

# Rapport

Mines Paris PSL - Projet MIG EMIX

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Mix électrique et biogaz</b>	<b>2</b>
1.1	Situation et objectifs globaux . . . . .	2
1.2	Mix électrique futur . . . . .	3
1.3	Biométhane . . . . .	4
1.4	Hydrogène . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Industrie</b>	<b>5</b>
2.1	Situation et objectifs globaux . . . . .	6
2.2	Métallurgie et produits métalliques . . . . .	7
2.3	Chimie . . . . .	9
2.4	Matériaux non métalliques et plastiques . . . . .	9
2.5	Industrie agroalimentaire . . . . .	11
2.6	Bois, papier et carton . . . . .	11
2.7	Faisabilité . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Transports</b>	<b>13</b>
3.1	Situation et objectifs globaux . . . . .	13
3.2	Véhicules particuliers . . . . .	13
3.3	Transport routier : poids lourds . . . . .	16
3.4	Transport aérien . . . . .	18
3.5	Transport maritime . . . . .	18
3.6	Transport ferroviaire . . . . .	19
3.7	Faisabilité . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Bâtiments</b>	<b>20</b>
4.1	Situation et objectifs globaux . . . . .	20
4.2	Isolation, chauffage et eau chaude sanitaire . . . . .	21
4.3	Climatisation et réfrigération . . . . .	25
4.4	Autres usages électriques . . . . .	25
4.5	Évolution du parc de bâtiment . . . . .	26
4.6	Faisabilité . . . . .	28

# Introduction

Ce rapport propose une synthèse de différents scénarios et projections sur le mix énergétique français, et de réfléchir à la décarbonation de trois des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre (GES) en France : l'industrie, le bâtiment et le transport intérieur (l'agriculture ne sera pas considérée). Nous avons tenté de considérer des hypothèses "réalistes", et avons intégré dans nos recherches les considérations des entreprises que nous avons visitées, qui parfois diffèrent. Nous tentons, avec nos projections, d'atteindre les objectifs de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) en 2030 et en 2050, tout en considérant des solutions techniquement réalisables.

Cela nous mène tout d'abord à la construction d'un mix électrique possible, et des recherches sur le potentiel de production d'hydrogène et de biogaz, nécessaires à la décarbonation de nos trois secteurs.

Pour chacun d'entre eux, une étude similaire est menée : nous commençons par un état de l'art, et par les calculs d'émissions futures pour être en accord avec la SNBC. On étudie ensuite toutes les pistes de décarbonation du secteur, et tentons de faire des projections en accord avec ces possibilités. Nous chiffrons ces données, et tentons d'évaluer leur faisabilité technique, le lien avec les autres secteurs, et les coûts approximatifs. Certaines critiques de notre modèle, des données et scénarios extérieurs, seront aussi ajoutées.

## 1 Mix électrique et biogaz

Aujourd'hui, le mix électrique français est très peu émetteur grâce à l'utilisation massive du nucléaire (environ 70 % de la production). Cependant, les centrales étant vieillissantes, il est nécessaire d'évaluer l'évolution de la production d'électricité à l'horizon 2030 et 2050 ainsi que les émissions associées (données utiles pour la suite de notre étude). De son côté, le biométhane apparaît comme une alternative au gaz naturel permettant, avec l'hydrogène, une diversification du mix énergétique de façon générale, dont l'importance est soulignée par la plupart des entreprises du secteur de l'énergie.

### 1.1 Situation et objectifs globaux

Source énergétique	gCO <sub>2</sub> eq / kWh
Nucléaire	6
Hydraulique	6
Éolien	6
Solaire	45
Biomasse - biométhane	18,8
Gaz naturel	233
Charbon	345

TABLE 1 – Émissions de CO<sub>2</sub> par source énergétique (données ADEME).

L'électricité est un des leviers clés pour atteindre les objectifs fixés pour 2030 et 2050 dans chaque secteur. Pour quantifier les émissions de chaque domaine énergétique, nous avons pris les données de l'ADEME, celles-ci étant suffisamment précises, fiables et complètes pour nous permettre d'assurer une cohérence dans tout le projet. Il apparaît que les énergies les plus émissives sont sans surprise le charbon et le gaz naturel, tandis que les moins émissives en France sont le nucléaire et l'hydraulique.

En 2020, la répartition de ces différents moyens de production d'électricité est donnée par les chiffres de RTE. Le nucléaire et l'hydraulique sont majoritaires aujourd'hui, expliquant le caractère peu émissif de notre électricité. En prenant en compte ces différentes proportions, l'électricité émet, en 2020, 29,6 gCO<sub>2</sub> eq / kWh.

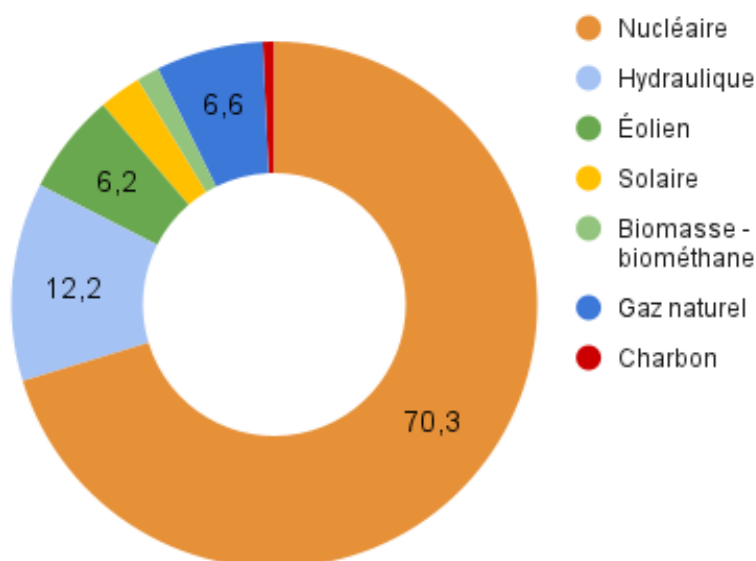


FIGURE 1 – Mix électrique français en 2020.

Concernant le biométhane, sa production en France est d'environ 13 TWh en 2023, ce qui correspond à 3,3 % du gaz dans le réseau français. En février 2024, on dénombre 667 sites de production en France (principalement dans le nord et l'est du pays) et 650 sites d'injection dans le réseau de gaz naturel. L'agriculture produit 80 % du biométhane, qui est obtenu à partir de résidus de la chaîne alimentaire, de boues de stations d'épuration et de déchets des collectivités et ménages.

Enfin, en 2022, la production de dihydrogène pur en France s'élevait à près de 200 000 tonnes (c'est-à-dire 6,6 TWh) d'après le Ministère de la transition écologique. L'hydrogène français est principalement produit par les raffineries et les sites industriels en chimie, qui utilisent une grande partie de leur production pour répondre à leurs besoins. Il est notamment utilisé pour la désulfuration des produits pétroliers, la production de chaleur et en tant que matière première, mais encore très peu dans le mix électrique et les transports.

Toutefois, s'il est aujourd'hui entièrement produit industriellement, Air Liquide nous a expliqué que l'exploitation (extraction + stockage) de l'hydrogène blanc (hydrogène présent dans la nature) constituerait une perspective inespérée pour le mix énergétique de demain. Cependant, soutenir les projets à l'hydrogène n'a pas de sens si sa production reste d'origine fossile et très émissive de CO<sub>2</sub>, comme c'est le cas aujourd'hui.

## 1.2 Mix électrique futur

La répartition actuelle de la production d'électricité se doit d'être actualisée pour 2030 et 2050. Cette répartition et, plus précisément, le facteur d'émission associé nous seront utiles dans nos estimations d'émissions futures pour chaque secteur.

Pour définir la marche à suivre, nous avons considéré les scénarios de RTE. Étant un domaine extrêmement peu émissif une fois installé, le nucléaire peut être un atout important dans la transition énergétique qui nous attend dans les prochaines années. De plus, son impact sur le territoire est bien moindre que celui de l'éolien et du photovoltaïque.

C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur les trois scénarios (parmi les six proposés par RTE) continuant à envisager le nucléaire dans le mix électrique de 2050. Sur ces trois scénarios, nous avons choisi de sélectionner la trajectoire centrale. Celle-ci correspond à une continuation de l'exploitation du nucléaire, avec de nouveaux projets avancés au rythme maximal de la filière communiquée à ce jour, sans pour autant relancer le secteur en développant du nouveau nucléaire (petits réacteurs modulaires) comme dans la trajectoire haute.

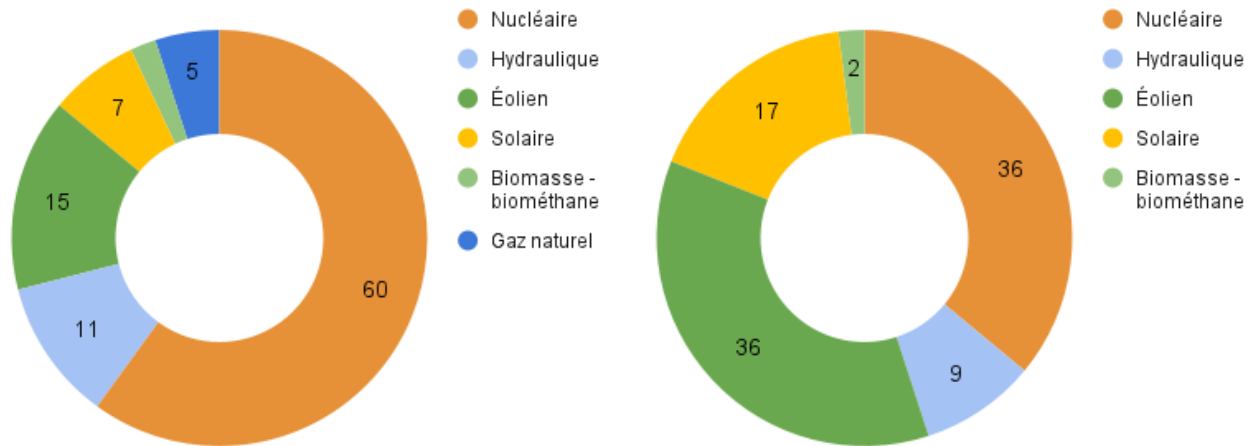


FIGURE 2 – Mix électrique français en 2030 puis 2050.

Dès lors, on peut estimer le facteur d'émission à 21,1 gCO<sub>2</sub> eq / kWh pour 2030. Pour celui de 2050, le facteur d'émission retenu est de 3 gCO<sub>2</sub> eq / kWh. Celui-ci est calculé à l'aide des données de RTE : en 2050, les émissions directes seraient de 2 MtCO<sub>2</sub> eq et la production d'électricité de 670 TWh. Toutefois, la quantification précise de ces émissions est amenée à évoluer selon le mix électrique réel et l'évolution des émissions liées aux cycles de vie des dispositifs nécessaires à la production d'électricité.

Selon le scénario retenu, les capacités installées et les productions associées sont les suivantes :

Filière	Nucl.	Nv nucl.	Éol terre	Éol mer	Solaire	Hydrau.	BioE	Therm
Capacité	16	23	52	36	90	22	2	0,5
Production	93	159	104	129	110	63	12	0,5

TABLE 2 – Capacités installées (GW) et productions associées (TWh) pour chaque filière.

De plus, il est essentiel d'assurer une marge de manœuvre énergétique pilotable pour s'adapter à la demande en électricité. Les moyens de flexibilité sont d'autant plus importants à l'horizon 2050 étant donné l'utilisation croissante d'énergies renouvelables. Ainsi, les hypothèses retenues pour les moyens de flexibilité sont entre autres les interconnexions.

Cette importance a été soulignée lors de la visite chez RTE, avec un rééquilibrage permanent de la fréquence autour de 50 Hz grâce à tous les producteurs du réseau synchrone d'Europe continentale : RTE va parfois même jusqu'à couper des parcs éoliens lorsqu'il y a un surplus de production pour conserver cette fréquence. Les centrales thermiques au biométhane ainsi que les STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) sont également amenées à avoir un rôle majeur pour assurer l'équilibre offre-demande.

### 1.3 Biométhane

Le biométhane est le méthane produit à partir d'épuration du biogaz – généré par la fermentation de matières organiques. Il produit (d'après notre visite chez GRTgaz) 80 à 90 % moins de CO<sub>2</sub>

que le gaz naturel : on considère que ce gaz provient de matière qui a capté du  $\text{CO}_2$  et le bilan est donc le même que celui du bois. Le gaz produit est renouvelable et non fossile, c'est l'alternative au gaz naturel retenue par toutes les entreprises.

Les objectifs annoncés par GRTgaz sont d'avoir 20 % de biogaz en 2030 et 100 % en 2050. Mais les engagements nationaux déjà annoncés nous amènent à 10 % en 2030, chiffre corroboré par l'ADEME. L'entreprise n'est pas productrice mais transporteuse de gaz, et ne peut donc remplir elle-même ces objectifs ambitieux. Nous prenons pour nos calculs la valeur de GRDF de 60 TWh de production en 2030 avec une consommation similaire de gaz, ce qui représenterait 15 % de biogaz. Pour 2050, on prend le scénario bas de l'ADEME de 75 % de biogaz, en accord également avec les récentes prévisions d'un scénario du *Shift Project*.

L'utilisation de gaz dans l'industrie diminue de peu, pour les transports elle augmente légèrement et diminue dans le résidentiel (divisée par 3). Ainsi, le gaz apparaît comme un vecteur énergétique dont on ne pourra se passer, prévision soutenue par l'IEA. Il est donc primordial de le décarboner et de soutenir toute initiative allant dans ce sens.

## 1.4 Hydrogène

Comme il sera expliqué pour chacun des secteurs l'exploitant, la demande d'hydrogène va augmenter pour atteindre la neutralité carbone, notamment dans le secteur industriel. Cela s'intègre dans une logique de diversification des énergies utilisées. Pour s'aligner sur cette demande, il faut une production décuplée et surtout décarbonée, donc une production électrique bien plus grande pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Dans les études qui suivent, on minimisera cependant le recours à l'hydrogène car son rendement global est faible.

Pour accompagner la transition des carburants fossiles vers l'hydrogène, les cibles privilégiées sont les hydrogènes dits "vert" (produit par électrolyse d'origine renouvelable ou nucléaire) et "bleu" (obtenu par reformage de gaz naturel avec captation du  $\text{CO}_2$  produit). Malgré la captation carbone, l'hydrogène bleu émet 3 kilogrammes de  $\text{CO}_2$  par kilogrammes de  $\text{H}_2$ . On comprend donc que celui-ci ne pourra pas être une solution de décarbonation à long terme à cause de son empreinte carbone non négligeable.

L'ADEME donne le chiffre de 15 à 20 TWh d'hydrolyse par an en France pour l'utilisation industrielle de l'hydrogène – en cas d'utilisation pour la production d'acier –, ce que nous considérerons d'ici 2050. Cela correspond à environ deux tranches nucléaires supplémentaires en France, c'est-à-dire une puissance continue d'au moins 2 GW. Cependant, notre visite chez Air Liquide nous a appris l'existence d'un unique projet d'électrolyseur de 800 MW en France, abandonné au vu de la quantité d'électricité nécessaire à son fonctionnement. Cela semble étonnant au vu des investissements prévus dans la sidérurgie.

Ainsi, malgré l'engouement autour de l'hydrogène et sa place importante dans la transition énergétique de certains secteurs, peu de projets se développent.

## 2 Industrie

En France, l'industrie représente aujourd'hui 18,1 % des émissions de GES, ce qui en fait le troisième secteur le plus émetteur derrière les transports et l'agriculture. Malgré la désindustrialisation de l'Europe, l'activité perdure sur le continent et se doit de réaliser sa transition énergétique à l'horizon 2050.

