3

LA CONSOMMATION

3

LA CONSOMMATION :
DES ÉVOLUTIONS STRUCTURELLES DE LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ EN VUE DE DÉCARBONER L'ÉCONOMIE

3.1 La trajectoire de référence pour la consommation d'énergie repose sur des progrès substantiels d'efficacité énergétique et le remplacement des énergies fossiles par des alternatives bas-carbone (électricité et biomasse)

3.1.1 Le cadre général de la SNBC : efficacité énergétique, électrification et mobilisation poussée du gisement de biomasse dans une France globalement autosuffisante en énergie

Les « Futurs énergétiques 2050 » élaborés par RTE s'inscrivent dans le cadre de la stratégie énergie-climat décidée par la France pour atteindre la neutralité carbone. Ils reprennent ainsi les orientations définies dans la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) adoptée en 2020.

La SNBC est en premier lieu fondée sur une perspective de forte diminution de la consommation énergétique totale, qui s'établirait pour la France à environ 930 TWh en 2050, contre près de 1600 TWh aujourd'hui.

La seconde caractéristique de la SNBC est de prévoir une évolution structurelle du bouquet énergétique en faveur des énergies bas-carbone, notamment l'électricité (55 % de la consommation d'énergie finale en 2050, contre 27 % aujourd'hui) et la biomasse (24 % en 2050, contre 11 % aujourd'hui), en misant très largement sur les énergies renouvelables.

Dans leurs principes, ces grandes lignes ne sont pas singulières au regard des stratégies retenues ou discutées dans les autres parties du monde adoptant un agenda de neutralité carbone. Ainsi, la perspective d'une baisse marquée de la consommation d'énergie finale, un haut degré d'électrification de l'économie ou encore un recours très poussé aux énergies renouvelables sont communs à de très nombreux exercices, menés à l'échelle internationale (comme le rapport de référence « *Net zero by 2050* » publié en mai 2021 par l'Agence internationale de l'énergie) ou européenne (scénarios de la Commission européenne et stratégies nationales des pays européens).

La pondération des différents vecteurs bas-carbone varie selon les stratégies considérées, mais comprend systématiquement une volonté d'électrification et d'utilisation accrue de la biomasse.

3.1.1.1 La demande d'énergie finale : une réduction de 40 % en 30 ans

La SNBC projette que la consommation d'énergie finale de la France se réduira de 40 % d'ici 2050 par rapport à aujourd'hui.

Cette évolution se décompose entre un effet haussier (« effet volume ») résultant de la croissance projetée de la population (qui atteindrait près de 72 millions d'habitants en 2050, contre 65 millions aujourd'hui) et de l'économie (la SNBC postule une croissance continue du PIB à un rythme moyen de près de 1,6 % par an) et un effet baissier très important du fait de l'efficacité énergétique. Celui-ci se subdivise lui-même en plusieurs postes :

- un accroissement de l'efficacité énergétique dans les différents secteurs (rénovation des bâtiments, consommation des appareils énergétiques, efficacité des procédés industriels…), à la fois en raison d'une progression mécanique (équipements électroménagers) et de politiques publiques spécifiques soutenues par l'État (avec notamment la rénovation thermique des bâtiments visant à porter en 2050 le parc immobilier français au niveau moyen du standard BBC – bâtiment basse consommation) ;
- un renforcement mécanique de l'efficacité énergétique lors de l'électrification : ainsi, les moteurs électriques pour les voitures affichent un rendement deux à trois fois plus élevé que les moteurs thermiques, et les pompes à chaleur ont une efficacité de l'ordre de trois fois plus importante que les chaudières traditionnelles ;
- dans une moindre mesure, une réduction de certains besoins énergétiques du fait d'évolutions comportementales permettant de tendre vers des modes de vie plus sobres.

Une baisse prolongée de la consommation d'énergie finale ne constituerait pas une rupture par rapport à la tendance actuelle : la consommation française diminue de manière régulière depuis une vingtaine d'années sous l'effet d'une plus faible croissance économique, de la désindustrialisation et des progrès réguliers dans l'efficacité des matériels. En revanche, réduire la consommation de 40 % en 30 ans, pour se situer en dessous de 1000 TWh (niveau dépassé par la France vers la fin des années 1960) constituerait une véritable rupture de pente et doit donc être considéré comme ambitieux.

La concertation organisée par RTE a donné lieu à un débat animé entre participants sur cet objectif d'efficacité énergétique, qui joue un rôle majeur dans l'élaboration des trajectoires sectorielles. Ce débat, initialement considéré hors du champ du travail des « Futurs énergétiques 2050 » de RTE, est apparu d'autant plus vif qu'il renvoie à des différends méthodologiques de fond. De ce fait, certains participants à la concertation ont regretté que ses implications au sens large pour la société ne soient pas suffisamment explicitées et demeurent noyées derrière le caractère apparemment consensuel d'une perspective à long terme de la diminution d'énergie. Ainsi, alors que certains participants ont considéré les perspectives de développement de l'efficacité énergétique trop pessimistes et pas assez en rupture avec la société actuelle, d'autres ont au contraire trouvé ce cadrage trop optimiste et ont regretté qu'il ait été fixé de manière exogène. À ce titre, on doit mentionner la proposition de certains participants de déterminer un niveau réaliste ou souhaitable de consommation énergétique par la modélisation (niveau endogène) plutôt que de se référer à la cible fixée par la SNBC.

L'analyse montre qu'**une forte ambition sur l'efficacité énergétique est un trait partagé des stratégies nationales des États européens, et que le degré d'ambition de la France se situe dans le haut de la fourchette des cibles annoncées.** Les trajectoires de consommation élaborées par RTE dans l'étude reprennent le cadrage et l'assortissent de variantes et tests de sensibilité *(voir parties 3.4 à 3.7).*

3.1.1.2 Le bouquet énergétique et la place des différents vecteurs : une stratégie fondée sur l'électricité et la biomasse produites en France

La SNBC prévoit le remplacement des combustibles fossiles par deux sources d'énergie (l'électricité bas-carbone et la biomasse) alimentant différents vecteurs (usages directs de l'électricité, chaleur, vecteurs gazeux comme l'hydrogène ou des gaz issus de la biomasse, combustibles liquides).

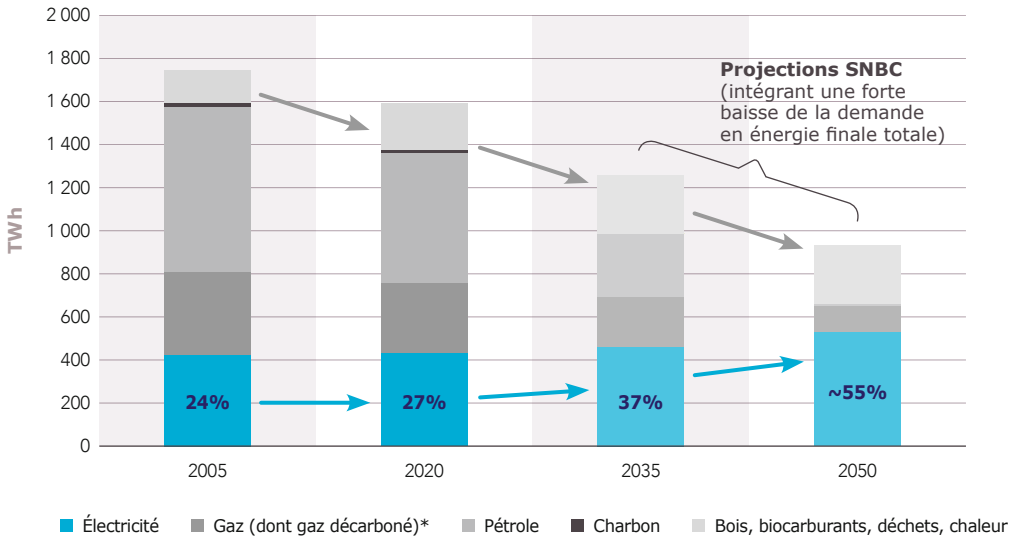
Du fait de la réduction projetée de la consommation, cette modification du bouquet énergétique ne se fait pas à volume d'énergie inchangé, et conduit à une baisse de l'énergie primaire utilisée.

Parmi les différents vecteurs, la SNBC retient une trajectoire de consommation d'électricité orientée à la hausse. Sous l'effet de cette croissance et de la réduction du besoin global d'énergie, la part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale est ainsi appelée à augmenter fortement d'ici 2050 et devrait atteindre de l'ordre de 55 % du volume d'énergie finale consommée, contre 27 % aujourd'hui. Les autres vecteurs énergétiques auraient des trajectoires très différentes (très forte réduction de l'utilisation des combustibles liquides, les produits pétroliers devant être remplacés par des biocarburants, baisse de la part du vecteur gaz restructuré autour d'un bouquet de gaz verts produits par utilisation de la biomasse française ou synthétisés à base d'électricité, progression des vecteurs chaleur et déchets).

Ces orientations sur la place des différents vecteurs résultent très largement des contraintes pesant sur les différentes sources d'approvisionnement en énergie bas-carbone. La SNBC est en effet fondée sur un raisonnement physique sur la disponibilité des ressources, avant de résulter d'une optimisation économique sur le coût des différents vecteurs.

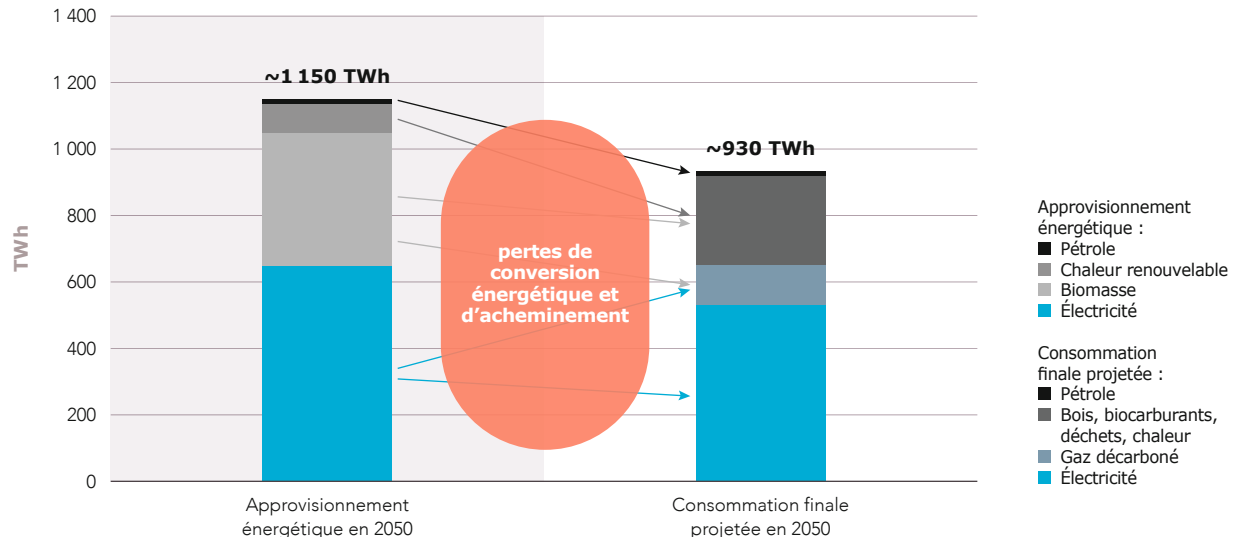
Ainsi, la SNBC prévoit que les vecteurs énergétiques décarbonés – autres que l'électricité – mobilisés pour atteindre la neutralité carbone seront principalement issus de la biomasse (biogaz, biocarburants

Figure 3.1 Évolution de la consommation d'énergie finale et de la part de l'électricité en France métropolitaine (historique et projections SNBC)



* Le vecteur gaz consiste aujourd'hui quasi-exclusivement en du gaz naturel d'origine fossile. Il est amené à évoluer pour n'être constitué, en 2050, que de gaz verts (hydrogène, biométhane, méthane de synthèse, ammoniac, etc.).

Figure 3.2 Projection de l'approvisionnement en énergie et de la consommation d'énergie finale à l'horizon 2050



ou bois-énergie) et dans une moindre mesure de chaleur renouvelable (géothermie, chaleur industrielle fatale…). Or les quantités accessibles sur le territoire sont limitées.

Parmi les éléments structurants de la SNBC figure le fait d'écarter ou de limiter très fortement le recours au captage et stockage du carbone (pour des questions de maturité et d'acceptabilité) ou de l'importation de combustible depuis d'autres pays (pour des questions d'indépendance et de souveraineté). **En conséquence, l'approvisionnement énergétique d'une France neutre en carbone est appelé à être quasi exclusivement (à hauteur de 95 %) couvert par la biomasse et par de l'électricité bas-carbone** (énergies renouvelables et nucléaire, dont les limites sur le potentiel technique sont moins limitantes).

À ce titre, la discussion d'expert sur le degré nécessaire d'électrification – élevé dans tous les cas et commun à toutes les stratégies d'atteinte de la neutralité carbone – ne doit pas masquer que **l'un des traits distinctifs de la SNBC réside dans le pari d'une très forte croissance de la mobilisation de la biomasse pour la production d'énergie, qui serait multipliée par 2,5 par rapport à aujourd'hui.** La stratégie de mobilisation de la biomasse inclut notamment la perspective d'une augmentation significative des besoins pour la production de biocarburants (20 TWh supplémentaires en 2050) et pour la production de biogaz (qui attendrait jusqu'à environ 150 TWh[1] en 2050 contre 11 TWh en 2019).

Or, la capacité à développer de tels volumes de biomasse-énergie constitue justement un point de débat, certes moins identifiable dans le grand public que celui qui porte sur les perspectives d'évolution du nucléaire ou des énergies renouvelables électriques, mais néanmoins tout aussi structurant pour l'atteinte de la neutralité carbone. Alors que les premières évaluations, sur lesquelles s'était fondée la SNBC, considéraient un potentiel total de mobilisation de la biomasse permettant de produire entre 400 et 450 TWh d'énergie, cette perspective apparaît notablement plus élevée que les stratégies nationales des pays voisins, et un

1. PCS (pouvoir calorifique supérieur), énergie finale.

rapport récent de France Stratégie[2] indique que la cible de biomasse agricole de la SNBC ne serait vraisemblablement pas atteignable. Dans le cadre de la prochaine SNBC, des scénarios de mobilisation de la biomasse moins intensifs pourraient ainsi être étudiés afin de privilégier les puits forestiers et agricoles. Les travaux de modélisation engagés par l'ADEME fourniront des informations importantes pour l'approfondissement de ce thème.

La faculté à atteindre les objectifs de mobilisation de la biomasse est un élément à prendre en compte dans la réflexion prospective sur le système électrique. En effet, dans une perspective de neutralité carbone, un déficit de production d'énergie décarbonée d'un côté doit être compensé de l'autre. Ainsi, une **non-atteinte des objectifs de la SNBC pour la biomasse impliquerait de prévoir une électrification accrue de l'économie** (en substitution au biogaz dans les bâtiments ou l'industrie, ou aux biocarburants dans les transports…) **en complément d'actions renforcées d'efficacité énergétique et de sobriété,** ou encore de faire reposer l'atteinte de la neutralité carbone sur des imports de combustibles décarbonés à rebours du principe fixé dans la SNBC.

2. France Stratégie, 2021, Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? https://www.strategie.gouv.fr/publications/biomasse-agricole-ressources-potentiel-energetique

3.1.2 Les « Futurs énergétiques 2050 » de RTE : l'évolution future de la consommation électrique résulte d'une modélisation reprenant l'esprit de la SNBC, et adaptée pour tenir compte de l'actualisation des perspectives techniques et des retours de la consultation publique

Si les « Futurs énergétiques 2050 » considèrent la SNBC comme un entrant, ils reposent sur un travail spécifique de modélisation de la consommation d'électricité ayant permis de déterminer des trajectoires prospectives à long terme, en énergie et en puissance.

Par rapport à la SNBC, plusieurs évolutions ont été apportées : les hypothèses de la modélisation et ses premiers résultats ont fait l'objet d'un examen croisé des parties prenantes dans le cadre des groupes de concertation, le contexte macroéconomique de référence a été ajusté pour tenir compte de la crise sanitaire et de l'évolution des perspectives démographiques, et les nouvelles politiques publiques décidées entre 2018 et 2021 ont été intégrées.

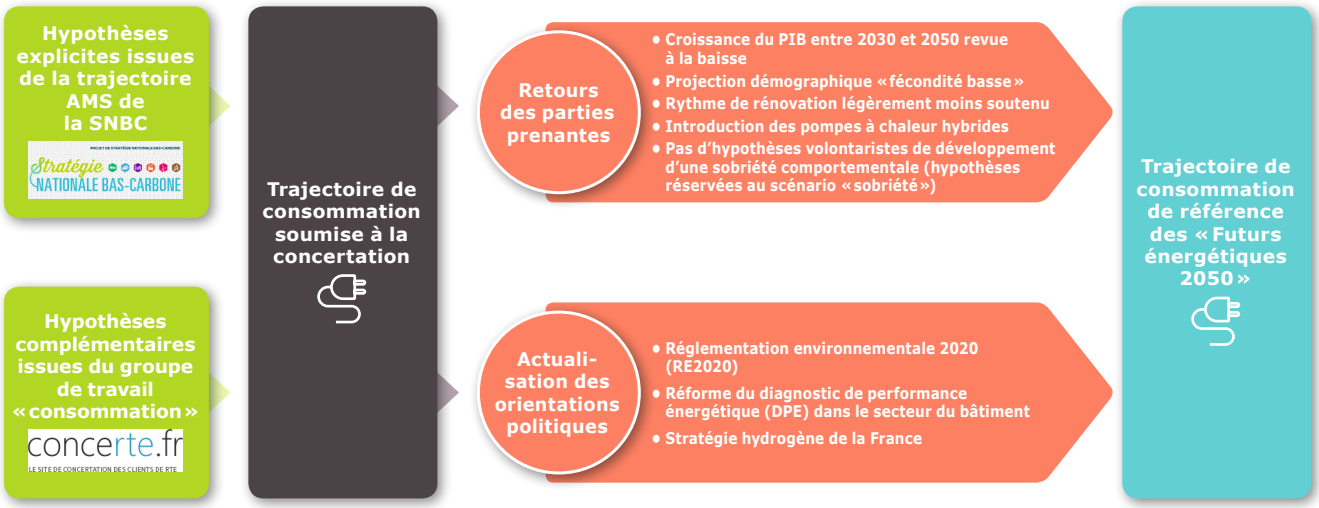
Ce travail permet aujourd'hui de disposer d'un ensemble de trajectoires de consommations ajustées, pouvant sur certains points présenter des différences avec la SNBC, et comprenant plusieurs variantes et analyses de sensibilité pour refléter les incertitudes.

