et 2030 sont considérés comme des habitations respectant les normes de bâtiment basse consommation (BBC). Cela correspond à une consommation maximale de 50 kWh d'énergie primaire par m².

Les hypothèses de part de marché des énergies de chauffage dans le neuf sont les suivantes sur l'ensemble de la période :

	Gaz	Electricité	EnR thermiques
Logements collectifs	60%	30%	10%
Maisons individuelles	30%	50%	20%

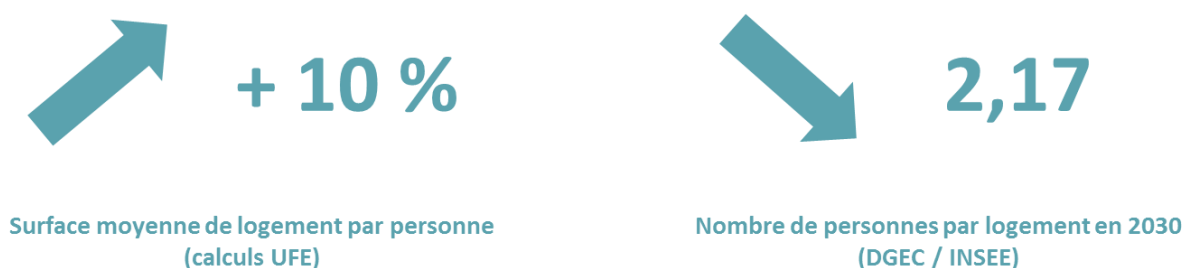
Figure 6 : Parts de marché des énergies de chauffage dans le résidentiel neuf

On considère que les logements neufs sont chauffés de la façon suivante :

- Gaz : chaudière gaz à condensation,
- Electricité : 80 % de pompe à chaleur et 20 % de convecteur électrique performant¹²,
- Energies renouvelables thermiques : raccordement à un réseau de chaleur pour les logements collectifs, chaudière biomasse pour les maisons individuelles.

Dans le même temps, une partie du parc de logements existant est détruite, à raison de 0,2 % par an. Cela représente un total approchant les 50 000 destructions chaque année.

L'évolution du parc considérée met en évidence deux tendances majeures qui sont actuellement observées dans le secteur résidentiel : la réduction du nombre de personnes par ménage, établie dans les prévisions de l'INSEE et de la DGEC¹³, ainsi que l'augmentation de la surface habitable disponible par personne. En effet, avec l'évolution naturelle du bâtiment résidentiel ici considérée par l'UFE entre 2015 et 2030, le nombre de personnes par logement diminue de 9 %, et la surface moyenne de logement par personne augmente de 10 %.



¹⁰ INSEE, Base de données logement, 2013.

¹¹ RTE d'après BatiEtude.

¹² Il s'agit de la répartition actuelle du chauffage électrique dans le neuf, constatée dans le Bilan Prévisionnel 2016 de RTE.

¹³ ADEME d'après DGEC / INSEE.

La consommation d'électricité spécifique par logement est considérée stable sur la période, égale à 2 730 kWh/logement.

Les dispositions légales concernant l'individualisation des frais de chauffage dans les logements collectifs d'ici 2025 ont également été prises en compte. Cette mesure permet une réduction de 5 % de la consommation d'énergie de chauffage sur l'ensemble des logements collectifs au chauffage collectif.

Dans ce cadre macroéconomique de référence, aucune hypothèse de travaux d'efficacité énergétique ou de substitution entre énergies de chauffage dans le bâti existant n'est retenue : elles relèveront de l'analyse effectuée dans la deuxième partie de l'étude. Au total, la consommation du secteur résidentiel évolue de la façon suivante :

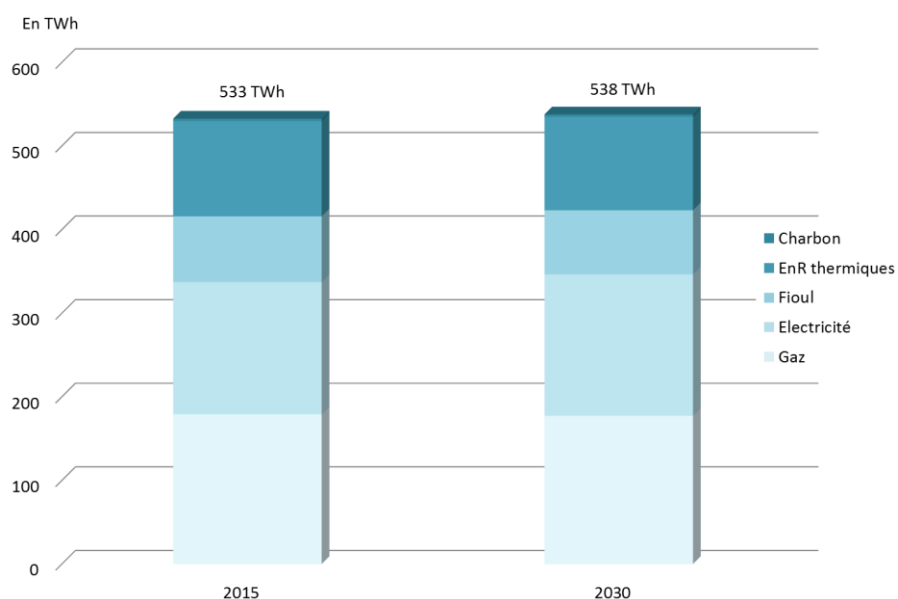


Figure 7 : Evolution de la consommation d'énergie dans le résidentiel dans le cadre macroéconomique de référence

La consommation énergétique du résidentiel augmente de 5 TWh sur la période. Ce résultat est lié aux effets volumes : bien que les nouveaux logements soient économes en énergie, il y a 5 millions de logements de plus en 2030 qu'en 2015.

Les émissions de CO₂ évoluent à la fois en raison de l'évolution de la structure de la consommation d'énergie et des objectifs d'intégration d'énergies renouvelables qui permettent notamment de réduire le contenu CO₂ du gaz.



Figure 8 : Evolution des émissions de CO₂ dans le résidentiel dans le cadre macroéconomique de référence

Au total, malgré une légère hausse de la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ diminuent de 2 MtCO₂ dans le résidentiel dans le cadre macroéconomique de référence.

2.2.4 Evolution du tertiaire

Le parc tertiaire compte actuellement 1,8 millions de locaux, qui totalisent 948 millions de m² de surface chauffée¹⁴.

Principalement tirée par la croissance économique, la croissance de la surface tertiaire est de 1,2 % par an¹⁵. Les parts de marché dans le neuf sont réparties à 50 % pour le gaz et 50 % pour l'électricité. A l'image de l'hypothèse prise en compte pour le résidentiel, les constructions neuves respectent les normes de bâtiment basse consommation.

Le taux de destruction du parc retenu est de 0,2 %, conformément à la tendance récente.

Au total, la surface tertiaire passe sur l'ensemble de la période de 948 Mm² à 1123 Mm².

La consommation d'électricité spécifique surfacique est considérée stable sur la période, égale à 100 kWh/m².

Au final, hors actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies, la consommation du secteur tertiaire évolue donc de la façon suivante :

¹⁴ CEREN, Suivi du parc et des consommations d'énergie dans le secteur tertiaire en 2011, 2012.

¹⁵ Ceci est conforme aux hypothèses du Bilan Prévisionnel 2016 de RTE.

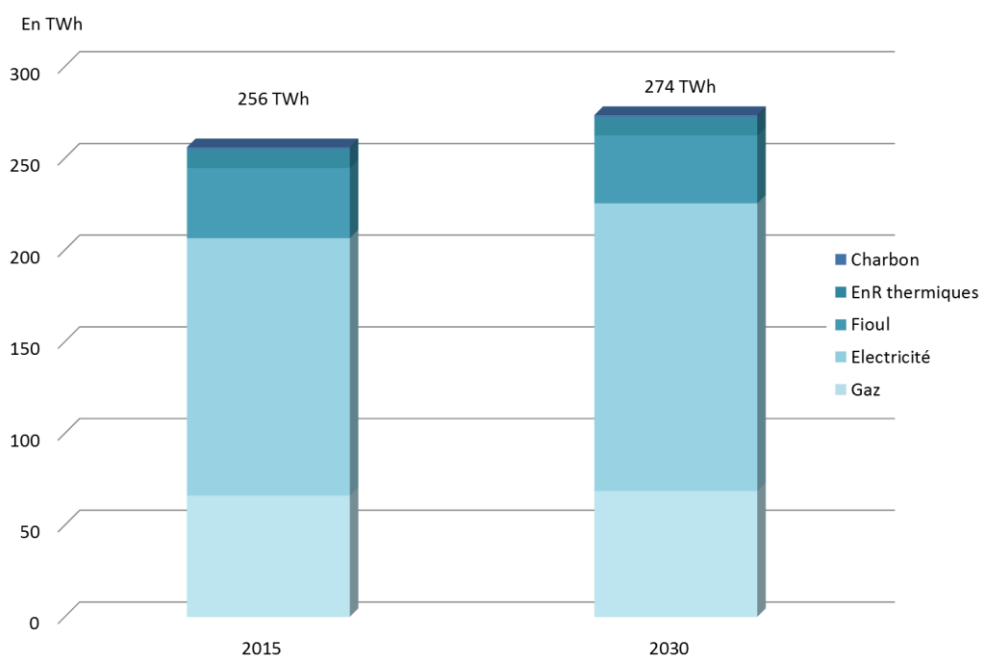


Figure 9 : Evolution de la consommation d'énergie dans le tertiaire dans le cadre macroéconomique de référence

Le tertiaire étant le principal moteur de la croissance économique de l'économie française sur la période 2015-2030, la consommation de ce secteur augmente de 18 TWh, principalement au profit du gaz et de l'électricité.

L'évolution des émissions de CO₂ est illustrée par le graphique suivant :

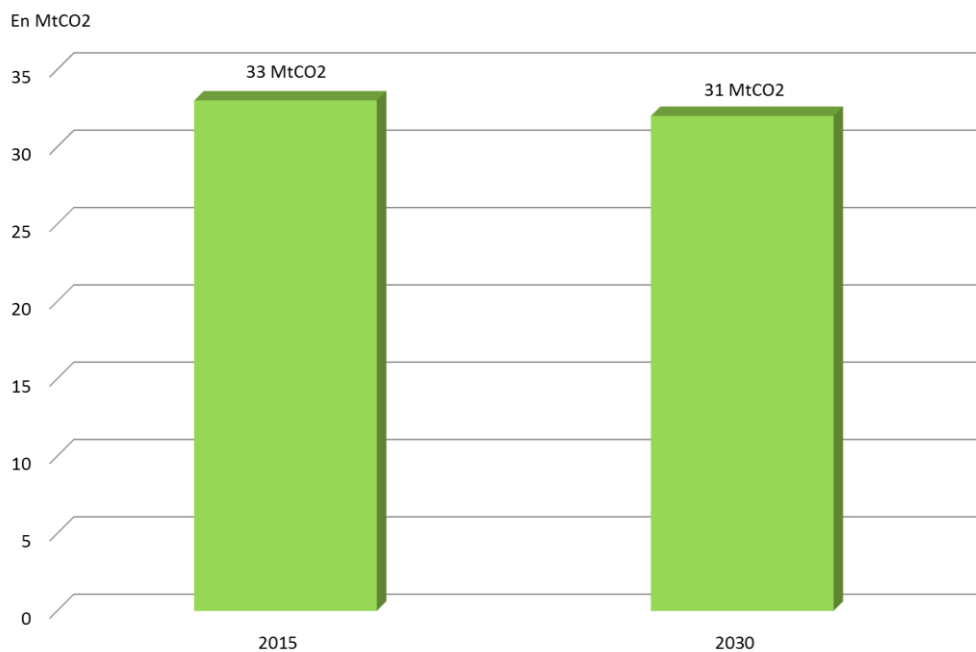


Figure 10 : Evolution des émissions de CO₂ dans le tertiaire dans le cadre macroéconomique de référence

Au total, les émissions de CO₂ diminuent de 1 MtCO₂ dans le tertiaire dans le cadre macroéconomique de référence.

2.2.5 Evolution du transport

Dans le secteur du transport, la première partie de l'étude permet de déterminer la structure globale de la demande de mobilité. Les hypothèses d'évolution sont issues de tendances récentes ou de la Stratégie de Développement de la Mobilité Propre (SDMP), un des volets de la PPE 2016.

Evolution de la demande de mobilité

Pour cette analyse, **le transport est segmenté** de la façon suivante :

- Transport terrestre de voyageurs,
- Transport terrestre de marchandises,
- Transport aérien et maritime.

Transport terrestre de voyageurs :

L'étude retient l'hypothèse d'une stabilité de la demande de mobilité par personne entre 2015 et 2030. Cette hypothèse correspond à celle de la SDMP. La croissance démographique conduit cependant à une augmentation de la demande de mobilité totale.

De plus, une évolution des comportements est intégrée dans le scénario, prenant ainsi en compte deux paramètres-clés de la SDMP d'ici 2030 :

- **Augmentation de 10 % des taux de remplissage des véhicules particuliers**
- **Report modal de 2 % de la mobilité des véhicules particuliers vers le transport collectif**

Ces tendances conduisent à la répartition de mobilité suivante entre 2015 et 2030 :

Mode de transport	2015	2030
Véhicule particulier	804	843
Transport collectif routi	52	61
Transport ferroviaire	109	126
Total	965	1030

Figure 11 : Répartition de la demande de mobilité pour le transport terrestre de voyageurs (en Md km.voyageurs)

Transport terrestre de marchandises :

L'évolution du volume total de marchandises transporté est parfaitement corrélée à l'évolution du PIB, c'est-à-dire qu'il croît au même rythme que le PIB : + 1,5 % par an entre 2015 et 2030.

L'étude retient deux hypothèses structurantes de la SDMP pour déterminer la structure de la demande pour le fret de marchandises à l'horizon 2030 :

- **Augmentation de 10 % du taux de chargement des poids lourds**
- **Report modal de 7 % du fret routier vers le fret ferroviaire**

Le choix de ces hypothèses conduit à la répartition suivante pour le fret de marchandises en 2030 :

Mode de transport	2015	2030
Routier	301	351
Ferroviaire	34	66
Fluvial	8	11
Total	341	428

Figure 12 : Répartition du volume de marchandises transporté (en Md t.km)

Transport aérien et maritime :

Ce secteur n'est pas traité spécifiquement par l'UFE. Le volume de consommation d'énergie a été considéré stable sur l'ensemble de la période¹⁶.

Evolution des technologies et des carburants

L'efficacité énergétique de l'ensemble des moteurs thermiques s'améliore de 1 % par an sur toute la période considérée, ce qui est facteur de réduction de la consommation d'énergie.

Pour définir le cadre macroéconomique de référence, les objectifs d'incorporation de biocarburants de la PPE, dont la part devra s'élever à 15 % des carburants pétroliers en 2030, ont été intégrés à l'analyse.

Au total, la consommation d'énergie dans le transport évolue comme suit :

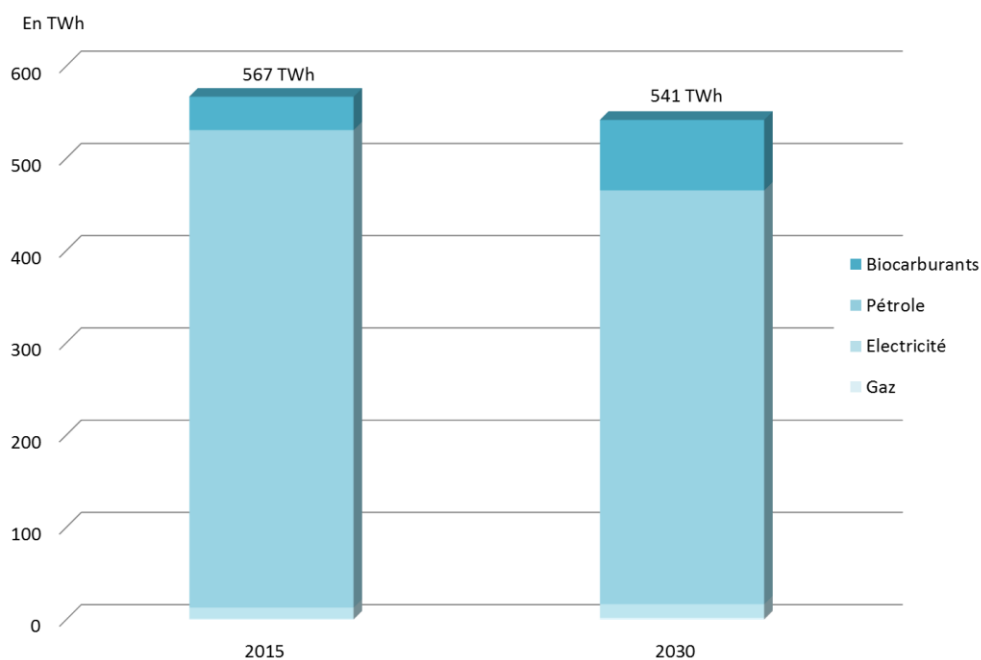


Figure 13 : Evolution de la consommation d'énergie dans le transport dans le cadre macroéconomique de référence

La consommation d'énergie du transport diminue de 26 TWh sur la période. Cela s'explique en grande partie par l'amélioration des rendements des moteurs plus rapide que la hausse des besoins de mobilité. De plus, avec l'intégration des biocarburants, les émissions de CO₂ diminuent de 18 MtCO₂, comme le montre le graphique suivant :

¹⁶ Pour rappel, seules les émissions de CO₂ liées au transport intérieur sont comptabilisées.