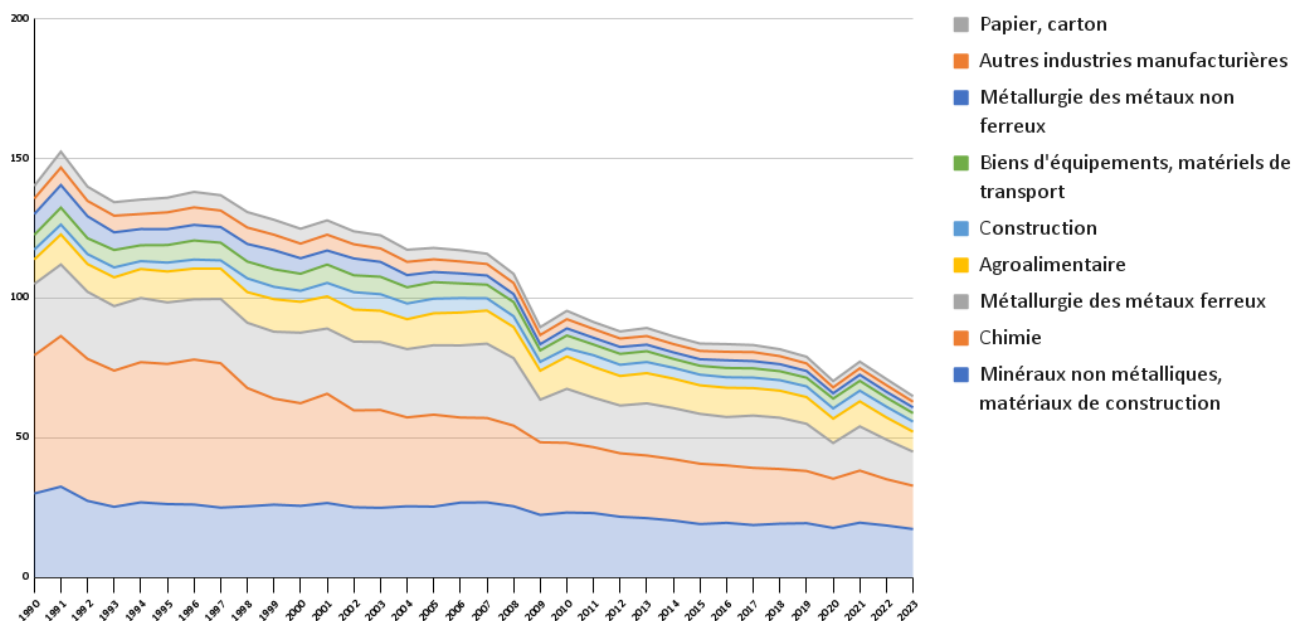


FIGURE 3 – Emissions de l'industrie par sous catégories (MtCO<sub>2</sub> éq) - chiffres clés du climat 2024.

## 2.1 Situation et objectifs globaux

Les émissions de l'industrie représentent au total 64,85 MtCO<sub>2</sub> éq en 2023. L'évolution des émissions de ce secteur est donnée par sous-catégories sur la figure ci-dessous.

On remarque tout d'abord une forte diminution des émissions depuis 1990. Bien que cette évolution soit positive à l'échelle de la France, il faut la nuancer car il s'agit plutôt d'une exportation de nos émissions, qui n'ont fait qu'augmenter globalement. En effet, la France s'est petit à petit désindustrialisée, et mise à part la diminution des émissions liées au N<sub>2</sub>O, on ne peut pas attribuer cette évolution à une politique de décarbonation.

On identifie néanmoins quatre secteurs majoritaires en termes d'émissions : les minéraux non métalliques, la chimie, la métallurgie et l'agroalimentaire. Ce sont les secteurs auxquels nous nous sommes intéressés dans cette étude, et pour lesquels nous avons recherché des moyens de décarbonation, ainsi qu'une idée approximative des financements nécessaires pour cette décarbonation (coûts des infrastructures à construire/remplacer, captation de CO<sub>2</sub>). Une autre approche serait d'identifier les secteurs par leur consommation d'énergie.

On retrouve bien nos quatre secteurs définis précédemment comme très émissifs. On retient néanmoins un autre secteur notable dans sa consommation d'énergie : le secteur bois-papier-imprimerie. Ce dernier est moins émissif car il utilise de la biomasse ayant absorbé une certaine quantité de CO<sub>2</sub> avant d'être utilisée. Toutefois, il est intéressant de regarder l'impact de l'électrification de ce secteur.

Pour comprendre précisément l'impact de chaque secteur et leurs marges de manœuvre, on peut croiser les données précédentes en calculant de façon approximative les émissions en CO<sub>2</sub> éq à partir du type d'énergie consommée. Pour ce faire, nous avons utilisé les données de notre première partie et de la base carbone 2015 de l'ADEME ci-jointe (que nous actualiserons pour 2030 et 2050 pour l'électricité et l'hydrogène). On retrouve alors les ordres de grandeur des émissions de chaque secteur, et on peut expliquer leur provenance. De plus, ce détail nous permettra d'estimer les émissions futures selon les stratégies mises en place pour chaque secteur.

Ajoutons à ces données passées nos objectifs : ceux de 2030 et ceux de 2050 que nous calculons à la proportionnelle de chaque secteur industriel en 2020, en utilisant les objectifs du gouvernement français dans le cadre de la SNBC. Ces objectifs s'inscrivent dans ceux donnés par l'Europe : - 55 % des émissions par rapport à 1990. Celui global de l'industrie se situe à 54 MtCO<sub>2</sub> éq en 2030 et

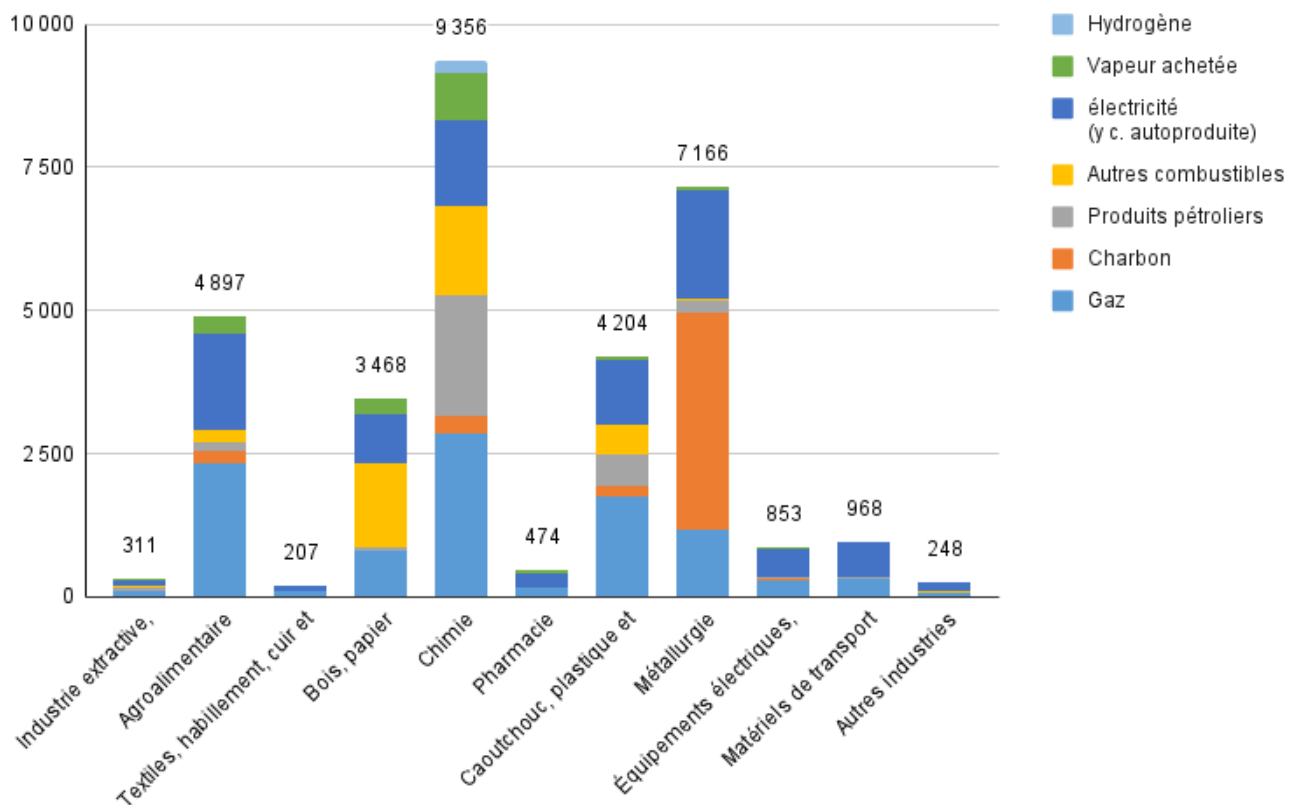


FIGURE 4 – Utilisation énergétique des différents secteurs (ktep) - Insee, enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie (EACEI) 2020.

Source d'énergie	kgCO <sub>2</sub> éq / tep	gCO <sub>2</sub> éq / kWh
Charbon	4002	345
Pétrole	3282,8	283
Gaz (GNL)	2702,8	233
Électricité	343,36	29,6
Hydrogène (fossile aujourd'hui)	2552	220
Biomasse / biométhane	218,08	18,8

TABLE 3 – Emissions de CO<sub>2</sub> en fonction des sources d'énergie.

15 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Ce sont des baisses drastiques qui correspondent à des diminutions respectives de 35 % et 81 % des émissions par rapport à 2015.

Comme on le supposait, il faut réduire franchement notre utilisation de combustibles fossiles, ou notre recours aux réactions polluantes (béton, acier). Cela passe par différents moyens, que nous allons maintenant étudier, sans supposer de diminution de la production. Nous nous concentrerons en particulier sur la décarbonation des moyens permettant de produire de la chaleur, car celle-ci est majoritairement produite à partir d'énergies fossiles et représente la plus grosse part des émissions du secteur industriel.

## 2.2 Métallurgie et produits métalliques

Les émissions du secteur de la métallurgie sont parmi les plus importantes de l'industrie avec 19,6 MtCO<sub>2</sub> éq émises en 2020. Les objectifs se traduisent dans ce secteur par, en 2030, 11,95 MtCO<sub>2</sub> éq et, en 2050, 3,49 MtCO<sub>2</sub> éq. La réduction est, comme partout, drastique.

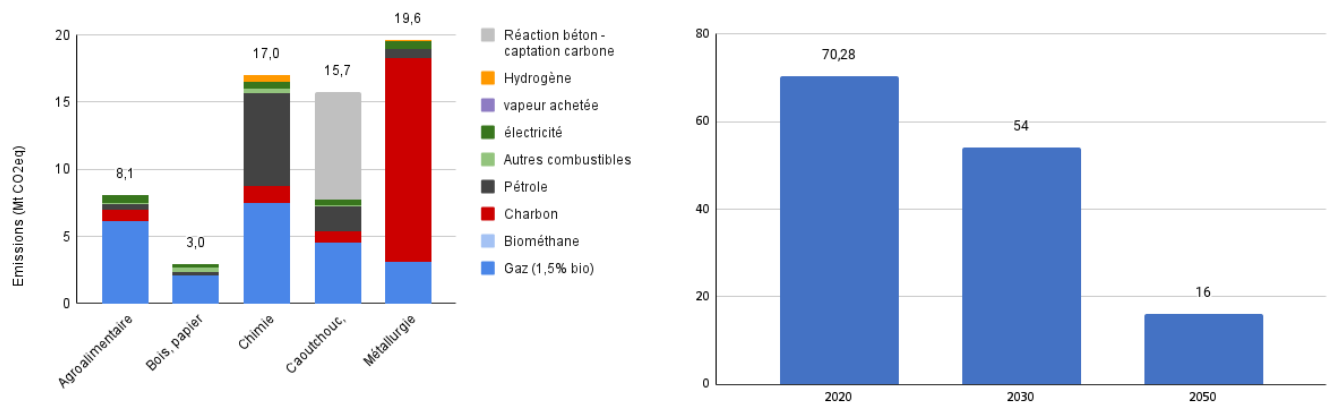


FIGURE 5 – Emissions par secteur selon l'énergie utilisée et objectifs de réduction pour l'industrie (MtCO<sub>2</sub> eq).

On commence par définir plus précisément ce domaine de réduction d'émissions : on se concentrera sur les productions d'acier et d'aluminium, qui sont les deux métaux les plus produits en France (près de 18 Mt d'acier sont produites par an, contre 1 Mt pour l'aluminium et moins de 0,2 Mt pour les autres métaux comme le cuivre ou le zinc).

Pour l'aluminium, les émissions sont dues aux procédés d'extraction du minerai, utilisant une électrolyse, émettant et consommant du gaz. Pour l'acier, c'est la réduction du fer avec du charbon qui est la plus émettrice, ce à quoi l'on ajoute l'utilisation de gaz dans les fours. Pour réduire les émissions, on se penche en premier lieu sur la suppression du charbon, puis sur l'électrification, le gaz pouvant être gardé pour les usages à plus hautes températures car de moins en moins carboné.

La réduction du fer peut se produire dans un procédé alternatif plus coûteux en utilisant du dihydrogène. Cela nécessite de nouvelles installations pour convertir entièrement ces usages. Le producteur d'acier en France, ArcelorMittal, a déjà signé avec l'État français des plans d'investissement pour décarboner trois de ses cinq sites d'ici 2030 et le reste d'ici 2050. Pour l'aluminium, l'ADEME prévoit plutôt l'installation de captage de carbone en sortie de production, et l'électrification de ses usages pour remplacer le gaz.

Ces solutions sont techniquement réalisables et ont déjà été appliquées : l'utilisation de l'hydrogène par ArcelorMittal, et, chez Air Liquide, les techniques de captation de CO<sub>2</sub> en sortie d'usine sur des sites industriels et centrales à charbon. De même pour l'électrification des fours. Leur inconvénient est, sans surprise encore, le coût. Les installations de DRI (fours à hydrogène pour l'acier) se comptent en milliards (2 à 5 par installation en comptant les fours électriques également) ; et l'installation de captation carbone coûte près de 200 millions d'euros par site (comptant aussi l'installation de cuves à hydrolyse prévues pour le captage).

En utilisant les prévisions de l'ADEME, les chiffres d'Air Liquide, et d'ArcelorMittal, on arrive sur un budget d'investissement de 6 milliards d'euros d'ici 2030 et 18 milliards d'euros d'ici 2050. Rappelons que l'on n'a compté que les deux métaux les plus produits, et que ce sont des investissements minimaux.

De plus, les coûts de production devraient aussi augmenter : le coût du captage est d'au moins 100 € par tonne de CO<sub>2</sub>, et l'hydrogène n'est pas rentable face au charbon. Des réglementations doivent être imposées pour rendre viables ces procédés décarbonés, dont les coûts d'investissement sont largement supérieurs à ce que l'État compte investir.

Avec de tels investissements, on émet 14,8 MtCO<sub>2</sub> eq en 2030 et 3,3 MtCO<sub>2</sub> eq en 2050. On est loin des objectifs de 2030, mais ceux de 2050 sont atteints. La part importante de l'hydrogène dans notre décarbonation n'est pas à oublier : c'est le seul moyen d'atteindre de tels objectifs ; la production de ce gaz reste en revanche quelque peu incertaine.



## 2.3 Chimie

La chimie représente, dans l'industrie, un des trois secteurs les plus émetteurs de CO<sub>2</sub>, avec la métallurgie et les matériaux de construction. Les deux sous-secteurs les plus émissifs sont la pétrochimie (27 % des émissions) et les engrais et produits azotés (14 %).

En 2020, le domaine de la chimie industrielle émettait 17,0 MtCO<sub>2</sub> éq. En supposant que la chimie continuera de représenter 26 % des émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie jusqu'en 2050 et en suivant les objectifs nationaux pour ces deux années, la chimie doit parvenir à n'émettre plus que 13,02 MtCO<sub>2</sub> éq d'ici 2030, et 3,81 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050.

Toutefois, on remarque une importante décarbonation de l'industrie chimique entre 1990 et 2018 (diminution de 63 %). Cependant, elle est principalement due à une diminution des émissions de N<sub>2</sub>O. Certains procédés utilisés ne sont donc plus exploitables pour réduire les émissions entre 2030 et 2050, dans la mesure où l'on doit dorénavant s'attaquer au CO<sub>2</sub> pour assurer une réelle baisse des émissions de la chimie dans l'industrie.