La consultation publique sur les scénarios, lancée fin janvier 2021, a permis de recenser de nombreuses demandes d'amendement, portant sur des paramètres techniques mais également, et de manière fondamentale, sur le cadrage de référence de la SNBC en général et les perspectives d'efficacité énergétique en particulier.

Parmi les modifications apportées à l'issue de la consultation publique figurent, en premier lieu, des éléments de cadrage macroéconomiques ou sectoriels :

- l'hypothèse de croissance du PIB entre 2030 et 2050 retenue par la SNBC a été jugée trop élevée au regard de l'historique des années passées et des perspectives existantes : elle a été revue à la baisse (rythme de croissance annuelle de +1,3 % par an en moyenne contre +1,7 % dans la SNBC entre 2030 et 2050) ;

Figure 3.3 Démarche de construction de la trajectoire de consommation de référence de l'étude



- l'évolution démographique a été recalée sur la projection « fécondité basse » de l'INSEE, qui apparait aujourd'hui plus réaliste et plus cohérente avec les observations récentes ;
- les éléments de sobriété relevant de ruptures comportementales par rapport aux tendances observées n'ont pas été repris dans la trajectoire de référence mais développés dans des proportions plus importantes dans un scénario dédié *(voir ci-après)* ;
- le rythme de rénovation thermique des bâtiments, très ambitieux au regard de l'historique ou de l'expérience internationale, a été revu en légère baisse, de même que la part du chauffage par radiateurs électriques (effet Joule). Un développement significatif des pompes à chaleur hydrides a également été introduit dans la trajectoire.

En second lieu, la modélisation a intégré l'ensemble des décisions de politique énergétique prises au cours des dernières années, et parfois postérieurement à la SNBC. Cette dernière a en effet été élaborée entre 2017 et 2020 et elle a depuis lors été complétée par plusieurs lois, par un plan de relance de l'économie dans le cadre de la pandémie de la COVID et a été suivie d'un approfondissement de la réflexion au niveau européen se traduisant par la volonté d'accroître l'ambition de réduction des émissions à l'horizon 2030 (projet du Green New Deal).

La trajectoire de référence intègre donc les orientations politiques actualisées, notamment la réglementation environnementale 2020 (RE2020) et la réforme du diagnostic de performance énergétique (DPE) dans le secteur du bâtiment, qui va renforcer le poids relatif du chauffage électrique dans la construction neuve, ainsi que la stratégie hydrogène de la France.

Enfin, des ajustements sur la consommation d'électricité de certains usages (sidérurgie, *data centers*, climatisation) ont été intégrés pour affiner le réalisme de la projection (toutes choses étant égales par ailleurs, ces réajustements ont un impact haussier).

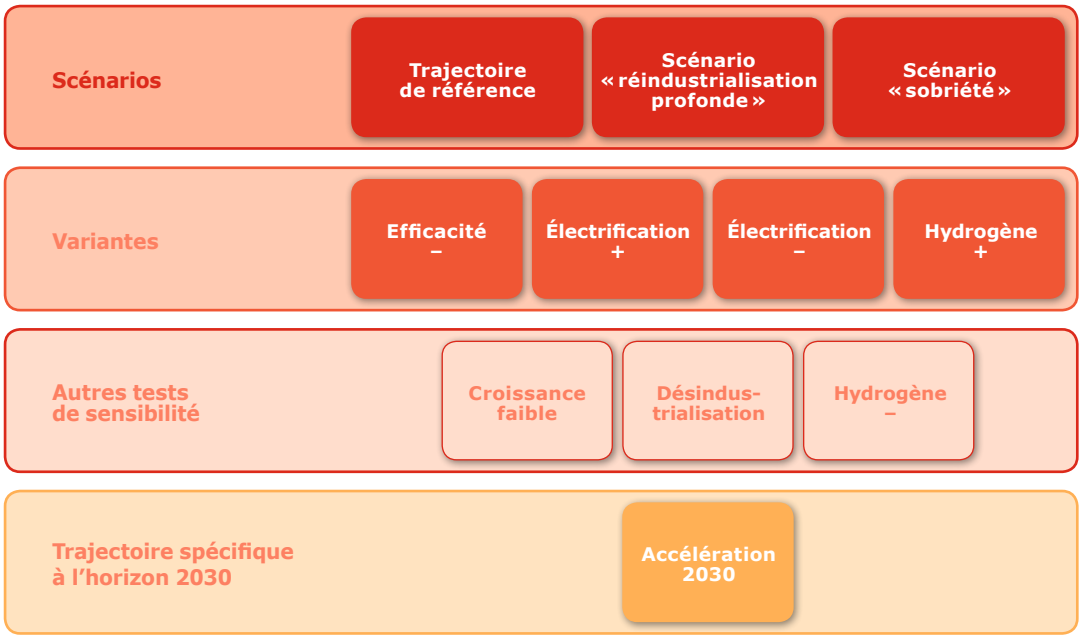
3.1.3 Un dispositif d'étude comprenant trois scénarios d'évolution de la consommation à long terme, une trajectoire d'accélération à l'horizon 2030, et de multiples tests de sensibilité, intégrant l'effet du réchauffement climatique

Quand bien même l'étude « Futurs énergétiques 2050 » vise à apporter des éléments de réponse circonstanciés à la question du mix électrique, laissée ouverte par les précédentes SNBC et PPE publiées en 2020, elle doit permettre également d'actualiser la réflexion sur les quantités d'électricité susceptibles d'être consommées à long terme.

La question de la consommation est en effet centrale dans la prospective du secteur électrique, et elle ne peut être considérée comme ayant été définitivement refermée par la SNBC en vigueur. En effet, cette dernière a été adoptée en 2020, seulement un an après que l'objectif de neutralité carbone a été inscrit dans la loi et, même si elle a bénéficié d'un travail de scénarisation et de modélisation engagé dès 2017, elle doit être considérée comme la première version d'une stratégie nationale appelée à être approfondie, ajustée et précisée régulièrement. Une prochaine évolution de la SNBC est déjà programmée, dans un cadre nouveau institué par la loi énergie-climat de 2019 (les prochaines SNBC et PPE découleront d'une loi de programme adoptée par le parlement). Les travaux préparatoires à la réévaluation de la SNBC ont ainsi été lancés fin 2020 par les services du ministère de la transition énergétique.

Ces possibles révisions concernent notamment les perspectives d'évolution de la consommation d'électricité, qui concentrent des enjeux d'autant plus lourds que l'électricité est appelée à remplacer le pétrole comme première source d'énergie du pays. De nombreux éléments de cadrage sont susceptibles d'être réinterrogés dans le cadre de la réactualisation prévue de la stratégie nationale bas-carbone : anticipations du contexte macroéconomique et politique,

Figure 3.4 Scénarios et variantes des « Futurs énergétiques 2050 »



choix d'une stratégie faisant de la France un pays globalement autosuffisant sur le plan énergétique plutôt que structurellement importateur, analyse du consensus social et politique sur l'évolution des modes de vie et les perspectives qu'elles offrent ou au contraire interdisent en matière de sobriété énergétique, perspectives de réindustrialisation dans le cadre d'une stratégie de relance, ou encore le rôle dévolu aux usages de la biomasse et à l'économie de l'hydrogène. Et la consultation organisée par RTE sur les « Futurs énergétiques 2050 » a précisément permis d'illustrer que des positions particulièrement différentes existaient dans le débat public sur chacun de ces paramètres clés pour la planification du système électrique.

Au cours des deux ans de travail de concertation sur les « Futurs énergétiques 2050 », ces incertitudes ont bien été mesurées, plaidant pour élargir le dispositif initialement envisagé.

La trajectoire de référence de l'étude reprend bien le cadrage de la SNBC tout en l'actualisant. Elle conduit à une consommation d'électricité de 645 TWh en 2050, en augmentation de 35 % par rapport à aujourd'hui.

La modélisation de cette trajectoire intègre une représentation des effets du changement climatique à l'horizon 2050. Bien que le changement climatique puisse avoir des impacts importants sur le système énergétique, ses effets sont rarement pris en compte dans les scénarios prospectifs de mix énergétique. La modélisation de RTE et Météo-France utilisée dans les « Futurs énergétiques 2050 » de RTE constitue en cela une démarche inédite pour ce type d'exercice prospectif. Les résultats présentés dans ce chapitre sont basés sur le scénario RCP4.5 du GIEC *(cf. chapitre 8).*

À ce scénario de référence s'ajoutent un scénario « sobriété » et un scénario de « réindustrialisation profonde ». Ces deux trajectoires obéissent à des cadrages sociaux, politiques et économiques substantiellement différents de la trajectoire de référence : il s'agit bien de scénarios en tant que tels, qui obéissent à une logique intrinsèque détaillée par la suite.

Différentes variantes sont également étudiées dans l'étude : la première consiste à réduire le degré d'efficacité énergétique projeté (« efficacité énergétique – »), la seconde à faire varier le niveau d'électrification (« électrification +/- ») et la troisième à prévoir un recours nettement plus élevé à l'hydrogène (« hydrogène + »). Des tests sur le niveau de la croissance économique (notamment pour évaluer le fonctionnement du système dans un environnement macroéconomique défavorable, avec par exemple une croissance nulle du PIB en 30 ans), seront également présentés dans l'analyse complète.

Enfin, une trajectoire spécifique (« accélération 2030 ») à l'horizon 2030 a été ajoutée à l'étude en lien avec le nouvel objectif européen visant à atteindre une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55 % (net, c'est-à-dire en intégrant la contribution des puits de carbone) en 2030, contre 40 % brut aujourd'hui. Cette trajectoire permet alors d'analyser la faculté de différentes configurations du système électrique à atteindre ce nouvel objectif, particulièrement ambitieux au regard des tendances actuelles de réduction des émissions en France et chez l'ensemble de ses voisins.

3.2 La trajectoire de consommation d'électricité : une perspective d'augmentation de 35 % d'ici 2050 pour sortir des énergies fossiles tout en promouvant l'efficacité énergétique, pouvant atteindre environ 645 TWh +/- 100 TWh en 2050

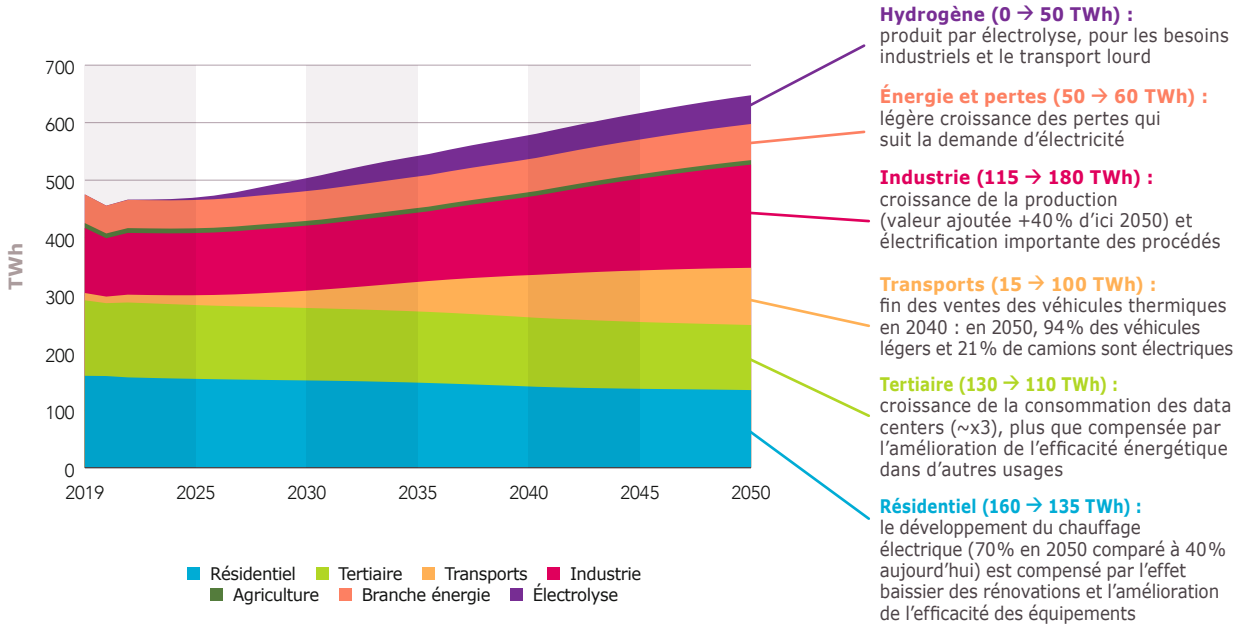
3.2.1 Une trajectoire de référence caractérisée par une évolution importante en niveau et en structure

Les orientations retenues pour la construction de la trajectoire de référence conduisent à une consommation totale de l'ordre de 645 TWh à l'horizon 2050 en France métropolitaine continentale, en incluant les pertes de transport et de distribution ainsi que l'électricité utilisée pour la production d'hydrogène. Ceci constitue une hausse de l'ordre de +35 % par rapport à aujourd'hui.

La trajectoire de référence prévoit une augmentation relativement régulière de la consommation, avec une tendance à l'accélération progressive (taux de croissance annuel moyen de 0,6 % sur la décennie 2020, de 1,1 % sur la décennie 2030 et de 1,3 % sur la décennie 2040). La consommation se stabiliserait ensuite, la neutralité carbone étant atteinte, pour n'évoluer que marginalement dans la décennie suivante en fonction de l'évolution de la population et de l'activité économique.

Ce scénario de consommation combine des évolutions très différenciées selon les secteurs. D'une part, la consommation électrique de trois secteurs est orientée très fortement à la hausse

Figure 3.5 Évolution de la consommation totale d'électricité dans la trajectoire de référence et décomposition sectorielle



du fait des nouveaux usages électriques : les transports (+85 TWh sur la période), l'industrie (+65 TWh) et la production d'hydrogène (+50 TWh). Dans le même temps, certains secteurs parmi les plus consommateurs historiquement (résidentiel, tertiaire) voient leur demande d'électricité diminuer sous les effets de l'efficacité énergétique.

Il conduit en outre à une évolution importante de la structure de la consommation tout au long de l'année, les « nouveaux usages électriques » étant plus flexibles que les usages traditionnels. Ainsi, la production d'hydrogène est considérée comme intégralement pilotable, tandis que la recharge des véhicules électriques et les usages industriels le sont également à des degrés divers *(voir paragraphe 3.8).*

3.2.2 Une trajectoire de rupture par rapport à la stabilité observée ces dix dernières années

La trajectoire d'évolution de la consommation nécessaire pour atteindre la neutralité carbone marquerait une rupture par rapport à la tendance actuelle.

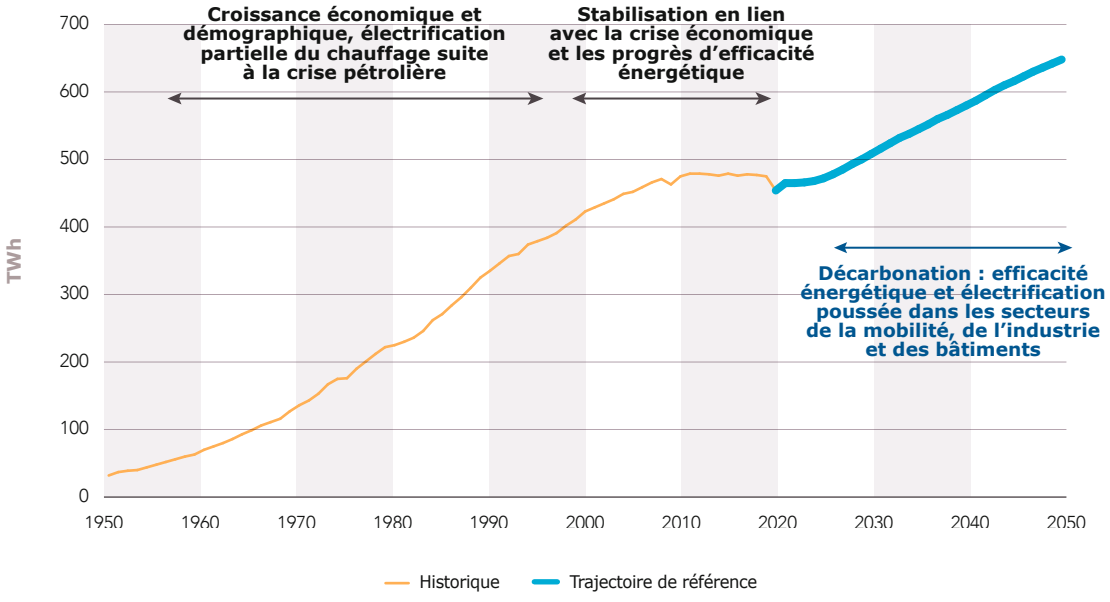
En effet, après plusieurs décennies de hausse soutenue liée à la croissance démographique et économique dès la fin de la seconde guerre mondiale, la consommation d'électricité en France s'est progressivement stabilisée au cours du XXIe siècle. Depuis une dizaine d'années, la consommation est ainsi remarquablement stable en données corrigées des variations météorologiques, à l'exception de la baisse brutale et conjoncturelle de la consommation enregistrée 2020 en raison de la crise sanitaire.

Cette stabilisation au cours des dix dernières années est généralement attribuée à une combinaison de facteurs bien identifiés :

- la diffusion des actions de maîtrise de la demande, et en particulier le développement de l'efficacité énergétique des bâtiments et des équipements ;
- le ralentissement tendanciel de la croissance économique ;
- la progression de la tertiarisation de l'activité économique, avec des services qui sont moins consommateurs d'électricité que l'industrie ;
- la modification du tissu industriel français (stagnation de l'industrie manufacturière et évolutions structurelles en faveur d'une industrie de haute technologie).

Par rapport à cette tendance désormais bien inscrite à la stabilité de la consommation, une réorientation structurelle de trajectoire à la hausse marquerait donc un changement structurant. La France retrouverait des rythmes d'augmentation annuelle de la consommation similaires aux années 2000, mais avec un moteur différent : des politiques publiques de décarbonation, plutôt que la croissance économique et l'équipement des ménages. Ce rythme de croissance, de l'ordre de +1 % par an, demeurerait cependant nettement inférieur à celui observé sur certaines périodes passées (4 % en moyenne dans les années 1980, par exemple).