Figure 14 : Evolution des émissions de CO₂ dans le transport dans le cadre macroéconomique de référence

2.2.6 Evolution de l'industrie

Le niveau de l'activité du secteur industriel est considéré stable en volume sur l'ensemble de la période étudiée. La part de l'industrie dans le PIB passe donc de 9,9 % en 2015 à 7,9 % en 2030, avec un volume total de 208 Md€. Afin de prendre en compte les spécificités du secteur industriel en matière de profils énergétiques, le parc a été segmenté à partir de la nomenclature d'activité particulière pour les consommations d'énergie (NCE)¹⁷, c'est-à-dire 22 segments.

¹⁷ Cette segmentation provient de l'INSEE.

NCE	Secteur industriel
E12 / E13 / E14	Industrie agro-alimentaire
E16	Sidérurgie
E18	Métallurgie non ferreux
E19	Minéraux Divers
E20	Ciment
E21	Mat. Construction
E22	Industrie du verre
E23	Engrais
E24	Chimie minérale
E25	Plastiques
E26	Autre chimie organique
E28	Parachimie
E29	Travail des métaux
E30	Construction mécanique
E31	Construction électrique
E32	Construction de véhicule
E33	Construction navale, aéronautique et armement
E34	Textile
E35	Papier
E36	Caoutchouc
E37	Transformation plastique
E38	Divers

Figure 15 : Segmentation de l'industrie selon la nomenclature NCE de l'INSEE

Selon les tendances récentes, les secteurs industriels de pointe et l'agroalimentaire se développent, tandis que les industries lourdes se contractent. L'UFE a donc pris en compte l'évolution de la structure de l'industrie pour déterminer l'évolution de sa consommation.

A chaque secteur industriel sont associées des consommations d'énergie. La mutation de la structure de l'industrie entraîne des variations de la consommation d'énergie. Au total, la consommation d'énergie de l'industrie évolue de la façon suivante :

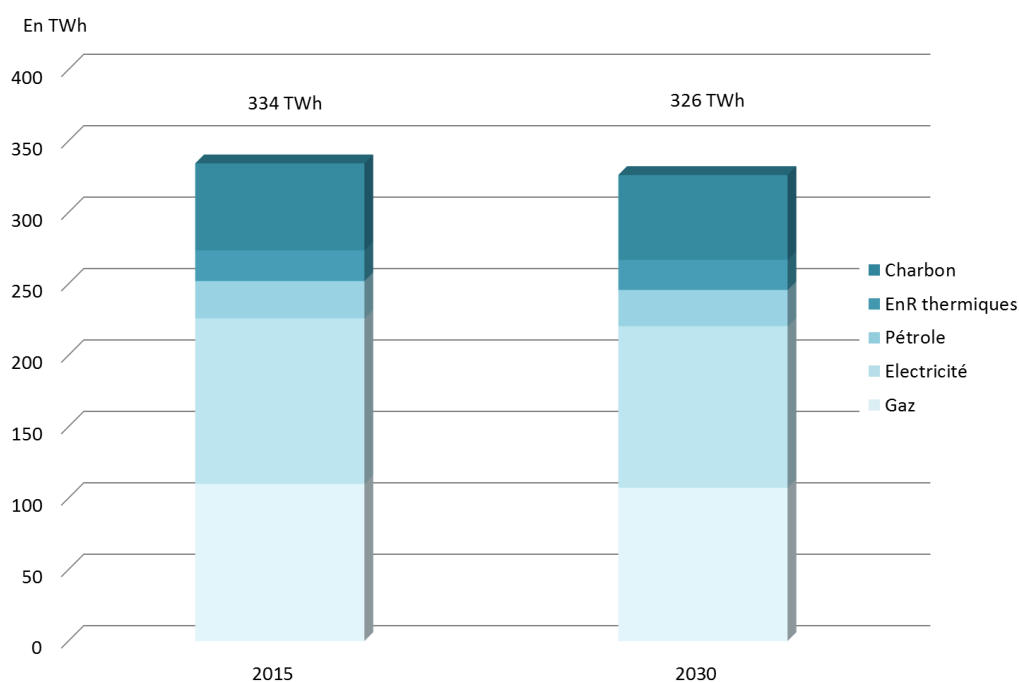


Figure 16 : Evolution de la consommation d'énergie dans l'industrie dans le cadre macroéconomique de référence

Cette faible réduction de la consommation d'énergie se traduit par une baisse des émissions de CO₂ de 6 Mt.



Figure 17 : Evolution des émissions de CO₂ dans l'industrie dans le cadre macroéconomique de référence

2.2.7 Evolution de l'agriculture

Le secteur de l'agriculture, qui ne représente que 4 % de la consommation d'énergie finale en France, n'est pas traité spécifiquement par l'UFE.

Il a été choisi de prendre comme tendance d'évolution de la consommation une réduction de 25 % sur l'ensemble de la période : cette trajectoire est conforme au scénario de référence proposé par la PPE 2016.

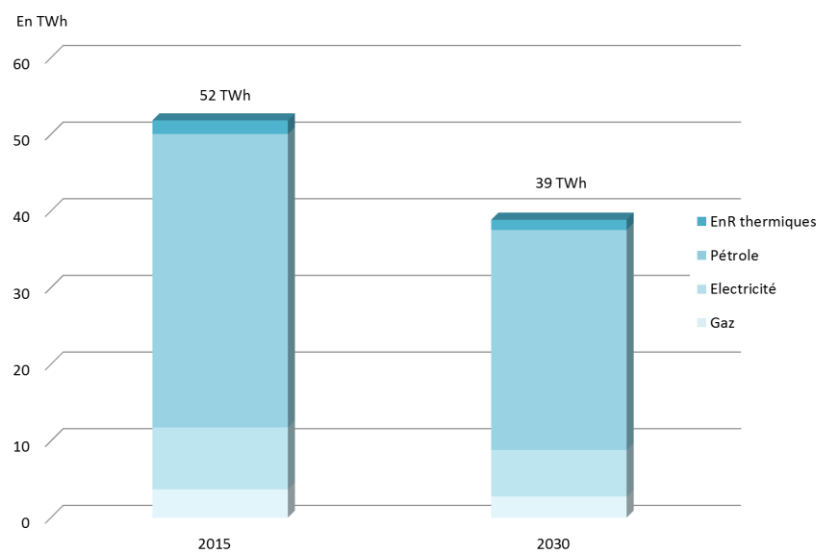


Figure 18 : Evolution de la consommation d'énergie dans l'agriculture dans le cadre macroéconomique de référence

Cette réduction de la consommation d'énergie génère une baisse des émissions de CO₂ de 4 Mt dans le secteur agricole.



Figure 19 : Evolution des émissions de CO₂ dans l'agriculture dans le cadre macroéconomique de référence

2.3 Bilan du cadre macroéconomique de référence en 2030

2.3.1 Bilan sur la consommation d'énergie finale

Au total, **sans effort de réduction de la consommation d'énergie**, mais en considérant uniquement l'évolution de l'activité économique, la croissance des parcs, l'application des normes et les changements de comportement, **la consommation d'énergie passe de 1742 TWh en 2015 à 1718 TWh en 2030**, soit une réduction de 1,4 % de la consommation d'énergie finale sur la période.

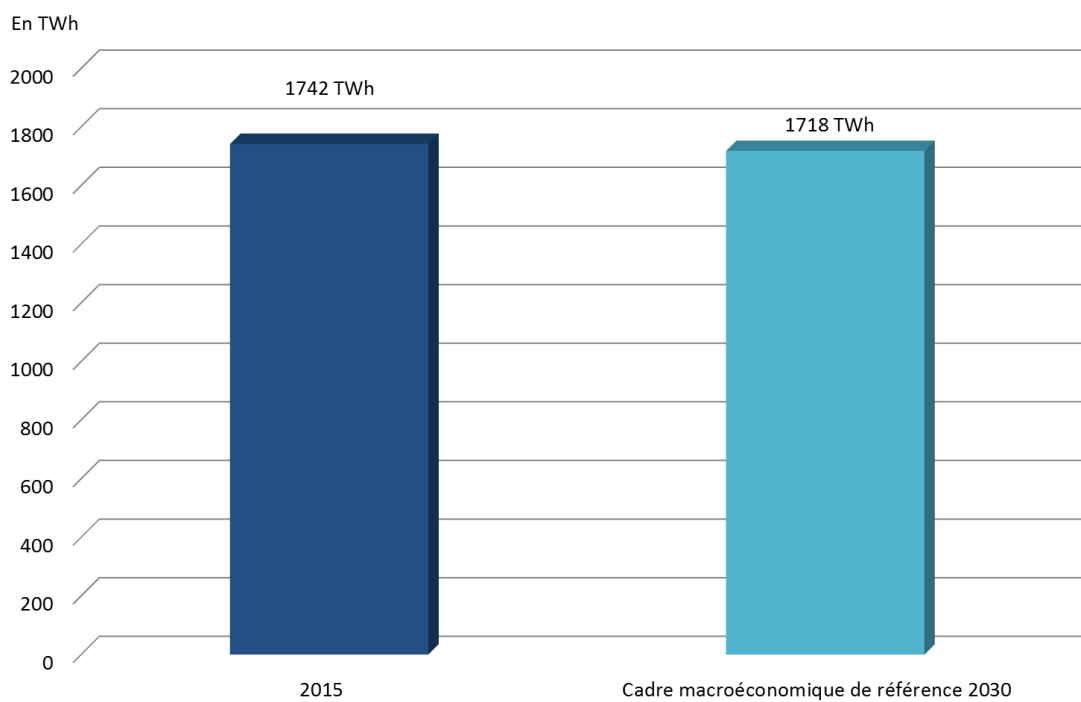


Figure 20 : Evolution de la consommation d'énergie finale dans le cadre macroéconomique de référence

2.3.2 Bilan sur les émissions de CO₂

En prenant en compte les évolutions sur la consommation tendancielle d'énergie et sur les contenus carbone de l'offre d'énergie, les émissions de CO₂ diminuent entre 2015 et 2030 de la façon suivante :

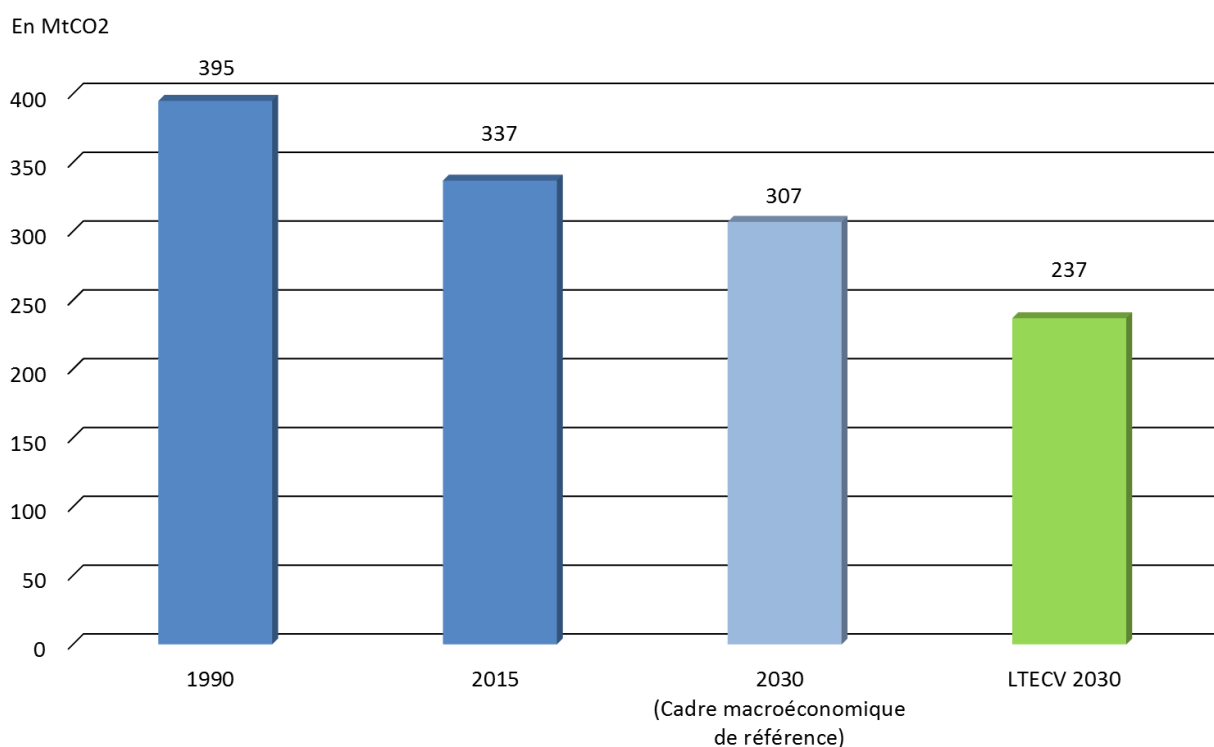


Figure 21 : Evolution des émissions de CO₂ dans le cadre macroéconomique de référence
(Source : CITEPA et calculs UFE)

Au total, les émissions de CO₂ sont réduites de 30 MtCO₂ dans le cadre macroéconomique de référence. Toutefois, cette réduction n'est pas suffisante pour atteindre l'objectif de - 40 % d'émissions de CO₂ en 2030 par rapport à 1990. L'objectif est en effet fixé à 237 MtCO₂ en 2030. **Les actions d'efficacité climatique à mener pour atteindre cet objectif devront permettre de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 70 MtCO₂.**

- 70 MtCO₂

C'est le volume des émissions de CO₂ que les actions d'efficacité climatique devront permettre d'économiser en 2030 par rapport au cadre macroéconomique de référence.

3 CADRE DE MISE EN ŒUVRE DE LA TRAJECTOIRE OPTIMISEE

La première partie de l'étude a permis de déterminer le niveau des efforts climatiques à réaliser pour parvenir à l'objectif climatique de la LTECV : 70 MtCO₂. Pour ce faire, il faut réaliser des actions d'efficacité climatique, c'est-à-dire des actions de réduction de la consommation d'énergie carbonée ou des substitutions entre énergies en faveur des énergies les moins carbonées.

Cette partie de l'étude caractérise les actions d'efficacité climatique disponibles dans l'économie française, ainsi que les gisements sur lesquels ces actions peuvent s'appliquer. Elle décrit également l'évolution des prix des énergies, ainsi que les hypothèses retenues sur les coûts du financement et les taux d'actualisation pour déterminer la trajectoire de décarbonation au moindre coût.

3.1 Les actions disponibles pour atteindre l'objectif climatique de la transition énergétique

Au total, ce sont 50 actions d'efficacité climatique qui sont étudiées par l'UFE. Elles portent sur les principaux secteurs d'activité économique (résidentiel, tertiaire, transport, industrie¹⁸). **L'intégralité des données sur les caractéristiques de ces actions est disponible en annexe.**

Par souci de cohérence entre les différentes études menées ou accompagnées par l'UFE, les caractéristiques des actions dans **le résidentiel et le tertiaire** (durée de vie, compatibilité, impact sur la consommation d'énergie, évolution de performance technologique) sont similaires à celles de l'étude Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France d'Ylios et Frontiers, publiée en 2015, et financée par Engie, l'ADEME, l'UFE et la CDC, ainsi qu'à celles de l'étude Réussir la démarche d'efficacité énergétique en France de l'UFE.

Concernant **l'industrie**, les données sont issues du CEREN. Enfin, pour **le transport**, les données utilisées proviennent principalement du Compte des Transports (SOeS) et de la Stratégie de Développement de la Mobilité Propre, volet de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie.

3.1.1 Actions dans le résidentiel

Les actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies considérées appartiennent à 3 catégories :

- **Les actions d'efficacité énergétique passives**, qui améliorent l'enveloppe thermique des bâtiments,
- **Les actions d'efficacité énergétique actives**, qui optimisent les consommations d'énergie. Elles permettent d'utiliser « mieux » l'énergie, c'est-à-dire d'éviter le gaspillage tout en préservant le confort des occupants,
- **Les actions de changement d'équipements** (systèmes énergétiques), qui correspondent à l'installation d'équipements énergétiques à meilleur rendement ou fonctionnant avec des énergies moins carbonées.

¹⁸ L'agriculture n'est pas traitée spécifiquement dans cette partie de l'étude.

Actions disponibles dans le résidentiel		
Changement de système de chauffage	Amélioration de l'enveloppe thermique	Optimisation active
1. Pompe à chaleur air/air	14. Isolation thermique extérieure (ITE)	20. Robinets thermostatiques
2. Pompe à chaleur air/eau	15. Isolation thermique intérieure (ITI)	21. Régulation programmable sur chauffage central
3. Pompe à chaleur géothermique	16. Isolation des combles	
4. Pompe à chaleur hybride	17. Isolation du plancher	
5. Convecteur électrique performant	18. Remplacement des ouvrants	
6. Chaudière bois	19. Raccordement réseau de chaleur	
7. Chaudière gaz à condensation		
8. Chaudière fioul à condensation		
9. Chaudière micro-cogénération bois		
10. Chaudière micro-cogénération gaz		
11. Eau chaude sanitaire solaire		
12. Eau chaude sanitaire thermodynamique		
13. Appareil à bois		

Figure 22 : Liste des actions disponibles dans le résidentiel

Chacune de ces actions a un coût d'installation, de maintenance ou d'entretien pour certaines, et génère une réduction de la consommation d'énergie (exprimée en pourcentage de la consommation de départ du logement). Le tableau ci-dessous est un exemple des données disponibles pour chacune des actions considérées :

Installation d'une pompe à chaleur air/eau dans une maison individuelle chauffée au fioul		
	Unité	2015
Coût d'investissement	€	11 000
Coût d'entretien annuel	€	200
Durée de vie	années	15
Impact sur la consommation de chauffage	%	- 50 %

Figure 23 : Exemple de jeu d'hypothèses associé à une action

Dans le secteur résidentiel, les actions étudiées pour réduire les émissions de CO₂ portent sur le parc résidentiel existant en 2015 en France métropolitaine, soit plus de 27 millions de logements¹⁹.