Plusieurs voies de décarbonation sont explorées pour atteindre les objectifs de 2030 et 2050 : électrification des procédés, utilisation d'hydrogène bas carbone et capture et stockage de CO<sub>2</sub>. D'après les données d'ALLICE, le potentiel d'électrification de la chimie dans l'industrie serait de 2 TWh pour le chauffage des fluides, de 8,97 TWh pour les fours, de 9,2 TWh pour le séchage et de 0,6 TWh pour la chimie fine, donnant un total de 20,77 TWh (c'est-à-dire 1786,22 ktep) de potentiel électrifiable sur les 69 TWh nécessaires à la chimie.

En sachant que le gaz naturel est actuellement l'énergie la plus utilisée pour les fours, le chauffage des fluides et le séchage, on suppose que l'on remplacera le gaz par l'électricité. En considérant qu'on atteint 80 % du potentiel électrifiable d'ici 2030, on obtient une baisse des émissions de 2,487 MtCO<sub>2</sub> éq d'ici 2030 et de 3,108 MtCO<sub>2</sub> éq d'ici 2050 grâce à l'électrification des procédés.

La capture et le stockage de CO<sub>2</sub> peuvent se révéler particulièrement efficaces, voire indispensables pour assurer la décarbonation envisagée d'ici 2030 et 2050. Toutefois, il s'agit d'une méthode coûteuse pouvant se heurter à de nombreux obstacles logistiques et économiques. La France possède, d'après France Chimie, un potentiel de captation de 24 MtCO<sub>2</sub> éq / an. En faisant l'hypothèse d'une évolution linéaire entre 2020 et 2050, on atteindrait un tiers du potentiel maximum en 2030. Ainsi, la captation carbone pourrait être à l'origine d'une diminution de 0,6 MtCO<sub>2</sub> éq en 2030 et de 1,7 MtCO<sub>2</sub> éq entre 2030 et 2050.

Pour atteindre les objectifs ambitieux de 2050, il est également possible de remplacer une partie du charbon et des produits pétroliers par du gaz naturel ou de la biomasse. Pour prendre ces éléments en compte, nous avons émis des hypothèses quant à la substitution de ces énergies, en considérant tout de même la part non substituable de charbon et de pétrole qui demeure dans l'industrie de la chimie.

Finalement, l'utilisation d'hydrogène bas carbone (à 25 % décarboné dans notre cas) pourrait également réduire les émissions. Elle permet notamment d'arriver (en combinant avec les autres procédés présentés ci-dessus) à des émissions de 12,4 MtCO<sub>2</sub> éq en 2030 et de 3,28 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Les objectifs de 2030 et de 2050 sont donc atteints.

Les investissements requis par le domaine de la chimie seraient à minima d'environ 970 millions d'euros en 2030 et de 3,65 milliards d'euros d'ici 2050. Ils prennent notamment en compte la production d'hydrogène, le captage de CO<sub>2</sub> (coût de captation et d'installation) et l'électrification des procédés (qui représente une part moindre par rapport à la production d'hydrogène et la captation carbone).

## 2.4 Matériaux non métalliques et plastiques

En 2020, la filière avait un total d'émissions de 15,7 MtCO<sub>2</sub> éq. L'objectif est de réduire ces émissions à 14,48 MtCO<sub>2</sub> éq en 2030 et à 4,23 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Les leviers d'action, selon Allice

Alliance et France Ciment, incluent l'électrification des fours, l'utilisation de pompes à chaleur (PAC) pour les usages thermiques, et la captation carbone.

La marge de manœuvre sur l'électrification des fours reste cependant réduite, car seuls 30 % des fours de la consommation thermique sont électrifiables. Par calcul de proportions, on estime que seulement 15,1 % de la consommation par combustion fossile peut être transformée en consommation électrique au maximum, même d'ici 2050. En effet, il est très compliqué d'électrifier ce secteur de l'industrie, principalement en raison de la demande en puissance : les brûleurs à gaz des fours sont difficilement remplaçables, compte tenu des conditions de température et de pression demandées instantanément. De même, il est peu aisé d'utiliser de l'hydrogène, car celui-ci est plus instable que le gaz classique et plus sensible à la présence de poussières ou de vapeur d'eau.

Il faut également prendre en compte les émissions dues au béton produit lors de la décarbonatation : un tiers des émissions du béton proviennent de son chauffage lorsqu'on prend en compte son impact énergétique avec les fours. La réaction chimique pour créer du béton est responsable d'environ 8 MtCO<sub>2</sub> par an en France (pour une production annuelle de 20 Mt de béton, qui émet au total 12 MtCO<sub>2</sub>, dont 8 Mt issues de la réaction de décarbonatation).

Pour réduire ces émissions spécifiques, la captation carbone apparaît comme la piste la plus évidente, car elle intervient directement au sein de la réaction. En supposant une production de béton constante à 12 MtCO<sub>2</sub> émis en 2030 et en 2050 (hypothèse qui pourrait être remise en question), on peut espérer, selon France Ciment, capter 2,9 MtCO<sub>2</sub> en 2030 et 6,8 MtCO<sub>2</sub> en 2050.

Cependant, pour rendre ce processus viable, il faudrait augmenter la taxe carbone afin de rendre la captation plus rentable que l'émission. Les cimentiers bénéficient actuellement de quotas en Europe, ce qui réduit l'impact de la taxe carbone. À ce jour, celle-ci est de 56 € / tCO<sub>2</sub>, soit 28 € / t de ciment. La captation carbone, quant à elle, coûte au minimum 50 € par tonne de ciment.

Pour réduire les émissions de pétrole, le recyclage du plastique est une piste favorisée. Actuellement, le taux de recyclage des déchets en France est de 26 %. On suppose qu'il atteindra 30 % en 2030 et 40 % en 2050. On fait également l'hypothèse que deux tiers de la consommation de pétrole dans ce secteur sont dus au plastique, permettant ainsi une réduction partielle de la consommation pétrolière. Il est également possible d'explorer des alternatives au béton, comme le béton-argile, les matériaux fibres-ciment, ou encore l'utilisation de papier/carton à la place du plastique.

Il serait aussi envisageable d'optimiser considérablement le séchage grâce à des pompes à chaleur à très haute température (cf. rubrique 2.6 Bois-papier-carton) développées par EDF. Cependant, le manque de données empêche ici une modélisation précise.

**Investissements nécessaires :** Les investissements requis pour atteindre ces objectifs incluent :

- 100-250 millions d'euros par site industriel pour construire des installations de captation carbone.
- 25 grandes cimenteries en France, avec un coût moyen de 175 millions d'euros par site : 8 sites installés d'ici 2030 (1,4 milliards d'euros), puis 17 sites supplémentaires entre 2030 et 2050 (3 milliards d'euros).
- Coût opérationnel de la captation : 100-200 € par tonne de CO<sub>2</sub> captée. À raison de 100 € / tCO<sub>2</sub>, cela correspond à 0,55 milliards d'euros par an entre 2025 et 2030, et 0,90 milliards d'euros par an entre 2030 et 2050.
- Électrification des fours : coût négligeable estimé à 20 000 € par four, avec l'électrification d'un tiers des fours.

Ainsi, on dépasse l'objectif en 2030 avec 11,9 MtCO<sub>2</sub> éq / an, mais les résultats pour 2050 restent insuffisants avec 4,6 MtCO<sub>2</sub> éq / an. Les investissements totaux dépassent 4,5 milliards d'euros d'ici 2050.

## 2.5 Industrie agroalimentaire

En 2020, l'industrie agroalimentaire avait un total d'émissions de 8,73 MtCO<sub>2</sub> éq. L'objectif est de réduire ces émissions à 6 MtCO<sub>2</sub> éq en 2030 et à 1,75 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Les leviers d'action identifiés par Alice Alliance et selon les objectifs du gouvernement français incluent :

- l'électrification des procédés thermiques en passant aux fours électriques et aux pompes à chaleur (PAC),
- la méthanisation des déchets alimentaires et l'autoconsommation du biogaz produit,
- le traitement UV pour la purification de l'eau,
- le recyclage des emballages plastiques.

Comme précisé lors de la visite d'EDF – Les Renardières, le potentiel d'électrification direct de l'industrie agroalimentaire est très grand. Une étude de la société Alice Alliance calcule le potentiel d'électrification des fours et des procédés de distillation, de séchage et de chauffage de fluides. En électrifiant ces procédés grâce à des PAC pour le séchage, la distillation et le chauffage de fluides, et en passant à des fours électriques, on estime qu'environ 15,6 TWh seraient électrifiés d'ici 2050. Cela nécessiterait l'ajout de 6 700 PAC et de 42 000 fours électriques (répartis équitablement entre 2030 et 2050), correspondant à un investissement minimal de 500 millions d'euros (en considérant un coût moyen de 20 000 € par PAC ou four industriel).

Concernant la méthanisation des déchets pour l'autoconsommation de biométhane, après avoir calculé la portion des déchets utilisables et l'énergie moyenne délivrée par 1 m<sup>3</sup> de déchets, on estime que l'énergie totale potentielle de biométhane pour l'industrie agroalimentaire est de 141,642 ktep. Ce procédé pourrait être déployé entre 2030 et 2050, réduisant les émissions de CO<sub>2</sub> de 0,1 Mt et améliorant la gestion des déchets. Cependant, chaque installation, avec une capacité moyenne de 8 GWh, coûte environ 5 millions d'euros. Les coûts totaux minimaux sont donc de l'ordre du milliard d'euros, bien qu'ils pourraient diminuer avec des financements comme ceux du projet FABbiogas.

Le charbon est utilisé comme matière première pour la filtration de l'eau afin d'éliminer les impuretés (métaux lourds, colorants, etc.). Le traitement UV est une alternative électrique déjà utilisée aujourd'hui. D'après Aqua Technique, purifier 1 m<sup>3</sup> d'eau nécessite 0,2 kWh d'électricité contre 1 kg de charbon. Cependant, le traitement UV ne suffit pas seul et doit être combiné à l'usage du charbon, dont on suppose l'utilisation divisée par deux avant 2030 pour garantir la pureté de l'eau. Cela représenterait un investissement minimal d'environ 12 millions d'euros, et une réduction des émissions de 0,3 Mt.

Enfin, le pétrole est utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour les emballages plastiques. Le gouvernement français vise à éliminer totalement les emballages à usage unique d'ici 2035. Nous supposons qu'entre 2030 et 2050, tous les emballages seront recyclés. Le recyclage des emballages réduit les émissions d'au moins 50 %. Ainsi, les émissions dues au pétrole dans ce secteur pourraient être divisées par deux entre 2030 et 2050.

En conclusion, ces différents leviers permettraient de réduire les émissions à 5,7 MtCO<sub>2</sub> en 2030, pour un objectif de 6 MtCO<sub>2</sub>, et à 1,75 MtCO<sub>2</sub> en 2050, atteignant ainsi l'objectif fixé. Ces réductions impliqueraient cependant un coût total de 500 millions d'euros d'ici 2030 et de 1,5 milliards d'euros entre 2030 et 2050.

## 2.6 Bois, papier et carton

Ce secteur a un faible impact avec 3,0 MtCO<sub>2</sub> en 2020, mais il a été considéré comme un cas d'étude pour son potentiel massif d'électrification. S'il est électrifié à 30 % en 2030 et à 80 % en 2050, les émissions respectives seraient de 2,1 MtCO<sub>2</sub> et 0,7 MtCO<sub>2</sub>.

Il est également possible, en théorie, d'optimiser ce secteur avec des pompes à chaleur (PAC) à très haute température, s'appuyant sur des cycles transcritiques et dont le coefficient de performance

(COP) peut atteindre 4. Cette technologie, développée par la R&D d'EDF en partenariat avec Dalkia et l'ADEME, permet de préchauffer l'air sec en entrée d'un sécheur industriel en récupérant l'énergie présente dans les buées extraites à plus basse température, auparavant perdue sous forme de chaleur fatale.

Ce système offre un important gain d'efficacité énergétique, car avec le cycle transcritique, il est facile de réaliser le changement d'état lorsque le fluide varie beaucoup en température, sans passer par un plateau de condensation. Selon EDF, "la solution Transpac permet donc une baisse de 75 % de la consommation d'énergie nécessaire au réchauffage de l'air et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 1 000 tCO<sub>2</sub> / an (à partir d'un COP de 4)."

Dans les faits, cette technique n'améliore pas de manière significative les performances du sec-teur, qui est déjà fortement électrifié. En revanche, elle est extrêmement intéressante pour remplacer les séchages de l'industrie en général, notamment dans la filière des matériaux non métalliques et plastiques.

## 2.7 Faisabilité

Finalement, avec un effort global afin de mettre en œuvre tous les moyens à disposition pour décarboner l'industrie, on observe qu'il est en théorie possible d'atteindre les objectifs fixés par la stratégie nationale bas carbone. En effet, on arrive au total à 13 MtCO<sub>2</sub> éq d'émissions sur les principaux sous-secteurs. Ajoutant à cela les secteurs négligés dans notre étude qui doivent se décarboner également, de façon semblable au secteur du bois, papier et imprimerie qui nous a servi d'exemple, les 15 MtCO<sub>2</sub> éq sont atteints en 2050. Au niveau des émissions associées, les répartitions par énergie sont les suivantes (les échelles diffèrent sur les graphiques) :

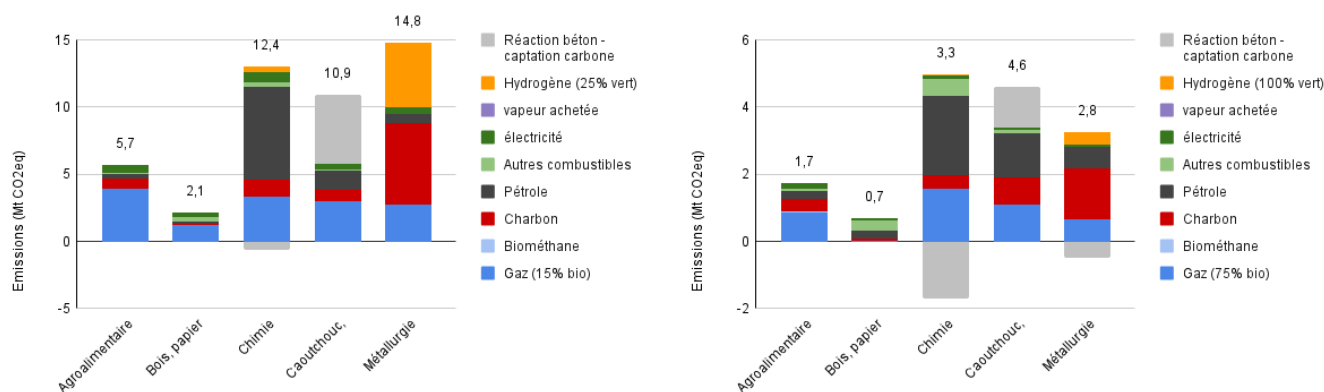


FIGURE 6 – Emissions par secteur selon l'énergie utilisée en 2030 puis 2050.

On observe ici un recours bien moins important aux énergies fossiles. Cela entraîne une diversification des énergies utilisées en entrée. En revanche, il apparaît également que le pétrole n'a que peu d'alternatives dans l'industrie.

Cependant, les investissements minimaux pour les quatre principaux secteurs de l'industrie s'élèvent dans notre estimation, certes grossière, à 10 milliards d'euros pour 2030. Étant donné les investissements prévus aujourd'hui à 4,5 milliards d'euros (ce chiffre a d'ailleurs diminué d'un milliard depuis 2023), la décarbonation est incertaine et ne sera pas totale. À l'horizon 2050, ce sont des dizaines de milliards d'euros à investir. Par ailleurs, il faudra également tenir compte du coût des matières premières industrielles, assez directement corrélé avec le cours du pétrole : dans la mesure où ces coûts suivent une forte augmentation depuis 2020 (contexte économique et géopolitique), les investissements nécessités pourraient être encore plus conséquents.

Ainsi, malgré un potentiel de décarbonation important pour l'industrie, celui-ci ne peut être atteint que par un engagement complet et immédiat de tous les acteurs du secteur, voire une collaboration accrue entre les entreprises du secteur de l'énergie (difficultés à réaliser des simulations conjointes entre RTE et GRTgaz par manque de partage de données).