Figure 3.6 Évolution de la consommation d'électricité en France



3.2.3 La hausse de la demande d'électricité à long terme est liée aux effets de l'électrification, qui ne sont qu'en partie compensés par la progression de l'efficacité énergétique

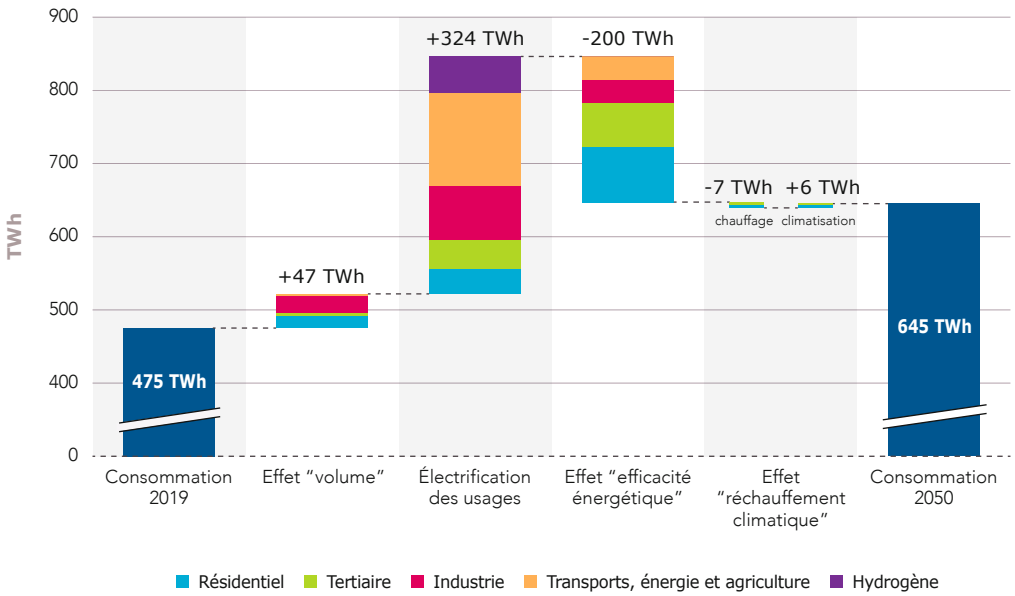
Une conclusion importante des « Futurs énergétiques 2050 » est que la trajectoire d'évolution de la consommation électrique nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone est résolument orientée à la hausse.

En effet, même dans le scénario « sobriété », l'effet haussier résultant du développement de nouveaux usages électriques l'emporte sur celui, baissier, associé au renforcement de l'efficacité énergétique ou à la sobriété. Ce résultat découle directement de l'importance des nouveaux usages à électrifier pour remplacer les énergies fossiles, dans un pays où ces dernières alimentent encore 60 % des besoins énergétiques finaux. Il apparaît beaucoup plus nettement dans une trajectoire de neutralité carbone, impliquant de se passer complètement des énergies fossiles, que dans une politique comme le « facteur 4 » visant à réduire les émissions de 75 %.

L'effet respectif de l'électrification et de l'efficacité énergétique peut, par exemple, être représenté pour la trajectoire de référence en décomposant l'évolution projetée de la consommation d'électricité entre 2019 et 2050 selon différentes composantes :

- un effet « volume », haussier, induit par la croissance démographique et l'évolution de l'activité économique, qui contribue à une hausse de l'ordre de 47 TWh ;
- un effet « électrification des usages », haussier, très majoritairement lié aux secteurs de l'industrie et des transports, qui constitue l'essentiel de l'augmentation de la consommation et représente environ +324 TWh ;
- un effet « efficacité énergétique », baissier, qui touche l'ensemble des secteurs et usages pour un volume total d'environ -200 TWh ;
- un effet « réchauffement climatique », globalement faible en énergie annuelle (-1 TWh), mais

Figure 3.7 Évolution de la consommation intérieure d'électricité entre 2019 et 2050 dans la trajectoire de référence et décomposition en effets



qui recouvre des évolutions contrastées sur les usages thermiques de l'électricité (-7 TWh sur le chauffage, +6 TWh sur la climatisation), avec en corollaire un impact significatif sur les appels de puissance.

Les effets de l'électrification, et dans une moindre mesure les effets « volume », ne sont ainsi que partiellement contrebalancés par les effets de l'efficacité énergétique sur les usages électriques.

L'intérêt de cette décomposition réside également dans l'identification des leviers de modération de l'augmentation de la consommation. Ainsi, le levier principal sur le secteur résidentiel – la rénovation énergétique (bâti et solutions de chauffage) efficace des logements – est considéré déjà largement activé dans la trajectoire de référence, puisqu'il contribue à réduire le besoin de 13 TWh. Il en va de même pour le secteur tertiaire, pour les mêmes raisons. *A contrario,* au-delà des efforts individuels de sobriété, des gains organisationnels sont possibles dans plusieurs secteurs, notamment dans celui des transports en cas de réduction du besoin de mobilité par la voiture individuelle ou de réduction de la taille des véhicules, et sont explorés dans le scénario « sobriété ».

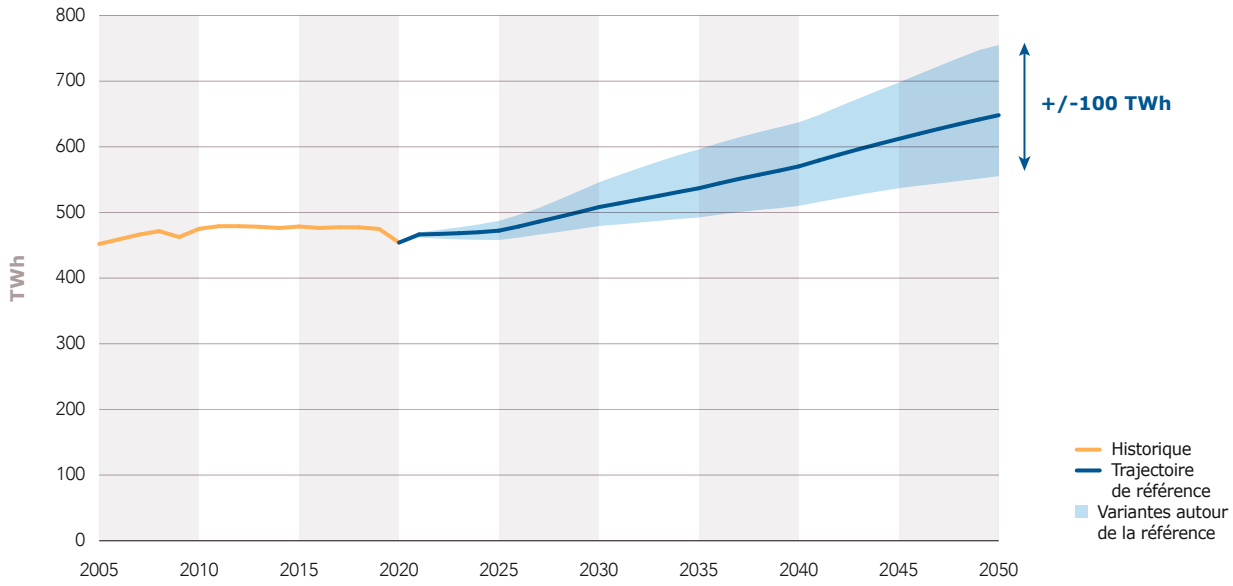
3.2.4 En intégrant différentes trajectoires de consommation envisagées, un cône de plus ou moins 100 TWh autour de la trajectoire de référence

Les différents scénarios et variantes présentés au paragraphe 3.1.3 conduisent à des évolutions de nature similaire. Ils confortent la conclusion forte des « Futurs énergétiques 2050 » sur le besoin de planifier un système électrique devant pouvoir répondre à une augmentation de la demande intérieure d'électricité qui lui sera adressée.

Les trajectoires modélisées dans l'étude conduisent, à l'horizon 2050, à évaluer la consommation électrique dans une plage de plus ou moins 100 TWh autour de la trajectoire de référence, s'échelonnant entre 555 TWh et 755 TWh en 2050, néanmoins avec davantage de configurations qui seraient orientées à la hausse qu'à la baisse. Si des combinaisons de variantes encore plus haussières pourraient être envisagées en sommant différents effets haussiers – conduisant alors à dépasser la barre des 800 TWh en 2050 –, le cône de prévision cité précédemment apparaît de nature à bien refléter les incertitudes actuelles sur les déterminants de la consommation.

Le cône de prévision est plus élevé que celui qui est retenu par l'ADEME dans la dernière édition de ses « visions 2030-2050 », actuellement en cours de réévaluation dans le cadre de ses travaux de prospective énergie-ressources. Dans des avis récents, l'Académie des sciences et l'Académie des technologies ont, quant à elles, retenu des perspectives plus élevées, mais sans procéder à un travail de modélisation de la consommation : une fois retraitées des différents effets, les estimations en ordre de grandeur de l'Académie des technologies sont cohérentes avec les trajectoires hautes de RTE.

Figure 3.8 Cône de variation des différentes trajectoires de consommation des « Futurs énergétiques 2050 »



3.2.5 L'augmentation de la consommation électrique est une constante de tous les scénarios institutionnels européens et mondiaux

La perspective d'augmentation de la consommation d'électricité n'est pas propre à la France : elle se retrouve dans toutes les stratégies nationales de décarbonation, dans la stratégie «net zero» de l'Agence internationale de l'énergie et dans les projections des différents instituts ayant publié des scénarios de neutralité carbone. Indépendamment des variations selon les régions du monde ou les instituts, **la perspective d'une augmentation de la part de l'électricité dans le mix est consensuelle, et celle d'une augmentation de la consommation en valeur absolue est également largement partagée.**

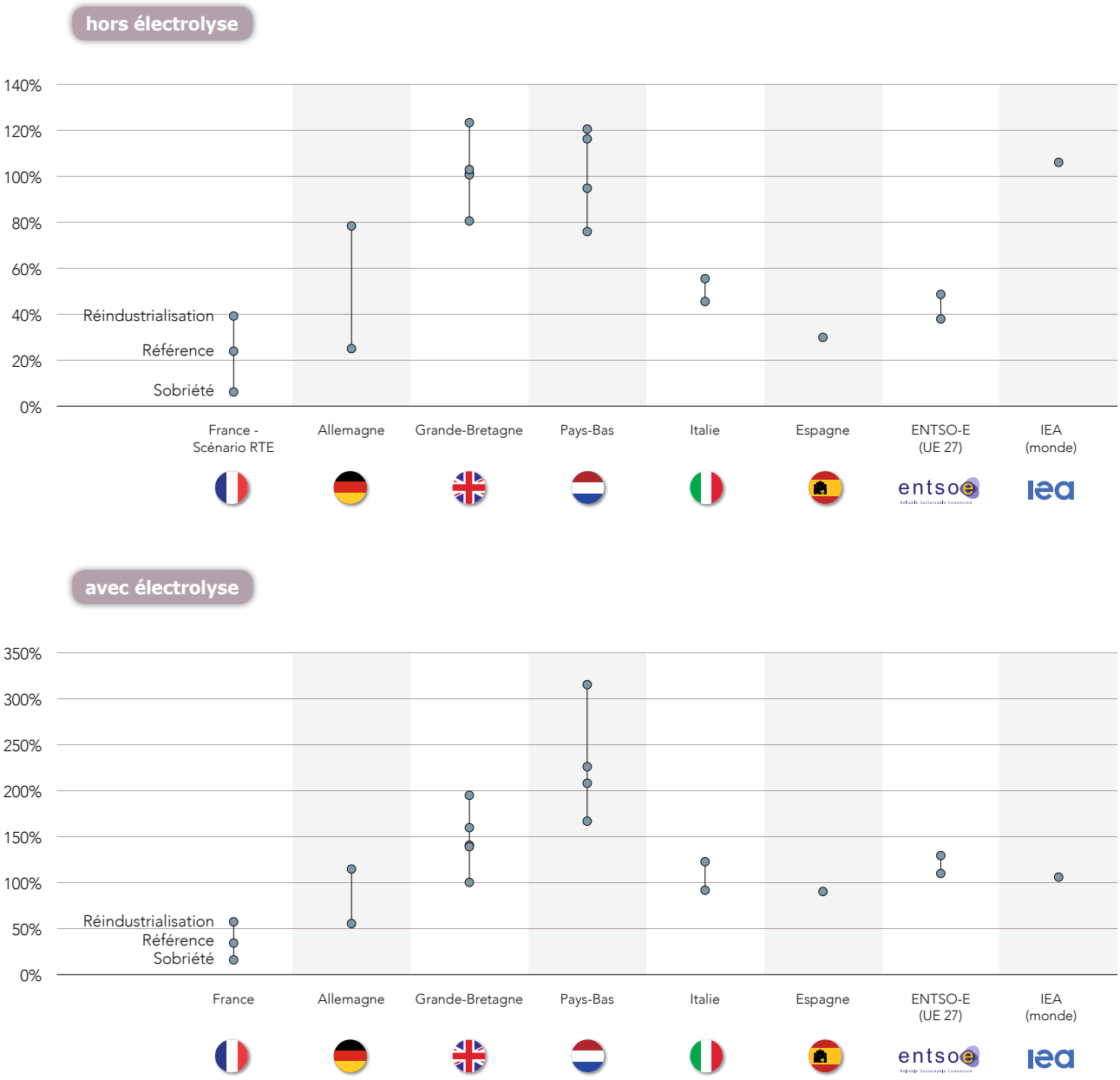
L'ampleur de l'augmentation prévue varie selon les pays. Elle dépend de plusieurs facteurs, comme (i) les prévisions de croissance démographique et économique (supérieures dans le monde par rapport à l'Europe), (ii) du niveau initial d'électrification (plus élevé en France que dans d'autres pays européens), (iii) des paris sur les technologies (par exemple, électrification vs captage et stockage du carbone) et (iv) des ambitions sur l'efficacité énergétique et la sobriété.

Ainsi, la perspective d'évolution peut être plus importante dans certains pays voisins qu'en France. C'est notamment le cas du Royaume-Uni ou des Pays-Bas, où l'usage de l'électricité dans le secteur du bâtiment par exemple est aujourd'hui moins répandu qu'en France du fait des conditions d'accès historiquement propices de ces pays aux gisements de gaz de la mer du Nord, et où les perspectives de développement de l'électricité sont en conséquence comparativement plus fortes.

Parmi les scénarios publiés par les organisations non gouvernementales, certains prévoient également une augmentation, parfois importante, de la consommation d'électricité. C'est le cas notamment du scénario européen du *Climate Action Network et du European Environmental Bureau*[3] publié en 2020, visant la neutralité carbone en 2040 via un renforcement des actions de maîtrise de la demande en énergie, une électrification importante des usages énergétiques et un développement massif des énergies renouvelables électriques. **Par rapport à la SNBC française, ce type de scénarios accorde au développement des usages énergétiques de la biomasse un rôle beaucoup plus limité, du fait de l'exigence de préserver les forêts et de ne pas accroître leur exploitation pour des usages énergétiques ou encore de limiter les conflits d'usage sur l'utilisation de la ressource agricole et forestière.** En France, le scénario de l'association négaWatt publié en 2017 constitue une entreprise de modélisation du secteur énergétique aboutie. Il s'écarte cependant du scénario porté par le *Climate Action Network* par la place importante qu'il accorde aux usages de la biomasse et qui conduisent, par ricochet, à un moindre développement de l'électricité et donc à une consommation électrique en baisse dans le scénario de référence.

3. CAN Europe, EEB, 2020, Building a Paris Agreement Compatible (PAC) energy scenario, http://www.caneurope.org/content/uploads/2020/06/PAC_scenario_technical_summary_29jun20.pdf

Figure 3.9 Évolution de la demande finale d'électricité entre 2018 et 2050 (en %) en France et dans une sélection de pays européens



Sources :
France : *Futurs Énergétiques 2050,* RTE (2021)
Allemagne : *Leitstudie Integrierte Energiewende,* DENA (2018)
Grande-Bretagne : *The Sixth Carbn Budget Electricity Generation,* Climate Change Committee (2020)
Pays-Bas : *Klimaaneutrale energiescenario's 2050*, Tennet/Gasunie (2020)
Italie : Long Term Strategy
Espagne : Long Term Strategy
UE27 : *TYNDP 2022*, ENTSO-E (2021)
Monde : *Net Zero by 2050*, International Energy Agency

3.2.6 Les hypothèses clés qui sous-tendent la trajectoire de référence font l'objet d'analyses détaillées

Le périmètre de validité de la trajectoire de référence est, par définition, dépendant des hypothèses utilisées pour l'élaborer. Fidèle au projet des « Futurs énergétiques 2050 » d'élaborer une prospective publique transparente permettant une discussion sur les hypothèses et les marges d'incertitude, RTE restitue ces hypothèses clés qui ont été discutées en concertation.

Tout d'abord, **la trajectoire de référence implique que la neutralité carbone soit réellement atteinte et, notamment, que les nouveaux usages de l'électricité se développent effectivement.** Un écart entre les intentions et la réalité conduisant par exemple à un moindre développement du véhicule électrique, à une électrification plus lente dans l'industrie ou à une persistance des énergies fossiles dans le secteur du bâtiment, aurait une incidence à la baisse sur le niveau de demande électrique. La trajectoire de référence ne constitue donc pas une prévision du « monde probable », mais une description de ce que devrait être la consommation pour atteindre un objectif public précis.

Une première catégorie d'hypothèses porte sur le contexte macroéconomique. RTE a retenu un cadrage macroéconomique et démographique réajusté à la baisse par rapport à la SNBC, mais qui demeure inscrit dans le même paradigme que les politiques publiques actuelles, lesquelles font l'hypothèse qu'une politique mondiale de lutte contre le changement climatique est compatible avec la poursuite de la croissance. Une discussion importante a été lancée en concertation, à l'initiative du *think-tank The Shift Project,* sur les limites possibles de cette approche dans un monde en transition énergétique, marqué par une raréfaction de l'accès aux énergies fossiles bon marché et par une augmentation du coût des alternatives bas-carbone. De même, alors que la plupart des analyses macroéconomiques sous-tendant la SNBC (réalisées par l'ADEME en partenariat avec l'OFCE) anticipent un effet positif des politiques de lutte contre le changement climatique sur la croissance, des analyses récentes comme celle de Jean Pisani-Ferry[4] invitent plutôt à les considérer comme un choc d'offre susceptible de réduire le potentiel de croissance. Des propositions visant à analyser des scénarios d'évolution de la consommation électrique dans des situations macroéconomiques contraintes (croissance par tête plus faible, voire nulle ou négative) ont ainsi été analysées, et donneront lieu à des approfondissements dans le rapport final de l'étude. **L'effet d'une révision à la baisse de l'hypothèse de croissance à long terme jouerait pour plusieurs dizaines de térawattheures.** Elle poserait, plus largement, des questions d'importance sur le financement de l'effort d'investissement pour atteindre la neutralité carbone, qui pourront être approfondies dans la version finale du rapport attendue début 2022.