Afin de prendre en compte les particularités de chaque bâtiment et de réaliser la modélisation la plus précise possible, une segmentation du parc a été réalisée selon les critères suivants²⁰ :

- **Le type de logement** : maison individuelle, logement collectif (parc privé et social),
- **Le mode de chauffage** : chauffage individuel, chauffage collectif,
- **La performance énergétique** : étiquettes DPE allant de A à G,
- **L'énergie de chauffage** : chauffage urbain, gaz de réseau, électricité, GPL, charbon, fioul, bois²¹.

¹⁹ Pour rappel, Les logements neufs ont été intégrés dans l'analyse du cadre macroéconomique de référence comme des bâtiments basse consommation, sur lesquels l'UFE considère qu'aucune action supplémentaire n'est accomplie au cours de la période.

²⁰ Ce parc de logements est déterminé à partir des données d'ENERBAT, ENGIE, de l'observatoire des DPE et du CEREN.

²¹ Les logements considérés comme chauffés au bois sont les logements dont l'énergie principale de chauffage est le bois.

Type	Etiquette Énergétique	Nombre de logements par combustible de chauffage							
		Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
Maison individuelle	A	103	89 965	76 714	50 266	2 631	9 078	3 340	36 497
	B	105	114 959	85 828	82 659	6 516	13 420	3 549	49 988
	C	761	658 186	445 386	577 053	40 841	81 998	13 584	267 337
	D	2 120	1 590 529	1 130 810	1 345 420	69 114	181 202	36 599	607 861
	E	2 152	1 494 072	1 104 373	1 160 061	46 342	155 613	37 997	527 159
	F	1 071	731 288	564 970	476 152	17 631	69 391	21 112	234 003
	G	401	281 639	221 920	158 921	6 488	25 345	8 813	85 949
Logement Collectif avec Chauffage Individuel	A	NA	77 543	1 972	78 040	4	NA	196	97
	B	NA	104 079	2 275	132 994	7	NA	212	124
	C	NA	505 461	11 119	594 857	31	NA	975	575
	D	NA	1 177 544	26 509	1 367 950	75	NA	2 416	1 368
	E	NA	919 454	20 967	1 076 193	61	NA	1 936	1 066
	F	NA	343 754	8 031	396 106	22	NA	760	409
	G	NA	130 165	3 128	144 673	8	NA	305	161
Logement Collectif avec Chauffage Collectif	A	24 749	77 086	15 085	NA	39	885	268	877
	B	32 608	103 466	17 401	NA	64	1 278	290	1 115
	C	166 504	502 482	85 057	NA	283	6 113	1 333	5 175
	D	380 147	1 170 605	202 794	NA	671	14 173	3 305	12 312
	E	298 506	914 036	160 397	NA	547	11 068	2 647	9 598
	F	110 435	341 728	61 435	NA	202	4 131	1 039	3 677
	G	40 850	129 398	23 931	NA	72	1 551	417	1 445

Figure 24 : Décomposition du parc résidentiel
(Analyse UFE selon données CEREN, DPE, ENERBAT, ENGIE)

L'ensemble de ce parc ainsi décomposé est caractérisé selon deux critères :

- **La surface moyenne du logement,**
- **La consommation surfacique moyenne par usage :** chauffage, eau chaude sanitaire et électricité spécifique²².

Type	Etiquette Énergétique	Consommation C + ECS par logement							
		Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Electricité effet Joule	Electricité PAC	GPL	Charbon	Bois
MI	A	3 797	2 048	1 898	1 348	1 447	2 535	1 633	4 179
MI	B	9 491	5 121	4 746	3 370	3 618	6 338	4 083	10 449
MI	C	17 085	9 218	8 543	6 066	6 512	11 409	7 349	18 808
MI	D	28 474	15 363	14 238	10 110	10 854	19 015	12 249	31 346
MI	E	43 661	23 557	21 832	15 501	16 642	29 156	18 782	48 064
MI	F	62 644	33 799	31 324	22 241	23 878	41 833	26 948	68 961
MI	G	85 423	46 089	42 715	30 329	32 561	57 045	36 747	94 038
LCI	A	NA	1 262	1 091	639	618	NA	1 198	2 632
LCI	B	NA	3 155	2 726	1 598	1 544	NA	2 996	6 579
LCI	C	NA	5 679	4 908	2 876	2 779	NA	5 393	11 843
LCI	D	NA	9 465	8 179	4 794	4 632	NA	8 988	19 738
LCI	E	NA	14 512	12 542	7 351	7 102	NA	13 781	30 265
LCI	F	NA	20 822	17 994	10 547	10 190	NA	19 773	43 423
LCI	G	NA	28 394	24 538	14 382	13 895	NA	26 963	59 213
LCC	A	2 704	1 262	1 091	NA	618	1 504	1 198	2 632
LCC	B	6 760	3 155	2 726	NA	1 544	3 761	2 996	6 579
LCC	C	12 168	5 679	4 908	NA	2 779	6 770	5 393	11 843
LCC	D	20 281	9 465	8 179	NA	4 632	11 283	8 988	19 738
LCC	E	31 097	14 512	12 542	NA	7 102	17 300	13 781	30 265
LCC	F	44 617	20 822	17 994	NA	10 190	24 822	19 773	43 423
LCC	G	60 842	28 394	24 538	NA	13 895	33 849	26 963	59 213

Figure 25 : Consommation d'énergie du parc pour les usages chauffage et eau chaude sanitaire (en kWh)
(Analyse UFE selon données CEREN, DPE, ENERBAT, ENGIE)

Appliquées à des types de logement différents, les différentes actions génèrent des économies d'énergie et de CO₂ différentes, pour des coûts qui varient. **Il est ainsi possible de comparer l'impact de deux actions sur des segments de parc différents.**

3.1.2 Actions dans le tertiaire

Les actions étudiées sur le tertiaire sont les suivantes :

²² L'usage cuisson est intégré au cadre macroéconomique de référence puisqu'aucune action d'efficacité climatique relative à cet usage n'est considérée.

Actions disponibles dans le tertiaire
1. Gestion thermique du bâtiment / Régulation programmable sur chauffage central
2. Pompe à chaleur air/air
3. Pompe à chaleur air/eau
4. Installation chaudière bois
5. Chaudière gaz condensation
6. Isolation thermique extérieure (ITE) / isolation combles
7. Remplacements des ouvrants / double-vitrage
8. Optimisation des systèmes de climatisation
9. Relamping
10. Raccordement réseau de chaleur
11. Rénovation de l'éclairage public

Figure 26 : Liste des actions disponibles dans le tertiaire

En 2015, le parc tertiaire²³ comprend un ensemble de surfaces chauffées de 965 millions de m².

Il a été segmenté selon les caractéristiques suivantes :

- **Le secteur d'activité** : commerces, bureaux, enseignement, santé, culture, café/hôtel/restaurant, sport, transport, habitat communautaire,
- **Le type de propriété** : public, privé,
- **La performance énergétique** : performant (étiquettes DPE A, B, C), moyen (étiquettes DPE D et E), énergivore (étiquettes DPE F et G)²⁴,
- **L'énergie de chauffage** : chauffage urbain, gaz de réseau, électricité, fioul, autres (bois, charbon, GPL).

Ce parc de locaux est déterminé grâce aux données de l'observatoire des DPE et du CEREN. Dans le secteur tertiaire, le parc étudié correspond aux surfaces chauffées des établissements tertiaires.

²³ De la même façon que dans le résidentiel, il est considéré que l'ensemble des surfaces neuves construites entre 2015 et 2030 respecteront des critères de consommation d'énergie performants, raison pour laquelle les actions d'efficacité énergétique et de substitution entre énergies ne portent que sur le parc existant en 2015.

²⁴ Les étiquettes énergétiques n'étant pas disponibles pour toutes les activités, seules les activités Bureaux et Commerces ont été sous-segmentées selon le critère de performance énergétique.

Type	Statut	Performance	Nombre de locaux					Surface moyenne (m ²)
			Chauffage urbain	Gaz de réseau	Electricité	Fioul	Autres	
Commerces	Privé	Performant	1 553	19 148	16 043	12 938	2 070	277
Commerces	Privé	Moyen	6 503	80 198	67 193	54 188	8 670	277
Commerces	Privé	Energivore	14 445	178 155	149 265	120 375	19 260	277
Bureaux	Privé	Performant	1 762	21 729	18 205	14 682	2 349	466
Bureaux	Privé	Moyen	7 802	96 228	80 623	65 019	10 403	466
Bureaux	Privé	Energivore	2 421	29 859	25 017	20 175	3 228	466
Enseignement, recherche	Privé	Toutes performances	1 247	11 842	1 870	4 986	831	1 828
Santé	Privé	Toutes performances	193	1 277	337	530	72	4 560
Cafés Hotels Restaurants	Privé	Toutes performances	13 800	82 800	78 200	48 300	6 900	251
Sport	Privé	Toutes performances	750	2 688	1 625	1 063	125	800
Transport	Privé	Toutes performances	3 600	37 800	21 600	22 500	4 500	287
Bureaux	Public	Performant	846	4 546	3 594	1 374	211	389
Bureaux	Public	Moyen	3 745	20 130	15 917	6 086	936	389
Bureaux	Public	Energivore	1 162	6 246	4 939	1 888	291	389
Enseignement	Public	Toutes performances	4 683	44 490	7 025	18 733	3 122	1 677
Enseignement supérieur	Public	Toutes performances	281	2 669	421	1 124	187	2 169
Hopitaux	Public	Toutes performances	405	2 685	709	1 114	152	6 318
Locaux sportifs	Public	Toutes performances	7 911	28 348	17 141	11 207	1 319	735
Bâtiments culturels	Public	Toutes performances	5 474	19 615	11 860	7 755	912	469
Habitat communautaire	Public	Toutes performances	243	2 794	1 032	1 822	182	3 060
Bâtiments sociaux	Public	Toutes performances	435	5 001	1 848	3 261	326	1 124

Figure 27 : Décomposition du parc tertiaire
(Analyse UFE selon données CEREN, DPE, ENERBAT, ENGIE)

Chacun des segments de ce parc est ensuite caractérisé selon deux critères :

- La surface moyenne des locaux,
- La consommation surfacique moyenne par usage : chauffage, eau chaude sanitaire et électricité spécifique,

Type	Statut	Performance	Chauffage	Chauffage + ECS	Electricité spécifique
Commerces	Privé	Performant	39	55	60
Commerces	Privé	Moyen	78	111	121
Commerces	Privé	Energivore	169	240	262
Bureaux	Privé	Performant	37	49	35
Bureaux	Privé	Moyen	97	128	93
Bureaux	Privé	Energivore	187	247	178
Enseignement, recherche	Privé	Toutes performances	97	109	31
Santé	Privé	Toutes performances	125	200	41
Cafés Hotels Restaurants	Privé	Toutes performances	138	273	111
Sport	Privé	Toutes performances	114	224	19
Transport	Privé	Toutes performances	120	171	149
Bureaux	Public	Performant	37	49	35
Bureaux	Public	Moyen	97	128	93
Bureaux	Public	Energivore	187	247	178
Enseignement	Public	Toutes performances	97	109	31
Enseignement supérieur	Public	Toutes performances	97	109	31
Hopitaux	Public	Toutes performances	125	200	41
Locaux sportifs	Public	Toutes performances	114	224	19
Bâtiments culturels	Public	Toutes performances	120	170	150
Habitat communautaire	Public	Toutes performances	101	148	54
Bâtiments sociaux	Public	Toutes performances	120	190	130

Figure 28 : Consommation surfacique par usage (en kWh/m²)
(Analyse UFE selon données CEREN, DPE, ENERBAT, ENGIE)

De la même façon que pour le secteur résidentiel, chacune des actions a un coût d'installation et génère une réduction de la consommation d'énergie (exprimée en % de la consommation surfacique de départ des locaux)²⁵.

3.1.3 Actions dans le transport

Les actions dans le transport, qui portent à la fois sur le transport de voyageurs et sur le transport de marchandises, sont listées ci-dessous :

Actions dans le transport
1. Remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule électrique
2. Remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule 2L/100km
3. Remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule hybride
4. Remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule hydrogène
5. Remplacement d'un véhicule thermique par un véhicule biocarburant
6. Remplacement d'un bus thermique par un bus électrique
7. Remplacement d'un car thermique par un car GNV
8. Remplacement d'un véhicule utilitaire thermique par un véhicule utilitaire électrique
9. Remplacement d'un poids lourd thermique par un poids lourd GNV

Figure 29 : Liste des actions disponibles dans le transport

Les coûts des technologies dans le transport sont sujets à des évolutions sur la période 2015 – 2030. Il en est de même pour l'efficacité énergétique des véhicules et les coûts des énergies. **L'ensemble des hypothèses retenues est disponible en annexe²⁶.**

3.1.4 Actions dans l'industrie

Les actions retenues pour l'étude sont des actions transverses aux différents secteurs industriels. L'UFE s'est appuyée sur l'étude du CEREN Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie²⁷. Les actions sont définies dans le tableau suivant :

²⁵ Voir Annexes.

²⁷ CEREN, Les gisements d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie, 2012.

Actions disponibles dans l'industrie
1. Chauffage des locaux
Comme dans les secteurs résidentiel et tertiaire, un gain important d'efficacité énergétique est possible sur le processus chauffage des locaux. Les locaux industriels peuvent avoir des spécificités défavorables (gros volumes, nécessité de transit fréquent avec l'extérieur,...). Le potentiel d'économie correspond à des actions d'efficacité énergétique passives (isolation des bâtiments), mais également à l'optimisation des systèmes énergétique en place (efficacité énergétique active, changement d'équipement,..)
2. Chaufferies/Production de chaleur
Les chaudières peuvent atteindre de meilleurs rendements, notamment en ayant recours à des économiseurs et des réchauffeurs d'air, ce qui permet de récupérer le maximum d'énergie des fumées. Des actions peuvent également être conduites en matière de calorifugeage des conduites.
3. Eclairage
Les gains en matière d'efficacité énergétique se situent dans le remplacement des lampes par des lampes à basse consommation mais aussi dans l'optimisation de l'éclairage
4. Production de Froid
La production de froid se fait principalement par machine frigorifique avec compresseur. Les mesures permettant les gains regroupent celles des machines tournantes, et les usages thermiques : compresseurs haute performance ; récupération de la chaleur de compression.
5. Moteur
Les moteurs représentent plus de 70% des usages de l'électricité dans l'industrie. Des gains très importants sont possibles grâce à un bon dimensionnement de l'équipement, à l'utilisation des moteurs les plus efficaces (Normes IE3 puis IE4), à l'utilisation de variateurs de vitesse.
6. Pompage
Les machines tournantes servant au pompage disposent d'un potentiel d'économie d'énergie important grâce à l'amélioration des rendements, l'optimisation des pertes de charge et la régulation
7. Transformateur
Les industriels possèdent souvent leurs propres transformateurs. Au même titre que sur les réseaux de transport et distribution électrique, des gains sont possibles en utilisant des transformateurs de dernière technologie.
8. Ventilation
Les machines tournantes servant à la ventilation disposent d'un potentiel d'économie d'énergie important grâce à l'amélioration des rendements, l'optimisation des pertes de charge et la régulation
9. Air comprimé
Les machines tournantes servant à l'air comprimé disposent d'un potentiel d'économie d'énergie important grâce à l'amélioration des rendements, l'optimisation des pertes de charge et la régulation

Figure 30 : Liste des actions disponibles dans l'industrie

Ces actions sont appliquées à chaque secteur industriel, qui sont eux-mêmes caractérisés en termes de :

- **Volume de consommations énergétiques par secteur et par combustible**
- **Part des consommations énergétiques par usage et par combustible**

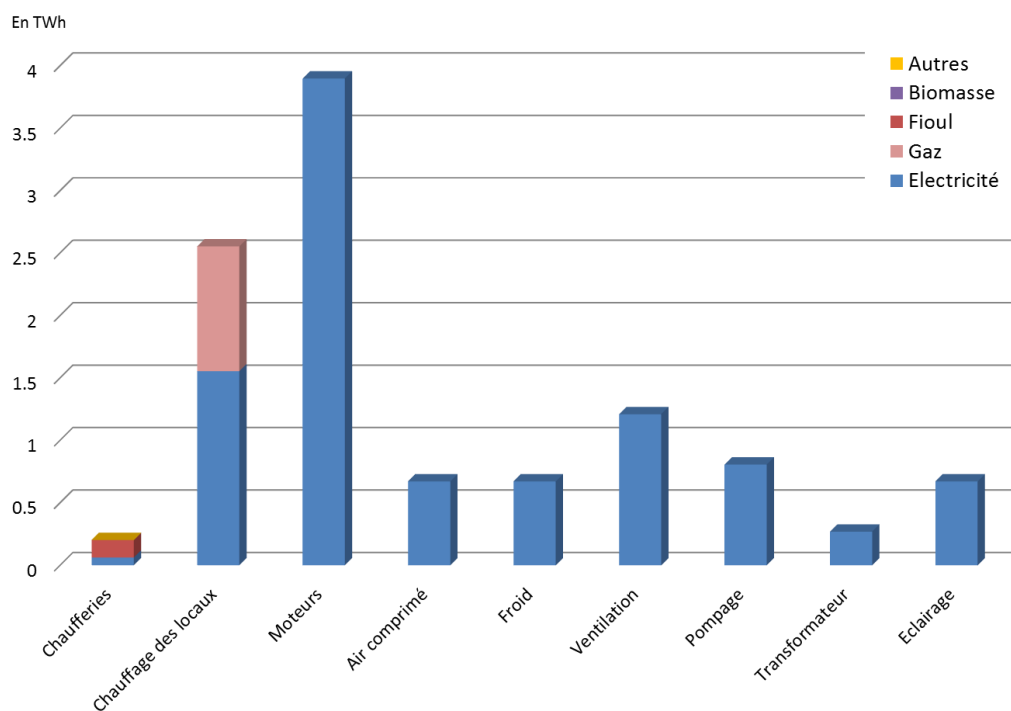


Figure 31 : Consommation de l'industrie agroalimentaire par usage et par combustible (Analyse UFE selon données CEREN et INSEE)

3.2 Contenus carbone et prix des énergies

Dès lors que les actions d'efficacité climatique sont caractérisées en termes de gisement et de coûts d'investissement et de maintenance, il est nécessaire d'identifier les gains sur la facture énergétique et les réductions d'émissions de CO₂ qu'elles pourront générer. Pour cela, il est nécessaire de disposer des prix des énergies sur la durée de vie des actions et de leurs contenus CO₂.