De plus, dans la logique du net zéro en 2050, des compensations carbone restent à déployer pour contrebalancer les émissions résiduelles. Cette transition peut tout de même être accélérée en généralisant aux produits importés et augmentant la taxe carbone, bien trop faible actuellement pour que la captation ou même la recherche dans le domaine (abandon de projets d'oxycombustion et d'oxyboosting d'Air Liquide) soient rentables. En revanche, sans application mondiale, la taxe carbone défavorise les exportations européennes.

Enfin, on a supposé ici que l'on souhaitait conserver la production industrielle actuelle dans le futur. Cette attitude s'est inscrite entre autres dans la ligne de conduite des entreprises visitées, qui favorisent la recherche de l'efficacité énergétique et de l'amélioration des technologies. Cependant, ces dernières évoluent trop lentement et n'apparaissent donc pas comme des solutions suffisantes. Une autre piste de recherche réside dans le développement d'alternatives pour les matériaux utilisés par exemple, une dynamique qui ne semble pas être une priorité des entreprises visitées. La sobriété, notion dépendant des consommateurs et des politiques publiques, est difficilement manœuvrable à l'échelle des entreprises. Elle devrait toutefois davantage être mise en avant à l'échelle nationale et européenne, permettant alors de réduire drastiquement les investissements nécessaires.

## 3 Transports

### 3.1 Situation et objectifs globaux

Le secteur du transport intérieur est le premier contributeur à l'émission de GES en France avec 32 % des émissions. Le transport dépend de l'industrie pétrolière (consommant 60 % du pétrole produit dans le monde), mais aussi de l'approvisionnement en électricité (consommant 34 % de l'électricité mondiale, en grande partie pour l'alimentation du réseau ferroviaire).

La majorité des émissions liées au transport proviennent du secteur routier (70 % de celles-ci) : ce dernier représente alors une cible de choix à décarboner. Or, le transport est le seul secteur pour lequel les émissions de GES n'ont pas diminué significativement.

Enfin, la décarbonation des transports est indissociable d'un changement profond dans ses usages.

### 3.2 Véhicules particuliers

#### 3.2.1 Situation actuelle

Les véhicules particuliers (VP) représentent plus de 80 % du transport individuel français et 52 % des émissions de GES du transport intérieur.

On observe, dans la dernière décennie, une stagnation de la flotte thermique, tout en diminuant sa part de véhicules diesel. Le nombre de véhicules électriques ou hybrides a quant à lui fortement augmenté.

Cependant, le parc de voitures non thermiques est toujours 10 fois moins important que celui des voitures thermiques. Le rendre majoritaire va nécessiter une mobilisation des acteurs concernés beaucoup plus importante. Il est clair que pour atteindre l'objectif de net zéro, maintenir notre modèle actuel (nombre de véhicules thermiques en circulation, distances parcourues, taux de remplissage) est inenvisageable. Ainsi, au-delà de la potentielle diminution du nombre de véhicules, il faut surtout diminuer drastiquement l'utilisation des véhicules thermiques. Deux possibilités sont envisagées : l'électrique et l'hydrogène.

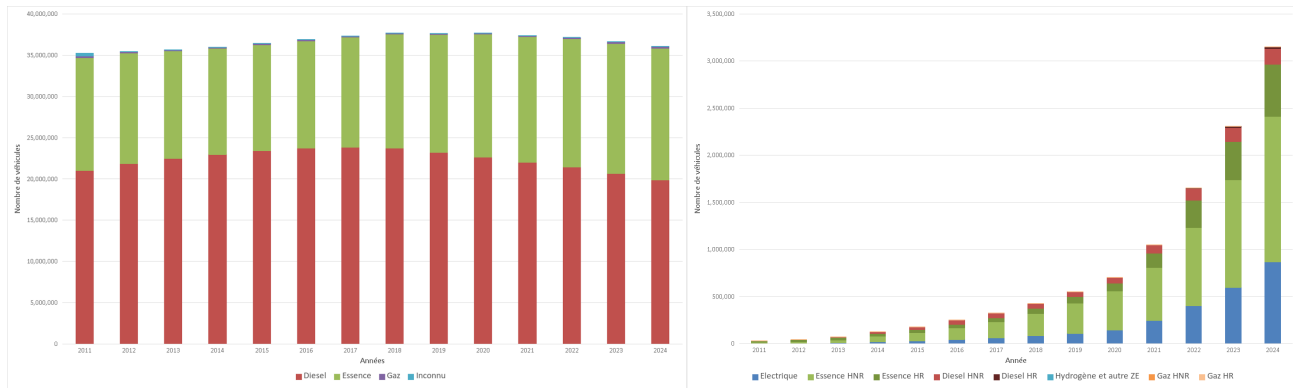


FIGURE 7 – Evolution du parc de VP thermiques (à gauche) et du parc de VP électriques/hybrides/hydrogène (à droite).

### 3.2.2 Quelle alternative choisir ?

L'hydrogène, transformé en électricité par une pile à combustible, se présenterait comme une alternative à l'utilisation de batteries dans un véhicule. La densité énergétique massique de l'hydrogène (trois fois celle de l'essence) en ferait un atout de taille dans la minimisation du poids du véhicule, sans qu'il ne perde en autonomie. Cependant, sa densité énergétique volumique est trois fois plus faible. Par ailleurs, sa fabrication est moins coûteuse en métaux critiques comme le lithium.

En revanche, la production d'hydrogène requiert beaucoup d'électricité : faire fonctionner l'ensemble du parc de VP actuel nécessiterait environ 200 TWh / an, soit plus de 40 % de notre production actuelle d'électricité. Un parc intégralement à l'hydrogène s'appuierait sur un réseau de distribution très important et une capacité d'électrolyse de l'ordre de 25 GW (selon Air Liquide, pour des électrolyseurs fonctionnant 70 % du temps avec un taux de conversion électricité → hydrogène d'environ 30 %). En comparaison, un parc 100 % électrique nécessiterait 70 TWh / an, soit 14 % de la production d'électricité annuelle actuelle. La voiture à hydrogène consomme trop d'électricité pour le moment.

Enfin, un parc comprenant à la fois de l'hydrogène et de l'électrique nécessiterait de nombreuses infrastructures réparties sur l'ensemble du territoire. La différence de prix d'installation des bornes de recharge (entre 1 et 2 millions d'euros pour une station hydrogène, contre 50.000 € pour une borne de charge rapide électrique) nous permet de conclure qu'un parc très majoritairement électrique semble plus viable économiquement.

À noter qu'une technologie envisagée par EDF pour les VE est la recharge continue sur la route par des rails à induction, qui diminueraient leurs besoins en autonomie avec un réseau assez développé. Cette technologie n'est pas encore assez mature, en plus d'être très coûteuse, nous ne l'étudierons donc pas.

### 3.2.3 Mise en place du parc 100 % véhicule électrique.

Pour rappel, la France a pour objectif de produire 2 M de VE par an, pour qu'en 2030, 2/3 des véhicules neufs vendus soient électriques, et que les VE représentent 15 % du parc total. Le pays suit aussi l'objectif européen d'interdiction de ventes de véhicules thermiques neufs en 2035. Actuellement, les VE représentent 4 % du parc automobile et 20 % des ventes de véhicules neufs.

Pour tenter de modéliser une évolution du parc de VP français jusqu'en 2050, nous avons fait les hypothèses simplificatrices suivantes : maintien du nombre de véhicules actuels, même distance parcourue, même efficacité énergétique des véhicules, même volume de production de VE et considération de voitures dont la durée de vie est fixée à 20 ans.

En suivant les tendances actuelles, la vente de véhicules pourrait être 100 % électrique en 2040. L'objectif de production de 2 millions de voitures électriques en 2030 semble difficilement atteignable

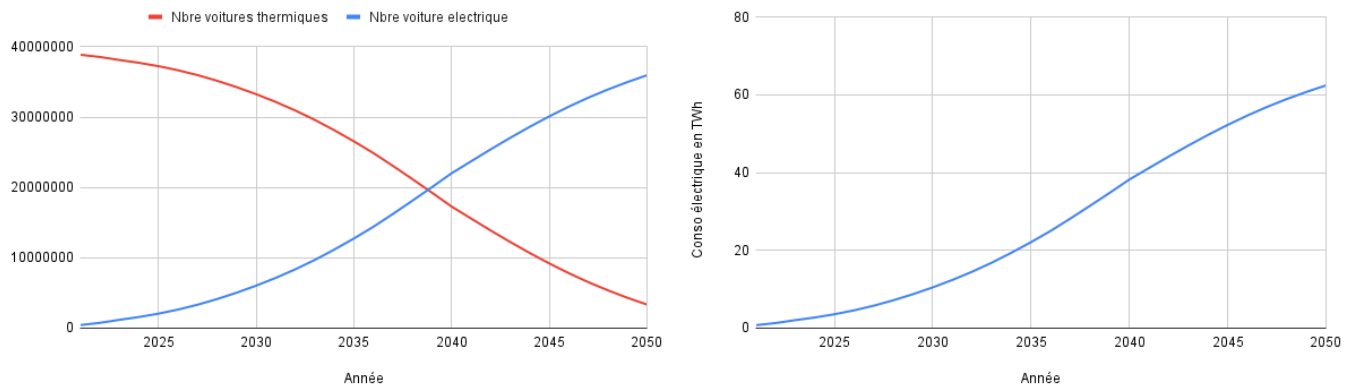


FIGURE 8 – Transition de la voiture thermique vers la voiture électrique et consommation électrique (TWh) de la voiture électrique.

étant donné la désindustrialisation de la France et de son secteur automobile ( $\approx 1$  M de voitures produites chaque année contre 3 M en 2005 et 2 M en 2010).

Si l'on suppose une conservation des habitudes (taux de remplissage à 1,6 ; 455 milliardss km parcourus annuellement, 0.15 kWh/km de consommation par les VE), on peut prédire l'évolution du besoin d'électricité du parc de voiture jusqu'en 2050 – à remettre en perspective avec la production actuelle d'électricité de 510 TWh / an et une tendance à l'électrification.

Ainsi, les besoins en électricité de l'ensemble des VE représenteront 14 % de notre consommation actuelle d'électricité en 2050. On remarque qu'un tel modèle, sans prime à la casse, ne permet pas d'atteindre 100 % de VE en 2050 (mais plutôt 90 %).

Pour mesurer l'impact de cette transition sur le climat, on peut alors regarder comment évoluent les émissions de GES du parc de voitures français (hors construction) en considérant le mix électrique français 2050 de 3 g de CO<sub>2</sub>/kWh et une évolution linéaire vers celui-ci.

En regard des tendances actuelles et des délais très courts (nous avons modélisé un scénario très optimiste), nous ne voyons pas comment les ambitions de l'UE sur le parc de voitures pourront être réalisées à temps. Malgré des efforts importants de l'Etat pour populariser les VE, la transition énergétique dans ce secteur passera obligatoirement par le report modal et une forme de sobriété.

### 3.2.4 Le coût de cette électrification

Pour dégager les grandes tendances des différences de coût d'utilisation entre les véhicules, nous avons suivi l'évolution du prix "cumulé" annuel (c'est-à-dire le coût total rapporté sur plusieurs années en comptant le prix d'achat du véhicule, l'achat de carburant et les frais d'entretien) pour différents types de véhicules, à partir de données moyennes actuelles de consommation.

Un VE est plus cher à l'achat, mais le faible prix de l'électricité par rapport aux carburants fossiles permet de combler l'écart de prix à partir d'une quinzaine d'années d'utilisation (180 000 km parcourus). À noter que la prime à la conversion en vigueur actuellement (4 000 € par véhicule) coûtera 8 milliards d'euros / an à l'État dès que le seuil des 2 millions de ventes de VE par an sera franchi.

Gardons cependant à l'esprit que les coûts calculés ci-dessus sont les coûts pour les utilisateurs, et non pour l'État. Le prix de l'essence étant en grande partie lié aux taxes, l'électrification de la flotte entraînera fatalement une perte de recettes importante pour l'État (30 milliards d'euros en 2023, soit plus de 1 % du PIB). De plus, aujourd'hui, la balance commerciale nationale est d'environ -18 milliards d'euros pour les VE, tandis que l'État a annoncé une aide de 5 milliards d'euros au secteur automobile d'ici 2030.

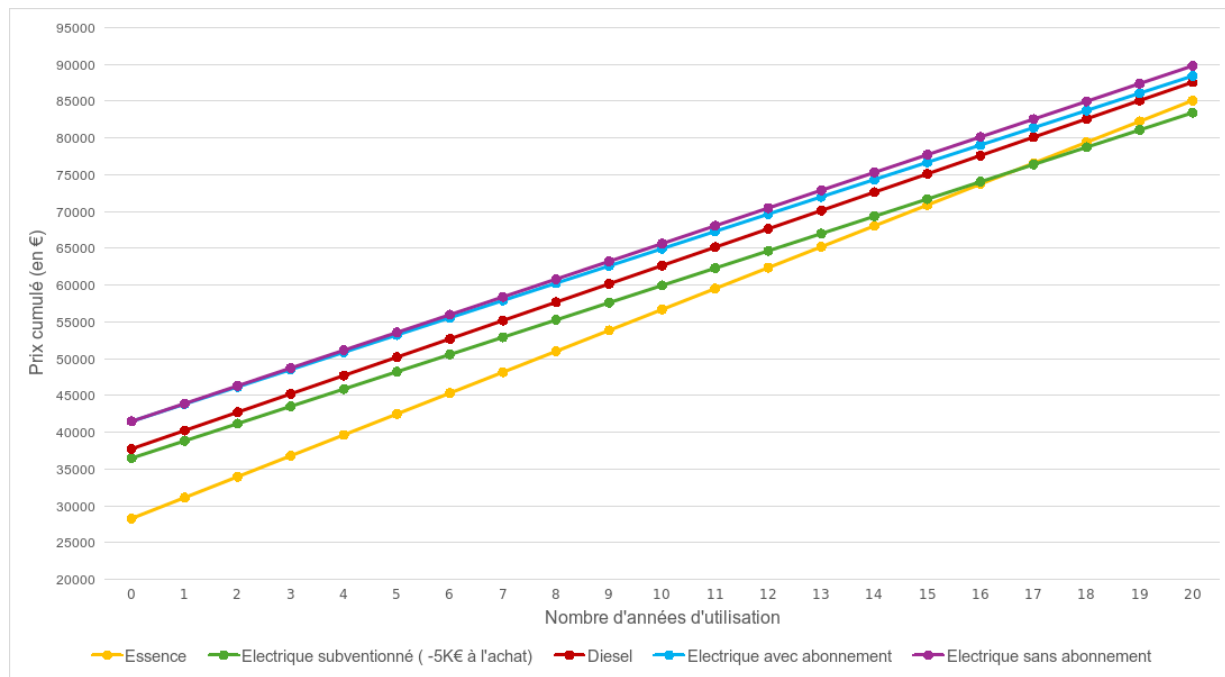


FIGURE 9 – Evolution du prix cumulé d'une voiture selon son type.

Enfin, le prix des batteries de VE (à performances égales) diminue continuellement, sachant qu'elles constituent 30 à 40 % de leur prix total ainsi que 50 % de leur empreinte carbone. Une recherche massive tournée vers les VE, avec diminution de la consommation d'énergies fossiles, diminuera à terme leur prix et permettra à l'État de réduire les subventions aujourd'hui en vigueur.

### 3.2.5 L'enjeu des ressources pour la production des batteries

Les batteries nécessitent de nombreuses terres rares pour leur fabrication, notamment du lithium. Aujourd'hui, les réserves mondiales prouvées de lithium sont d'environ 28 Mt, soit assez de lithium pour fabriquer environ 5 milliards de VE, ce qui ne peut pas faire l'objet d'une solution à long terme (bien que de nouveaux gisements soient encore à découvrir et que l'efficacité des batteries soit amenée à augmenter). Développer de nouveaux types de batteries, telles que les batteries aluminium-ion ou à électrolyte solide, est primordial dans cette transition.

D'autant plus que la production des batteries pour VE sera en compétition avec celle pour stocker simplement l'électricité des ENR non-pilotables. Le développement des solutions de recyclage des batteries sera aussi un enjeu clé de la gestion des ressources.

## 3.3 Transport routier : poids lourds

### 3.3.1 Hydrogène ou électricité ?

Pour atteindre les objectifs de transition énergétique, il est indispensable de se débarrasser des camions à moteurs thermiques. En France, le transport routier de poids lourds représente 7,7 % des émissions de CO<sub>2</sub> globales. Nous allons donc étudier les différentes alternatives bas carbone à ces camions.