La seconde catégorie d'hypothèses porte sur la projection des modes de vie. La trajectoire de référence des « Futurs énergétiques 2050 » repose sur un maintien des standards de vie actuels et notamment du degré de confort. À ce titre, elle intègre des évolutions comportementales lorsque celles-ci apparaissent déjà à l'œuvre dans la société ou sont prescrites par la réglementation, mais ne présupposent pas de rupture comportementale par rapport à aujourd'hui. Elle ne retient notamment pas certains des leviers de la SNBC (baisse de 1°C de la température de chauffe, augmentation du taux d'occupation moyen des véhicules légers, etc.), mais ceux-ci sont explorés – et dans des proportions significativement plus importantes – dans le « scénario sobriété ». **L'adoption de modes de vie plus sobres a une influence baissière estimée à une centaine de térawattheures.** *A contrario*, le développement de nouveaux usages énergivores pourrait entraîner la consommation à la hausse.

La troisième catégorie concerne le développement de l'efficacité énergétique. La trajectoire de référence de l'étude « Futurs énergétiques 2050 »

4. https://www.piie.com/publications/policy-briefs/climate-policy-macroeconomic-policy-and-implications-will-be-significant

Figure 3.10 Principales hypothèses de la trajectoire de référence et risques/facteurs de non-respect

	Hypothèses clés de la trajectoire de référence	Risque/facteur de non-respect de la trajectoire de référence	Conséquences sur la consommation d'électricité (écart par rapport à la trajectoire de référence)
Cadrage socioéconomique	• Croissance économique de 1,3 % en moyenne sur 30 ans • Croissance démographique de 4 millions d'habitants en 30 ans	Croissance économique plus faible, voire nulle (situation de crise)	Moindre consommation électrique (plusieurs dizaines de TWh) – *variante «croissance faible»*
Mode de vie	• Pas de rupture sociétale	Généralisation de pratiques sobres	Moindre consommation électrique (-90 TWh) – scénario «sobriété»
		Relâchement des comportements et des investissements d'efficacité énergétique	Consommation électrique plus élevée (+70 TWh) – variante «efficacité énergétique -»
Industrie	• Part de l'industrie dans le PIB stable à 10%	Poursuite de la déindustrialisation	Moindre consommation électrique (-30 TWh) – *variante «désindustrialisation»*
		Croissance ou électrification supplémentaire	Consommation électrique plus élevée (+50 TWh) - *scénario «réindustrialisation»* ou (+10 TWh) – *variante «électrification +»*
Résidentiel/ tertiaire	• Réussite de la politique de rénovation thermique (parc équivalent proche de BBC en 2050)	Pas d'inflexion de la trajectoire	Consommation électrique plus élevée (+20 TWh) avec un impact important à la pointe – *variante « efficacité énergétique -»*
Transports	• Décollage du véhicule électrique, interdiction de la vente des voitures thermiques en 2040 (95% du parc de véhicules légers en 2050)	Echec de la généralisation du véhicule électrique (75% du parc de véhicules légers en 2050)	Moindre consommation électrique (-15 TWh) – *variante «électrification -»*
		Accélération et interdiction dès 2035 des véhicules thermiques	Consommation électrique plus élevée (+3 TWh en 2050, mais +13 TWh en 2030), – *variante «électrification +»*
	• Essor modéré des camions électriques (20% du parc)	Essor plus soutenu des camions électriques (75% du parc)	Consommation électrique plus élevée (+24 TWh) – *variante «électrification +»*
Production d'hydrogène	• Développement conforme à la SNBC et au plan de relance	Développement moins rapide	Moindre consommation électrique (-10 TWh) – *variante «hydrogène -»*
		Développement plus rapide	Consommation électrique plus élevée (+110 TWh) – *variante «hydrogène +»*

est caractérisée par un déploiement important des actions d'efficacité énergétique dans tous les secteurs : rénovation des bâtiments et développement des pompes à chaleur, efficacité des procédés industriels, diminution de la consommation unitaire des véhicules, efficacité énergétique des appareils électroménagers, etc. À titre d'exemple, elle implique une inflexion très significative du rythme de rénovation dans le secteur résidentiel. De l'ordre de 400 000 par an aujourd'hui, l'ambition est de porter ce rythme à près de 700 000 par an en moyenne autour de 2030 et à plus de 800 000 par an à partir de 2040. **Un échec de la politique de rénovation des bâtiments aurait une influence haussière sur la consommation à hauteur d'une vingtaine de térawattheures.**

S'agissant de l'industrie manufacturière, en cohérence avec la SNBC, le scénario de référence « Futurs énergétiques 2050 » retient l'hypothèse d'un maintien de sa part relative dans le PIB français. Contrairement à ce que pourrait suggérer une interprétation hâtive, **le maintien à long terme de ce ratio à son niveau actuel ne constitue pas un scénario de *statu quo* mais bien une trajectoire contre-tendancielle, qui nécessite une inflexion par rapport à la tendance baissière observée sur les dernières décennies.** Or l'évolution baissière de cet indicateur au cours des dernières décennies résulte de tendances lourdes – d'une part par des facteurs structurels comme la progression de la productivité plus forte dans l'industrie que dans le tertiaire ou l'externalisation d'activités de l'industrie vers les services, d'autre part par la dégradation du solde commercial. La perspective d'une rupture plus marquée avec cette évolution est traitée dans le scénario dédié « réindustrialisation profonde ». Là encore, l'influence pourrait atteindre une centaine de térawattheures (hydrogène compris) dans le cas de figure le plus élevé. Il est néanmoins important de rappeler que l'évolution pourrait être également baissière : si le rythme actuel d'électrification des procédés industriels était poursuivi, la réduction de la consommation industrielle atteindrait 30 TWh.

Le cas des transports illustre bien les incertitudes associées à la prospective publique. Dans un scénario d'électrification massive des véhicules individuels ou utilitaires légers, la consommation électrique du secteur avoisinerait 100 TWh. **Les incertitudes entourant cette trajectoire se comptent en dizaines de térawattheures :** à la hausse si les camions choisissaient majoritairement l'électricité par batterie plutôt que l'hydrogène ou d'autres carburants « verts », à la baisse si l'électrification du parc automobile était moindre ou si celui-ci se réduisait. Ces incertitudes sont étudiées dans la variante « électrification + » et la trajectoire « accélération 2030 », spécifique à cet horizon.

3.3 Une consommation d'électricité qui évolue en structure, dans sa répartition entre les différents secteurs et usages

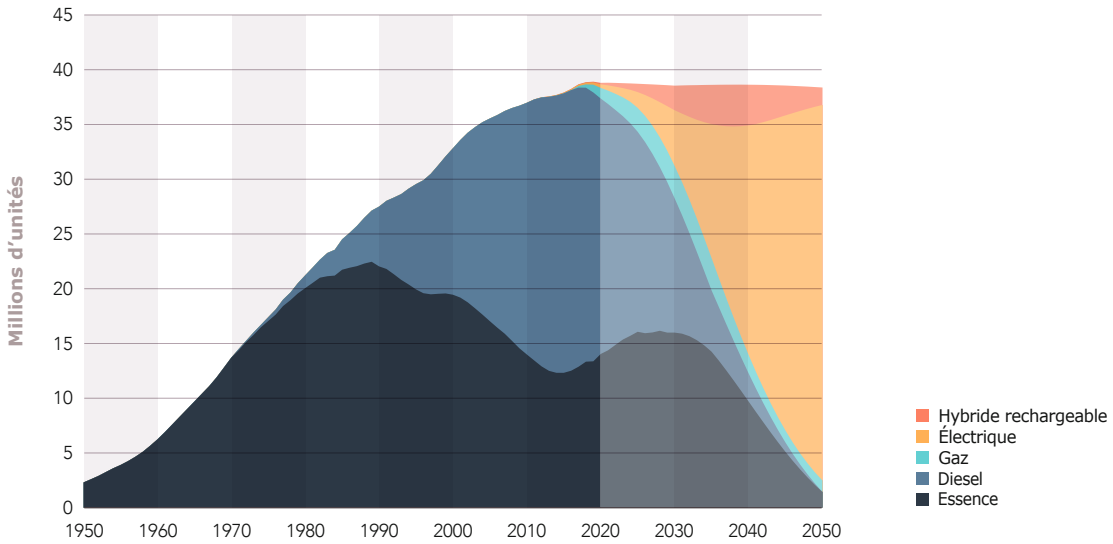
3.3.1 Transports : une forte augmentation de l'usage de l'électricité pour se passer d'énergies fossiles

Le secteur des transports représente 30 % des émissions nationales, et 32 % de la consommation d'énergie finale en France. L'électricité n'y joue aujourd'hui qu'un rôle restreint (2 %), principalement dans le secteur ferroviaire avec notamment les transports de passagers urbains et longue distance.

Le développement de l'électromobilité routière constitue le principal levier de décarbonation du secteur des transports. Il s'agit en effet de l'une des actions qui permet d'agir le plus rapidement sur les émissions, pour des volumes importants et à des coûts faibles au regard d'autres actions de décarbonation *(voir chapitre 12)*. L'analyse du développement de l'électromobilité et de ses impacts sur le système électrique a fait l'objet de travaux menés dans le cadre d'un large groupe de travail, piloté par RTE en collaboration avec AVERE-France. Ces travaux ont été restitués dans un rapport[5], publié en mai 2019.

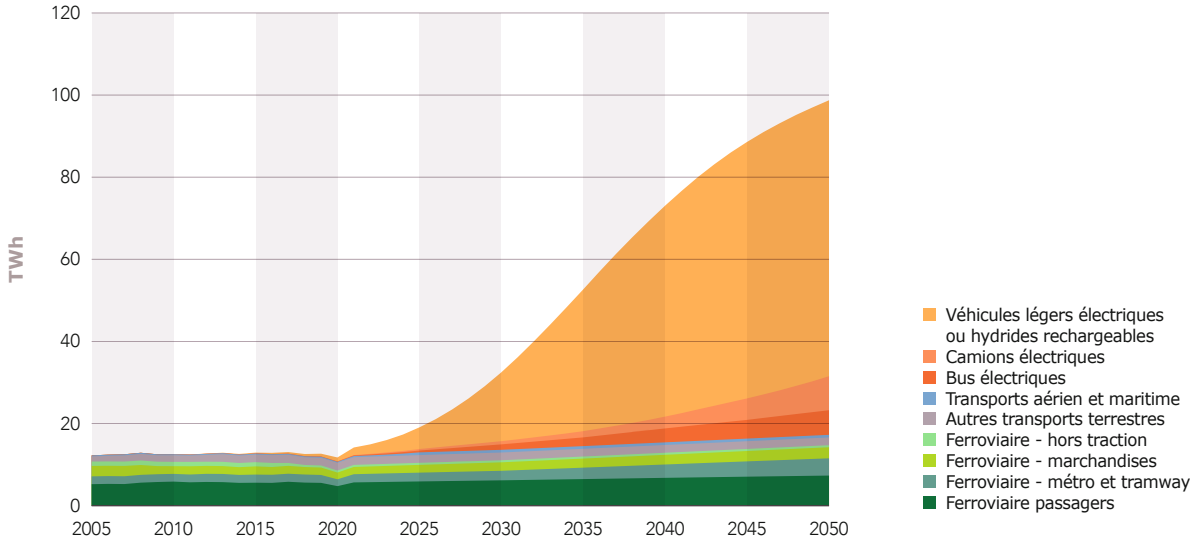
Il s'est forgé, au cours des dernières années, un relatif consensus sur la priorité de cette action, qui se décline en politiques publiques en Europe : tant les normes sur les émissions des véhicules neufs

Figure 3.11 Évolution de la structure du parc de véhicules légers entre 1950 et 2050



5. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-05/RTE%20-%20Mobilite%20electrique%20-%20principaux%20resultats.pdf

Figure 3.12 Consommation électrique du secteur des transports – Trajectoire de consommation de référence



que les politiques des villes pour chasser de leurs centres les véhicules les plus polluants ouvrent un espace pour une bascule rapide vers la mobilité électrique. Depuis quelques mois, on assiste en outre à des annonces de plus en plus volontaristes des constructeurs quant à l'électrification de leur flotte, à des annonces d'implantation d'usines de construction de batteries.

Ainsi, le consensus de place sur les trajectoires possibles de développement de la mobilité électrique a été significativement revu à la hausse depuis le dernier Bilan prévisionnel long terme. La trajectoire la plus haute, qui prévoyait 15 millions de véhicules électriques en 2035, constitue désormais la trajectoire centrale de l'étude «Futurs énergétiques 2050».

La trajectoire de consommation de référence implique des transferts vers l'électricité dès la décennie 2020 (pour les véhicules légers et certains bus et camions opérant en zone urbaine) puis, massivement, au cours de la décennie 2030.

Pour tenir cette trajectoire, **plus de 40% du parc automobile léger et plus de 80% des immatriculations neuves doivent être composés de véhicules électriques ou hybrides rechargeables à l'horizon 2035,** ce qui est cohérent avec une interdiction en 2040 de la vente de voitures et véhicules utilitaires légers neufs utilisant des énergies fossiles – soit le jalon retenu à ce jour par la France. À 2030, cela implique un parc de 7,3 millions de véhicules électriques. La trajectoire «électrification +», qui permet d'atteindre un jalon plus ambitieux pour 2030, en accord avec le nouvel objectif européen et les annonces de la Commission européenne du 14 juillet 2021, implique pour sa part une accélération par rapport à cet objectif : elle conduirait à atteindre 13,1 millions de véhicules en circulation en 2030.

À l'horizon 2050, **la trajectoire de référence implique que près de 95% du parc de véhicules légers, soit près de 36 millions d'unités, disposent d'une motorisation électrique[6].** Les autres véhicules fonctionneraient à l'hydrogène ou au GNL.

6. Véhicules tout électriques ou hybrides rechargeables

L'électromobilité routière est également destinée à se développer sur les segments des bus/autocars et sur celui des camions, avec une dynamique et un niveau d'électrification toutefois moindres que pour les véhicules légers, compte tenu de la logistique nécessaire et de la viabilité économique des technologies concurrentes sur ces segments.

À l'horizon 2050, plus de la moitié de la flotte de bus et autocars serait ainsi mue par le vecteur électrique, ainsi que plus de 20 % des camions.

Là encore, des opportunités de bascule plus rapide pour les camions, bus et autocars existent et offrent l'opportunité de réduire les émissions de gaz à effet de serre plus rapidement avec un parc électrique largement décarboné. Dans la trajectoire « électrification + », la part de des camions électrique s'élève ainsi à 76 %, contre 21 % dans la trajectoire de référence.

Enfin, un report modal progressif vers le transport ferré (train, métro, tramway) pourrait également contribuer à la hausse de la consommation électrique du secteur.

Tout compris, la consommation des transports avoisinerait les 100 TWh en 2050 dans la trajectoire de référence, contre un peu moins de 13 TWh en 2019.

3.3.2 Industrie : une stratégie de rénovation de l'appareil productif français qui passe largement par l'électricité

L'industrie représente aujourd'hui 16 % des émissions françaises. Ses procédés sont partiellement électrifiés (36 % en énergie finale), notamment dans les secteurs des métaux non ferreux et de la construction mécanique.

La consommation annuelle d'électricité dans le secteur de l'industrie atteint 113 TWh en 2019. Cette consommation est en baisse depuis les années 2000, sous les effets conjugués d'une contraction de la production industrielle et d'une amélioration de l'efficacité énergétique au fur et à mesure que l'appareil productif se modernisait ; cette baisse n'a été que partiellement compensée par des mesures d'électrification. La consommation électrique de l'industrie en France est très largement inférieure à celle de l'Allemagne (223 TWh), comparable à celle de l'Italie (120 TWh) et supérieure à celle du Royaume-Uni (92 TWh).

La poursuite de l'électrification des procédés industriels et des besoins de chaleur constitue un levier essentiel pour décarboner l'industrie, et il s'agit de ce fait de la principale voie de décarbonation du secteur établie par la SNBC.

La trajectoire de référence de l'étude « Futurs énergétiques 2050 » retient donc une évolution progressive mais profonde du mix énergétique du secteur industriel. Les transformations prévues consistent en un remplacement de l'utilisation de l'hydrogène fossile (issu notamment du reformage du méthane) par de l'hydrogène bas-carbone entre 2025 et 2035, ainsi qu'en une électrification des procédés par des technologies électriques (techniques résistives, conduction, induction, compression mécanique de vapeur pour l'essentiel) et des besoins de chaleur via le remplacement de chaudières fossiles par des pompes à chaleur ou des chaudières électriques – un mouvement qui serait surtout visible dans les décennies 2030 et 2040. La part de l'électricité dans la consommation énergétique finale dans l'industrie passerait alors de 40 % aujourd'hui à 70 % à l'horizon 2050.

RTE retient dans son scénario central de consommation une inflexion résolue de la tendance actuelle d'évolution de l'activité industrielle, consistant en un arrêt de la dynamique de long terme de désindustrialisation et en une stabilisation de la part de l'industrie manufacturière dans le PIB à environ 10 % en 2050.

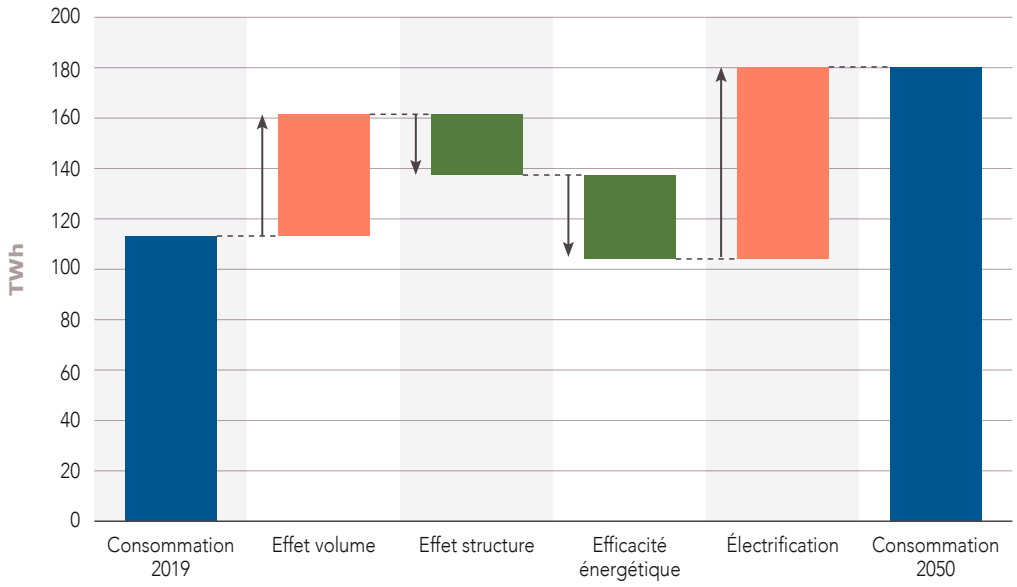
Or l'analyse fine des tendances passées sur l'industrie montre que la diminution de la part de l'industrie dans le PIB résulte en grande partie d'effets structurels (gains de productivité plus importants dans l'industrie que dans le tertiaire, évolution de la structure de consommation qui porte de manière croissante plus sur les services que sur les biens manufacturés, externalisation et comptabilisation des dépenses en services de l'industrie…) et seulement en partie à la croissance des importations. **Le maintien de la part de l'industrie dans le PIB à 10 % apparaît donc déjà comme une stratégie de redéploiement industriel en France, cohérente avec les ambitions publiques sur la relocalisation d'une partie des importations et la relance d'une dynamique industrielle en ce qui concerne certains secteurs stratégiques.** Il s'agit d'un scénario contre-tendanciel mais atteignable, qui reflète déjà un effort de réindustrialisation du pays.