Comme mentionnés au 2.2.1, les contenus carbone des énergies évoluent entre 2015 et 2030²⁸, de manière à prendre en compte les objectifs d'intégration d'énergies renouvelables dans le gaz et les carburants. Le graphique suivant rappelle les contenus en CO₂ des énergies utilisés²⁹ :

²⁸ Ces contenus CO₂ sont considérés stables entre 2030 et 2060.

²⁹ Ces hypothèses sont identiques à celles retenues pour définir le cadre macroéconomique de référence.

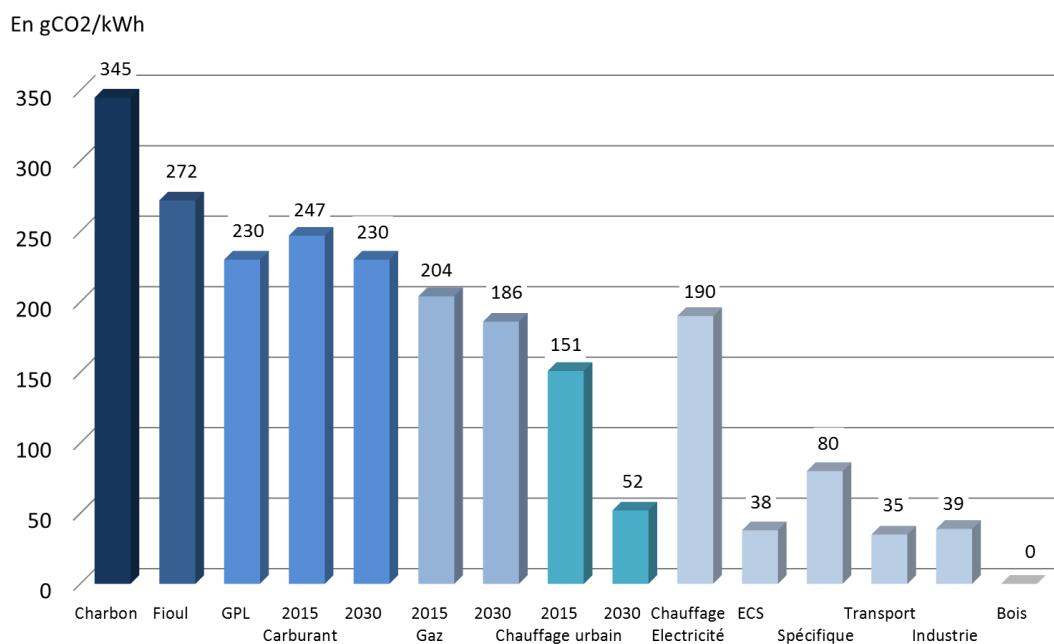


Figure 32 : Contenus carbone des énergies
(Source : ADEME pour 2015. Calculs UFE pour 2030)

L'analyse intègre également une chronique d'évolution des prix des énergies sur la période 2015-2030. Pour rappel, les prix au client final se décomposent en trois postes de coûts :

- Le coût de l'énergie,
- Le coût de la distribution,
- La fiscalité.

Pour les énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz, les tendances d'évolutions des prix des énergies sur la période 2015-2030 sont issues de la Banque Mondiale³⁰. Concernant le prix de l'électricité, les tendances d'évolution sont celles du scénario « *New Policies* » de l'Agence Internationale de l'Energie. Pour le bois et le chauffage urbain, les trajectoires de prix sont conformes aux évolutions récentes des bases de données Pégase et de l'ADEME.

Les coûts de distribution des énergies sont considérés comme stables sur la période 2015-2030.

Enfin, la composante CO₂ de la fiscalité énergétique évolue :

- Pour le secteur diffus (résidentiel, tertiaire, transport), la contribution climat énergie (CCE), qui prend la forme d'une composante carbone proportionnelle aux émissions de CO₂ des énergies fossiles, a été directement intégrée dans le prix des énergies, suivant la trajectoire fixée par la PPE en juillet 2016,

³⁰ Banque Mondiale, *World Bank Commodity Forecast Price Data*, 2016.

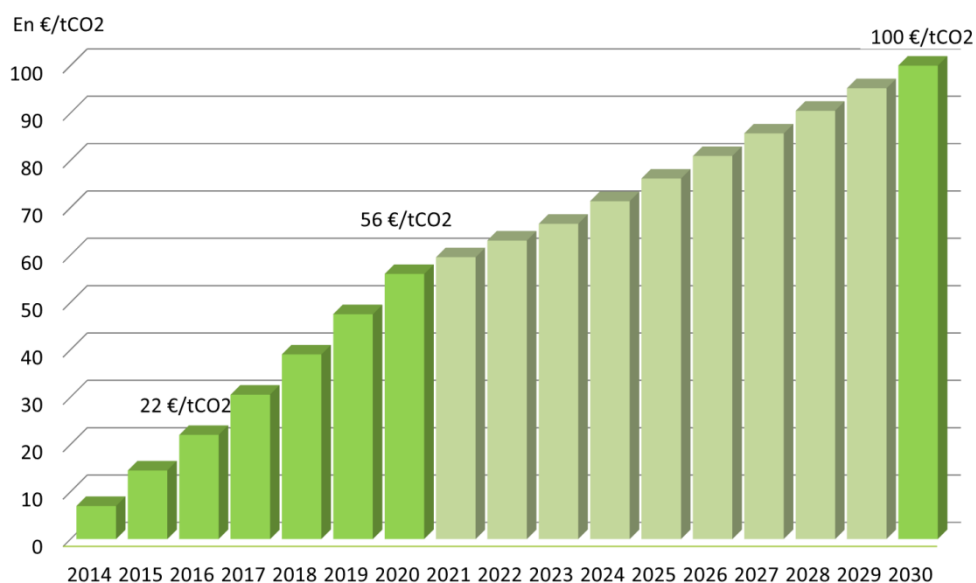


Figure 33 : Evolution du niveau de la contribution climat énergie

- Pour le secteur industriel, une trajectoire du prix du CO₂ sur le mécanisme ETS a également été intégrée dans l'évolution du prix des combustibles pour les consommateurs industriels. Cette trajectoire est conforme à celle de la PPE³¹, ce qui permet d'aboutir à un niveau de prix du CO₂ de l'ordre de 24 €/tCO₂ en 2030.

Les prix de détail des énergies retenues pour chaque secteur d'activité économique sont représentés dans les graphiques suivants.

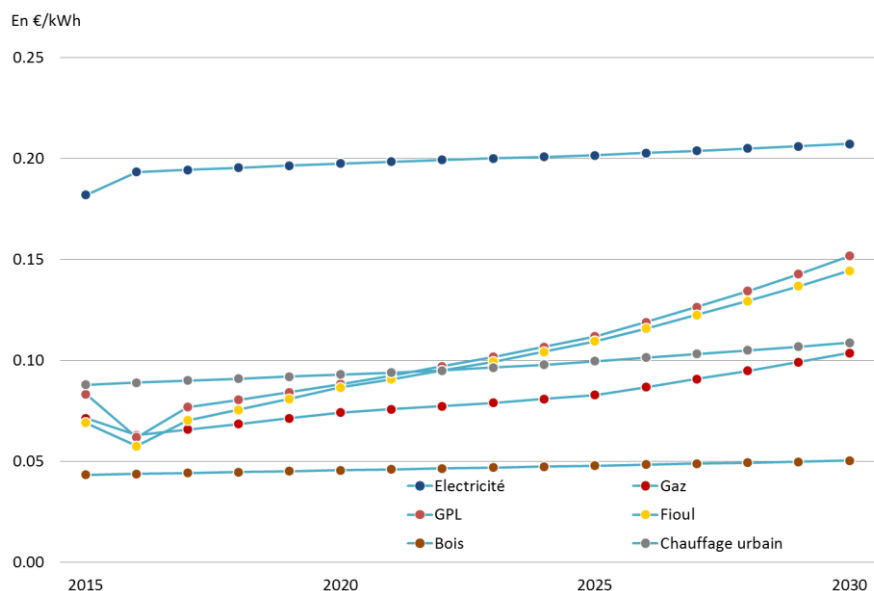


Figure 34 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans le bâtiment

³¹ Cette trajectoire prévoit un prix de 15€/tCO₂ en 2020 et de 17,8 €/tCO₂ en 2023.

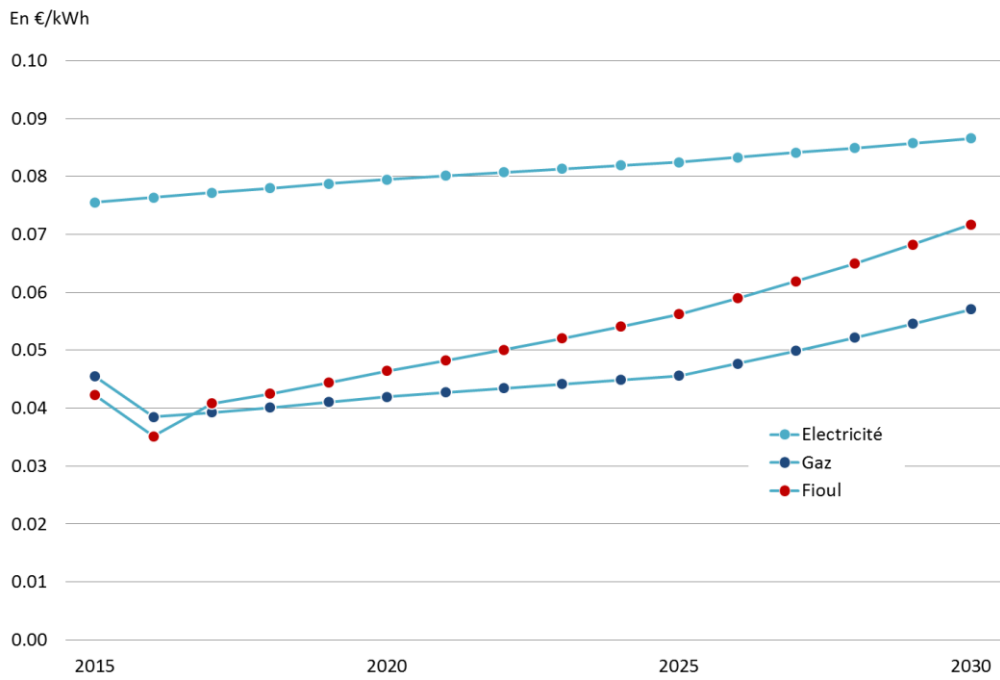


Figure 35 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans l'industrie

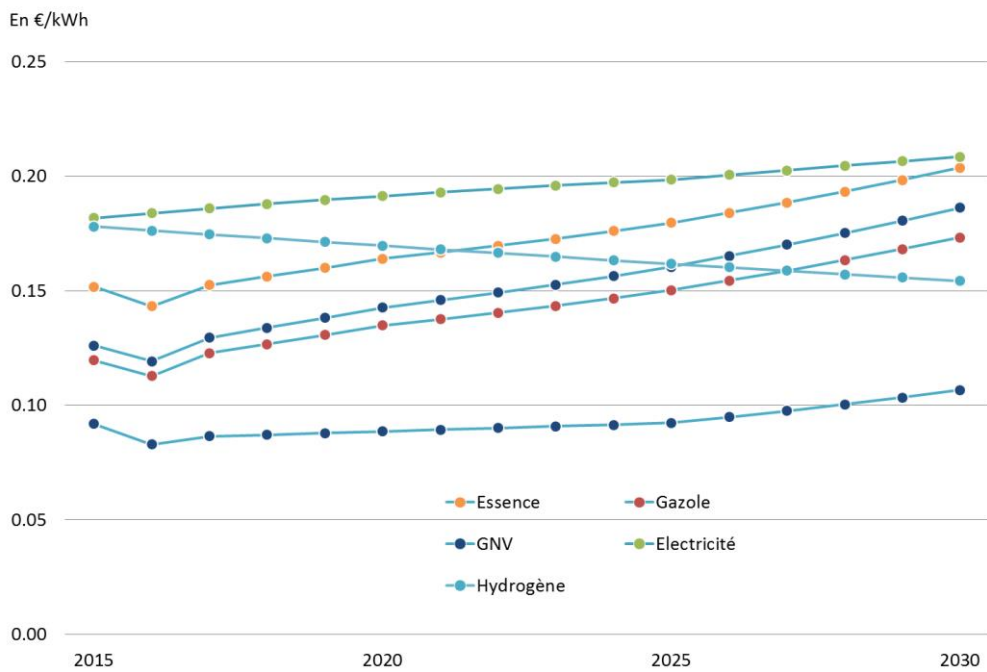


Figure 36 : Evolution des prix de détail TTC des énergies dans le transport

4 METHODOLOGIE DU CALCUL DE LA TRAJECTOIRE

Une fois l'objectif fixé (partie 2), les actions d'efficacité climatique caractérisées et l'évolution des prix et des contenus CO₂ des énergies identifiée (partie 3), l'UFE a cherché à déterminer la trajectoire optimale de déploiement de ces actions pour atteindre l'objectif climatique de la LTECV au moindre coût. **Grâce à un modèle annualisé et intégré sur toutes les énergies (pétrole, gaz, électricité, biomasse, chaleur ...) et tous les secteurs économiques (résidentiel, tertiaire, transport, industrie) en France, l'UFE modélise une dynamique de transition sur une période allant de 2015 à 2030, optimisée selon la rationalité économique des acteurs.**

Pour cela, trois étapes d'analyse se succèdent :

1. **La construction de l'interclassement des mesures par secteur** : cet ordre de mérite permet de comparer et d'interclasser les mesures selon **leur surcoût par tonne de CO₂ évitée**, par rapport à un remplacement à l'identique. Il distingue, pour une action donnée, le segment de parc auquel elle s'applique et l'année de déploiement (par exemple : installation d'une chaudière bois dans une maison individuelle étiquette E initialement chauffée au gaz en 2018),
2. **Le déploiement des mesures dans une trajectoire optimisée** : le modèle déploie de façon optimisée les différentes mesures dans le temps et en évalue les impacts en termes de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂,
3. **L'analyse des résultats** : cette étape permet de traiter graphiquement les résultats et d'évaluer les impacts du déploiement sur le mix énergétique, ainsi que les impacts en termes d'emplois pour les filières concernées.

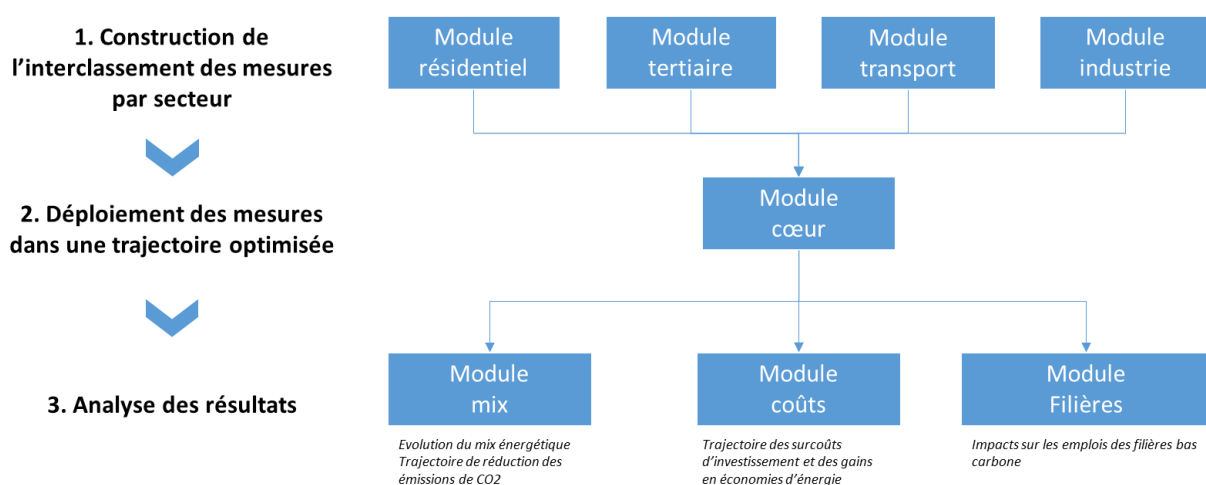


Figure 37 : Vision d'ensemble du modèle développé

4.1 Construction de l'interclassement des mesures par secteur

L'interclassement des mesures par secteur est construit à partir d'un surcoût par tonne de CO₂ évitée, calculé sur l'ensemble de sa durée de vie et pour le segment de parc spécifique sur lequel s'applique l'action.