Aujourd'hui, deux possibilités sont envisagées par les industriels : les camions à hydrogène et les camions électriques.

Tout d'abord, du point de vue de l'efficacité énergétique, l'électrique l'emporte. Le rendement du moteur électrique défie toute concurrence (90 %). Pour l'hydrogène, en multipliant les rendements moyens de l'électrolyse et de la pile à combustible, on atteint un rendement final de 30 % – soit trois



fois moins que l'électrique. Toutefois, à cause du poids des batteries, un camion électrique est environ 15 % plus lourd qu'un camion à hydrogène.

L'électrique étant moins consommateur que l'hydrogène, il est à première vue moins polluant et moins contraignant pour adapter les infrastructures, ainsi que plus efficace (demande énergétique 3 fois moindre).

Cependant, aujourd'hui les temps de recharge à autonomie égale diffèrent grandement : 2h pour un camion électrique contre 15 min à l'hydrogène. Cette différence est amenée à s'estomper puisque EDF nous a présenté une technologie de recharge rapide à 3000 kW, qui permettrait à la recharge électrique d'être aussi rapide que le plein d'hydrogène.

D'autre part, le surcoût de l'électrique par rapport à l'hydrogène réside dans l'augmentation de la taille du parc routier. Comme le poids d'un camion est limité à 44 t sur les routes françaises, pour transporter la même masse de marchandise, il faudrait 15 % de camions électriques de plus que de camions à hydrogène. Ceci entraîne un surcoût de 3,5 milliards d'euros / an.

Le surcoût de l'hydrogène réside, lui, dans l'achat de l'énergie, car il faut 3 fois plus d'électricité pour faire rouler un camion à hydrogène. On peut alors s'attendre à un kWh utile d'hydrogène 3 fois plus cher ; cela entraîne un surcoût de 40 milliards d'euros / an. Un parc routier entièrement électrique est donc économiquement plus intéressant qu'un parc à hydrogène.

Enfin, comparons le coût d'utilisation total d'un camion thermique et électrique : le prix d'un plein de 100 km est de 30 € pour l'électrique et 55 € pour le thermique. On a considéré une distance parcourue de 130 000 km par an. Dans ce cas, le surcoût de l'achat du camion électrique est compensé en moins de 3 ans.

Ainsi, quand la recharge à 3000 kW sera déployée, les entreprises routières auront tout intérêt à électrifier leur flotte. Pour limiter l'impact de l'extraction des métaux nécessaires aux batteries électriques, tout en électrifiant massivement le parc routier, il sera indispensable que l'État investisse massivement dans leur recyclage.

### 3.3.2 Evolution d'ici 2050.

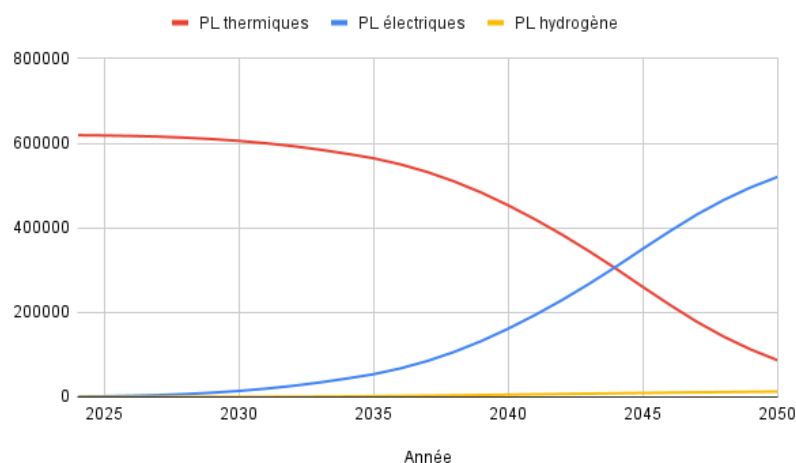


FIGURE 10 – Parc des différents types de poids lourds.

Aujourd'hui, les infrastructures pour les poids lourds électriques et à hydrogène sont peu développées et leur déploiement sera donc plus lent que pour les VE. Considérant que l'électrique prédominera par ses nombreux avantages, on peut prévoir l'évolution suivante :

## 3.4 Transport aérien

### 3.4.1 Les différentes alternatives.

Le transport aérien national et international représente environ 7 % des émissions de CO<sub>2</sub> françaises. Pour décarboner le secteur de l'aviation, l'Europe compte principalement sur les Sustainable Aviation Fuel (SAF). Les SAF sont répartis en deux catégories : les e-fuels (produits en formant des hydrocarbures à partir d'hydrogène vert et de CO<sub>2</sub> préalablement capté), et les biocarburants obtenus à partir de biomasse.

L'utilisation de ces SAF est actuellement préférée à l'hydrogène. En effet, l'avion à hydrogène n'est envisagé que pour des courtes distances. De plus, l'hydrogène ne peut pas être utilisé dans les réacteurs actuels, contrairement aux SAF. Ceux-ci sont en effet plus simples à incorporer car ils requièrent peu voire pas de modification des réacteurs actuels.

Pour 2050, l'UE a fixé un objectif de 70 % de SAF, répartis en 35 % d'e-fuel et 35 % de biocarburants. Cet objectif permettrait de diminuer de 70 % les émissions de CO<sub>2</sub>, et de n'émettre que 5 MtCO<sub>2</sub> / an, contre 17 actuellement. La synthèse des e-fuels est toutefois très énergivore et la France aurait besoin d'au plus 50 TWh / an d'électricité pour produire suffisamment d'e-fuel selon l'ADEME. Le potentiel de production de carburant en 2050 permettrait d'atteindre 35 % de biocarburant au sein des SAF. Le potentiel de production restant pourra permettre de couvrir les besoins de décarbonation des transports maritimes.

Le principal facteur limitant du développement des SAF est leur coût. Aujourd'hui, les SAF sont en moyenne 3 à 4 fois plus chers que les carburants fossiles. En supposant que le développement massif du secteur des SAF permette d'atteindre un coût seulement 2 fois supérieur au prix du kérosène fossile, on peut évaluer la valeur de la taxe carbone qui permettrait de rendre les SAF compétitifs. Il faudrait que la taxe carbone atteigne 360 € / tCO<sub>2</sub> dans le secteur de l'aviation. Cette valeur est plutôt raisonnable sachant que la taxe carbone a déjà atteint 100 € / tCO<sub>2</sub> et que le ministère de la transition écologique estime qu'il faudrait qu'elle atteigne au minimum 500 € / tCO<sub>2</sub> pour pouvoir réussir la transition énergétique de ce secteur.

Enfin, intéressons-nous aux avions à hydrogène, même s'ils ne sont pas pris en compte dans les objectifs de décarbonation de l'UE. Si comme le prédit Airbus, 10 % de la flotte fonctionne à l'hydrogène en 2050, alors la France aura besoin de 115 TWh / an d'électricité pour la production d'hydrogène aérien (22 % de la production actuelle d'électricité). Pour arriver à ce résultat, on considère que l'entièreté des avions à hydrogène sont des courts courriers qui parcourent 6 vols de 1000 km par jour.

Ainsi, on comprend que l'hydrogène risque d'avoir du mal à s'imposer dans le secteur aérien et restera probablement une technologie minoritaire. Sa demande énergétique est tout simplement trop importante par rapport à sa participation à la décarbonation du secteur aérien.

### 3.4.2 Evolution d'ici 2050.

Nous supposons que le développement des avions à hydrogène ne sera pas effectif d'ici à 2050 et que leur nombre sera donc négligeable. Comme les avions actuels peuvent voler au SAF, la décarbonation du secteur aérien dépend uniquement de la capacité de production de ces carburants bas carbone. Nous avons utilisé les chiffres de l'ADEME, qui nous paraissent très optimistes. En effet, ils estiment que l'incorporation des SAF dans l'aviation passera de 42 % en 2045 à 70 % en 2050, soit un quasi doublement de l'utilisation de SAF en seulement 5 ans.

## 3.5 Transport maritime

Le transport maritime compte pour 2 % des émissions de CO<sub>2</sub> françaises. Réduire de 81 % les émissions de CO<sub>2</sub>, suivant les objectifs de la SNBC, revient à n'utiliser que 2 TWh de carburant

fossile en 2050. Or, avec l'augmentation du trafic maritime, l'ADEME prévoit au plus un besoin de 46,4 TWh de carburant en 2050.

Pour ne pas utiliser la biomasse uniquement pour produire des biocarburants destinés au transport maritime, nous proposons de répartir équitablement la consommation de biocarburants et d'e-fuels, de manière analogue à ce qui est prévu pour le secteur de l'aviation.

Pour limiter au maximum la consommation de carburant, on peut envisager d'installer de grandes voiles sur les porte-conteneurs. D'après un rapport de l'entreprise Windship en collaboration avec l'ADEME, cette technologie est peu chère, facile à installer sur les navires existants, et elle permettrait de diminuer la consommation de carburant de 30 %. De plus, selon une étude du gouvernement du Royaume-Uni, 40 à 45 % de la flotte mondiale pourrait être équipée d'une propulsion par le vent d'ici en 2050.

De plus, nous proposons de passer l'entièreté du transport intra-national à l'électrique. Nous avons en effet vu que l'hydrogène est en général peu avantageux à cause de sa faible efficacité énergétique. En suivant ces directives, la France aurait besoin de 33 TWh d'électricité pour produire les e-fuels, et de 5 TWh d'électricité pour recharger les bateaux électriques. Cela permet d'arriver aux objectifs attendus en prenant bien en compte l'utilisation des voiles.

### 3.6 Transport ferroviaire

Le secteur ferroviaire est l'un des moins émetteurs de CO<sub>2</sub> (1 % des émissions de GES liés au transport français). Son utilisation devrait croître de manière significative dans les années à venir, renforçant sa contribution à la décarbonation des déplacements.

Ses faibles émissions s'expliquent principalement par la forte électrification du réseau ferroviaire français, avec 60,8 % des lignes électrifiées en 2024 (contre 44,5 % en 1996), avec un mix électrique peu carboné. Cependant, la fabrication des infrastructures ferroviaires, comme les rails et les installations électriques, génère des émissions indirectes (sidérurgie).

Avec 27 597 km de voies ferrées, dont 2 700 km de lignes à grande vitesse (LGV), la France dispose du deuxième réseau ferroviaire d'Europe, après l'Allemagne. Environ 15 000 trains circulent chaque jour : 75 % électriques, et 25 % encore au diesel, principalement sur les lignes non électrifiées. Le ferroviaire transporte 11,3 % des voyageurs et 8,9 % des marchandises à l'intérieur du pays. Les émissions ferroviaires varient selon les types de rames (2-5 gCO<sub>2</sub> / km-passager pour un TGV, contre 50-100 gCO<sub>2</sub> / km-passager pour un TER ou 20-50 gCO<sub>2</sub> / tonne-km pour un train diesel).

L'objectif principal de la SNCF est de supprimer l'usage du diesel dans les TER, responsable de 61 % de leurs émissions carbone, d'ici 2035. Le coût d'électrification d'une ligne ferroviaire standard variant entre 350 000 € à 1,5 millions d'euros par km, des solutions telles que les biocarburants (déjà testés en 2021 sur la ligne Paris-Granville), les trains hybrides combinant batteries et récupération d'énergie au freinage, ainsi que les trains à hydrogène, sont envisagées. Parallèlement, la relance des trains de nuit, soutenue par le plan France Relance, offre une alternative aux vols court-courriers, réduisant ainsi l'empreinte carbone des déplacements longue distance.

### 3.7 Faisabilité

Dans le cadre de nos hypothèses pour les différents secteurs du transport français, on peut prédire l'évolution des émissions des GES sur la période transitive 2021-2025. On remarque alors que l'évolution majeure est liée aux véhicules particuliers (-77 MtCO<sub>2</sub> éq) tandis que le secteur aérien ne diminue que faiblement ses émissions. De plus, avec un mix électrique autant décarboné, la part d'émissions causée par les véhicules électriques est infime (environ 1 % des émissions pour 90 % des véhicules).

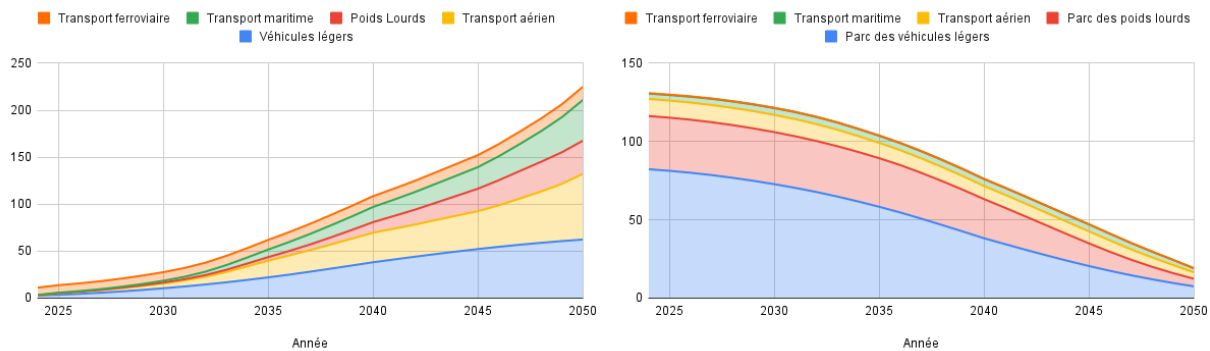


FIGURE 11 – Consommation électrique (en TWh) et émissions de GES (en MtCO<sub>2</sub> éq) du secteur des transports

Ainsi, plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour la transition du secteur du transport : d'une part, le fait que la décarbonation de ce dernier passe forcément par une électrification des véhicules qui nécessitera une quantité importante d'électricité (225 TWh / an d'ici 2050). En vue de la probable demande croissante en électricité de la majorité des secteurs, notre capacité à assurer cet approvisionnement électrique peut être remise en cause et une priorisation sera peut-être nécessaire. D'autre part, en regardant les tendances actuelles d'évolution du trafic (notamment aérien) et les différentes optimisations technologiques possibles, nous conjecturons un reste d'émissions de GES de l'ordre de 19 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Ainsi, une modification de nos mœurs et usages des transports semble être inévitable pour atteindre les objectifs fixés d'émissions.

## 4 Bâtiments

En France, le secteur des bâtiments (résidentiels et tertiaires) représente aujourd'hui 16 % des émissions de gaz à effet de serre (ADEME), réparties à 63 % dans le résidentiel et 37 % dans le tertiaire. Le bâtiment est le quatrième secteur le plus émetteur derrière les transports, l'agriculture et l'industrie, et représente un levier d'action important dans l'objectif du net zéro en 2050. Nous tenons à souligner une grande incertitude quant aux émissions totales du secteur, qui varient parfois d'un facteur 2 selon la base de données consultée. Nous nous sommes pourtant restreints à des bases de données issues d'organismes reconnus comme l'ADEME, le SDES, ou Carbone 4.

### 4.1 Situation et objectifs globaux

Les émissions des bâtiments représentent un total de 100 MtCO<sub>2</sub> éq en 2020, en comptant les émissions directes et indirectes de leur exploitation, ainsi que celles dues à la construction et à la rénovation imputées de l'industrie (les émissions propres aux matériaux ne sont pas comptabilisées ici).

L'évolution de ces émissions sur les 30 dernières années est donnée par le graphique figure 12. De manière générale, les émissions totales ont diminué depuis 2004, ce qui reflète probablement des efforts réalisés dans l'efficacité énergétique et la transition énergétique, mais traduit aussi l'évolution climatique.