Avec un PIB en augmentation d'environ 1,3 % par an en moyenne dans la trajectoire de référence, il s'agit d'un scénario de croissance de l'activité industrielle avec une augmentation d'environ 40 % de la valeur ajoutée associée à l'industrie manufacturière entre 2019 et 2050. Cette augmentation concernerait la plupart des branches, tout en étant plus marquée pour les industries stratégiques et celles contribuant à la transition énergétique (produits électriques et électroniques, pharmacie, industrie agroalimentaire…).

Dans ce scénario de référence, l'expansion de l'activité industrielle va de pair avec une amélioration du solde commercial de l'industrie manufacturière, qui s'inverse en 2050 (presque +30 Md€ contre presque -30 Md€ en 2019).

Bien que partiellement contrebalancés par plus de 30 TWh de gains d'efficacité énergétique attendus

Figure 3.13 Décomposition de l'évolution de la consommation industrielle dans le scénario de référence, selon les différents effets



d'ici à 2050, les effets haussiers combinés de l'accroissement de la production industrielle et de l'électrification des procédés et des besoins de chaleur industriels se traduiraient par une croissance marquée de la consommation d'électricité dans l'industrie, qui atteindrait environ 180 TWh en 2050 dans la trajectoire de référence, contre un peu plus de 113 TWh en 2019.

Les industriels français, dans le cadre de la concertation, ont défendu la perspective d'augmentations plus importantes des consommations industrielles. Par rapport à la trajectoire de référence, l'écart porte essentiellement sur l'efficacité énergétique, plusieurs fédérations industrielles considérant les perspectives de gains comme plus faibles. **Les travaux ultérieurs menés avec les fédérations conduisent désormais aux mêmes ordres de grandeur (environ 180 TWh de consommations directes d'électricité dans le scénario correspondant à la trajectoire de référence de RTE, et de l'ordre de 240 TWh dans le scénario de réindustrialisation), auxquelles s'ajoutent des consommations directes d'hydrogène pour l'industrie.**

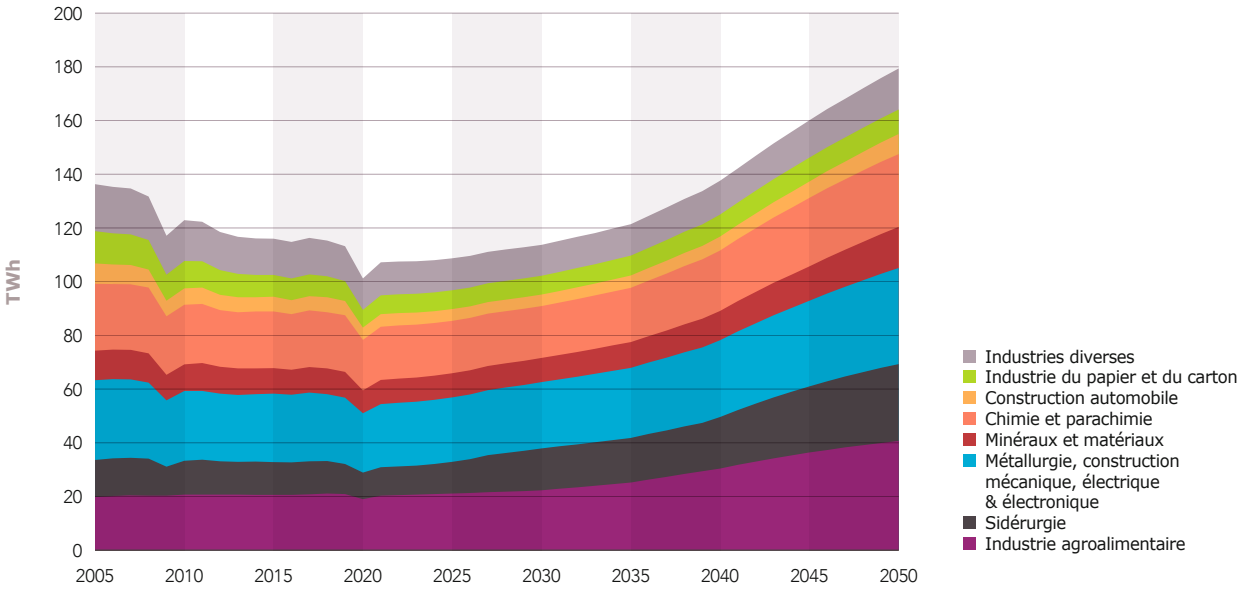
L'incertitude sur la consommation industrielle est explorée dans les différents scénarios et variantes. Ainsi, la consommation industrielle pourrait atteindre de l'ordre de 210-250 TWh dans le scénario de réindustrialisation (dont plusieurs variantes ont été étudiées), et environ 190 TWh dans la variante «efficacité énergétique faible», contre 180 TWh dans la référence. Dans le sens opposé, une plus grande sobriété conduirait à une consommation de l'ordre de 163 TWh.

Les dynamiques sous-jacentes à la maille des différentes grandes branches industrielles sont contrastées :

- la décarbonation de la production sidérurgique nécessitera un accroissement marqué de la consommation électrique de ce secteur, au travers d'un accroissement du recyclage (la production secondaire d'acier se fait très essentiellement via la filière électrique) et de l'essor de filières peu émettrices pour la production d'acier primaire (filières *Direct Reduced Iron* utilisant de l'hydrogène ou procédé électrolytique à plus long terme) ;

- la métallurgie et la construction mécanique (hors secteur automobile), électrique et électronique devraient également voir leur demande électrique croître fortement du fait d'un fort potentiel d'électrification des procédés productifs et de la croissance de l'activité (avec notamment le développement de la production de batteries électriques dans des *gigafactories)* ;
- la consommation électrique des industries agroalimentaires devrait croître fortement à l'horizon 2050, portée par le dynamisme économique de cette branche d'activité et le fort potentiel d'électrification de ses procédés, notamment par le recours à des techniques résistives, à de la compression mécanique de vapeur ou à des pompes à chaleur ;
- la consommation électrique des autres secteurs de production est aussi projetée à la hausse, mais dans de moindres proportions.

Figure 3.14 Consommation électrique du secteur industriel (hors production d'hydrogène par électrolyse) – Trajectoire de référence



3.3.3 Résidentiel : un secteur dont la consommation est maîtrisée sous réserve que la rénovation des bâtiments soit au rendez-vous

Le secteur résidentiel est responsable de 10 % des émissions de gaz à effet de serre en France, et de 30 % de la consommation finale d'énergie. L'électricité y est fortement présente, et constitue notamment l'unique vecteur énergétique utilisé pour l'éclairage, le « blanc » (équipements électroménagers et pour la production de froid), les technologies de l'information ou de communication (TIC) ou encore la climatisation. L'essentiel des enjeux de décarbonation du secteur résidentiel concerne le chauffage, qui génère à lui seul 82 % de ses émissions directes.

Même si la France est connue pour un développement du chauffage électrique plus marqué que dans les pays voisins, le chauffage reste un usage dominé par les combustibles fossiles, qui alimentent 52 % des besoins. Il demeure aujourd'hui 3,4 millions de logements chauffés au fioul, et plus de 12 millions au gaz. Le remplacement des combustibles fossiles par des solutions bas-carbone (électricité, bois, biogaz, réseaux de chaleur urbains alimentés par des énergies renouvelables), en commençant par une sortie rapide du chauffage au fioul, et la réduction du besoin de chauffe constituent ainsi la principale voie de réduction des émissions dans ce secteur, comme l'a récemment noté le Haut Conseil pour le climat[7]. Des éléments d'analyse sur ce sujet ont été apportés dans l'étude[8] publiée en décembre 2020 par RTE et l'ADEME, portant sur la contribution du chauffage des bâtiments à la réduction des émissions de CO_2 et son impact sur le système électrique à l'horizon 2035.

L'État a défini, au cours des dernières années, des politiques publiques permettant d'agir sur ces deux leviers – la performance énergétique des bâtiments et l'utilisation de solutions de chauffage bas-carbone – qui constituent la clé de la réduction des émissions dans ce secteur.

Sur le plan de la performance des bâtiments, les enjeux ne portent pas en premier lieu sur les bâtiments neufs, qui sont soumis depuis la réglementation thermique de 2012 à des exigences très strictes, lesquelles ont encore été renforcées dans la réglementation environnementale 2020 (RE 2020). Du fait du faible taux de rotation et de renouvellement du parc immobilier, les logements de 2050 existent déjà aujourd'hui en large partie, et c'est en conséquence dans l'amélioration de leur performance que réside le principal enjeu à long terme pour la consommation des bâtiments.

Cela passe par une intensification du rythme de rénovation thermique des logements, qui doit conduire au doublement du nombre annuel d'opérations (il faut atteindre un rythme de croisière de 700 000 ou 800 000 opérations de rénovation efficaces par an, contre 400 000 en rythme tendanciel). Cette trajectoire doit conduire, à l'horizon 2050, le besoin de chauffage moyen d'un logement à diminuer de 40 % environ. Néanmoins, la rénovation des logements est une politique complexe à mettre en œuvre : elle met en jeu un soutien public budgétaire important, nécessite un investissement de la part des particuliers et repose sur la mobilisation d'un tissu de petites entreprises. L'éventualité d'un échec partiel dans l'atteinte des objectifs publics doit donc être intégrée à l'étude « Futurs énergétiques 2050 » – cette éventualité est notamment prise en compte par RTE dans la variante « efficacité énergétique moins ».

Sur le plan de la bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone, les enjeux diffèrent là encore dans le neuf et l'existant. Pour les bâtiments neufs, la nouvelle RE 2020 prévoit que les nouveaux logements n'utiliseront plus de combustibles fossiles à compter de 2022 pour les maisons et 2025 pour les immeubles collectifs. Elle devrait conduire à une place prépondérante de l'électricité, via les pompes à chaleur, dans les maisons et dans une moindre mesure dans l'habitat collectif. Les incitations sont également fortes pour le

7. https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2021/06/HCC-rappport-annuel-2021.pdf
8. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-12/Rapport%20chauffage_RTE_Ademe.pdf

développement du chauffage au bois, ou au raccordement des immeubles à des réseaux de chauffage urbain. Dans l'ancien, la bascule vers des solutions bas-carbone repose sur le soutien budgétaire aux opérations de conversion (notamment la promotion des pompes à chaleur avec le dispositif MaPrimeRenov') et la modification du DPE. La trajectoire de référence de l'étude retient un accroissement constant du flux annuel de logements convertis à l'électricité (passage de 65 000 logements par an à 250 000 à l'horizon 2050). Le parc immobilier passerait ainsi de 40 % des logements chauffés à l'électricité aujourd'hui à 70 % en 2050.

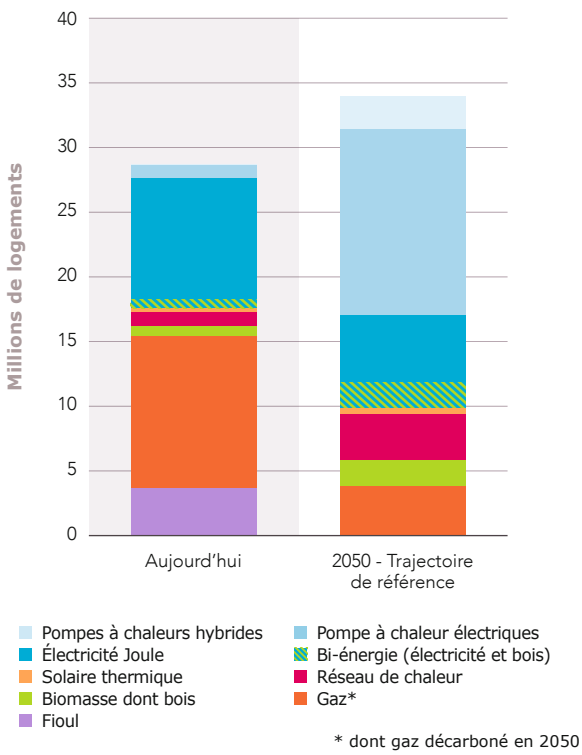
À ces évolutions sur le parc s'ajoute l'impact du réchauffement climatique sur les besoins de chauffe : avec l'élévation moyenne des températures hivernales (basées sur le scénario RCP4.5 du GIEC), ceux-ci se contracteraient d'environ 13 %.

Au global, la consommation électrique de chauffage se réduirait de 25 % environ à l'horizon 2050.

La conversion des systèmes de chauffe à l'électricité va globalement de pair avec celle de la production d'eau chaude sanitaire. Dans la trajectoire de référence, 70 % des ménages en 2050 auraient recours à l'électricité pour cet usage (contre 51 % aujourd'hui). Toutefois, il est attendu que cette évolution s'accompagne d'un développement des procédés thermodynamiques de production d'eau chaude sanitaire (chauffe-eau thermodynamique et pompes à chaleur double service), déjà en forte croissance depuis plusieurs années et qui devraient ainsi devenir largement majoritaires à terme. Ces procédés, plus efficaces sur le plan énergétique, représenteraient alors environ deux tiers des équipements électriques de production d'eau chaude sanitaire en 2050, entraînant une contraction de plus de 20 % de la consommation de cet usage.

Parmi les facteurs d'évolution à long terme de la consommation des logements, la climatisation-ventilation est fréquemment citée comme l'un des facteurs à surveiller de près, notamment alors que le réchauffement climatique s'accélère et conduira à des températures plus élevées et une fréquence plus importante des canicules. Ce poste représente aujourd'hui une consommation annuelle faible, de l'ordre de 6 TWh. RTE estime qu'il devrait plus que

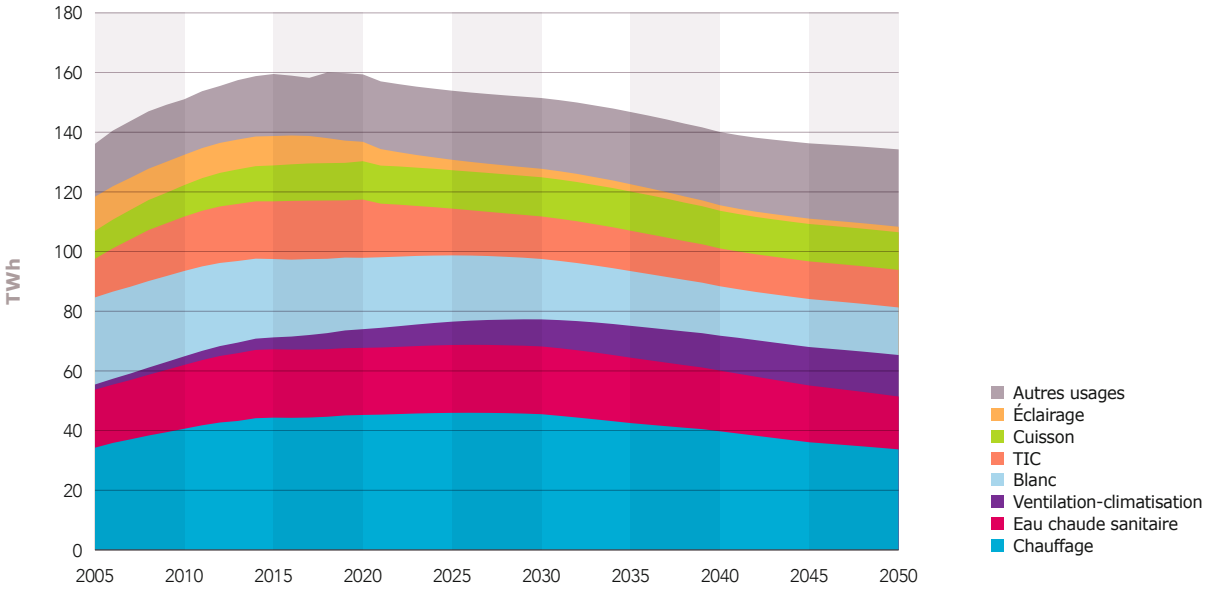
Figure 3.15 Évolution du parc de chauffage résidentiel entre aujourd'hui et 2050 dans la trajectoire de référence



* dont gaz décarboné en 2050

doubler et atteindre 14 TWh en 2050 (mais cette consommation est concentrée sur une période réduite). Trois raisons y concourent : (i) tous les logements neufs et tous les logements rénovés seront équipés d'un système de ventilation mécanique pour améliorer le confort d'été (il s'agit d'une obligation réglementaire dans la RE 2020), (ii) le taux d'équipement des ménages en climatisation est structurellement orienté à la hausse, et il est projeté qu'il atteigne environ 55 % des logements en 2050, (iii) le réchauffement climatique devrait se traduire par des températures estivales plus élevées en moyenne, intensifiant l'usage de la climatisation. Néanmoins, **même cette trajectoire très haussière ne conduit pas à faire de la climatisation un composant essentiel de la consommation des ménages en 2050.** La situation en France devrait ainsi demeurer durablement différente de celle des États-Unis ou des pays du sud de l'Europe.