Pour chaque segment de parc, est identifiée une solution de référence qui est considérée comme l'alternative de base à l'action. Par exemple, pour le résidentiel, l'installation d'une pompe à chaleur air/eau dans une maison initialement chauffée au fioul est comparée à l'installation d'une chaudière fioul moyenne. Le calcul effectué s'exprime donc en €/tCO₂ évitée par rapport au choix d'une solution de référence :

$$\text{Coût de la tonne de carbone évitée} = \frac{\text{Surcoût d'investissement} - \sum_1^n \frac{\text{Gains en économie d'énergie}}{(1+t)^i}}{n * \text{tCO2 évitée par an}}$$

Le taux d'actualisation, ici noté t , permet d'actualiser les gains liés aux économies d'énergie sur la facture, sur l'ensemble de la durée de vie n de l'action effectuée. Un taux d'actualisation de 4 %, correspondant au taux retenu dans le cadre du dispositif des Certificats d'Economie d'Énergie, est retenu pour les particuliers ; il est de 1 % pour les actions concernant le secteur public.

Cet indicateur permet de comparer deux mesures entre elles en termes d'efficacité climatique pour des parcs différents mais aussi pour des années variables, ce qui représente la véritable innovation du modèle. Ainsi, un véhicule électrique est beaucoup plus rentable en 2030 qu'en 2015 : les coûts des batteries ont diminué et l'écart entre les prix de l'électricité et du pétrole a été réduit en raison de la hausse de la contribution climat énergie.

Afin de faciliter la compréhension de la méthode d'interclassement, le calcul de la rentabilité d'une mesure précise en accompagnera la description. L'exemple sera celui de l'installation en 2025 d'une pompe à chaleur air/eau dans une maison individuelle d'étiquette énergétique E, initialement chauffée au fioul.

4.1.1 Calcul du surcoût d'investissement de la mesure

Le calcul du coût de la tonne de carbone évitée dépend dans un premier temps du surcoût d'investissement initial de la mesure. Ce surcoût correspond à la différence entre le coût d'investissement de la mesure étudiée et celui de la mesure initialement installée lorsqu'il y en a une³². Il prend en compte :

- **Le surcoût d'achat et d'installation de l'équipement**

Il s'agit de la différence entre le coût d'acquisition (installation comprise) de l'action évaluée et celui d'un remplacement à l'identique de la technologie installée.

A cette différence peuvent s'ajouter des coûts d'infrastructure le cas échéant (par exemple, la borne de recharge au domicile du particulier dans le cas des véhicules électriques)³³.

³² C'est le cas pour le changement d'un système de chauffage ou de véhicule, contrairement aux actions d'isolation par exemple.

³³ Pour les véhicules électriques, qui nécessitent des points de charge, le coût de l'installation d'une borne de charge normale à domicile est imputé à chaque véhicule électrique (2 000 € selon Enedis). Ce coût est intégré au calcul de l'efficacité climatique du véhicule électrique. Par ailleurs, les véhicules électriques nécessitent des bornes de recharge sur la voirie publique ainsi que le renforcement des réseaux électriques. Ces facteurs de coûts sont pris en compte à un niveau de 5 000 € par véhicule. Ce surcoût n'est pas intégré dans le calcul de la l'interclassement global, mais est considéré comme un coût supplémentaire pour la collectivité. Il n'intervient donc pas dans l'ordre de déploiement des actions, mais est pris en compte dans les chroniques d'investissements au niveau macroéconomique.

Installation d'une pompe à chaleur air/eau		Installation d'une chaudière moyenne au fioul		Surcoût d'installation
11 000 €	-	3 000 €	=	8 000 €

- **Le coût du financement**

Le coût du financement correspond aux intérêts liés à l'emprunt effectué pour réaliser l'investissement. Il varie entre 1 et 4 % en fonction du type d'acteur concerné (public ou privé). La durée du prêt retenue est égale à 10 ans, quelle que soit l'action considérée. Par simplification, il est considéré que 100 % des investissements sont financés par emprunt.

Intérêts liés à l'emprunt pour la pompe à chaleur		Intérêts liés à l'emprunt pour la chaudière		Coût du financement
2 560 €	-	700 €	=	1 860 €

4.1.2 Calcul du gain en économie d'énergie

Il est ensuite nécessaire d'évaluer les gains en économie d'énergie réalisés chaque année (ces gains seront ensuite actualisés). Ils correspondent aux gains réalisés sur la facture énergétique par le décideur de l'action, et prennent en compte les éléments suivants :

- **Réduction de la consommation énergétique**

Pour une mesure donnée, son impact pourra varier selon le segment du parc auquel elle est appliquée, notamment le type de bâtiment et le combustible de chauffage avant sa mise en place. Il change aussi en fonction des années, comme dans le transport par exemple, où les consommations de carburant des véhicules évoluent sur la période.

Dans le bâtiment, l'impact des mesures est exprimé en pourcentage de réduction de la consommation du logement, sur le périmètre d'usage pertinent pour chaque mesure : le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire et/ou l'électricité spécifique.

Consommation de chauffage d'une maison fioul étiquette E		Impact d'une PAC sur un logement fioul en 2025		Economie d'énergie annuelle
15 060 kWh	X	58 %	=	8 740 kWh

- **Evolution des prix des énergies sur la durée de vie**

Afin de prendre en compte les différences de durée de vie des actions, le modèle compare les gains en économie d'énergies des mesures sur l'ensemble de leur durée de vie.

Des chroniques de prix pour les énergies dans les différents secteurs ont été établies entre 2015 et 2060³⁴. Elles permettent de calculer pour chaque année les économies réalisées sur la facture de l'acteur économique considéré.

Facture annuelle de chauffage au fioul en 2025		Facture annuelle de chauffage à l'électricité en 2025		Gain annuel sur la facture de chauffage
2 110 €	-	1 330 €	=	780 €

- **Coût d'entretien**

Les coûts de maintenance annuels peuvent être différents en fonction de l'action choisie. Le surcoût d'entretien est donc la différence entre l'action choisie et l'action de référence moyenne.

Entretien annuel de la chaudière		Entretien annuel de la pompe à chaleur		Gain annuel d'entretien
115 €	-	200 €	=	- 85 €

4.1.3 Calcul du volume de CO₂ évité par an

Pour chaque secteur, l'interclassement des mesures est établi au regard de la contribution de ces mesures à l'atteinte de la réduction des émissions de CO₂.

Les gains sur la consommation d'énergie ayant été calculés lors de l'étape précédente, la réduction des émissions de CO₂ est ensuite déduite en fonction de la teneur en CO₂ de la consommation avant et après la réalisation de la mesure.

³⁴ Voir 3.3

Emissions de CO2 annuelles liées à la chaudière fioul		Emissions de CO2 annuelles liées à la pompe à chaleur		Gain annuel de CO2
4,1 tCO2	-	1,2 tCO2	=	2,9 tCO2

4.1.4 Calcul final de la rentabilité climatique

Surcoût d'investissement (achat / coût du financement)		Gains en économie d'énergie actualisés à 4 % sur 15 ans		Rentabilité climatique finale
9 860 €	-	7 620 €	=	51 €/tCO2
<hr style="width: 60%; margin: 0 auto;"/>				
44 tCO2				
Réduction des émissions de CO2 sur 15 ans				

Au final, puisque chaque action peut être appliquée à des sous segments différents et à des années différentes, ce sont plus de 45 000 mesures sur lesquelles est réalisé ce calcul de rentabilité climatique.

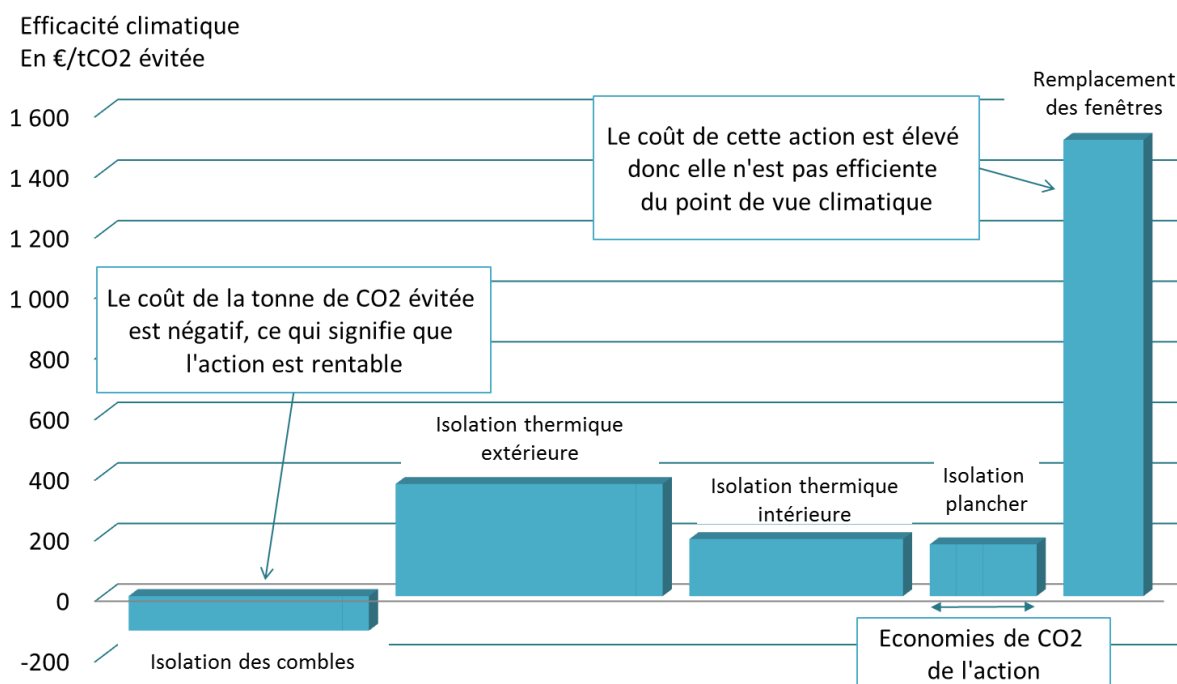


Figure 38 : Exemples de la rentabilité de quelques mesures dans une maison individuelle au fioul en 2023 (Calculs UFE)

4.2 Déploiement des mesures dans une trajectoire optimisée

L'étape suivante consiste à modéliser le déploiement de chaque mesure, suivant l'ordre de classement des mesures au regard du surcoût par tonne de CO₂ évitée qui vient d'être établi.

4.2.1 Définition du volume de déploiement de la mesure

Bien que certaines mesures soient rentables dès 2016, leur déploiement dans l'économie doit prendre en compte un certain nombre de contraintes. Ce déploiement peut ainsi être limité par des incompatibilités techniques, les capacités des filières des technologies bas carbone, ou encore le taux d'adoption des acteurs économiques.

- **Gisement disponible**

Tout d'abord, toutes les actions ne peuvent pas être déployées sur tous les segments d'un secteur. Par exemple, il n'est pas possible d'installer une chaudière gaz à condensation dans un logement qui n'est pas raccordé au réseau de gaz. Il n'est également pas possible d'installer des robinets thermostatiques sur des logements chauffés avec des convecteurs électriques. L'UFE a donc établi des matrices de compatibilité pour écarter ces incohérences techniques.

	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
Robinets thermostatiques	1	1	1	0	0	1	1	1
RPCC	0	1	1	1	1	1	1	1
PAC air/air	0	0	0	1	0	0	0	0
PAC air/eau	0	1	1	0	0	1	1	1
PAC géothermique	0	1	1	0	0	1	1	1
PAC hybride	0	1	1	0	0	1	1	1
Convecteur électrique	0	1	1	1	0	1	1	1
Chaudière bois	0	1	1	0	0	1	1	0
Chaudière condensation gaz	0	1	1	0	0	1	1	1
Chaudière condensation fioul	0	0	1	0	0	1	1	1
Chaudière micro-cogénération bois	0	1	1	0	0	1	1	1
Chaudière micro-cogénération gaz	0	1	1	0	0	1	1	1
ECS solaire	0	1	1	1	1	1	1	1
ECS thermodynamique	0	1	1	1	1	1	1	1
Appareil à bois	1	1	1	1	1	1	1	1
ITE	1	1	1	1	1	1	1	1
ITI	1	1	1	1	1	1	1	1
Isolation combles	1	1	1	1	1	1	1	1
Isolation plancher	1	1	1	1	1	1	1	1
Remplacements ouvrants	1	1	1	1	1	1	1	1
Raccordement réseau de chaleur	0	1	1	0	0	1	1	1

Figure 39 : Exemple de matrice de compatibilité utilisée

Ensuite, des taux d'équipement du parc, issus d'ENERBAT et ENGIE, limitent le gisement disponible pour la mesure à déployer. Ainsi, si 25 % des logements collectifs chauffés au gaz étaient déjà équipés de robinets thermostatiques en 2015, cela réduira d'autant le gisement de déploiement de cette mesure : il n'est logiquement pas possible de mettre en place une mesure dans un logement déjà équipé.

Par ailleurs, dans le cas où plusieurs mesures peuvent concerner le même usage, des contraintes de compatibilité sont mises en place. Ainsi, **si une mesure concernant l'usage « chauffage » a déjà été réalisée sur un logement (par exemple la mise en place d'une chaudière bois), il est impossible qu'une mesure concernant cet usage ait de nouveau lieu sur ce logement** au cours de la période.

En revanche, **une mesure concernant un autre usage (comme l'isolation des combles) pourra toujours avoir lieu dans ce logement** plus tard dans la période. Son impact sera recalculé car la mise en place du nouveau moyen de chauffage aura réduit la consommation énergétique du logement.

Dans le secteur de l'industrie, l'approche utilisée diffère en l'absence de données précises disponibles sur le parc. Les mesures sont déployées en fonction des potentiels de gisements techniquement réalisables identifiés dans l'industrie française par le CEREN.

- **Taux d'adoption de la mesure**

Pour déterminer le volume de déploiement de la mesure, on prend en compte la propension des acteurs à effectuer les travaux d'installation afférents. Ce n'est pas parce qu'une mesure a une excellente efficacité climatique qu'elle sera réalisée dans l'ensemble du gisement disponible : la notion de taux d'adoption entre ici en compte, tout comme la part de renouvellement possible sur le segment considéré.

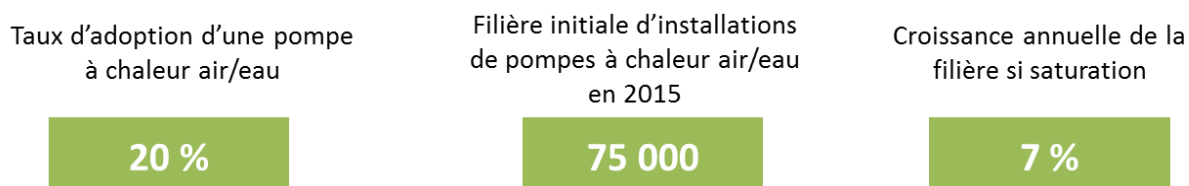
- **Capacité des filières industrielles**

Le déploiement est également contraint par les capacités des filières bas carbone. Certaines filières ne sont pas en mesure de déployer les actions nécessaires au rythme optimal car leur niveau de maturité est insuffisant. Il est donc essentiel de prendre en compte ce paramètre.

Plusieurs types de données sont mobilisés afin de calibrer le niveau de telles contraintes sur le déploiement à l'échelle du parc, notamment des études de marché attestant des volumes de production et d'adoption sur les années passées³⁵, ainsi que le taux de rénovation du parc.

Lorsqu'une filière atteint sa capacité maximale de déploiement lors de l'année n , alors sa capacité en $n+1$ augmente. Cette augmentation varie selon le niveau de maturité de la filière.

Dans le secteur du bâtiment, le taux possible d'évolution de la filière en cas de saturation est le même au cours de toute la période. Dans le transport, pour les filières considérées « non matures », les taux d'évolution varient en fonction des années. Les hypothèses retenues par l'UFE sont indiquées en Annexe.



4.2.2 Cadencement du déploiement et cible de l'objectif politique

Le déploiement des mesures est réalisé dans l'ordre dicté par l'interclassement des mesures selon leur surcoût par unité d'objectif climatique. Il s'effectue dans le respect des contraintes de gisements et de filières mentionnées ci-dessus. Ce déploiement est réalisé au pas de temps annuel jusqu'en 2030.

Pour chaque mesure déployée, le modèle calcule les économies d'énergie réalisées et la réduction des émissions de CO₂.

Les capacités des filières, les gisements disponibles et les consommations d'énergie du parc sont recalculées pour chaque année, ce qui permet d'avoir une trajectoire dynamique annualisée entre 2015 et 2030.

Le modèle, dit « *de convergence* », itère alors jusqu'à trouver le bouquet de mesures qui permet d'atteindre l'objectif climatique de réduction des émissions de CO₂ au moindre coût.

4.3 Indicateurs de sortie

A l'issue de l'étape de déploiement et après retraitement des résultats dans des modules dédiés, le modèle permet d'obtenir les résultats suivants :

- La trajectoire de déploiement des actions les plus efficaces,
- La contribution à l'atteinte de l'objectif de la loi de chacune des actions déployées,
- La trajectoire de réduction des émissions de CO₂,
- La trajectoire de réduction de la consommation d'énergie,
- Les niveaux d'investissements nécessaires à l'atteinte de l'objectif visé,
- Les besoins de développement des filières des technologies bas carbone.

³⁵ ADEME, Marchés et emplois liés à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2013 – 2014 et perspectives à court terme, 2016.

5 ANALYSE DES RESULTATS

L'ensemble des résultats peut être retrouvé dans la brochure *Transition Energétique : Les clés pour financer l'évolution de la demande en France*.