Nous constatons que l'essentiel des émissions du secteur sont dues au chauffage (à 76 %). Viennent ensuite dans une moindre mesure le chauffage de l'eau chaude sanitaire (ECS), les usages autres tels que la cuisson et l'emploi d'appareils électriques (machines à laver, télévisions), puis la climatisation et enfin la construction et la rénovation.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à chacune de ces sources d'émissions, avons recherché des moyens de la décarboner ainsi qu'une idée approximative des financements nécessaires

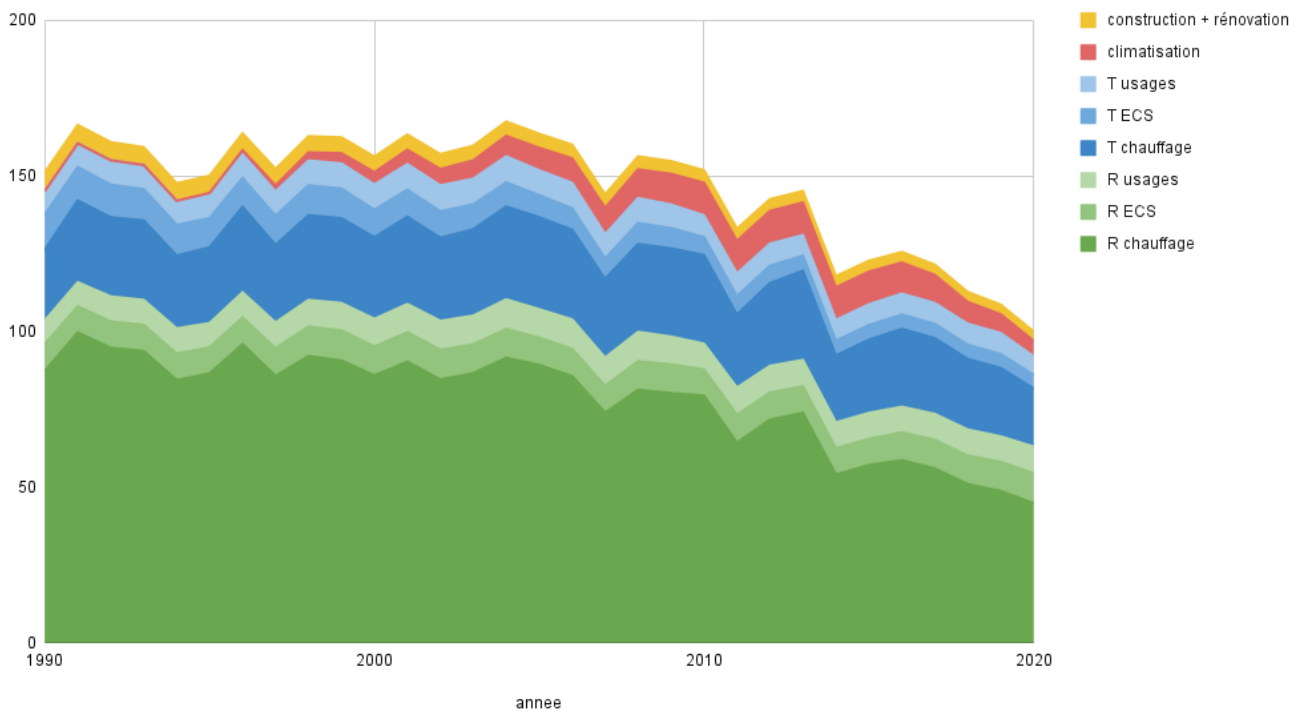


FIGURE 12 – Emissions du secteur du bâtiment (MtCO<sub>2</sub> éq).

pour cette décarbonation.

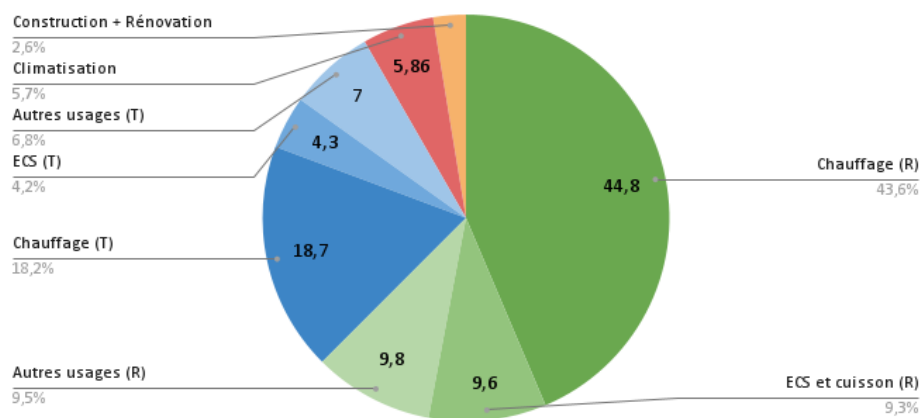


FIGURE 13 – Emissions du secteur du bâtiment en 2020 (MtCO<sub>2</sub> éq).

Le gouvernement français a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre du bâtiment de 60 % en 2030 par rapport aux émissions de 2020, et d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

## 4.2 Isolation, chauffage et eau chaude sanitaire

### 4.2.1 Efficacité énergétique

Les émissions du secteur étant toutes dues à une consommation d'énergie, une première approche pour les réduire est de réduire la consommation énergétique elle-même. Tous les bâtiments ne sont pas égaux en consommation, selon leur isolation et leur situation géographique. L'efficacité énergétique d'un bâtiment se mesure en kWhEF / m<sup>2</sup> / an. Le parc immobilier est actuellement à une moyenne de 240 kWhEF / m<sup>2</sup> / an.

L'efficacité énergétique des logements neufs peut être aisément régulée. On peut exiger des biens neufs qu'ils soient des bâtiments à énergie passive, c'est-à-dire ultra-performants énergétiquement, de sorte que leur consommation au mètre carré est très basse voire négative (car compensée par des apports solaires, géothermiques ou de la chaleur fatale).

L'objectif du gouvernement que les bâtiments neufs aient une consommation inférieure à 55 kWhEP / m<sup>2</sup> / an (70 pour les logements collectifs) nous semble atteignable en s'appuyant sur le développement de technologies comme l'isolation par aérogel, le verre électrochrome, le béton bas carbone avec microcapsules de matériaux à changement de phase ou encore des panneaux de fibres de bois compressées.

Bien que ces techniques soient coûteuses, la tendance de ces dix dernières années semble indiquer que le remplacement de plus d'un tiers du parc actuel est possible, et ce avec une efficacité thermique s'améliorant d'année en année.

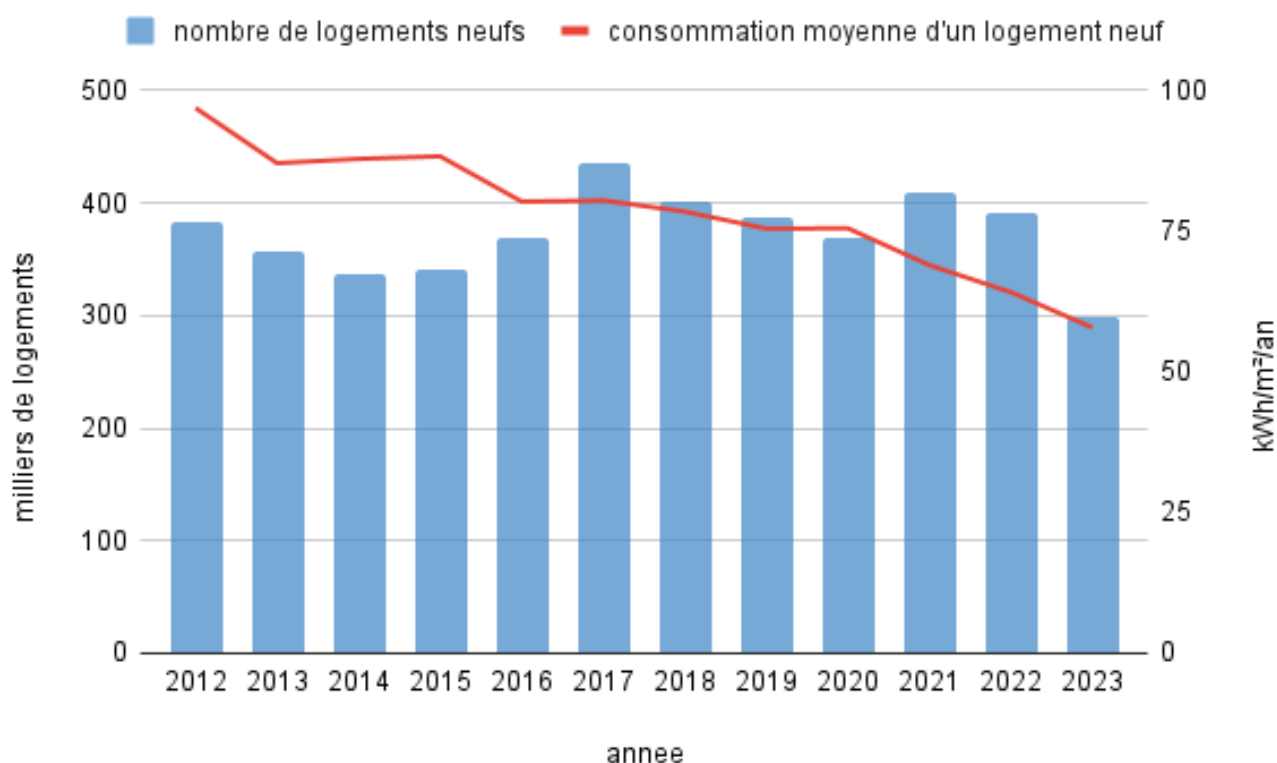


FIGURE 14 – Bilan sur la construction.

Pour les deux tiers restants, l'amélioration de l'efficacité énergétique repose sur la rénovation du parc existant. Les pertes thermiques par les murs, les toits et les fenêtres représentent jusqu'à 70 % des déperditions énergétiques d'un bâtiment non isolé, et une isolation performante permet de réduire ces pertes jusqu'à 80 % (ADEME : "Isoler son logement"). En rénovant seulement l'enveloppe thermique (murs, toitures, sols, et fenêtres), les économies sur le chauffage atteignent 35 % en moyenne sur les bâtiments existants, sans changer le chauffage. Dans les rénovations, il convient de commencer par les toitures, puis les murs, et enfin les sols et fenêtres pour maximiser l'efficacité et minimiser les coûts. Les technologies et méthodes d'isolation utilisées lors des rénovations peuvent faire appel à des matériaux efficaces (panneaux en laine minérale ou en polystyrène expansé pour l'isolation par l'extérieur), bio-sourcés (ouate de cellulose, fibres de bois, chanvre), mais aussi des méthodes avancées comme l'isolation sous vide ou les aérogels qui permettent d'atteindre des performances thermiques supérieures dans des espaces contraints.

Des économies considérables peuvent être réalisées sur le parc résidentiel en ciblant en priorité les 4,8 millions de passoires thermiques françaises (étiquette F ou G du DPE). Entre 2022 et 2023,

378 000 passoires thermiques ont disparu : à ce rythme, il ne faudrait que 13 ans pour éradiquer les passoires thermiques. La base de données TREMI nous indique une amélioration moyenne de 18 % (57 kWh / m<sup>2</sup> / an) pour chaque bâtiment rénové entre 2017 et 2019, avec un coût moyen de 15 200 €. La stratégie nationale bas carbone prévoit 500 000 rénovations par an. En 2023, 669 890 dossiers ont été soutenus par le dispositif MaPrimeRenov, mais seulement 13 400 ont été mis aux normes RE2020 avec un DPE A ou B (France Info). À ce rythme, il faudrait plus de 2 600 ans pour que la France s'occupe des 35 millions de logements à rénover.

Par la suite, nous faisons l'hypothèse que 600 000 logements sont rénovés chaque année, engendrant chacun une amélioration de 60 kWhEF / m<sup>2</sup> / an sur le logement considéré. En ajoutant à cela les dynamiques de construction, nous obtenons que le logement moyen consomme 203 kWhEF / m<sup>2</sup> / an en 2030 et 129 kWhEF / m<sup>2</sup> / an en 2050, soit une amélioration de 46 % par rapport à 2020.

Quid de la sobriété liée à la température de chauffage ? D'après une étude de Homeys, en moyenne durant l'hiver 2022-2023, les Français ont chauffé leur logement à une température de 20,2°C. Le gouvernement préconise une température de chauffage de 19°C, avant tout pour économiser l'énergie de chauffage. Si l'on étudie l'impact d'une telle réduction, on obtient un gain minime de 1,6 kWhEF / m<sup>2</sup> / an (calculs en annexe). Ceci correspond, en prenant en compte les facteurs d'émissions des différents modes de chauffage, à près de 1,2 MtCO<sub>2</sub> dont l'émission est évitée, soit 1,3 % des émissions actuelles du secteur, une part infime de ces dernières.

#### 4.2.2 Vecteur énergétique

Pour réduire au mieux les émissions de GES, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments doit être couplée à un changement des modes de chauffage. On peut débiter par l'analyse de la base de données de l'ADEME sur les Diagnostics de Performance Énergétique (DPE), qui recense la consommation de 9 millions de logements. Cela représente près d'un tiers du parc de résidences principales (30 millions en 2020).

En combinant ces statistiques aux intensités carbone des vecteurs énergétiques établies par l'ADEME, nous parvenons à un total de 73 MtCO<sub>2</sub> éq, rien que pour le chauffage résidentiel. Ce total est bien loin des 40 MtCO<sub>2</sub> éq annoncées par le rapport Citepa-Secten (1), chiffre repris par le gouvernement sur la plupart de ses portails traitant des émissions françaises.

Il est à noter que le DPE est critiqué par UFC Que Choisir et HelloWatt (2) comme indicateur peu fiable quant à la consommation en énergie finale des logements analysés.

Type	gCO <sub>2</sub> éq / kWh
Gaz	233
Joule	60
Réseau	120
PAC	60
Fioul	340
Bois	18

TABLE 4 – Émissions en gCO<sub>2</sub> éq par kWh selon le type d'énergie.

On peut alors utiliser une autre base de données, provenant de l'organisme gouvernemental qu'est le service des données et études statistiques (SDES). Nous calculons alors un total de 48 MtCO<sub>2</sub> éq, plus proche du résultat de Citepa-Secten. Cette confirmation de la validité de la base de données nous permet d'estimer l'état du parc résidentiel actuel : On constate que les chauffages gaz et fioul sont responsables de la quasi-totalité des émissions, bien qu'ils ne représentent que moins de la moitié des logements. Ces deux modes de chauffage sont donc un levier d'action essentiel pour la baisse des émissions. Le bilan est similaire dans le parc tertiaire (avec un total de 32 MtCO<sub>2</sub> éq).

Dès lors, pour estimer les émissions d'ici 2050, on fait les hypothèses suivantes :

- disparition des chaudières fioul en 2050 (objectif porté par le gouvernement) ;
- augmentation du nombre de PAC de +200 % en 2050 (directive européenne) ;
- amélioration de l'enveloppe énergétique des bâtiments : baisse de la consommation moyenne de 240 kWh / m<sup>2</sup> / an à 129 kWh / m<sup>2</sup> / an (cf. 3.3.A) ;
- changements du mix énergétique : 75 % de biogaz en 2050 et 3 gCO<sub>2</sub> éq/kWh pour l'électricité (d'après la partie 2.) ;
- poursuite du développement du chauffage urbain selon les tendances actuelles.

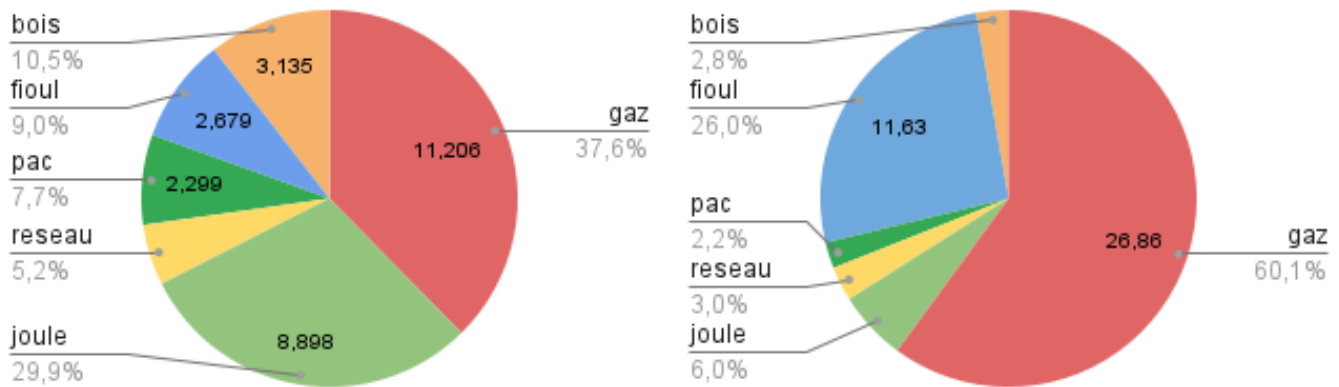


FIGURE 15 – Chauffage du parc (en millions de logements) et émissions respectives (MtCO<sub>2</sub> éq).