Figure 3.16 Consommation électrique du secteur résidentiel – Trajectoire de référence



L'évolution de la consommation résidentielle repose également sur la poursuite des progrès d'efficacité énergétique. Cette perspective paraît réaliste. D'une part, elle prolonge une tendance désormais bien ancrée depuis une dizaine/vingtaine d'années : les nouveaux appareils sont plus performants que les anciens, et leur taux de renouvellement permet à ces gains de se diffuser plus rapidement dans l'économie. D'autre part, elle s'appuie sur une réglementation contraignante (étiquetage énergétique, normes constructives, règlements d'écoconception), établie au niveau européen. Dans la trajectoire de référence, ces usages spécifiques de l'électricité sont ainsi amenés à décroître en volume, même en intégrant une tendance au suréquipement des ménages pour le matériel informatique. À titre d'exemple, **la consommation électrique pour l'éclairage a beaucoup diminué au cours des dernières années et est susceptible d'être divisée par quatre d'ici 2050** par le seul effet de la généralisation des ampoules LED et de l'amélioration de leur performance énergétique.

Ces différents effets conduisent la consommation du secteur résidentiel à se contracter pour s'établir à 134 TWh en 2050 dans la trajectoire de référence, contre 160 TWh en 2019. Parmi les différents facteurs d'incertitude, il faut noter la sensibilité forte de ce chiffrage à la réussite de la politique de rénovation des logements, quand bien même la trajectoire de référence intègre un facteur de prudence par rapport à l'objectif fixé par la loi de disposer d'un parc immobilier équivalent au niveau BBC d'ici 2050.

Dans le cas contraire (variante « efficacité énergétique moindre ») la consommation serait plus élevée de 22 TWh et demeurerait stable par rapport à aujourd'hui. À l'inverse, une plus grande sobriété dans certains usages pourrait conduire à des valeurs plus faibles, de l'ordre de 23 TWh.

3.3.4 Tertiaire : un secteur dont certains usages sont amenés à croître dans le numérique, mais qui recèle également un fort gisement d'efficacité énergétique

Le secteur tertiaire représente 6 % des émissions de gaz à effet de serre françaises, et 16 % de la consommation finale énergétique. Il a été marqué par une dynamique haussière de la consommation énergétique durant plusieurs décennies, qui trouve sa source dans la tertiarisation de l'activité économique et l'essor de nouveaux usages de l'électricité (électrification des usages thermiques, développement de la bureautique…). Toutefois, une inflexion s'est fait jour depuis 2010 et se traduit depuis lors par une relative stagnation de la demande en énergie du secteur. Sa nature composite rend difficile l'interprétation fine des mouvements (moindre croissance de l'activité économique, efficacité énergétique en hausse, développement important des TIC…), dont les effets tendent à se contrebalancer.

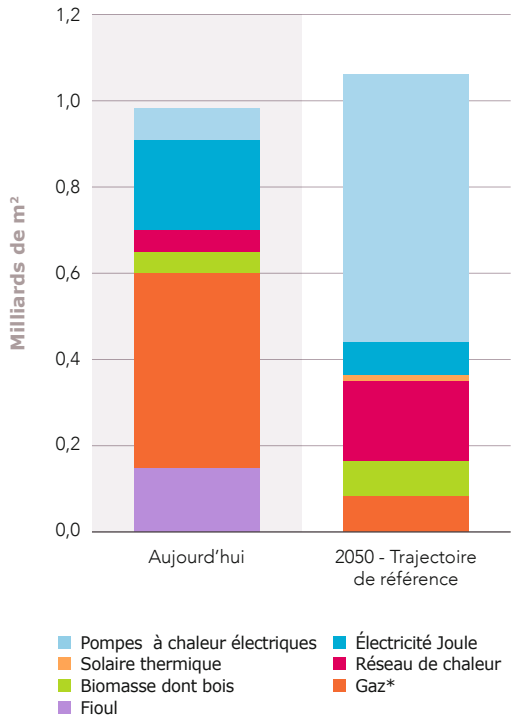
L'enjeu principal de décarbonation du secteur tertiaire porte, à l'instar du secteur résidentiel, sur les usages recourant à des combustibles carbonés, et donc aux usages thermiques du bâtiment (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson). Cela implique un effort accru d'amélioration de l'efficacité énergétique, tant sur l'isolation du bâti que sur les équipements, et d'importants transferts de consommation de combustibles carbonés vers l'électricité ou d'autres énergies bas-carbone.

La trajectoire de référence de l'étude traduit les ambitions publiques, et donc la perspective d'un effort important de rénovation thermique des bâtiments tertiaires (bureaux, surfaces commerciales). Cette ambition est portée par le décret tertiaire, adopté en 2019, et qui doit conduire à traiter 2,5 % du parc tertiaire chaque année, contre 1,5 % aujourd'hui, et à réduire ainsi le besoin de chauffage moyen par mètre carré de 40 % environ à l'horizon 2050. Cette baisse est renforcée par l'impact du réchauffement climatique.

Comme dans le secteur résidentiel, les orientations publiques sont supposées conduire à davantage de transferts vers l'électricité (essentiellement des pompes à chaleur) avec, à terme, un flux annuel moyen de plus de 10 millions de mètres carrés de surfaces tertiaires convertis à l'électricité. Cela conduirait à ce que 65 % environ des surfaces tertiaires soient chauffées électriquement en 2050 contre 30 % environ aujourd'hui. Malgré cette croissance du nombre de solutions de chauffage électrique, les gains escomptés d'efficacité énergétique sur le bâti et les systèmes de chauffe (pompes à chaleur) apparaissent suffisamment élevés pour conduire à une diminution de la consommation électrique de chauffage dans le secteur tertiaire, attendue en baisse de près de 20 % en 2050 par rapport à 2019 dans la trajectoire de référence.

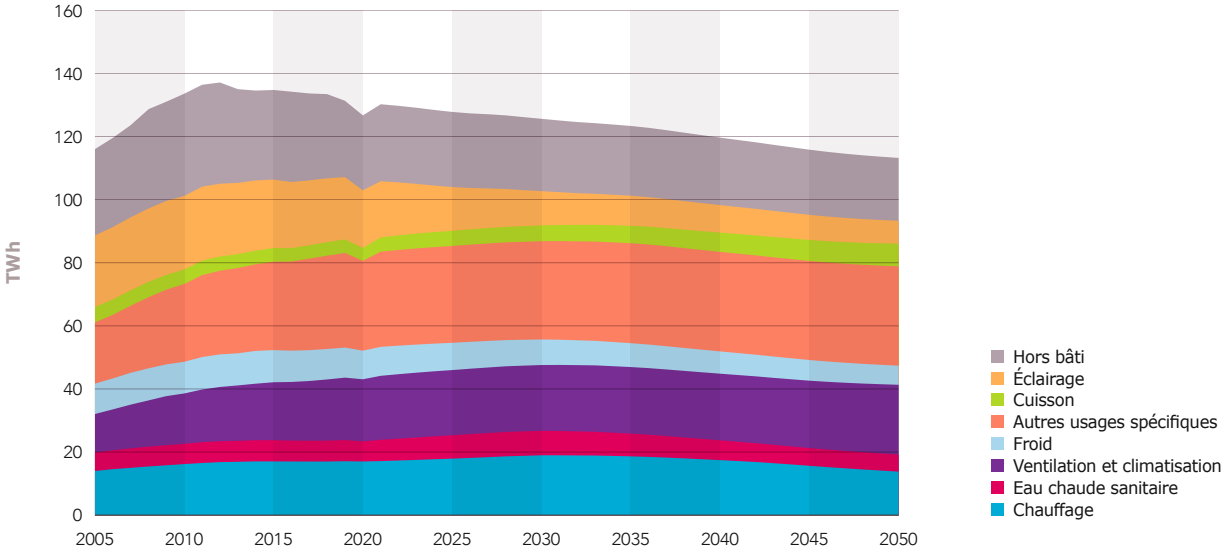
Le recours au vecteur électrique pour la production d'eau chaude sanitaire est supposé croître de façon corrélée à la part des surfaces chauffées à l'électricité. Cet effet fortement haussier devrait toutefois être moindre que celui – baissier – des gains d'efficacité énergétique, au travers d'équipements thermodynamiques. La consommation électrique

Figure 3.17 Évolution du parc de chauffage tertiaire entre aujourd'hui et 2050 dans la trajectoire de référence



* dont gaz décarboné en 2050

Figure 3.18 Consommation électrique du secteur tertiaire – Trajectoire de référence



pour la production d'eau chaude sanitaire s'établirait ainsi en 2050 à un niveau 20 % plus bas que celui de 2019.

La consommation de climatisation-ventilation est en revanche attendue en légère croissance (de 12 % environ) à l'horizon 2050, avec des gains d'efficacité énergétique qui contrebalancent partiellement l'augmentation des surfaces climatisées (par rapport aux logements, les surfaces tertiaires comme les bureaux ou les centres commerciaux sont déjà largement équipés de systèmes de ventilation et de climatisation) et celle de l'usage de la climatisation, renforcé par le réchauffement climatique.

Avec un potentiel de gains énergétiques relativement modéré et une part de marché en très forte croissance (près de 80 % en 2050 contre 40 % aujourd'hui), l'usage cuisson devrait voir sa consommation électrique croître de près de 70 % d'ici 2050.

Par ailleurs, comme dans le secteur résidentiel, l'efficacité énergétique des usages spécifiques (froid, bureautique, etc.) se poursuit sous l'effet moteur des règlements d'écoconception, avec un effet modérateur sur la consommation de ces usages.

En revanche, face à la croissance très rapide des flux de données, les perspectives de hausse de la consommation d'électricité associée aux usages numériques, et notamment aux *data centers*, fait l'objet de nombreux débats : certains acteurs portent la vision d'une croissance exponentielle de la demande, tandis que d'autres tablent sur une croissance plus modérée. Dans les scénarios de RTE, l'hypothèse retenue est celle d'une hausse marquée de la demande électrique des *data centers*, tout en modélisant une poursuite des gains d'efficacité énergétique (qui, au-delà des réglementations, répond à un objectif de performance économique pour les acteurs du numérique). Ce scénario conduit à un triplement de la demande d'électricité des *data centers* d'ici 2050, pour atteindre plus de 9 TWh.

Ainsi, la consommation du secteur tertiaire s'élèverait, dans la trajectoire de référence, à 113 TWh en 2050, contre 131 TWh en 2019. Ce niveau fluctue d'une vingtaine de térawattheures à la hausse ou à la baisse selon les différentes variantes étudiées.

3.3.5 Power-to-gas : une consommation d'électricité importante pour produire de l'hydrogène bas-carbone par électrolyse

La consommation d'hydrogène dans l'industrie représente 1 % des émissions de gaz à effet de serre en France, et 1 % de la consommation énergétique. L'hydrogène utilisé aujourd'hui est en effet un dérivé des hydrocarbures, dont il est extrait par vaporeformage.

Le développement de l'hydrogène bas-carbone constitue aujourd'hui un élément revendiqué de la stratégie énergétique française, au même titre que de celle de nombreux États européens (Allemagne, Espagne, Pays-Bas, Belgique). Cette perspective est récente et s'est structurée au cours des toutes dernières années, alors qu'elle ne figurait pas, ou alors marginalement, dans les stratégies de décarbonation. Elle s'articule autour de la double promesse que l'hydrogène permettrait de décarboner des secteurs où l'électrification est difficile ou onéreuse d'une part, et qu'elle constituerait un moyen de stocker de l'énergie très complémentaire avec le développement des énergies renouvelables électriques d'autre part. Les perspectives ouvertes par l'hydrogène bas-carbone ont été détaillées, récemment, par un rapport de référence de l'Agence internationale de l'énergie[9].

En l'état actuel des technologies, l'hydrogène bas-carbone serait très largement produit par électrolyse de l'eau, c'est-à-dire par un procédé électrique. D'autres modes de production sont possibles, notamment la pyrolyse ou la pyrogazéification de déchets. Néanmoins, ces technologies sont moins matures et le passage à l'échelle dans la production d'hydrogène bas-carbone, si elle se concrétise dans les prochaines années, sera largement réalisé en utilisant l'électricité.

Cette perspective conduit à envisager un nouveau rôle pour l'électricité. Celle-ci est aujourd'hui uniquement une « énergie finale ». Elle est ainsi directement consommée dans les bâtiments, dans l'industrie ou pour le transport ferroviaire par exemple. En ce sens, elle diffère du gaz naturel, qui est à la fois une énergie finale (utilisée notamment dans le secteur du bâtiment pour le chauffage ou dans l'industrie), et une énergie primaire utilisée pour produire de l'électricité.

Avec la perspective d'un développement de l'hydrogène par électrolyse, l'électricité deviendra un entrant servant à produire un autre vecteur énergétique, qui pourra lui-même être soit directement consommé en tant qu'énergie finale, soit transformé en un autre combustible (comme le méthane de synthèse), soit stocké et retransformé ultérieurement en électricité.

La consommation énergétique directe de l'hydrogène est appelée à se développer dans trois directions :

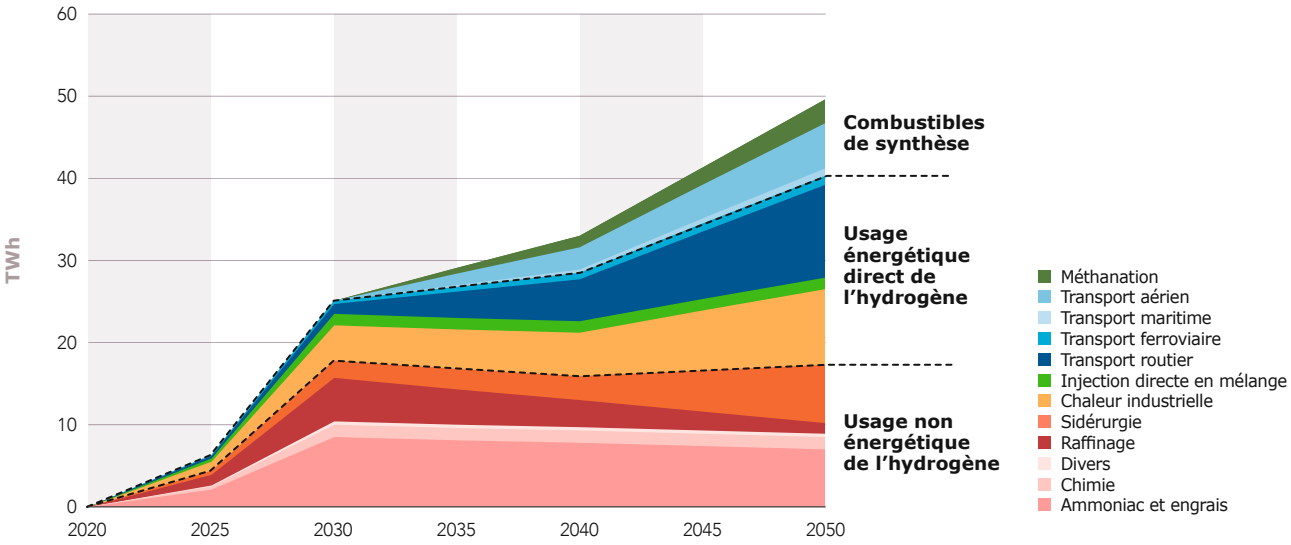
- dans l'industrie, pour la production de chaleur haute température, en substitution à de la biomasse ;
- en injection directe dans le réseau actuel de gaz naturel (mais de façon limitée en raison des contraintes de dilution) ;
- dans les transports, de manière limitée pour les transports ferroviaires et plus fortement dans les transports lourds (4 % des camions en 2050, couvrant 8 % des distances).

Les orientations de la SNBC, confirmées depuis par le Plan hydrogène et France relance, privilégient l'usage de l'hydrogène dans l'industrie dans un premier temps (afin de remplacer l'hydrogène actuel), puis dans les transports lourds. L'injection directe d'hydrogène ne constitue pas, en revanche, la voie privilégiée.

RTE a mené des premières analyses des enjeux techniques, économiques et environnementaux associés au développement en France de la production d'hydrogène par électrolyse à 2035, qui ont fait l'objet d'un rapport publié[10] en janvier 2020. Ces travaux s'intéressaient en particulier au mode opératoire des électrolyseurs, sous des hypothèses de développement correspondant aux orientations

9. *« Energy Technology Perspectives 2020 »* (AIE, septembre 2020) : https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020
10. RTE, 2020, *« La transition vers un hydrogène bas-carbone, atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035 »*, https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/rapport%20hydrogene.pdf

Figure 3.19 Consommation électrique pour la production d'hydrogène – Trajectoire de référence



des pouvoirs publics décrits dans la SNBC. Ils ont permis d'établir différents régimes de production et de consommation d'hydrogène.

La production d'hydrogène est un procédé intensif en électricité. L'électricité nécessaire pour produire les volumes d'hydrogène correspondants à la SNBC s'élève à 50 TWh environ en 2050, contre zéro aujourd'hui. Ces volumes n'intègrent pas la demande d'hydrogène qui serait éventuellement nécessaire pour la production d'électricité, à travers la boucle *power-to-gas-to-power* dans certains scénarios de développement poussé des énergies renouvelables : ces volumes supplémentaires sont déterminés par simulation et seront détaillés au chapitre 9.

S'agissant d'un vecteur nouveau, pratiquement inexistant à l'heure actuelle, l'incertitude sur son développement apparaît extrêmement forte. Certaines ONG ont exprimé des réserves quant aux trajectoires très ambitieuses articulées dans plusieurs États, considérant que le développement de l'hydrogène bas-carbone devait être restreint à un socle « sans regret » constitué des usages actuels de l'hydrogène diminués de ceux associés au raffinage et aux hydrocarbures en général – qui n'auraient plus de justification dans une France neutre en carbone à l'horizon 2050[11]. *A contrario*, plusieurs acteurs soutiennent des perspectives de développement de l'hydrogène à une échelle encore supérieure. Cette perspective est intégrée à l'étude « Futurs énergétiques 2050 » sous la forme de la variante « hydrogène + », qui conduit à la production de 120 TWhH_2 (mobilisant un peu plus de 170 TWh d'électricité) et à une consommation électrique totale de 755 TWh.

Ainsi, le spectre de la consommation électrique pour la production d'hydrogène – hors production dédiée pour les besoins du système électrique – est particulièrement large : entre 40 et 171 TWh, avec une référence de 50 TWh.

11. https://www.agora-energiewende.de/en/publications/no-regret-hydrogen/
https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/billet-de-blog/reseau-transeuropeen-dhydrogene-quel-role-dans-la
https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/billet-de-blog/plan-hydrogene-en-europe-les-conditions-du-succes

3.3.6 Une répartition sectorielle de la consommation qui évolue fortement

Sous l'effet des politiques de décarbonation, de l'apparition de nouveaux usages et des dynamiques d'évolution très différentes selon les grands secteurs de consommation, les scénarios de l'étude «Futurs énergétiques 2050» impliquent tous une évolution de la structure de la demande intérieure d'électricité.