5.1 Description de la trajectoire

5.1.1 Evolution des émissions de CO₂

La trajectoire déployée montre que l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixé par la loi relative à la transition énergétique est très ambitieux, et qu'il est nécessaire de déployer un très grand nombre d'actions pour pouvoir le remplir. **Ainsi, c'est l'ensemble des secteurs d'activité de l'économie qui sont sollicités.**

Ce scénario visant la décarbonation de la consommation d'énergie permet d'identifier les leviers sectoriels ainsi que la répartition de l'effort attendu de la part des différents secteurs pour atteindre les objectifs :

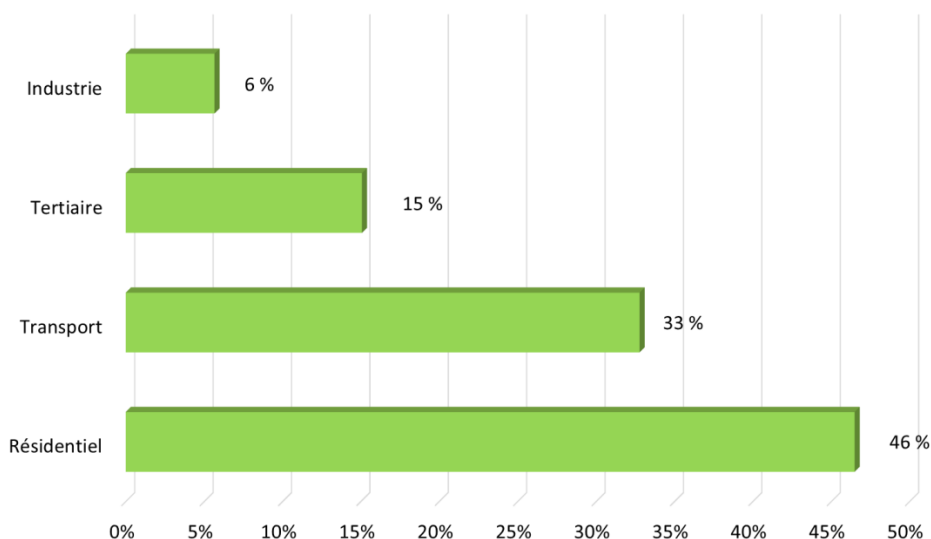


Figure 40 : Contribution à l'atteinte de l'objectif CO₂ de chacun des secteurs (Calculs UFE)

5.1.2 Evolution du mix de consommation d'énergie

Dans le scénario déployé par le modèle, la trajectoire montre deux évolutions significatives:

- D'une part, **une réduction de la consommation d'énergie finale**, à travers des actions d'efficacité énergétique bien ciblées ;
- D'autre part, la décarbonation de cette consommation grâce au **rôle majeur des énergies bas carbone** (électricité, biomasse et chauffage urbain).

Le graphique suivant illustre l'évolution du niveau et de la structure de la consommation d'énergie dans la trajectoire calculée :

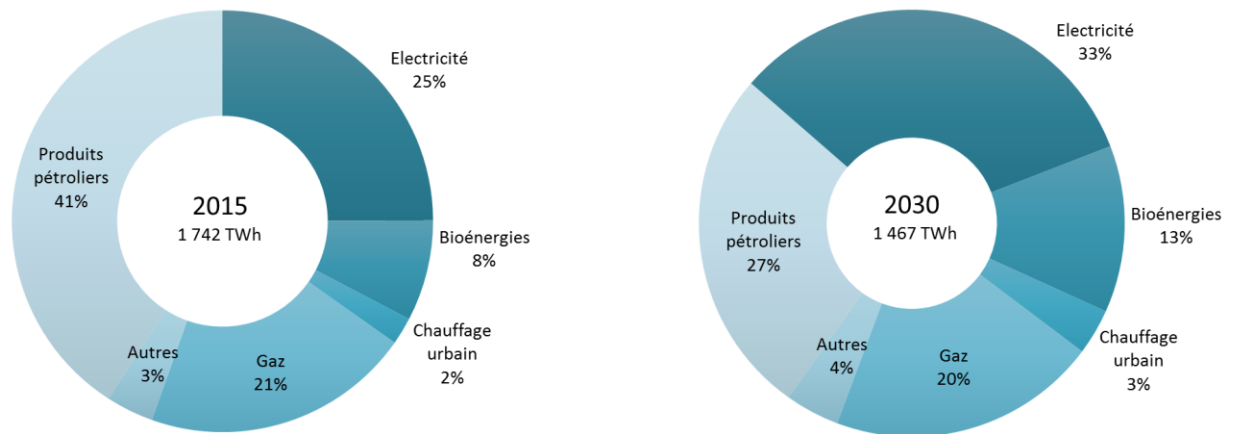


Figure 41 : Evolution du mix de demande énergétique final entre 2015 et 2030 (Calculs UFE)

Les observations majeures qui peuvent être faites sont les suivantes :

- **Le niveau de consommation totale diminue**, ce qui est la traduction du fait que la réduction des émissions de CO₂ est en partie réalisée par la réduction de la consommation d'énergie,
- **La part des énergies peu ou pas carbonées augmente**,
- **La consommation de carburants pétroliers diminue fortement**.

L'atteinte de l'objectif CO₂ au moindre coût permet de réduire de 18 % la consommation d'énergie finale entre 2012 et 2030 et de 35 % la consommation énergétique primaire d'énergies fossiles³⁶.

5.2 10 actions-clés permettent d'atteindre 75 % de l'objectif

L'étude démontre qu'un bouquet de 10 mesures permet d'atteindre les ¾ de l'objectif de réduction des émissions de CO₂ par dans la loi. Eu égard au contexte de contraintes économiques, budgétaires et financières, il semble nécessaire et raisonnable de se focaliser prioritairement sur ces actions les plus efficaces.

L'optimum économique déployé conduit à privilégier massivement les actions les plus efficaces dans le cadre de la transition énergétique. Dans le résidentiel, les actions sont ainsi principalement déployés dans les logements énergivores dont l'énergie de chauffage est carbonée.

La trajectoire est déterminée en croisant les gisements et les coûts des actions. Ainsi, les actions les plus bénéfiques sont celles qui permettent à la fois de réduire de façon importante les émissions de CO₂ et à un coût faible.

³⁶ Les objectifs de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte sont respectivement de - 20 % de consommation d'énergie finale entre 2012 et 2030, et - 30 % de consommation énergétique primaire d'énergies fossiles entre 2012 et 2030.

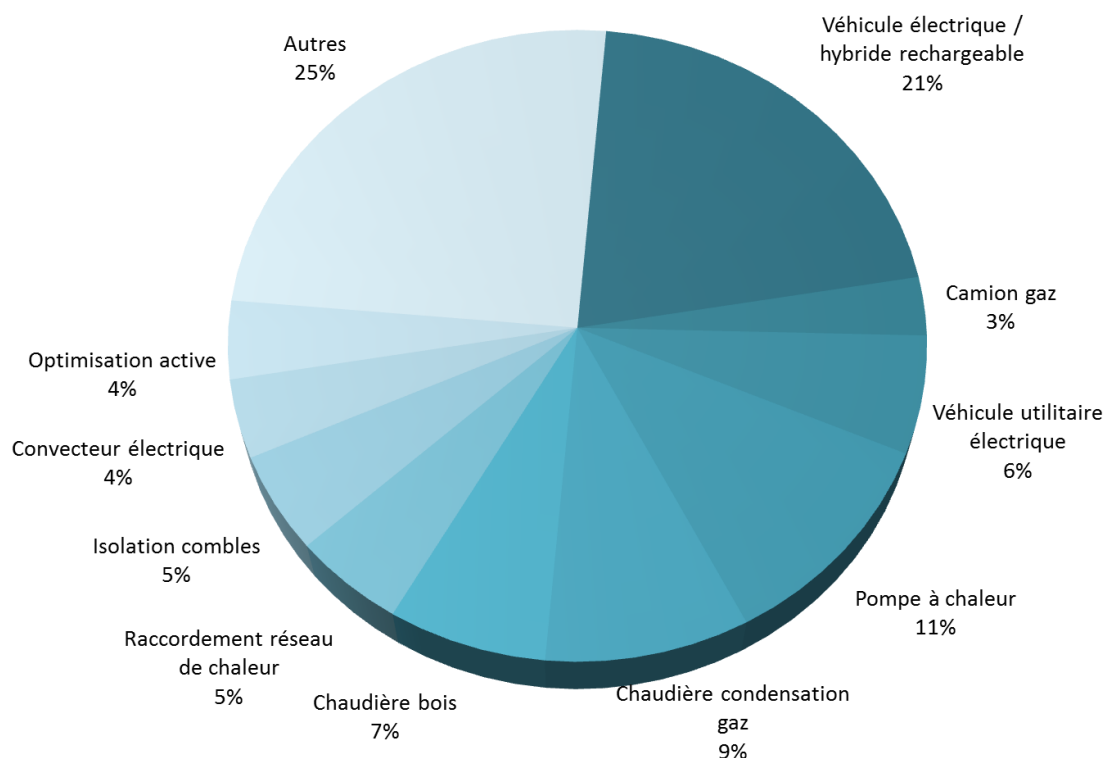


Figure 42 : Top 10 des actions (contribution à l'objectif de réduction des émissions de CO₂) (Calculs UFE)

Cet ensemble de 10 actions montre qu'il est important de se concentrer sur la complémentarité entre les énergies. Ce bouquet est diversifié et illustre différentes familles d'actions sur lesquelles se concentrer pour réussir la transition énergétique ; il comprend ainsi :

- **4 actions de consommation d'électricité** : voiture électrique et hybride rechargeable, véhicule utilitaire électrique, pompe à chaleur, convecteur électrique performant,
- **2 actions de consommation de gaz** : camion au gaz naturel, chaudière gaz à condensation,
- **2 actions de consommation d'énergies renouvelables thermiques** : chaudière bois, raccordement à un réseau de chaleur,
- **2 actions d'efficacité énergétique** : une passive (isolation des combles), une active (optimisation de la consommation par l'utilisation de robinets thermostatiques, le pilotage).

5.3 La transition énergétique est, une fois optimisée, capitalistique mais soutenable

Les actions nécessaires pour atteindre la cible sont nombreuses, et portent sur l'ensemble de l'économie. Le modèle montre que le coût de la mise en œuvre de la trajectoire est très important.

En effet, les besoins d'investissements liés à l'atteinte de cet objectif sont évalués à 435 Md€ sur la période, soit un peu moins de 30 milliards d'euros d'investissements supplémentaires chaque année dans des actions visant la consommation d'énergie.

Si cette trajectoire est fortement capitalistique, elle est optimisée grâce à un raisonnement pragmatique basé sur la rationalité économique. Ainsi, **cette trajectoire basée sur un interclassement des mesures en fonction de leur efficacité climatique permet d'atteindre l'objectif au moindre coût.**

Dans une approche où les actions sont guidées par une volonté de réduire les émissions de CO₂, les gains d'économies d'énergie générés sur la facture sont supérieurs aux surcoûts d'investissement initiaux sur l'ensemble de la période : ils sont au total de 480 Md€. Une partie de ces gains sera générée après 2030, puisqu'ils sont comptabilisés pour toute la durée de vie des investissements. Au total, les investissements supplémentaires motivés par la transition énergétique se remboursent donc en réduction de facture d'énergie dans la durée.

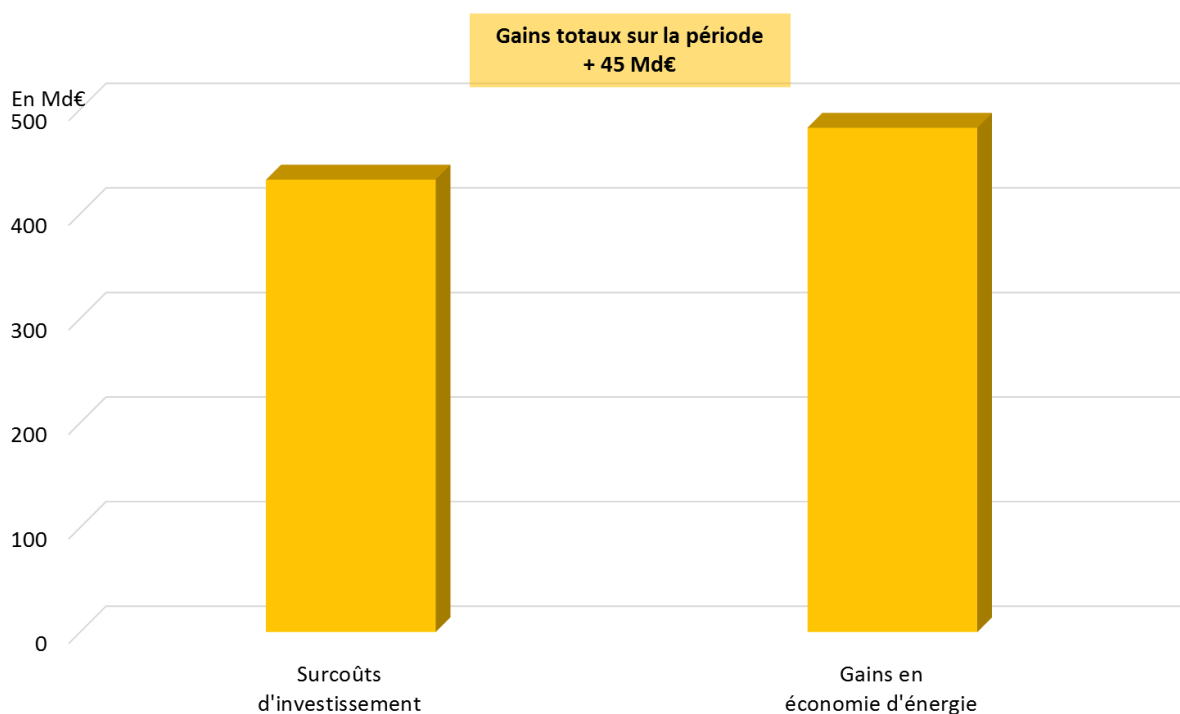


Figure 43 : Bilan total du financement de la transition énergétique (Calculs UFE)

5.4 Toutes les actions nécessaires ne sont pas rentables

Si on peut s'attendre à des gains de long terme au niveau macroéconomique, toutes les actions ne se valent pas au niveau individuel. Certaines actions sont très rentables (optimisation active sur les logements énergivores), tandis que d'autres ne le sont pas sans aides publiques, alors qu'elles sont tout de même nécessaires pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de CO₂ au moindre coût. Enfin, certaines actions ne sont pas rentables en début de période, mais le sont en 2030.

A titre d'illustration, le véhicule utilitaire électrique, action importante de la transition énergétique, n'est pas rentable aujourd'hui, mais le devient au cours de la période grâce à la baisse de coûts des batteries et à la hausse des prix des énergies fossiles.

Efficacité climatique
En €/tCO₂ évitée

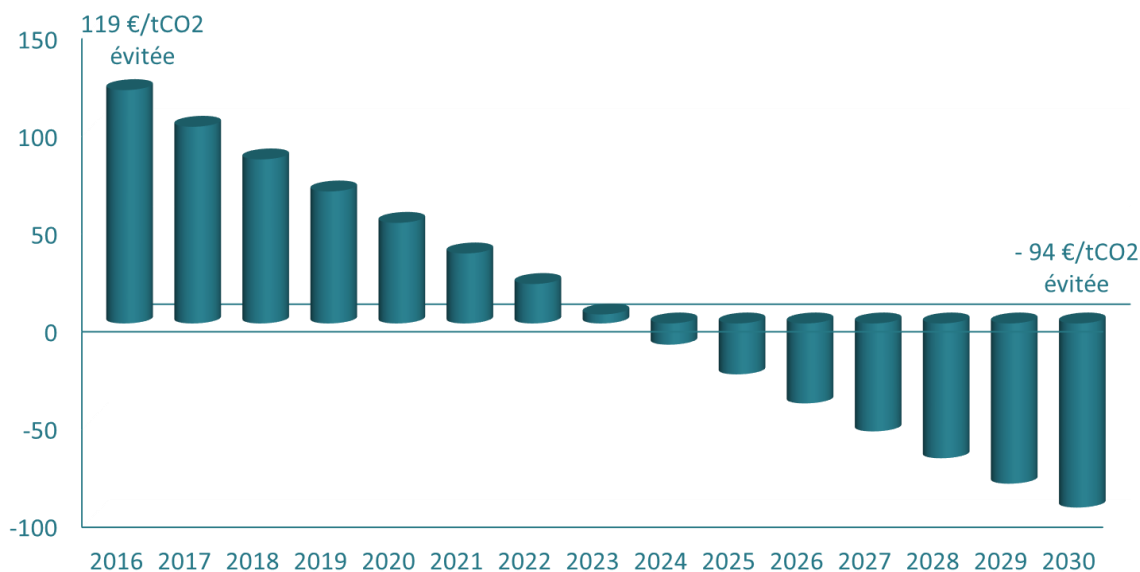


Figure 44 : évolution de la rentabilité du VUL électrique

L'optimum économique déployé conduit à privilégier massivement les actions les plus bénéfiques et les plus rentables dans le cadre de la transition énergétique. Les volumes concernant ces 10 actions sont très importants.

5.5 Le bon déploiement des actions dépend de la capacité d'adaptation des filières industrielles

En démontrant que l'atteinte des objectifs de la transition énergétique repose sur un petit nombre de technologies clés, l'UFE révèle l'importance d'anticiper le développement des filières industrielles concernées. **Les capacités actuelles des filières industrielles limitent l'adoption des technologies bas carbone.** Le développement de ces filières représente une contrainte majeure de la transition énergétique.