Ainsi, on établit un total de 9,4 MtCO<sub>2</sub> éq pour le chauffage résidentiel et tertiaire en 2050, soit une réduction de 85 % par rapport à 2020. Le détail des consommations, pour connaître le mix énergétique nécessaire, est donné en fin de cette partie par souci de concision.

#### 4.2.3 Eau chaude sanitaire

Concernant l'eau chaude sanitaire (ECS), la consommation française est actuellement de 103 TWh / an (80 dans le logement, 23 dans le tertiaire). Contrairement au chauffage, la sobriété nous semble ici un levier d'action important. En effet, dans les logements, la moitié de l'ECS est utilisée pour les douches. Les Français passent en moyenne 9 minutes sous la douche, avec une moyenne de 5 douches par semaine. Diviser par 2 le temps passé sous la douche permettrait d'économiser près de 20 TWh annuellement.

De plus, réduire la température (de 35°C à 25°C) permettrait encore de diviser l'énergie nécessaire au chauffage par 2, et finalement, installer sur toutes les douches des régulateurs de débit (de 15 à 8 L / min) permettra de diviser encore par 2 cette consommation. Le bilan total des douches passerait donc de 40 TWh / an à 5 TWh / an, rien qu'en adoptant ces habitudes.

On estime que le transport de l'eau chaude sanitaire au sein même d'un logement est responsable pour 30 % à 50 % des pertes énergétiques. Des solutions techniques concrètes sont envisagées pour réduire ces pertes : une meilleure isolation des tuyaux pour les logements existants, et une disposition architecturale optimale pour les logements neufs, de manière à minimiser la longueur parcourue par l'eau chaude.

Concernant le chauffage de l'eau, nous proposons de développer plus encore le réseau de chaleur, de manière à utiliser le plus possible l'énergie fatale propre aux ENR. Cela permettrait d'alléger le stress sur le réseau électrique imposé par le développement du mix ENR. Cette idée pourrait même être étendue aux chauffe-eau électriques particuliers, en équipant les disjoncteurs de dispositifs intelligents, activant le chauffage lorsque la production d'électricité verte est importante.

Pour les hypothèses d'évolution, nous avons donc choisi une réduction de la consommation de 30 %, ainsi qu'un développement des chauffe-eau électriques et des PAC air-eau. Les émissions de



l'ECS passent alors de 13,9 à 2,2 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050.

### 4.3 Climatisation et réfrigération

La climatisation, autrefois rare dans les logements, connaît une adoption croissante, stimulée par les vagues de chaleur. Le taux d'équipement est passé de 11 % en 2016 à 25 % en 2020 en France métropolitaine (INSEE, EDF, ADEME). Or, l'exposition des bâtiments à la chaleur est appelée à augmenter, d'une part sous l'effet de vagues de chaleur de plus en plus fréquentes et intenses, ainsi que d'autre part à cause d'îlots de chaleur urbains.

Actuellement, la consommation énergétique issue de la climatisation s'élève à 23,7 TWhEF / an, avec des émissions de 0,70 MtCO<sub>2</sub> éq / an. D'après les études prospectives de l'ADEME (scénarios 1 et 2), la part croissante du nombre de PAC dans les logements et la sobriété des comportements (utilisation réduite à 8 h/jour, contre 12 h/jour actuellement) devraient réduire la consommation énergétique du secteur de la climatisation en France métropolitaine à 6,4 TWhEF en 2050, ce qui correspond à des émissions de 0,02 MtCO<sub>2</sub> éq.

Mais les fuites dans les systèmes de climatisation sont responsables d'émissions de gaz fluorés, au pouvoir de réchauffement global élevé (PRG). Les émissions totales de ces gaz du secteur des bâtiments en 2019 étaient estimées à 8 MtCO<sub>2</sub> éq, soit 52 % des émissions de gaz fluorés en France. Les autorités ont interdit l'usage des FC en 2025 : ceux-ci sont désormais remplacés par des HFO, de l'ammoniac NH<sub>3</sub> ou du CO<sub>2</sub>, dont les PRG sont bien plus faibles, d'un facteur 1000 au moins.

Pour évaluer l'évolution des émissions, faute de données, on étend à l'échelle nationale celle de la région PACA (1,1 MtCO<sub>2</sub> éq d'émissions de gaz fluorés en 2019), qui suivent une décroissance constante de 140 KtCO<sub>2</sub> éq / an. Cette généralisation n'est pas restrictive quand on sait que cette région est celle du pays où la climatisation est la plus répandue. Selon cette tendance, les émissions de gaz fluorés devraient être nulles d'ici 2030 (on retiendra ici une valeur de 25 % des émissions de 2020). Cette estimation est cohérente avec la législation européenne adoptée en 2023 et qui prévoit la disparition de ces produits d'ici à 2050 dans toute l'Europe.

On parvient à des émissions de 0,02 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050, soit une part négligeable dans le bilan total du secteur.

### 4.4 Autres usages électriques

Un des postes d'émission secondaire du secteur des bâtiments est celui lié au fonctionnement des appareils électriques autres que ceux traités précédemment. Ces appareils électriques consomment actuellement 180 TWh / an, correspondant à des émissions de 5,3 MtCO<sub>2</sub> éq / an.

La consommation électrique totale liée à l'éclairage privé en France est de 49 TWh par an, avec 14 TWh / an pour l'éclairage résidentiel et 35 TWh / an pour l'éclairage dans le secteur tertiaire. En tout, cela représente 10 % de la consommation électrique en France. Le passage de l'éclairage à LED et la gestion intelligente de l'éclairage permettrait de réduire cette consommation de près de 30 % (Syndicat de l'Éclairage et ADEME).

On estime à 75 TWh / an la consommation des appareils électroménagers domestiques comme les réfrigérateurs, lave-linges, lave-vaisselles, et congélateurs, qui représentent environ 30 % de la consommation électrique résidentielle (ministère de la transition écologique). Si l'ensemble des foyers français remplaçaient leurs appareils anciens par des modèles plus efficaces, cela pourrait permettre une réduction d'environ 20 à 30 % de la consommation totale d'électricité dans les foyers. Les mêmes usages dans le tertiaire correspondent à une consommation électrique annuelle de 41 TWh.

Quant à la consommation électrique des appareils informatiques, on additionne la consommation de près de 9 TWh / an du secteur tertiaire (serveurs, ordinateurs de bureau, et périphériques utilisés dans les bureaux et espaces professionnels) à celle de près de 6,5 TWh / an du secteur

résidentiel (ordinateurs, écrans, box internet, et équipements connectés). On peut réduire de 20 à 30 % cette consommation en adaptant légèrement les habitudes de vie : éteindre les appareils inutilisés et préférer des appareils légers (les ordinateurs portables consomment jusqu'à 80 % moins d'énergie que les ordinateurs fixes).

Dans les scénarios tendanciels, la consommation électrique du numérique augmentera de 5 % d'ici 2030, et jusqu'à 16 % d'ici 2050 de par la digitalisation croissante et le développement de l'intelligence artificielle (étude ADEME – Arcep sur l'empreinte environnementale du numérique en 2020, 2030 et 2050). D'après le Parlement, les data centers devraient se développer à un rythme de +21 % annuellement jusqu'en 2040. Il devient dès lors intéressant de considérer la cogénération, qui peut alimenter les réseaux de chaleur (notamment en ville), ce que nous avons pris en compte dans notre projection de l'évolution du secteur du chauffage.

Le bilan total de consommation en 2050 est de 167 TWh / an, ce qui correspond à des émissions de 0,5 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050.

## 4.5 Évolution du parc de bâtiment

### 4.5.1 Evolution du besoin en bâtiments

Depuis 1970, la surface immobilière occupée par personne a augmenté de 30 %. Néanmoins, dans une perspective de neutralité, il convient d'envisager une part raisonnable de sobriété.

D'une part, on peut considérer l'encouragement de nouveaux comportements dans le secteur résidentiel (cohabitation des personnes âgées, plus grande mobilité durant sa vie, ... autant de pratiques permettant de diminuer la surface occupée par personne, qui croît aujourd'hui avec l'âge). À ceci s'ajoute une baisse du besoin en logement, permise par le ralentissement de la croissance démographique déjà amorcé.

D'autre part, on peut s'attendre à une relative stagnation de la demande en bâtiment issue du secteur tertiaire. La surface totale du parc de bâtiments tertiaires en France a peu varié depuis 2020, et les objectifs du dispositif Éco Énergie Tertiaire conduiront à une réallocation d'espaces. C'est pourquoi on peut légitimement considérer que la demande en nouveaux espaces pour le tertiaire sera absorbée par la diminution de leur surface propre. D'autant plus qu'on observe dès à présent l'essor des espaces collaboratifs, des centres logistiques pour l'e-commerce ou la mise en place d'un taux de télétravail.

### 4.5.2 Evolution du rythme des nouvelles constructions

Depuis la fin de l'année 2017, on observe une tendance à la baisse du nombre de logements construits annuellement. La réorientation du besoin conduirait à accélérer cette tendance, qui prévoit 9 millions de logements neufs dans le parc de 2050 (ADEME). Cependant, il convient d'évaluer l'impact de la limitation des nouvelles constructions : toute chose égale par ailleurs, le taux de logement neuf a-t-il une influence considérable sur la consommation énergétique du parc et ses émissions ?

On étudie 2 scénarios (SA et SB), l'un prévoyant la poursuite de la tendance actuelle (SA : 9M/33M de logements neufs en 2050), et l'autre imaginant une réduction du neuf dans le parc (SB : 4M/32M de logements neufs en 2050). Ce dernier est en cohérence avec les scénarios les plus restrictifs visant le net 0 en 2050.

On obtient alors (cf annexe) une consommation du parc SB 10 % supérieure à celle du parc SA. En ignorant le potentiel de rénovation du parc existant d'habitations, le taux de logement neuf a donc une influence non négligeable sur la consommation énergétique du parc. Construire à neuf permet de déployer des technologies plus vertueuses, avec la limite toutefois des capacités de construction

disponibles. Par ailleurs, la rénovation permet d'atteindre des résultats de réductions d'émissions plus rapidement et en mobilisant une quantité moindre de ressources.

#### 4.5.3 Meilleure utilisation du parc existant

D'une part, on peut envisager l'occupation des 8,2 % de logements vacants en 2024, ce qui est une disposition d'ores et déjà discutée dans le cadre de propositions de lois.

Un autre appui est la conversion des résidences secondaires en résidences principales, ou du moins une mutualisation de ces dernières. Une utilisation du parc compatible avec une stratégie zéro carbone conduit à une diminution d'un facteur 4 du taux de résidences secondaires, pour atteindre 2,5 % du parc de logements (d'après l'ADEME). Bien que depuis les années 2000 leur nombre soit croissant d'après l'INSEE, ce qui rend improbable la tendance ci-dessous, on peut peser le bénéfice du déclin des résidences secondaires dans une perspective de neutralité carbone. Libérer 8,5 % du parc reviendrait à épargner la construction d'autant de logements neufs, soit l'équivalent de près de 8 années sans construction de nouveaux logements. Sachant que la construction représentait 20 MtCO<sub>2</sub> éq en 2023, on économise donc la production de près de 160 MtCO<sub>2</sub> éq, soit 1,6 années d'émissions du secteur du bâtiment.

On comprend donc la pertinence d'une redistribution de ces logements, d'autant plus crédible que les pouvoirs publics se sont déjà engagés dans une tentative de diminution de la part des résidences secondaires dans les logements (non-éligibilité à certaines aides publiques, soumission à la taxe d'habitation, quotas fixant des taux maximum de résidences secondaires dans les municipalités, ...).

Il s'agirait également de repenser le secteur des logements à l'aube de la neutralité carbone, en considérant la fin de l'idéal de la maison pavillonnaire individuelle. Passée de 56,7 % en 2015 à 55,9 % en 2022, la part de logements individuels au sein de l'ensemble des résidences principales devrait atteindre 48,7 % en 2050 si la tendance de baisse de 0,257 point par an se poursuit. Cette tendance est bien en deçà des scénarios de neutralité envisageant qu'elle pourrait chuter en dessous des 20 %. Certes, les constructions neuves pourraient à l'avenir préférer les petits collectifs ou l'habitat dense individualisé. Mais les maisons individuelles déjà présentes sur le marché devraient perdurer. Ce facteur ne semble donc pas déterminant dans la consommation et les émissions des bâtiments.

#### 4.5.4 Emissions de la construction et rénovation

La tendance actuelle montre une décroissance considérable de la consommation d'énergie des chantiers (amputée de celle liée à la fabrication des matériaux, que l'on impute à l'industrie). Ainsi, en 2050, elle devrait avoir diminué de 45 % (et atteindre 6 TWhEF) par rapport à la consommation énergétique du secteur en 2015 (11 TWhEF), d'après l'ADEME.

En considérant les énergies finales consommées sur les chantiers (majoritairement fossiles aujourd'hui et électriques) et leur évolution à venir (équitablement fossiles et électriques en 2050), on obtient les valeurs d'émissions présentées ci-dessous. Pour expliquer la variation entre 2020 et 2050, il faut considérer les gains en efficacité énergétique sur les chantiers (notamment permis par les maquettes numériques) qui s'ajoutent aux ralentissements des constructions neuves au-delà de 2050, évoquées précédemment.

Cependant, la hausse de la consommation et des émissions attendue entre aujourd'hui et 2030, date à laquelle elles seront maximales, s'explique par les rénovations et déconstruction-reconstructions nécessaires à l'évolution du parc que nous envisageons. Celles-ci devraient être achevées d'ici 2050, si bien que ces travaux ne changent pas la consommation énergétique et les émissions du secteur des bâtiments en 2050.

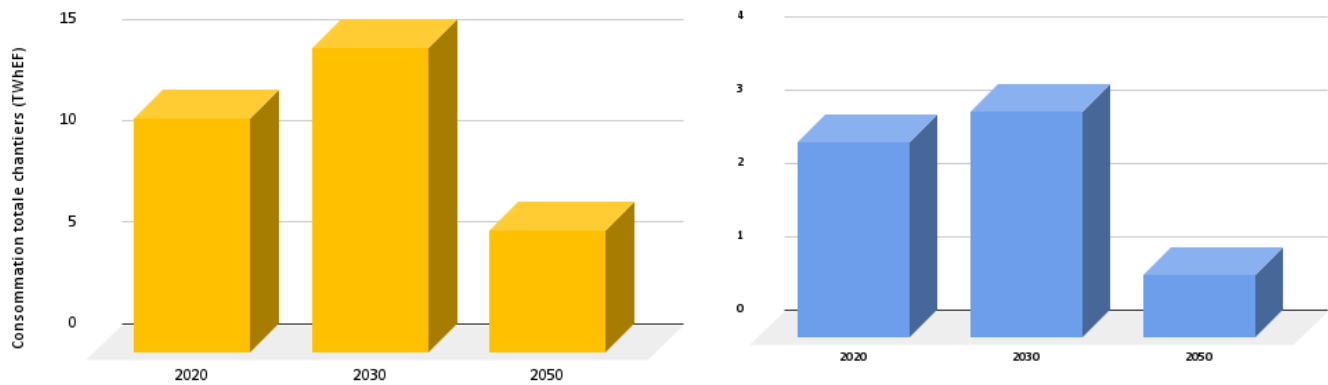


FIGURE 16 – Consommation totale (TWhEF) et émissions (MtCO<sub>2</sub> éq) des chantiers résidentiels et tertiaires.

## 4.6 Faisabilité

L'étude des différents postes de consommation d'énergie et donc d'émissions, ainsi que la projection des évolutions en 2030 puis 2050, permet alors de dresser ce bilan :

On remarque qu'avec nos projections, on n'atteint pas les objectifs fixés par la stratégie nationale bas carbone (cf. 4.1) : ni la neutralité carbone en 2050, ni les 60 % de réduction (mais seulement 35 %) des émissions de 2030 par rapport à celles de 2020.