La trajectoire de référence implique ainsi que la consommation des secteurs du bâtiment (résidentiel et tertiaire) s'inscrive à la baisse grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Dit autrement, le maintien de la consommation d'électricité dans la zone des 645 TWh en 2050 est tributaire d'une bonne exécution des politiques de rénovation du

Figure 3.20 Historique et évolution de la consommation d'électricité par secteur dans la trajectoire de référence

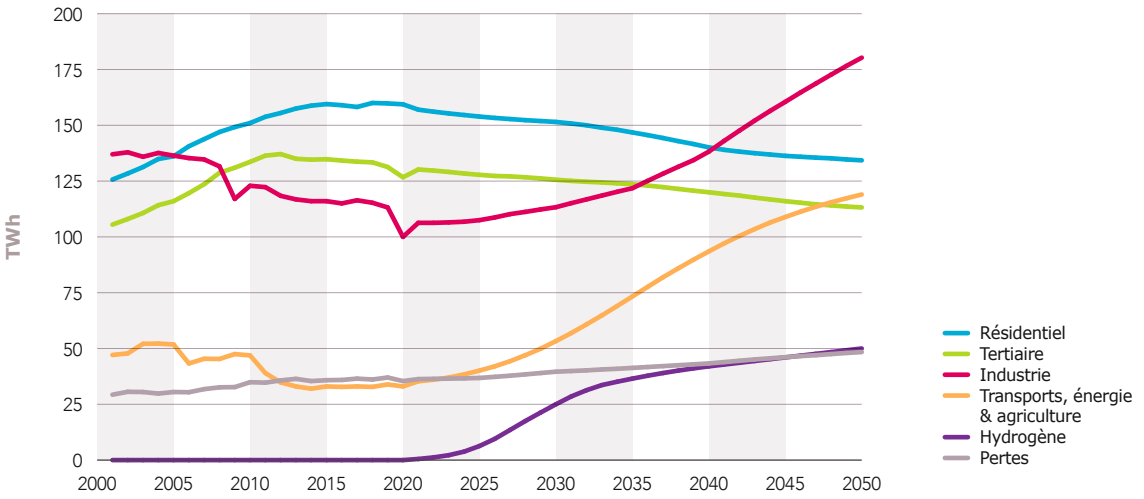
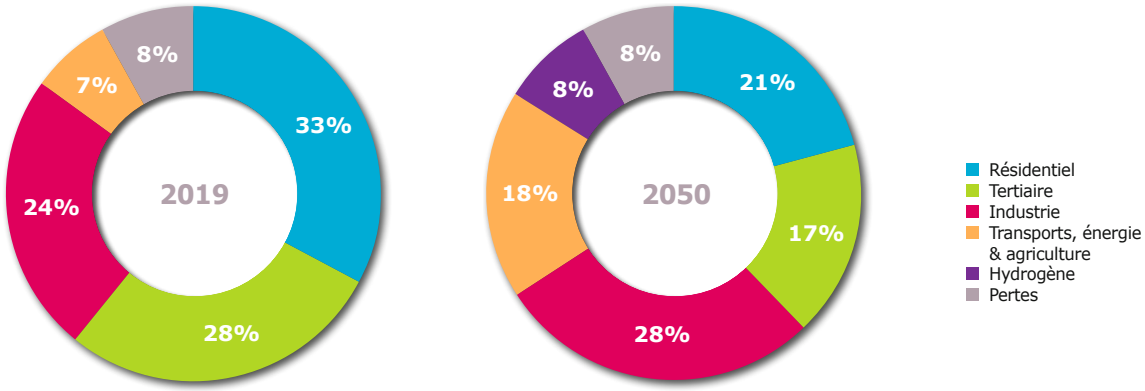


Figure 3.21 Évolution structurelle de la consommation intérieure d'électricité entre 2019 et 2050 dans la trajectoire de référence



bâti, même si – par prudence et eu égard aux difficultés rencontrées dans le déploiement de ces politiques depuis une dizaine d'années – RTE a retenu dans la trajectoire de référence des hypothèses légèrement moins volontaristes que ne le prévoit la loi (laquelle vise l'atteinte d'un parc immobilier équivalent BBC à l'horizon 2050).

Cette maîtrise est utile alors que, dans les autres secteurs (industrie, transports), l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 implique une augmentation de la consommation d'électricité par rapport à aujourd'hui dans des proportions importantes.

La structure de la consommation intérieure d'électricité en France devrait donc être affectée en profondeur par ces évolutions contrastées.

Ainsi, une trajectoire de type SNBC conduirait l'industrie à redevenir le premier poste de consommation en France, rang qu'elle avait abandonné depuis 2005, dépassée successivement par le secteur résidentiel puis le secteur tertiaire. À l'opposé, les secteurs du bâtiment (résidentiel et tertiaire), qui pèsent aujourd'hui pour plus de 60 % de la demande électrique, ne devraient plus en représenter que 38 % en 2050.

3.3.7 Synthèse des principales hypothèses dans la trajectoire de référence sur la consommation d'électricité

Figure 3.22 Synthèse des principales hypothèses de la trajectoire de référence

		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	508 TWh	567 TWh	645 TWh
Cadrage socioéconomique	PIB *(TCAM)*	+1,5 %	2021/2030 : +1,4 %	2030/2040 : +1,3 %	2040/2050 : +1,3 %
	Population *(France métropolitaine)*	64,8 millions	66,7 millions	68,2 millions	69,0 millions
Efficacité énergétique	Rénovations dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	400000 par an	680000 par an	830000 par an	830000 par an
	Gains d'une rénovation dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	30 %	50 %	50 %	40 %
	Pompes à chaleur dans les logements existants *(moyenne sur dix ans)*	+40000 par an	+270000 par an	+330000 par an	+350000 par an
	Rénovations dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	1,5 % du parc par an	2,0 % du parc par an	2,5 % du parc par an	2,5 % du parc par an
	Gains d'une rénovation dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	15 %	25 %	40 %	50 %
Nouveaux usages et électrification	Part de chauffage électrique dans les logements neufs *(moyenne sur dix ans)*	50 %	80 %	85 %	85 %
	Transferts vers chauffage électrique dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	65000 par an	130000 par an	165000 par an	250000 par an
	Transferts vers chauffage électrique dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	2,5 Mm^2 par an	7,5 Mm^2 par an	10,5 Mm^2 par an	10,5 Mm^2 par an
	Nombre de véhicules *(y compris véhicules hybrides rechargeables)*	0,3 millions	7,3 millions	24,7 millions	35,9 millions
	Part des camions électrifiés	0 %	2 %	8 %	21 %
	Consommation électrique pour la production d'hydrogène	0 TWh	25 TWh	42 TWh	50 TWh
	Transferts vers l'électricité depuis 2019 dans l'industrie	-	9 TWh	34 TWh	77 TWh
	Transferts vers l'électricité depuis 2019 sur l'eau chaude sanitaire et la cuisson	-	6 TWh	9 TWh	11 TWh
	Consommation des *data centers*	3 TWh	5 TWh	6,5 TWh	9,5 TWh
Parcs résultants	Part de logements chauffés à l'électricité	40 %	50 %	60 %	70 %
	Part de surfaces tertiaires chauffées à l'électricité	30 %	40 %	55 %	65 %
	Part de l'électricité dans la consommation énergétique industrielle	30 %	35 %	45 %	60 %
	Part de l'électricité dans le parc de véhicules légers	1 %	20 %	65 %	95 %

3.4 Un scénario « réindustrialisation profonde » pour explorer les implications d'une reconquête industrielle assise sur une électricité compétitive et bas-carbone

3.4.1 La question de l'industrie dans les « Futurs énergétiques 2050 »

Alors que la question de la réindustrialisation et des fuites de carbone constituait à l'origine un thème d'étude parmi d'autres, elle s'est imposée au cours des deux ans de concertation comme un enjeu central de l'étude « Futurs énergétiques 2050 ».

Cette priorisation fait écho au consensus politique croissant, encore renforcé par la crise sanitaire, en faveur de politiques de réindustrialisation et/ou de relocalisation de certaines activités considérées comme stratégiques. Les raisons associées sont multiples : elles tiennent à la défense et la qualité de l'emploi, à la compétitivité de l'économie française, à la volonté de renforcer la souveraineté du pays ou à celle d'en réduire l'empreinte carbone.

Dans le cadre de la concertation, l'intérêt de construire un scénario consacré spécifiquement à ce thème a notamment été défendu par les organisations syndicales et les fédérations industrielles. RTE a ainsi proposé, à l'issue de la consultation publique, de retenir ce scénario comme l'un des principaux de l'étude, et de l'analyser sur plusieurs terrains en recherchant des réponses quantitatives :

- l'évaluation des perspectives d'évolution de la consommation d'électricité et d'hydrogène du secteur industriel à court, moyen et long terme, en fonction des ambitions ;
- l'analyse des choix les plus pertinents sur le mix électrique nécessaire pour alimenter cette consommation au meilleur coût ;
- les gains apportés par les scénarios de réindustrialisation sur les émissions en général et l'empreinte carbone de la France en particulier ;
- les conditions économiques et réglementaires auxquelles un scénario d'accélération peut être crédible.

Ces analyses confirment que la France dispose à date d'un double avantage comparatif (économique et climatique) en matière de production d'électricité *(voir chapitres 11 et 12).*

Cet avantage par rapport à d'autres pays est néanmoins transitoire : il est très marqué sur la décennie 2020-2030, encore important sur la période 2030-2040, mais tend à s'estomper au fur à et mesure que les réacteurs nucléaires existants seront arrêtés sur critère d'âge.

Cette analyse implique **qu'il existe une fenêtre d'opportunité en matière d'investissement dans l'appareil industriel au cours des prochaines années.** Un réinvestissement dans certains secteurs, ainsi que la relocalisation de certaines activités fortement émettrices au nom de la réduction de l'empreinte carbone, peuvent se justifier dans une perspective stratégique, économique et climatique.

Cette fenêtre d'opportunité correspond au calendrier des dispositifs de *France Relance*, et encore plus de ceux du Plan d'investissement *« France 2030 »* annoncé par le président de la République le 12 octobre 2021, qui organisent un soutien à l'électrification des industriels énergo-intensifs. Le détail des mesures de « France 2030 » devrait permettre d'affiner cette hypothèse et pourrait infléchir plus nettement la tendance de décarbonation, donc d'électrification.

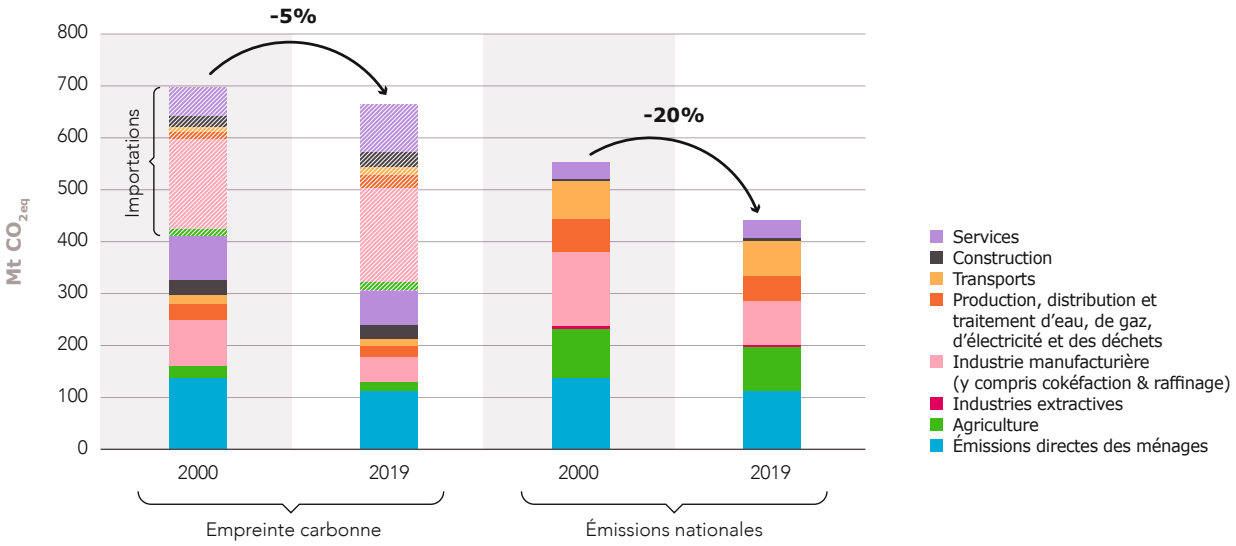
Le scénario de « réindustrialisation profonde » doit servir à en analyser les prérequis et les conséquences.

3.4.2 L'enjeu des fuites carbone

Au cours des quinze dernières années, les émissions de gaz à effet de serre en France ont diminué : selon l'inventaire national, elles sont passées d'environ 540 $MtCO_2eq$ à environ 440 $MtCO_2eq$ entre 2000 et 2015[12], soit une baisse de près de 20 %. Toutefois, dans le même temps, l'empreinte carbone de la France est demeurée globalement stable, autour de 700 $MtCO_2eq$, même si elle a eu tendance à baisser légèrement au cours des toutes dernières années.

La désindustrialisation du pays au cours de ces trente dernières années, accompagnée de l'augmentation de la demande intérieure en produits industriels, explique en large partie ce constat : **malgré les progrès dans l'efficacité énergétique des procédés en France et dans le monde, une partie des émissions a simplement été déplacée hors de France.**

Figure 3.23 Décomposition de l'empreinte carbone et des émissions nationales de la France entre 2000 et 2019



12. Les estimations provisoires pour 2019 sont du même ordre de grandeur.

3.4.3 Un scénario volontariste articulé sur les secteurs technologiques de pointe et stratégiques, associés à quelques relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger

Par rapport à la trajectoire de référence – fondée sur une inflexion dans la trajectoire industrielle conduisant à maintenir la part de l'industrie dans le PIB à long terme, à rebours de la tendance actuelle –, **le scénario de réindustrialisation profonde est un scénario de rupture. Il implique de porter la part de l'industrie manufacturière dans le PIB à 12-13 % en 2050.**

De manière détaillée, plusieurs stratégies industrielles sont envisageables, en fonction des branches sur lesquelles l'accélération serait la plus marquée. Or la contribution au PIB et l'intensité énergétique par rapport à la valeur ajoutée peuvent différer très largement d'une branche à l'autre : l'analyse de ce scénario implique donc de réaliser des projections détaillées, branche par branche.

L'analyse menée a conduit à distinguer deux formes différentes de réindustrialisation, qui n'entraînent pas le même type d'effet sur la consommation énergétique en France et les émissions :

- Un premier type de réindustrialisation pourrait concerner les industries exposées aux risques de fuites de carbone, donc notamment l'industrie lourde et fortement consommatrice. Ses conditions de réalisations sont à préciser, mais intègrent la mise en œuvre de mécanismes efficaces d'ajustement carbone aux frontières.
- Un second type de réindustrialisation porterait sur certains secteurs stratégiques tels que l'électronique ou les équipements électriques. Ces secteurs sont ceux qui présentent des plus fortes valeurs ajoutées et conduisent à la plus forte croissance du PIB[13]. Ils sont moins sensibles au prix de l'énergie.

Dans le scénario « réindustrialisation profonde » de RTE, ces deux tendances sont panachées mais avec une plus forte pondération pour les secteurs technologiques de pointe et stratégiques. Le scénario est complété de quelques relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger dans l'optique de réduire l'empreinte carbone de la consommation française, mais n'est pas construit autour du principe d'une relocalisation complète de certaines branches comme la pharmacie ou le textile. En effet, les perspectives de relocalisation de ces activités sont très faibles dans une économie ouverte, pour des raisons de normes environnementales ou de coût du travail.

13. L'interdépendance entre les branches industrielles et entre l'industrie et les autres secteurs productifs, ainsi que l'effet sur le PIB, sont évaluées grâce à des tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale, projetés sur l'horizon considéré. Ceci permet de disposer d'un cadre macroéconomique cohérent reliant les différents secteurs. Le modèle ne tient en revanche pas compte des effets de bouclage macroéconomique (impacts sur les salaires, rétroaction sur la consommation des ménages, etc.) pour lesquels un modèle d'équilibre général serait nécessaire.

3.4.4 Une consommation d'électricité en croissance de plus de 100 TWh par rapport à la trajectoire de référence

Le scénario «réindustrialisation profonde» de l'étude «Futurs énergétiques 2050» est fondé sur un investissement spécifique sur les secteurs stratégiques[14], ainsi que sur la relocalisation de certaines productions fortement exposées à la concurrence internationale et dont la fabrication à l'étranger est particulièrement intensive en carbone[15].

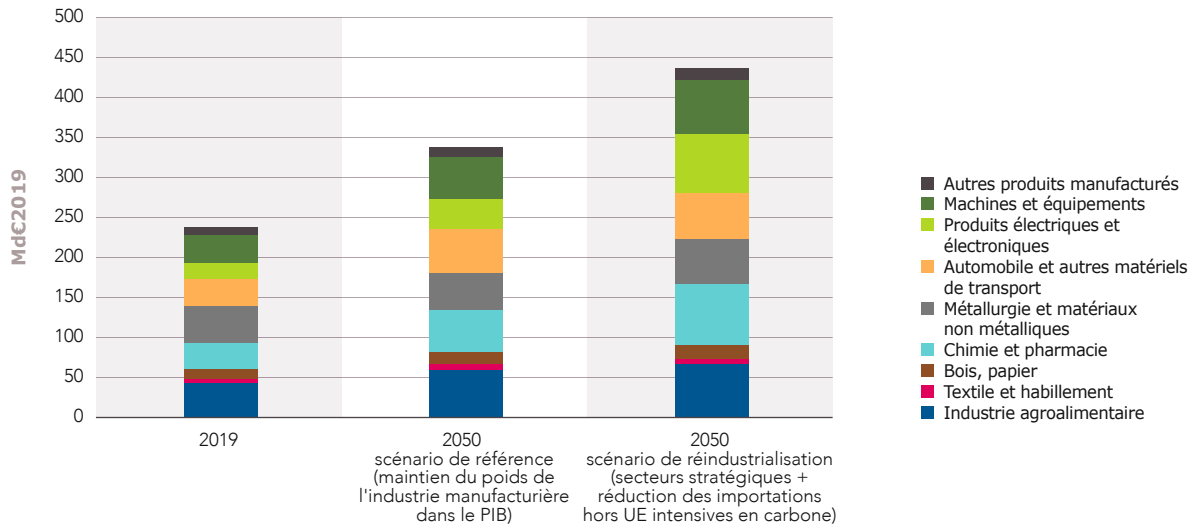
Le scénario se traduit par une diminution des importations provenant de pays hors Union européenne pour ces produits, qui implique l'introduction d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'Union européenne. Il conduit en 2050 à :

- une augmentation du PIB par rapport à la trajectoire de référence (+5%)
- une augmentation du poids de l'industrie manufacturière dans le PIB (au-delà de 12%, contre 10% dans la trajectoire de référence).
- une valeur ajoutée de l'industrie supérieure de 80% à celle d'aujourd'hui.