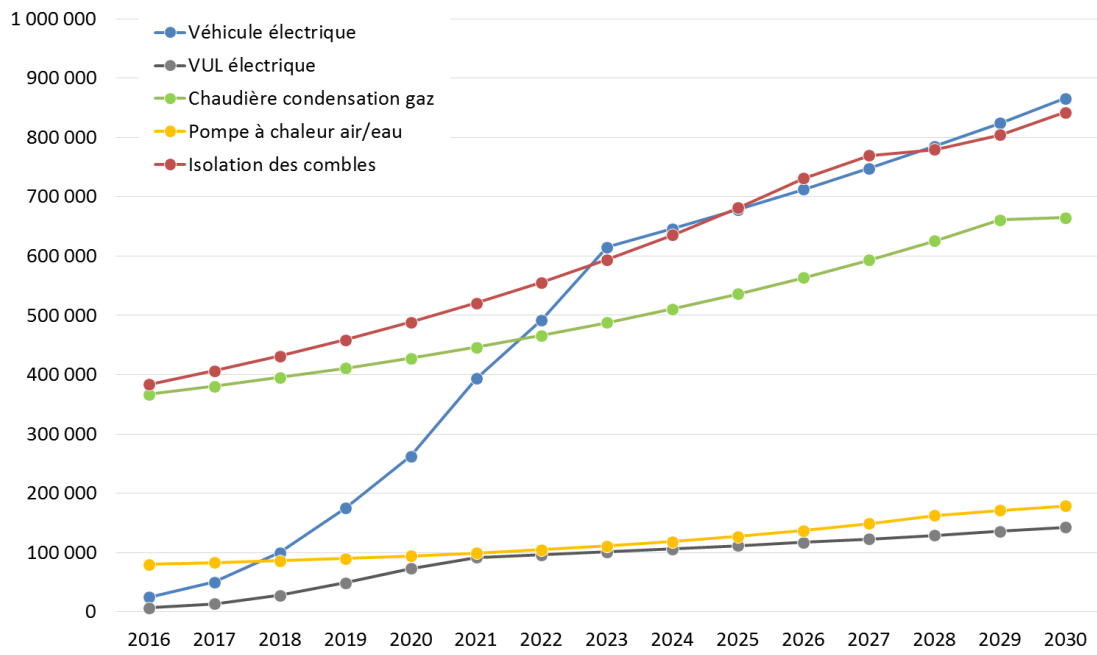


Figure 45 : Exemples de déploiement des actions dans la trajectoire optimisée (Calculs UFE)

6 ANNEXES

6.1 Données de cadrage du parc

6.1.1 Résidentiel

Le parc considéré couvre plus de 27 millions de logements.

Nombre de logements par combustible de chauffage									
Type	Etiquette Énergétique	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
MI	A	103	89 965	76 714	50 266	2 631	9 078	3 340	36 497
MI	B	105	114 959	85 828	82 659	6 516	13 420	3 549	49 988
MI	C	761	658 186	445 386	577 053	40 841	81 998	13 584	267 337
MI	D	2 120	1 590 529	1 130 810	1 345 420	69 114	181 202	36 599	607 861
MI	E	2 152	1 494 072	1 104 373	1 160 061	46 342	155 613	37 997	527 159
MI	F	1 071	731 288	564 970	476 152	17 631	69 391	21 112	234 003
MI	G	401	281 639	221 920	158 921	6 488	25 345	8 813	85 949
LCI	A	NA	77 543	1 972	78 040	4	NA	196	97
LCI	B	NA	104 079	2 275	132 994	7	NA	212	124
LCI	C	NA	505 461	11 119	594 857	31	NA	975	575
LCI	D	NA	1 177 544	26 509	1 367 950	75	NA	2 416	1 368
LCI	E	NA	919 454	20 967	1 076 193	61	NA	1 936	1 066
LCI	F	NA	343 754	8 031	396 106	22	NA	760	409
LCI	G	NA	130 165	3 128	144 673	8	NA	305	161
LCC	A	24 749	77 086	15 085	NA	39	885	268	877
LCC	B	32 608	103 466	17 401	NA	64	1 278	290	1 115
LCC	C	166 504	502 482	85 057	NA	283	6 113	1 333	5 175
LCC	D	380 147	1 170 605	202 794	NA	671	14 173	3 305	12 312
LCC	E	298 506	914 036	160 397	NA	547	11 068	2 647	9 598
LCC	F	110 435	341 728	61 435	NA	202	4 131	1 039	3 677
LCC	G	40 850	129 398	23 931	NA	72	1 551	417	1 445

Figure 46 : Répartition du parc de résidences principales en 2015
(Analyse UFE selon ENERBAT / ENGIE / DPE / CEREN)

L'hypothèse ici faite est que la surface moyenne des logements ne varie pas en fonction de leur performance énergétique.

Surface moyenne par combustible de chauffage (en m2)								
Type	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
MI	99	111	119	108	116	118	90	111
LCI	NA	68	68	51	49	NA	66	70
LCC	70	68	68	NA	49	70	66	70

Figure 47 : Surface moyenne des parcs considérés
(Analyse UFE selon ENERBAT / ENGIE / DPE / CEREN)

		Consommation C + ECS par logement							
Type	Etiquette Énergétique	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Electricité effet	Electricité PAC	GPL	Charbon	Bois
MI	A	3 797	2 048	1 898	1 348	1 447	2 535	1 633	4 179
MI	B	9 491	5 121	4 746	3 370	3 618	6 338	4 083	10 449
MI	C	17 085	9 218	8 543	6 066	6 512	11 409	7 349	18 808
MI	D	28 474	15 363	14 238	10 110	10 854	19 015	12 249	31 346
MI	E	43 661	23 557	21 832	15 501	16 642	29 156	18 782	48 064
MI	F	62 644	33 799	31 324	22 241	23 878	41 833	26 948	68 961
MI	G	85 423	46 089	42 715	30 329	32 561	57 045	36 747	94 038
LCI	A	NA	1 262	1 091	639	618	NA	1 198	2 632
LCI	B	NA	3 155	2 726	1 598	1 544	NA	2 996	6 579
LCI	C	NA	5 679	4 908	2 876	2 779	NA	5 393	11 843
LCI	D	NA	9 465	8 179	4 794	4 632	NA	8 988	19 738
LCI	E	NA	14 512	12 542	7 351	7 102	NA	13 781	30 265
LCI	F	NA	20 822	17 994	10 547	10 190	NA	19 773	43 423
LCI	G	NA	28 394	24 538	14 382	13 895	NA	26 963	59 213
LCC	A	2 704	1 262	1 091	NA	618	1 504	1 198	2 632
LCC	B	6 760	3 155	2 726	NA	1 544	3 761	2 996	6 579
LCC	C	12 168	5 679	4 908	NA	2 779	6 770	5 393	11 843
LCC	D	20 281	9 465	8 179	NA	4 632	11 283	8 988	19 738
LCC	E	31 097	14 512	12 542	NA	7 102	17 300	13 781	30 265
LCC	F	44 617	20 822	17 994	NA	10 190	24 822	19 773	43 423
LCC	G	60 842	28 394	24 538	NA	13 895	33 849	26 963	59 213

Figure 48 : Consommation chauffage et eau chaude sanitaire par logement (en kWh/logement)
(Analyse UFE selon ENERBAT / ENGIE / DPE / CEREN)

6.1.2 Tertiaire

Ce sont près de 1,8 millions de locaux tertiaires qui sont pris en compte.

Type	Statut	Performance	Nombre de locaux					Surface moyenne (m2)
			Chauffage urbain	Gaz de réseau	Electricité	Fioul	Autres	
Commerces	Privé	Performant	1 553	19 148	16 043	12 938	2 070	277
Commerces	Privé	Moyen	6 503	80 198	67 193	54 188	8 670	277
Commerces	Privé	Energivore	14 445	178 155	149 265	120 375	19 260	277
Bureaux	Privé	Performant	1 762	21 729	18 205	14 682	2 349	466
Bureaux	Privé	Moyen	7 802	96 228	80 623	65 019	10 403	466
Bureaux	Privé	Energivore	2 421	29 859	25 017	20 175	3 228	466
Enseignement, recherche	Privé	Toutes performances	1 247	11 842	1 870	4 986	831	1 828
Santé	Privé	Toutes performances	193	1 277	337	530	72	4 560
Cafés Hotels Restaurants	Privé	Toutes performances	13 800	82 800	78 200	48 300	6 900	251
Sport	Privé	Toutes performances	750	2 688	1 625	1 063	125	800
Transport	Privé	Toutes performances	3 600	37 800	21 600	22 500	4 500	287
Bureaux	Public	Performant	846	4 546	3 594	1 374	211	389
Bureaux	Public	Moyen	3 745	20 130	15 917	6 086	936	389
Bureaux	Public	Energivore	1 162	6 246	4 939	1 888	291	389
Enseignement	Public	Toutes performances	4 683	44 490	7 025	18 733	3 122	1 677
Enseignement supérieur	Public	Toutes performances	281	2 669	421	1 124	187	2 169
Hopitaux	Public	Toutes performances	405	2 685	709	1 114	152	6 318
Locaux sportifs	Public	Toutes performances	7 911	28 348	17 141	11 207	1 319	735
Bâtiments culturels	Public	Toutes performances	5 474	19 615	11 860	7 755	912	469
Habitat communautaire	Public	Toutes performances	243	2 794	1 032	1 822	182	3 060
Bâtiments sociaux	Public	Toutes performances	435	5 001	1 848	3 261	326	1 124

Figure 49 : Parc tertiaire en 2015 et surface moyenne des logements
(Analyse UFE selon ENERBAT / ENGIE / DPE / CEREN)

Type	Statut	Performance	C + ECS	Elec spé
Commerces	Privé	Performant	55	60
Commerces	Privé	Moyen	111	121
Commerces	Privé	Energivore	240	262
Bureaux	Privé	Performant	49	35
Bureaux	Privé	Moyen	128	93
Bureaux	Privé	Energivore	247	178
Enseignement, recherche	Privé	Toutes performances	109	31
Santé	Privé	Toutes performances	200	41
Cafés Hotels Restaurants	Privé	Toutes performances	273	111
Sport	Privé	Toutes performances	224	19
Transport	Privé	Toutes performances	171	149
Bureaux	Public	Performant	49	35
Bureaux	Public	Moyen	128	93
Bureaux	Public	Energivore	247	178
Enseignement	Public	Toutes performances	109	31
Enseignement supérieur	Public	Toutes performances	109	31
Hopitaux	Public	Toutes performances	200	41
Locaux sportifs	Public	Toutes performances	224	19
Bâtiments culturels	Public	Toutes performances	170	150
Habitat communautaire	Public	Toutes performances	148	54
Bâtiments sociaux	Public	Toutes performances	190	130

Figure 50 : Consommations surfaciques moyennes par usage (en kWh/m2)
(Analyse UFE selon ENERBAT / ENGIE / DPE / CEREN)

6.1.3 Transport

Le parc de véhicules pour le transport de voyageurs terrestre est le suivant.

	Parc 2015
Véhicule thermique	31 725 000
Bus thermique	26 000
Car thermique	66 000
Véhicule électrique	43 000
Véhicule hybride rechargeable	9 200
Bus électrique	350
Car GNV	2 170

Figure 51 : Parc de véhicules pour le transport de voyageurs en 2015
(Stratégie de Développement de la Mobilité Propre, SOeS)

Pour le transport de marchandises routier, le parc considéré est le suivant :

	Parc 2015
VUL thermique	5 970 000
Poids lourd thermique	551 000
VUL électrique	25 370
Poids lourd GNV	360

Figure 52 : Parc de véhicules pour le transport de marchandises
(Stratégie de Développement de la Mobilité Propre, SOeS)

A chaque technologie est associée une durée de vie. Pour le transport, ces durées de vie sont celles observées par le SOeS.

Durée de vie des actions dans le transport	
Véhicule thermique	14
Bus thermique	14
Car thermique	14
VUL thermique	14
Poids lourd thermique	15
Véhicule électrique	14
Véhicule 2L/100	14
Véhicule hybride rechargeable	14
Véhicule hydrogène	14
Bus électrique	14
Car GNV	14
VUL électrique	14
Poids lourd GNV	15

Figure 53 : Durée de vie des actions dans le transport

Le parcours moyen réalisé chaque année par les différents véhicules est le suivant. Ces chiffres sont issus du SOeS 2014 sur le parcours moyen des véhicules et de la Stratégie de Développement de Mobilité Propre. Ils sont considérés stables sur l'ensemble de la période :

Les données utilisées proviennent de diverses sources publiques telles que le volet Stratégie et Développement de la Mobilité Propre de la PPE.

Type de transport	Mode de transport	Type de trajet	2015
Transport de voyageurs	Routier individuel	-	12 750
Transport de voyageurs	Routier collectif	Proximité	40 265
Transport de voyageurs	Routier collectif	Longue distance	30 175
Transport de marchandises	Routier	Léger	15 960
Transport de marchandises	Routier	Lourd	39 000

Figure 54 : Parcours moyen annuel par type de transport (en km/an)

Pour le transport de voyageurs, les taux de remplissage estimés sont les suivants. L'augmentation annuelle pour les véhicules particuliers correspond à l'hypothèse de la Stratégie de Développement de la Mobilité Propre :

Type de transport	Mode de transport	Type de trajet	Evolution annuelle	2015
Transport de voyageurs	Routier individuel	-	0.5%	1.8
Transport de voyageurs	Routier collectif	Proximité	0%	10.3
Transport de voyageurs	Routier collectif	Longue distance	0%	19.2

Figure 55 : Taux de remplissage pour le transport de voyageurs (en voyageur/véhicule)

Dans le secteur du fret de marchandises, le nombre de tonnes moyen transporté par véhicule est évalué dans le tableau suivant. L'augmentation du taux de chargement des poids lourds correspond à l'objectif fixé par la Stratégie de Développement de la Mobilité Propre à l'horizon 2030 :

Type de transport	Mode de transport	Type de trajet	Evolution annuelle	2015
Transport de marchandises	Routier	Léger	0%	0.3
Transport de marchandises	Routier	Lourd	0.6%	12.4

Figure 56 : Volume moyen de marchandises transportées (en tonne/véhicule)

6.1.4 Industrie

Les consommations d'énergie par industrie sont issues de l'enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie publiée par l'INSEE : Les consommations d'énergie par industrie et par usage sont déterminées

en utilisant les données de l'INSEE³⁷. Les données sur les coûts et les gisements de consommation d'énergie proviennent du CEREN³⁸.

Secteur	Electricité	Gaz	Fioul	Charbon	Biomasse
Industrie AA	19.36	24.93	1.46	1.77	2.01
Sidérurgie	12.22	6.32	0.23	49.43	0.12
Métallurgie non ferreux	6.81	2.56	0.72	0.00	0.00
Minéraux Divers	0.27	0.12	0.10	0.00	0.00
Ciment	2.74	2.70	5.21	3.61	1.45
Mat. Construction	2.80	4.70	0.71	0.34	0.00
Industrie du verre	3.53	8.44	0.66	0.00	0.00
Engrais	0.71	8.92	0.02	0.00	0.30
Chimie minérale	9.34	8.89	0.35	3.32	1.65
Plastiques	2.63	4.47	5.66	0.00	0.59
Autre chimie organique	7.16	8.95	9.30	0.00	4.75
Parachimie	2.82	1.86	0.04	0.00	0.12
Travail des métaux	8.13	5.46	0.37	1.87	0.04
Construction mécanique	2.94	1.45	0.13	0.00	0.02
Construction électrique	4.58	1.62	0.04	0.16	0.01
Construction de véhicule	4.95	2.97	0.17	0.10	0.12
Construction navale, aéronaut	2.42	1.08	0.05	0.00	0.12
Textile	1.37	1.17	0.13	0.00	0.00
Papier	9.21	9.36	0.04	0.32	6.72
Caoutchouc	1.42	0.94	0.01	0.00	0.44
Transformation plastique	5.93	1.36	0.20	0.00	0.17
Divers	4.77	1.96	0.47	0.00	3.05

Figure 57 : Consommations d'énergie de l'industrie (en TWh)
(Source : Analyse UFE selon INSEE et CEREN)

³⁷ INSEE, Enquête annuelle sur les consommations annuelles d'énergie dans l'industrie, 2014.

³⁸ CEREN, Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie, 2013.

6.2 Coûts d'achat et d'installation

6.2.1 Bâtiment

	Maison individuelle	Logement collectif	
		Chauffage individuel	Chauffage collectif
Robineets thermostatiques	238	238	238
RPCC	300	300	600
PAC air/air	8 400	8 400	5 000
PAC air/eau	11 000	11 000	11 000
PAC géothermique	15 000	-	-
PAC hybride	6 840	6 840	6 840
Convecteur électrique	6 000	6 000	-
Chaudière bois	10 300	10 300	5 220
Chaudière condensation gaz	3 600	3 600	1 660
Chaudière condensation fioul	5 500	5 500	1 500
Chaudière micro-cogénération bois	14 400	14 400	2 500
Chaudière micro-cogénération gaz	14 400	14 400	2 500
ECS solaire	5 894	5 894	635
ECS thermodynamique	2 760	2 760	1 656
Appareil à bois	3 600	3 600	1 125
ITE	14 450	7 260	7 260
ITI	8 500	5 750	5 750
Isolation combles	4 005	347	347
Isolation plancher	4 080	345	345
Remplacements ouvrants	9 000	5 400	5 400
Raccordement réseau de chaleur	-	1 125	1 125

Figure 58 : Coûts d'investissement des actions dans le résidentiel (en €/logement)

(Source : Ylios, Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France, 2015)

Dans le secteur tertiaire, les coûts considérés ne peuvent pas être calculés par nombre de logements, car les surfaces moyennes des bâtiments sont très différentes en fonction des services associés (cafés, hôpitaux, écoles ...). Le calcul des surcoûts d'investissement a été fait en fonction des données du résidentiel, de façon à obtenir au final un surcoût exprimé en €/m² de surface chauffée.