La mise en place de politiques ambitieuses de transition, notamment du point de vue des financements, est le principal facteur déterminant la faisabilité des projets. À ce stade, il convient également de souligner l'importance de l'électrification pour faire décroître les émissions du secteur, quand bien même la consommation énergétique reste élevée. D'autre part, le secteur pourrait éventuellement s'appuyer sur certaines émissions négatives, contribuant à puiser le carbone de l'atmosphère, essentiellement par le biais de constructions en bois. Avec 12 % de constructions en bois en 2023, la poursuite de la tendance actuelle, qui semble la plus probable, conduit à un puits carbone de près de 4 MtCO<sub>2</sub> en 2050.

Toutefois, nous tenons à souligner qu'il ne faut pas négliger les émissions qui seront engendrées par

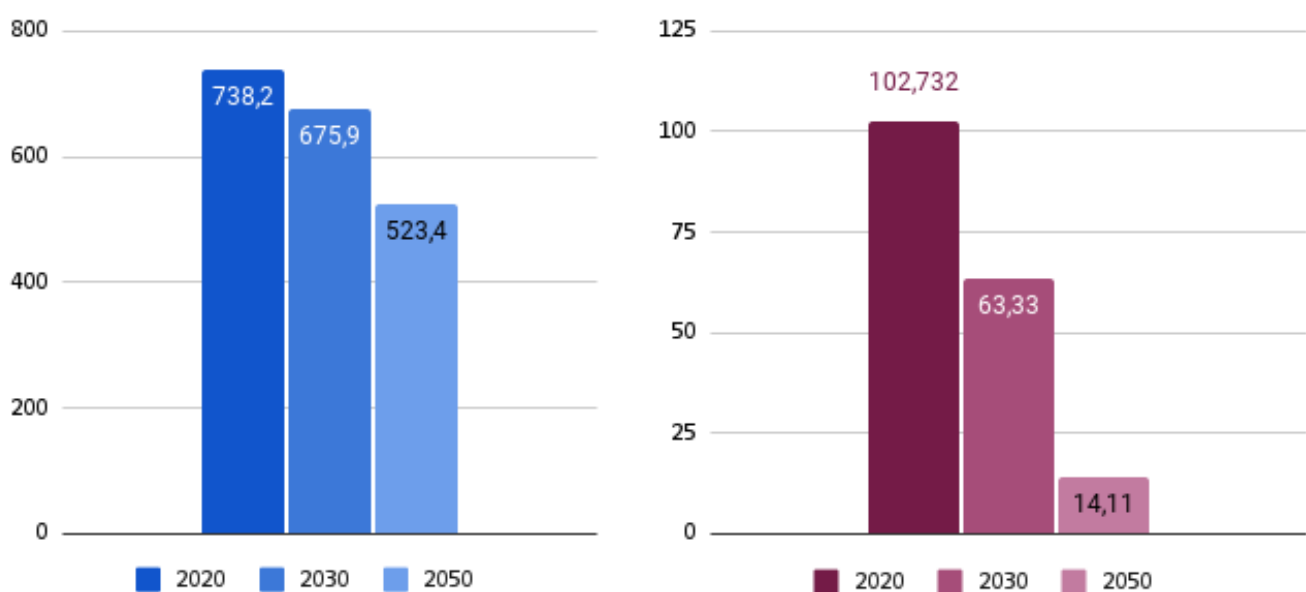


FIGURE 17 – Consommation énergétique (TWh / an) et émissions (MtCO<sub>2</sub> éq) des bâtiments en 2020.

la phase de travaux nécessaire aux rénovations considérables attendues dans les bâtiments, étant donné la persistance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (étant d'environ 1 siècle).

L'évaluation de la faisabilité passe également par celle du coût de la transition vers la neutralité. Dans le secteur des bâtiments, pour évaluer le coût de la rénovation du parc (mise aux normes A ou B du DPE pour atteindre un parc de bâtiments basse consommation (BBC)), on peut considérer le budget de 2024 de 4 milliards d'euros attribué à MaPrimeRénov, et lui associer la bonne performance de 650 000 logements rénovés en 2023. On obtient alors un budget total de près de 170 milliards d'euros pour obtenir un parc basse consommation (27,8 millions de logements à rénover). Concernant la climatisation, la transition du parc depuis celui actuel vers celui de 2050 devrait coûter de l'ordre de 2 milliards d'euros.

Ces ordres de grandeur de coût montrent qu'atteindre le parc de logements projeté par notre modèle en 2030 puis 2050 est accessible avec des moyens envisageables, au vu des budgets investis par l'État, dans l'armée par exemple.

Ainsi, bien que la SNBC envisage la neutralité complète à l'horizon 2050 pour le secteur des bâtiments, la décarbonation nécessite un engagement d'ampleur et immédiat des acteurs publics, qui seuls sont en mesure de conduire la transformation du parc, en subventionnant les particuliers et entreprises mais aussi en les contraignant via une législation restrictive. La trajectoire actuelle des rénovations semble notamment incompatible avec l'objectif de n'avoir que des bâtiments basse consommation (inférieure à 50 kWh / m<sup>2</sup> / an) à l'horizon 2050.

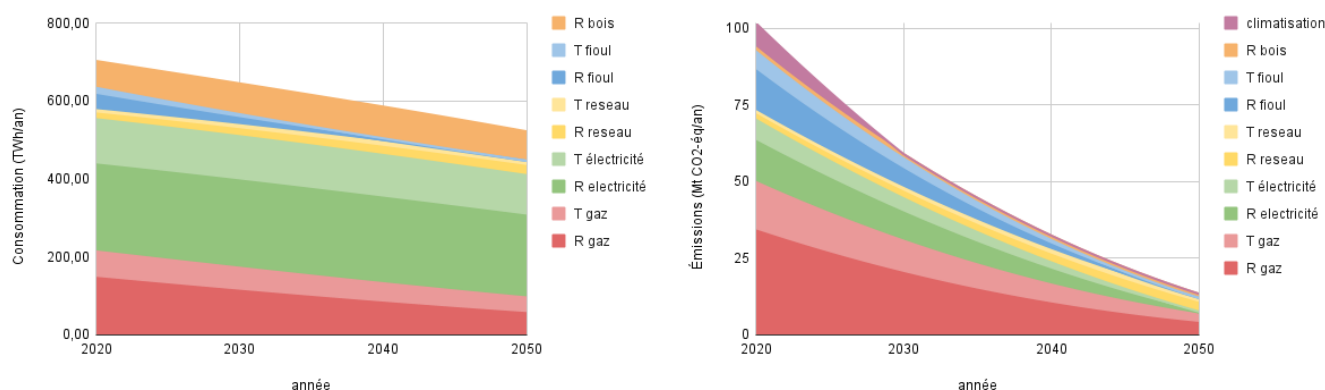


FIGURE 18 – Consommation et émissions du secteur du bâtiment.

Nos projections mettent en valeur la recherche de l'efficacité énergétique et de l'amélioration des technologies. Elle ne doit cependant pas se faire sans développer la sobriété dans l'usage des bâtiments. Que ce soit en termes d'occupation des surfaces immobilières, des surfaces chauffées, de la température de chauffage, ou même de manière secondaire, de la consommation d'eau chaude sanitaire et d'électricité, il convient d'encourager l'évolution des comportements, quitte à repenser nos modèles (maison individuelle, résidence secondaire, cohabitation, ...). Une fois de plus, la sobriété devrait gagner de l'attention à l'échelle nationale et européenne, pour envisager une réduction des investissements nécessaires.

## Conclusion

Dans les trois secteurs étudiés, nous avons été confrontés à des difficultés similaires pour atteindre les objectifs de décarbonation en 2030 et en 2050. Les moyens technologiques sont pour la plupart déjà existants (différentes technologies autour de l'hydrogène, captation carbone, optimisation des cycles thermodynamiques, technologies de limitation des pertes...) et la recherche dans ces

domaines reste intense, ne serait-ce que dans les différents pôles R&D que nous avons pu visiter. Cependant, ils ne sont pas déployés aujourd'hui ou du moins pas assez rapidement.

Certes, la demande en énergie globale devrait diminuer, notamment avec une meilleure gestion de la chaleur. Cependant, la consommation électrique devrait, quant à elle, augmenter considérablement. La décarbonation massive du mix électrique, permise par une diversification des énergies, est primordiale et s'inscrit dans le scénario N2 de RTE retenu. Ainsi, l'introduction d'une proportion minimale de 75 % de biogaz et le développement de l'hydrogène décarboné à 100 % sont des conditions extrêmement importantes, restrictives... mais malheureusement insuffisantes.

Nous sommes en effet arrivés à la conclusion qu'une électrification des usages énergétiques, même de façon massive et alliée à une quête d'efficacité énergétique, ne suffira pas. Dans les transports par exemple, l'électrification la plus rapide ne permet même pas d'atteindre le net 0 en 2050. Dans les bâtiments, on reste au mieux à 16 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2050, avec des investissements autour de 100 milliards d'euros. Dans l'industrie enfin, si l'objectif de 16 millions de tonnes peut être atteint, il repose sur une transformation complète des technologies installées et des investissements très importants.

Des mesures comme une taxe carbone généralisée, renforcée et adaptée en fonction des secteurs, afin de ne pas pénaliser outre mesure l'exportation industrielle européenne tout en s'adaptant aux besoins des transports, des interventions de l'État avec une législation et des investissements conséquents en particulier dans le domaine du bâtiment, un aménagement du territoire repensant la place des villes, des campagnes et des sites industriels, limitant le transport de gaz et d'énergies renouvelables, ou un réseau européen électrique toujours plus interconnecté du fait du caractère majoritairement non pilotable des énergies renouvelables, seront aussi des aides appréciables.

Il importe finalement d'aller vers une forme de sobriété raisonnée dans chacun des secteurs. Celle-ci ne sera possible que vécue comme un effort collectif, avec une sensibilisation à ces sujets et une participation active de la part de l'État, une forme de collaboration avec et entre les entreprises pour engager tous les citoyens dans la transition.

## Références

- [1] RTE : *Futurs énergétiques 2050, Principaux résultats*, octobre 2021.
- [2] RTE : Scénario N2, consulté le 28/11/2024, <https://rte-futursenergetiques2050.com/scenarios/n2>.
- [3] ADEME : *Base Carbone*, 2015.
- [4] SEFE Energy : *Méthanisation : la production de biométhane en 2020 en France*, août 2020, <https://www.sefe-energy.fr/gazmagazine/2020/08/production-biomethane-france-2020>.
- [5] INSEE : *Enquête Annuelle sur les Consommations d'Énergie dans l'Industrie (EACEI)*, 2020.
- [6] Statistiques Publiques : *Chiffres clés du Climat, France, Europe et Monde*, édition 2024, Service des Données et Études Statistiques (SDES).
- [7] Ministère de la transition écologique : *Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)*, octobre 2020, [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/19092\\_strategie-carbone-FR\\_oct-20.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/19092_strategie-carbone-FR_oct-20.pdf).
- [8] Alice Alliance : *Potentiel d'intégration des gaz décarbonés en industrie*, avril 2022.
- [9] Alice Alliance : *Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels*, mars 2022.
- [10] France Chimie : *Feuille de route de décarbonation de la chimie en France*, novembre 2023.
- [11] Ministère de l'écologie : *Lutte contre la pollution plastique*, octobre 2024, <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/lutte-contre-pollution-plastique>.
- [12] Commissariat général au développement durable - 18 novembre 2021, <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-de-l-industrie-manufacturiere>.
- [13] France Ciment : *Le ciment en chiffres - 2022*, [https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/brochure-infociments\\_21-22-0123-2.pdf](https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/brochure-infociments_21-22-0123-2.pdf).
- [14] Paprec : *Tout savoir sur les matières recyclables*, consulté le 28/11/2024, <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage-2/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/plastiques/>.
- [15] EDF : *Transpac, la pompe à chaleur haute performance au service d'une industrie décarbonée*, 03/04/2024, <https://www.edf.fr>.
- [16] INSEE : *Étude sur l'augmentation des prix du pétrole et des matières premières*, 2022, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6436488>.
- [17] Techniques de l'ingénieur : *Trois alternatives durables au béton*, mis à jour le 19/11/2021, <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/trois-alternatives-durables-au-beton-104776/>.
- [18] ARCEP : *Étude sur l'empreinte environnementale du numérique en 2020, 2030 et 2050*, <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-thematiques-transverses/lempreinte-environnementale-du-numerique/etude-ademe-arcep-empreinte-environnemental-numerique-2020-2030-2050.html>.
- [19] Homeys : *Consommation électrique du secteur*, consulté le 02/12/2024, <https://www.homeys.fr/blog/consommation-electrique-secteur#:~:text=Une%20C3%A9tude%20r%C3%A9alis%C3%A9e%20par%20Homeys,%C2%B0C%20l'ann%C3%A9e%20derni%C3%A8re..>

- [20] The Shifters : *Greenwashing dans le secteur financier*, consulté le 02/12/2024, <https://www.theshifters.org/publications/greenwashing-secteur-financier/>.
- [21] Ministère des territoires, de l'écologie et du logement, consulté le 28/11/2024, <https://www.ecologie.gouv.fr/dossiers/comment-consommer-plus-durablement/opter-mode-plus-durable>.
- [22] SDES : *Enquête TREMI - Travaux de rénovation énergétique dans les maisons individuelles*, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-les-travaux-de-renovation-energetique-dans-les-maisons-individuelles-tremi>.
- [23] SDES : *Enquête TREMI - Travaux de rénovation énergétique dans les maisons individuelles*, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-les-travaux-de-renovation-energetique-dans-les-maisons-individuelles-tremi>.
- [24] DataLab 2024 : *Les chiffres clés des transports*, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-transports-2024/pdf/chiffres-cles-des-transports-2024.pdf>.
- [25] Rapport ferroviaire BPI : <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/empreinte-carbone-des-trajets-en-train-calcul-et-decarbonation>.
- [26] Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires : *Chiffres clés des transports*, édition 2024.
- [27] Convention scientifique étudiante sur l'hydrogène : *Rapport*, mars 2024.
- [28] ADEME : *Electro-carburants en 2050 : quels besoins en électricité et CO<sub>2</sub> ?*, rapport octobre 2023.



## Annexes

### Impact des politiques de sobriété sur la part de logements neufs dans le parc résidentiel

**Méthode de modélisation et de calcul :** On étudie 2 scénarios (SA et SB), prévoyant la poursuite de la tendance actuelle (SA), qui implique 9 millions de logements neufs dans un parc de 33 millions de logements en 2050, et d'autre part imaginant une réduction à 4 millions sur 32 millions du nombre de logements neufs (SB), en cohérence avec les scénarios les plus restrictifs visant le net zéro en 2050.

Sachant que la réglementation thermique des bâtiments neufs (2012) majore à 50 kWh / m<sup>2</sup> / an leur consommation d'énergie primaire, et que d'après l'ADEME, la consommation moyenne d'un bâtiment sur le parc existant est d'environ 240 kWh énergie primaire / m<sup>2</sup> / an, on peut estimer l'impact de la variation de la part du neuf dans le parc de logements sur sa consommation énergétique totale.

### Impact des politiques de sobriété sur la température de chauffage

**Méthode de modélisation et de calcul :** On ignore la part des entrepôts dans le tertiaire, en faisant l'hypothèse simplificatrice qu'ils ne font pas varier leur température intérieure. La surface concernée par une variation de cette température est donc celle de la totalité du parc résidentiel (2 700 Mm<sup>2</sup>), du parc de bureaux (180 Mm<sup>2</sup> d'après [laplacedelimmobilier.com](http://laplacedelimmobilier.com)) et de celui de commerces (73 Mm<sup>2</sup> d'après l'INSEE).

On considère une hauteur moyenne de 2,5 m sous le plafond, ce qui permet de calculer un volume d'air à chauffer. En prenant un coefficient de déperdition de 1,5 (correspondant à une maison bien isolée), on obtient qu'une énergie thermique voisine de 4,6 TWh pourrait être économisée si la température moyenne de chauffage des Français était diminuée à 19°C, soit un gain de 1,6 kWh / m<sup>2</sup> / an.