6.2.2 Transport

Coûts d'investissement	Evolution annuelle	2015	2020	2025	2030
Véhicule thermique	0%	20 000	20 000	20 000	20 000
Bus thermique	0%	220 000	220 000	220 000	220 000
Car thermique	0%	250 000	250 000	250 000	250 000
VUL thermique	0%	30 000	30 000	30 000	30 000
Poids lourd thermique	0%	230 000	230 000	230 000	230 000
Véhicule électrique	-1.5%	35 000	32 453	30 091	27 900
Véhicule 2L/100	-2.0%	40 000	36 157	32 683	29 543
Véhicule hybride rechargeable	-1.5%	30 000	27 816	25 792	23 915
Véhicule biocarburant	0%	20 000	20 000	20 000	20 000
Véhicule hydrogène	-2%	65 000	60 269	55 882	51 815
Bus électrique	-1%	235 000	229 183	223 511	217 979
Car GNV	-1%	280 000	273 070	266 311	259 719
VUL électrique	-1.2%	45 000	42 364	39 882	37 546
Poids lourd GNV	-1%	260 000	253 565	247 289	241 168

Figure 59 : Evolution des coûts d'investissement dans le transport
(Sources : McKinsey, RATP, CERTU, gaz-mobilite.fr, Dires d'experts)

6.2.3 Industrie

Les surcoûts par action d'efficacité énergétique effectués dans l'industrie sont directement repris de l'étude 2013 du CEREN³⁹ :

Actions	Coûts
Chaufferies	180
Chauffage des locaux	100
Moteurs	400
Air comprimé	55
Froid	55
Ventilation	100
Pompage	100
Transformateur	300
Eclairage	400

Figure 60 : Surcoûts d'investissement des actions dans l'industrie (en €/MWh)
(Source : CEREN)

³⁹ CEREN, Le gisement d'économies d'énergie dans les opérations transverses de l'industrie, 2013.

6.3 Coûts d'entretien

6.3.1 Bâtiment

	Entretien
PAC air/air	200
PAC air/eau	200
PAC géothermique	200
PAC hybride	200
Convecteur électrique	0
Chaudière bois	200
Chaudière condensation gaz	115
Chaudière condensation fioul	115
Chaudière micro-cogénération bois	115
Chaudière micro-cogénération gaz	115
Appareil à bois	200
Raccordement réseau de chaleur	0

Figure 61 : Coûts de maintenance des actions du bâtiment (en €/an)
(Source : www.quellenergie.fr)

6.3.2 Transport

Maintenance	2015
Véhicule thermique	600
VUL thermique	600
Véhicule électrique	420
Véhicule 2L/100	600
Véhicule hybride rechargeable	600
Véhicule biocarburant	600
Véhicule hydrogène	600
VUL électrique	420

Figure 62 : Coûts de maintenance des actions du transport (en €/an).
(Sources : ADEME, CERTU, Dires d'experts)

6.4 Impacts des actions sur la consommation énergétique

6.4.1 Résidentiel

Dans le bâtiment, l'impact d'une action donnée pourra varier selon le segment du parc auquel elle est appliquée, notamment :

- **Le type de bâtiment** : les réductions de consommation d'énergie sont différentes selon que les logements soient collectifs ou individuels.
- **Le type de combustible** de chauffage avant la mise en œuvre de l'action

Ces impacts sur la réduction de la consommation d'énergie d'un logement sont issus de l'étude menée en 2014 par l'Ademe, Engie, la CDC et l'UFE.

Maison individuelle									
Action	Durée de vie	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
Robinets thermostatiques	15	5%	5%	5%	N/A	N/A	5%	5%	5%
RPCC	8	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
PAC air/air	15	N/A	N/A	N/A	50%	N/A	N/A	N/A	N/A
PAC air/eau	15	33%	50%	50%	61%	N/A	50%	28%	28%
PAC géothermique	15	51%	51%	48%	75%	N/A	48%	48%	48%
PAC hybride	15	33%	33%	28%	61%	N/A	28%	28%	28%
Convecteur électrique	15	N/A	16%	16%	16%	16%	16%	16%	N/A
Chaudière bois	15	11%	11%	10%	64%	64%	10%	10%	1%
Chaudière condensation gaz	15	25%	25%	25%	71%	71%	25%	25%	25%
Chaudière condensation fioul	15	0%	21%	21%	61%	61%	21%	21%	1%
Chaudière micro-cogénération bois	15	21%	21%	21%	41%	41%	21%	21%	10%
Chaudière micro-cogénération gaz	15	21%	21%	21%	41%	41%	21%	21%	10%
ECS solaire	15	70%	70%	50%	69%	69%	50%	70%	70%
ECS thermodynamique	15	39%	39%	39%	97%	97%	39%	39%	39%
Appareil à bois	15	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
ITE	30	23%	23%	25%	22%	22%	25%	23%	23%
ITI	30	18%	18%	20%	18%	18%	20%	18%	18%
Isolation combles	30	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Isolation plancher	30	11%	10%	10%	12%	11%	11%	11%	11%
Remplacements ouvrants	30	5%	5%	5%	4%	4%	5%	5%	5%
Raccordement réseau de chaleur	15	1%	1%	1%	61%	61%	1%	1%	1%

Figure 63 : Réductions de la consommation d'énergie des actions dans les maisons individuelles
(Source : Ylios, Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France, 2015)

Logement collectif									
Action	Durée de vie	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
Robinets thermostatiques	15	5%	5%	5%	N/A	N/A	5%	5%	5%
RPCC	8	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
PAC air/air	15	N/A	N/A	N/A	50%	N/A	N/A	N/A	N/A
PAC air/eau	15	23%	50%	50%	60%	N/A	50%	23%	23%
PAC géothermique	15	51%	51%	48%	75%	1%	48%	48%	48%
PAC hybride	15	23%	23%	23%	60%	N/A	23%	23%	23%
Convecteur électrique	15	N/A	16%	16%	16%	16%	16%	16%	N/A
Chaudière bois	15	11%	11%	10%	64%	64%	10%	10%	1%
Chaudière condensation gaz	15	25%	25%	25%	71%	71%	25%	25%	25%
Chaudière condensation fioul	15	0%	25%	25%	61%	61%	25%	25%	1%
Chaudière micro-cogénération bois	15	29%	29%	29%	56%	56%	29%	29%	29%
Chaudière micro-cogénération gaz	15	29%	29%	29%	56%	56%	29%	29%	29%
ECS solaire	15	37%	37%	37%	37%	37%	37%	37%	37%
ECS thermodynamique	15	43%	43%	43%	82%	82%	43%	43%	43%
Appareil à bois	15	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
ITE	30	37%	37%	37%	39%	39%	37%	37%	37%
ITI	30	40%	40%	41%	42%	42%	40%	40%	40%
Isolation combles	30	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
Isolation plancher	30	10%	10%	10%	11%	10%	10%	10%	10%
Remplacements ouvrants	30	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
Raccordement réseau de chaleur	15	1%	1%	1%	61%	61%	1%	1%	1%

Figure 64 : Réductions de la consommation d'énergie des actions dans les logements collectifs
(Source : Ylios, Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France, 2015)

Pour certaines technologies, telles que les pompes à chaleur ou les chaudières à condensation, la performance s'améliore au cours des années, selon les variations des rendements saisonniers évoqués par l'ADEME dans Vision 2030-2050.

	2015	2020	2025	2030
PAC air/air	3.25	3.50	3.75	4.00
PAC géothermique	3.79	4.08	4.38	4.67
Convecteur électrique	0.98	0.98	0.98	0.98
Chaudière condensation gaz	0.92	0.93	0.95	0.96
Chaudière condensation fioul	0.85	0.86	0.88	0.90
ECS solaire	1.83	1.85	1.88	1.90

Figure 65 : Evolution des rendements des technologies entre 2015 et 2030
(Source : ADEME)

6.4.2 Tertiaire

Action	Durée de vie	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Electricité	Fioul	Autres
GTB/RPCC	8	5%	5%	5%	5%	5%
PAC air/air	15	N/A	N/A	33%	N/A	N/A
PAC air/eau	15	33%	33%	61%	28%	28%
Chaudière bois	15	11%	11%	64%	10%	21%
Chaudière condensation gaz	15	25%	25%	71%	25%	36%
Raccordement réseau de chaleur	15	1%	1%	N/A	1%	1%
ITE / Combles	30	24%	24%	24%	25%	24%
Ouvrants / Doubles vitrages	30	5%	5%	4%	5%	5%
Optimisation systèmes climatisation	15	5%	5%	5%	5%	5%
Eclairage public	15	10%	10%	10%	10%	10%
Relamping	20	11%	11%	11%	11%	11%

Figure 66 : Réductions de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire
(Source : Ylios, Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France, 2015)

6.4.3 Transport

Pour les véhicules fonctionnant avec du carburant fossile, l'hypothèse a été prise que leur efficacité s'améliorait de 1 % chaque année.

Les consommations des différents modes de transport sont les suivantes :

Mesure	Evolution annuelle	2015
Véhicule thermique	-1%	67
Bus thermique	-1%	461
Car thermique	-1%	436
VUL thermique	-1%	90
Poids lourd thermique	-1%	404
Véhicule électrique	0%	25
Véhicule 2L/100	0%	19
Véhicule hybride rechargeable	0%	46
Véhicule biocarburant	-1%	40
Véhicule hydrogène	-1%	63
Bus électrique	0%	130
Car GNV	-1%	313
VUL électrique	0%	34
Poids lourd GNV	-1%	375

Figure 67 : Consommations unitaires du transport (en kWh/100km)
(Sources : ADEME, CERTU, Dires d'expert)

6.5 Capacités des filières

6.5.1 Bâtiment

Les volumes des filières en 2015 sont issus d'Uniclima et de l'enquête OPEN 2014.

Dans le cas où la capacité maximum de la filière est atteinte en année n-1, la capacité d'installation de la filière s'adapte pour les années suivantes en augmentant selon un taux de flexibilité. Ces derniers tiennent compte de la maturité de la filière en question.

Ces contraintes s'appliquent sur le volume de déploiement annuel. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Action	Type logement	Taux de saturation	2015
Robinets thermostatiques	MI	2%	187 200
	LCI	10%	51 840
	LCC	10%	48 960
RPCC	MI	2%	228 800
	LCI	2%	88 000
	LCC	10%	35 200
PAC air/air	MI	2%	120 000
	LCI	2%	80 000
	LCC	0%	-
PAC air/eau	MI	2%	72 000
	LCI	20%	8 000
	LCC	0%	-
PAC géothermique	MI	20%	3 000
	LCI	0%	-
	LCC	0%	-
Chaudière condensation fioul	MI	10%	15 200
	LCI	0%	-
	LCC	20%	3 800
Chaudière condensation gaz	MI	2%	123 200
	LCI	10%	57 200
	LCC	10%	39 600
Chaudière micro-cogénération bois	MI	20%	2 800
	LCI	20%	1 300
	LCC	20%	900
Chaudière micro-cogénération gaz	MI	20%	4 480
	LCI	20%	2 080
	LCC	20%	1 440
Chaudière bois	MI	10%	17 600
	LCI	0%	-
	LCC	20%	4 400
PAC hybride	MI	20%	1 371
	LCI	20%	957
	LCC	0%	-

Action	Type logement	Taux de saturation	2015
Convecteur électrique	MI	2%	172 500
	LCI	2%	57 500
	LCC	0%	-
Appareil à bois	MI	2%	65 000
	LCI	0%	-
	LCC	0%	-
ECS solaire	MI	20%	9 840
	LCI	0%	-
	LCC	20%	2 460
ECS thermodynamique	MI	10%	53 200
	LCI	20%	22 800
	LCC	0%	-
Isolation Thermique Extérieure	MI	2%	64 960
	LCI	10%	30 160
	LCC	20%	20 880
Isolation Thermique Intérieure	MI	2%	85 904
	LCI	10%	39 884
	LCC	10%	27 612
Isolation combles	MI	2%	191 750
	LCI	10%	115 050
	LCC	10%	76 700
Isolation plancher	MI	2%	128 856
	LCI	10%	59 826
	LCC	10%	41 418
Remplacements ouvrants	MI	2%	204 400
	LCI	2%	94 900
	LCC	2%	65 700
Raccordement réseau de chaleur	MI	0%	-
	LCI	0%	-
	LCC	20%	13 000

Figure 68 : Capacités initiales et évolution des filières dans le résidentiel
(Source : Uniclimate, ADEME, Dires d'experts)

Pour le tertiaire, à la différence de ce qui peut être réalisé dans le résidentiel, il n'est pas possible d'exprimer les filières en terme d'installations par logement car le parc est spécifique et possède des surfaces moyennes très différentes. Les filières sont donc plutôt considérées en termes de m² couverts, et suivent les mêmes proportions que celles identifiées dans le secteur résidentiel.

6.5.2 Transport

Les filières dans le transport correspondent aux ventes estimées pour 2016 :

	2015
Véhicule électrique	25 000
Véhicule 2L/100	1 000
Véhicule hybride rechargeable	8 000
Véhicule biocarburant	6 248
Véhicule hydrogène	1 000
Bus électrique	100
Car GNV	250
VUL électrique	7 000
Poids lourd GNV	360

Figure 69 : Capacités initiales des filières pour le transport
(Sources : CCFA, SOeS, Estimations UFE)

Dans le transport, pour les filières considérées comme non matures, les taux d'évolution varient en fonction de l'année.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Véhicule électrique	100%	100%	75%	50%	50%	25%	25%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Véhicule 2L/100	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Véhicule hybride rechargeable	100%	100%	75%	75%	50%	50%	25%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Véhicule biocarburant	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Véhicule hydrogène	0%	0%	0%	0%	100%	100%	75%	50%	50%	25%	25%	5%	5%	5%	5%
Bus électrique	150%	100%	100%	50%	20%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Car GNV	150%	100%	100%	50%	20%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
VUL électrique	100%	100%	75%	50%	25%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Poids lourd GNV	100%	100%	100%	75%	75%	50%	50%	25%	25%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

Figure 70 : Taux d'évolution des filières dans le transport
(Source : Dires d'experts)

6.6 Compatibilité et gisements disponibles

6.6.1 Bâtiment

Le tableau ci-dessous explicite les incompatibilités de déploiement entre les actions retenues dans les secteurs résidentiel et tertiaire. La première ligne du tableau liste les actions préalablement installées – que ce soit sur le parc de départ ou parce que la mesure, mieux classée dans l'interclassement des solutions, a été déployée. Les lignes suivantes envisagent le déploiement des autres actions : une case verte dénote la possibilité de ce déploiement, tandis qu'une case rouge dénote une incompatibilité.

	Chauffage urbain	Gaz de réseau	Fioul	Elec - effet Joule	Elec - PAC	GPL	Charbon	Bois
Robinetts thermostatiques	1	1	1	0	0	1	1	1
RPCC	0	1	1	1	1	1	1	1
PAC air/air	0	0	0	1	0	0	0	0
PAC air/eau	0	1	1	0	0	1	1	1
PAC géothermique	0	1	1	0	0	1	1	1
PAC hybride	0	1	1	0	0	1	1	1
Convecteur électrique	0	1	1	1	0	1	1	1
Chaudière bois	0	1	1	0	0	1	1	0
Chaudière condensation gaz	0	1	1	0	0	1	1	1
Chaudière condensation fioul	0	0	1	0	0	1	1	1
Chaudière micro-cogénération bois	0	1	1	0	0	1	1	1
Chaudière micro-cogénération gaz	0	1	1	0	0	1	1	1
ECS solaire	0	1	1	1	1	1	1	1
ECS thermodynamique	0	1	1	1	1	1	1	1
Appareil à bois	1	1	1	1	1	1	1	1
ITE	1	1	1	1	1	1	1	1
ITI	1	1	1	1	1	1	1	1
Isolation combles	1	1	1	1	1	1	1	1
Isolation plancher	1	1	1	1	1	1	1	1
Remplacements ouvrants	1	1	1	1	1	1	1	1
Raccordement réseau de chaleur	0	1	1	0	0	1	1	1

Figure 71 : Matrice de compatibilité entre actions et énergies de chauffage

De la même façon, toutes les actions considérées ne sont pas compatibles avec tous les types de logements. Ainsi, il est considéré qu'il n'est pas possible d'installer une chaudière condensation gaz dans un logement ne disposant pas de boucle d'eau chaude. Le tableau ci-dessous illustre ces incompatibilités.

	Robinetts thermostatiques	RPCC	PAC air/air	PAC air/eau	PAC géothermique	PAC hybride	Convecteur électrique
MI	1	1	1	1	1	1	1
LCI	1	1	1	1	0	1	1
LCC	1	1	0	0	0	0	0

	Chaudière micro-cogénération gaz	ECS solaire	ECS thermodynamique	Appareil à bois	ITE	ITI	Isolation combles
MI	1	1	1	1	1	1	1
LCI	1	0	1	0	1	1	1
LCC	1	1	0	0	1	1	1

	Chaudière condensation gaz	Chaudière condensation fioul	Chaudière micro-cogénération bois	Remplacements ouvrants	Raccordement réseau de chaleur	Chaudière bois	Isolation plancher
MI	1	1	1	1	0	1	1
LCI	1	0	1	1	1	0	1
LCC	1	1	1	1	1	1	1

Figure 72 : Matrice de compatibilité entre actions et types de logements

6.6.2 Industrie

Le gisement théorique d'économies d'énergie des utilités industrielles est évalué selon le CEREN à 64 TWh.

Usage	Gisement total par usage
Chaufferies	20%
Chauffage des locaux	19%
Moteurs	29%
Air comprimé	5%
Froid	5%
Ventilation	9%
Pompage	6%
Transformateur	2%
Eclairage	5%

Figure 73 : Part des usages dans le gisement disponible (en %)
(Source : CEREN)