La progression importante de l'activité industrielle se reflète dans l'évolution du solde commercial de l'industrie manufacturière, bien plus positive dans ce scénario que dans la trajectoire de référence : **le solde commercial dépasserait les 200 Md€ à l'horizon 2050, essentiellement sous l'effet de l'investissement dans les secteurs stratégiques.**

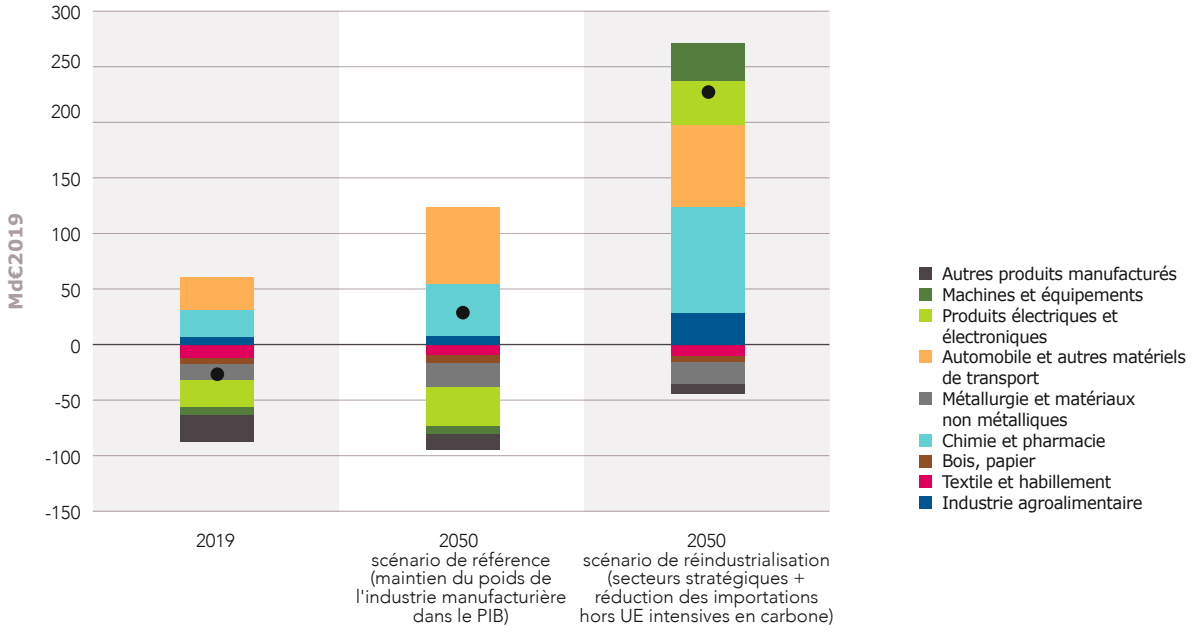
Un tel niveau serait particulièrement élevé au regard de l'historique. En effet, la balance commerciale pour l'industrie manufacturière était positive au début des années 2000, mais pour des volumes bien moindres (de 10 et 20 Mds€). Un niveau de 200 Mds€ correspond, en ordre de grandeur, à la performance de l'Allemagne au cours des dernières années.

Figure 3.24 Valeur ajoutée de l'industrie manufacturière en 2019, en 2050 dans la trajectoire de référence, et en 2050 dans le scénario «réindustrialisation profonde»



14. Les branches «stratégiques» sont essentiellement celles mentionnées dans le plan de relance élaboré en 2020 par le gouvernement, ainsi que les branches concernées par la transition énergétique (informatique et électronique, chimie, pharmacie, agroalimentaire, machines et équipements, équipements électriques, matériel médical, automobile et autres matériels de transport, matières premières et métallurgie).
15. Les branches à risque de fuite carbone considérées ici sont celles identifiées par l'Union européenne, qui bénéficient d'allocations d'un montant de quotas gratuits dans le cadre du système communautaire d'échange de quotas d'émission.

Figure 3.25 Solde commercial de l'industrie manufacturière (et décomposition des soldes par branche) en 2019, en 2050 dans la trajectoire de référence, et en 2050 dans le scénario « réindustrialisation profonde »



Du point de vue énergétique, l'effet sur les consommations d'énergie est **un surcroît de la consommation électrique directe de l'industrie de près de 60 TWh/an, accompagné d'une hausse de la consommation de combustibles décarbonés comme l'hydrogène** par rapport à la trajectoire de référence. Cette consommation additionnelle de combustibles s'élèverait à environ 50 TWh, incluant les usages en tant que matière première. En supposant que la moitié de ce besoin en combustibles soit satisfait par la production en France d'hydrogène par électrolyse (le reste pouvant correspondre par exemple à des combustibles importés), la réindustrialisation contribuerait indirectement à la mobilisation de 37 TWh supplémentaires d'électricité.

3.4.5 Différentes variantes de réindustrialisation pour distinguer l'impact d'une stratégie fondée sur la valeur ajoutée de celle consistant à réduire l'empreinte carbone

Le scénario de réindustrialisation profonde combine les effets d'une réindustrialisation marquée sur les branches stratégiques (produits électroniques, etc.) et sur celles dont les importations sont intensives en carbone, et qui présentent des risques de « fuites de carbone ».

Ces logiques de réindustrialisation, donnant la priorité respectivement à la compétitivité stratégique et à la réduction de l'empreinte carbone, peuvent être analysées séparément :

- une trajectoire fondée sur la réduction de 50 % des importations intensives en carbone provenant de pays hors Union européenne (qui pourrait refléter l'introduction d'un mécanisme de compensation carbone aux frontières de l'Union européenne) entraîne un effet relativement limité sur l'augmentation du PIB par rapport au scénario de référence, ou sur la part de l'industrie manufacturière dans le PIB. En effet, les branches concernées sont souvent associées à des consommations d'énergie élevées mais à des valeurs ajoutées plus faibles que celles d'autres branches.
- une trajectoire portant principalement sur les branches stratégiques entraîne un effet très positif sur le solde commercial, le PIB ou la part de l'industrie dans le PIB.

Les études confirment qu'une relocalisation des productions les plus intensives en carbone a un effet plus important sur l'empreinte carbone de la France et les émissions qu'une relocalisation d'autres productions ou, de manière générale, qu'une réindustrialisation de l'économie.

- dans le cas d'une réindustrialisation portée essentiellement par une augmentation des exportations, la France contribuerait à la réduction des émissions mondiales, avec des productions bas-carbone qui se substitueraient dans le reste du monde à des produits plus carbonés, mais l'effet sur l'empreinte carbone de la France (liée à la consommation des ménages français) serait relativement limité.
- En revanche, une réindustrialisation couplée à une relocalisation marquée de la consommation, avec une réduction volontariste des importations qui seraient remplacées par de la production locale, pourrait contribuer de manière significative à la réduction de l'empreinte carbone du pays. La section qui suit décrit les effets de différentes stratégies de réindustrialisation et/ou relocalisation sur l'empreinte carbone et les émissions directes.

L'emploi constitue un autre enjeu qui pourrait être priorisé dans l'élaboration d'une stratégie nationale pour l'industrie. Un scénario qui privilégierait les branches intensives en emplois, tout en atteignant le même niveau de PIB et la même part de l'industrie manufacturière que dans le scénario « réindustrialisation profonde », nécessiterait un inversement de tendance très fort sur les branches concernées. Par exemple, pour le textile, cette trajectoire supposerait une réduction des importations jusqu'à des niveaux jamais vu depuis les années 1990, alors que les importations n'ont cessé d'augmenter sur les dernières décennies.

3.4.6 Des réductions de l'empreinte carbone plus importantes grâce à la relocalisation de la production

Une stratégie ambitieuse de réindustrialisation accompagnée d'une relocalisation des productions pour la satisfaction de la demande intérieure permet de réduire de manière significative l'empreinte carbone de la France par rapport à la trajectoire de référence, même en prenant en compte la décarbonation progressive des pays dont la France importe. La réduction de l'empreinte carbone sur la trajectoire d'ici 2050 serait de près de 900 $MtCO_2eq$ *(voir chapitre 12 pour les résultats détaillés sur ce volet).*

3.4.7 Synthèse des principales hypothèses du scénario de réindustrialisation

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Scénario réindustrialisation		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	538 TWh *(508 TWh)*	631 TWh *(567 TWh)*	752 TWh *(645 TWh)*
Activité économique	PIB *(TCAM)*	+1,5 %	2021/2030 : +1,5 % *(+1,4 %)*	2030/2040 : +1,5 % *(+1,3 %)*	2040/2050 : +1,5 % *(+1,3 %)*
	Part de l'industrie dans le PIB	9,9 %	10,5 % *(+9,8 %)*	11,4 % *(+9,9 %)*	12,3 % *(+10,0 %)*
	Solde commercial en biens manufacturés *(milliards d'euros)*	-27	+34 *(-11)*	+115 *(+6)*	+227 *(+29)*

3.5 Le scénario de sobriété permet de représenter les gains associés à des changements des modes de vie

3.5.1 La question de la sobriété dans les « Futurs énergétiques 2050 »

Le thème de la sobriété est incontournable dans la réflexion sur les futurs énergétiques.

Clé de voûte de la réflexion devant rendre possible la transition énergétique dans ses multiples dimensions pour les uns, repoussoir synonyme de décroissance et promesse de rupture par rapport aux modes de vie actuels pour les autres, la sobriété est devenue un thème de discussion qui cristallise les débats. Le terme lui-même s'avère particulièrement clivant. Dans le cadre de la consultation conduite par RTE, aucun accord ni aucune évidence ne ressortent des diverses contributions. Pour certains groupes, la sobriété est une évidence, tandis que d'autres en rejettent le principe même. Certains enfin jugent la question mal formulée au risque de favoriser le *statu quo* en matière de transition dans l'appareil productif.

Plus largement, même si des slogans de façade portant sur l'intérêt de moins consommer semblent faire l'unanimité, les implications de ce thème sont très larges – raison pour laquelle le terme de « sobriété » n'a rien de consensuel. Ce sont en effet les caractères des modes de vies actuels des processus de production, de l'organisation des sociétés, ainsi que de leur évolution qui sont ici en jeu.

Ces questions ont de fortes dimensions politiques, sociales et symboliques, adossées à des préférences philosophiques profondes. Loin d'être neuves, elles ont accompagné l'industrialisation de nos sociétés et ne peuvent pas être réduites, comme cela a été longtemps le cas, à une simple crainte devant la nouveauté. Par exemple, les débats sur les limites sociales et politiques d'une dynamique d'accumulation du capital productif visant à satisfaire des besoins sans cesse plus importants d'une partie de la population sont contemporains du modernisme et de l'essor industriel au XIX^{e} siècle. Dans les années 1970, à l'occasion de la parution du rapport Meadows[16] sur les limites à la croissance, ces débats ont été formulés en référence à des préoccupations d'ordre environnemental et économique. Ils ont, depuis, structuré le développement de l'écologie politique.

Dans cette situation, RTE a procédé à des choix visant à permettre une confrontation de points de vue sur les orientations qui peuvent être, dès aujourd'hui, envisagées. Il s'agit de mettre en avant plusieurs futurs possibles, tout en répondant à des impératifs techniques, matériels et économiques liés au fonctionnement du système électrique et à la sécurité énergétique du pays.

Un volet important des « Futurs énergétiques 2050 » est, en conséquence, consacré au cadrage de la réflexion sur la sobriété, en commençant par préciser les définitions utilisées et la méthode d'analyse (détaillée dans le cadre de la concertation). Celle-ci est fondée sur :

(i) l'ouverture des réflexions aux praticiens et représentants de la société civile pour repositionner les échanges sur les variables sociétales clés en amont du processus de scénarisation,
(ii) l'étude de variantes contrastées y compris sur le plan sociétal, ainsi que
(iii) l'explication des « implicites sociétaux » des scénarios.

Cette méthode a été bien accueillie par les parties prenantes.

Le second choix, qui découle du premier, consiste à problématiser le sujet en donnant à voir la

16. « *The limits to growth* », rapport du Club de Rome, 1972

différence entre un scénario de référence qui prolongerait les habitudes de vie actuelles et un scénario de sobriété qui marquerait des différences nettes. De ce fait, le débat sur les gains possibles de la sobriété comparés à la difficulté à les atteindre lorsqu'ils impliquent de déroger aux modes de consommation et de production actuels n'est pas « dissimulé » derrière un ensemble de paramètres techniques présentés en note de bas de page, mais rendu particulièrement visible.

Cette distinction entre scénario de référence et scénario de sobriété relève également d'une posture de prudence : le choix méthodologique qui consiste à fonder la trajectoire de référence sur des modes de consommation et de production se situant dans le prolongement de ceux d'aujourd'hui constitue une hypothèse prudente pour le dimenVsionnement du système électrique, dans un contexte où un éventuel surdimensionnement de la production d'électricité a des conséquences moins coûteuses qu'un sous-dimensionnement du mix par rapport à l'impératif de lutter contre le réchauffement climatique. Il n'invalide en rien l'intérêt de la sobriété comme levier pour la neutralité carbone.

3.5.2 Une distinction explicite entre sobriété et efficacité

Si les débats relatifs à la sobriété sont nombreux, il n'existe pour autant pas de définition de la sobriété qui fasse consensus.

La notion de sobriété provient en effet de mouvements et de racines très diverses. Dans les débats sur l'évolution des besoins énergétiques, plusieurs parties prenantes ont progressivement tenté de définir les contours de la notion de « sobriété énergétique » (qui ne couvre qu'une partie des enjeux de sobriété). Dans son panorama sur la sobriété, l'ADEME la définit ainsi comme « une recherche de «moins», de modération des biens et des services produits et consommés, tout en recherchant un «mieux», notamment une augmentation de la qualité de vie et du bien-être »[17]. L'association négaWatt évoque une démarche de réduction des consommations superflues s'organisant par une hiérarchisation des besoins, et favorisant les comportements et activités intrinsèquement peu consommateurs d'énergie au niveau individuel et collectif.

Le choix méthodologique des « Futurs énergétiques 2050 » consiste à distinguer explicitement la notion de sobriété de celle d'efficacité, souvent confondues dans les débats. L'efficacité correspond ici à la diminution de consommations énergétiques d'un dispositif technique pour un service rendu équivalent. Si l'efficacité s'avère complémentaire de la sobriété, cette dernière vise, au-delà de la seule amélioration de l'efficacité des matériels, à interroger plus fondamentalement les modes de production et de consommation

Le scénario de sobriété étudié repose sur une recherche de gisements dans tous les secteurs de consommation. La méthodologie déployée pour étudier ce scénario sobriété repose (i) sur une revue de littérature exhaustive portant sur les principaux axes de transformation en faveur d'une société plus sobre et (ii) sur une identification des actions en faveur de la sobriété.

17. ADEME, novembre 2019, Florian Cézard et Marie Mourad. « *Panorama sur la notion de sobriété – Définition, mises en œuvre, enjeux* » – Synthèse

3.5.3 La sobriété, un outil pour la lutte contre le réchauffement climatique

Les actions sur la demande d'énergie au travers des modes de vie constituent un outil évident pour l'atteinte de la neutralité carbone, qui doit être aujourd'hui systématiquement investigué. Deux questions se posent pour la modélisation : comment prendre en compte cet outil, et à quel niveau. Chaque organisme appelé à investiguer le thème de la neutralité carbone a dû répondre à cette question.

Cette intégration représente un défi méthodologique que certaines institutions ont relevé à l'instar du GIEC. Dans le cadre de ses derniers rapports, celui-ci s'est appuyé sur un canevas de cinq trajectoires appelées *Shared socio-economic Pathways* (SSP ou « Trajectoires socio-économiques de référence »), décrivant le cadrage démographique, macroéconomique et quelques grands déterminants autour des modes de vie afin d'intégrer des composantes économiques, sociétales et géopolitiques aux projections d'évolution des émissions et du climat.

De manière générale, **l'évolution des modes de vie vers davantage de sobriété est une notion désormais intégrée comme un des leviers de décarbonation dans la plupart des études prospectives,** mais avec des définitions diverses qui rendent difficile l'identification de l'ampleur des transformations envisagées et leurs effets sur la consommation énergétique ou la réduction des émissions.

Certains scénarios, comme ceux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), évoquent l'évolution des comportements individuels comme une des variables permettant de faciliter l'atteinte de la neutralité carbone. Les leviers mobilisés par l'AIE dans son scénario *Net-zero by 2050* restent toutefois limités et pèsent relativement peu dans la trajectoire de réduction des émissions (4 % des baisses d'émissions sur l'ensemble de la trajectoire).

À l'inverse, d'autres acteurs intègrent la sobriété au cœur de leur matrice d'analyse, en portant une vision systémique sur la transformation de l'organisation de la société et en déclinant de manière fine les effets de la sobriété activables dans les différents secteurs. En particulier, les associations négaWatt et Virage Energie[18] intègrent, de longue date, un volet important sur la sobriété énergétique dans leurs travaux prospectifs, en vue de proposer des trajectoires de transition vers un futur sans énergies fossiles dans l'optique de limiter le réchauffement climatique, tout en y ajoutant un autre objectif de sortie du nucléaire.

3.5.4 Un scénario sobriété qui explore dans une approche systématique et dans des proportions beaucoup plus importantes que la SNBC les conséquences d'une inflexion structurelle des modes de vie vers la recherche d'un moindre impact sur l'environnement

La trajectoire de référence des « Futurs énergétiques 2050 » suppose une poursuite des standards de vie actuels et notamment du degré de confort actuel. À ce titre, elle intègre des évolutions comportementales lorsque celles-ci apparaissent déjà amorcées dans la société ou sont prescrites par la réglementation. Elle ne présuppose donc pas de rupture comportementale par rapport à aujourd'hui.

L'analyse des gisements de sobriété, qui fait l'objet d'un scénario dédié, explore via une approche systématique les conséquences d'une inflexion structurelle des modes de vie et l'intérêt que revêtirait une telle évolution pour l'atteinte des objectifs climatiques.

18. Virage Energie, 2016, *« Mieux vivre en Nord-Pas-de-Calais : pour un virage énergétique et des transformations sociétales »*

3.5.5 Les gisements de sobriété sont détaillés et quantifiés

Dans le **secteur résidentiel,** la propension des individus à accepter de partager certains espaces et équipements, et potentiellement à disposer de moins de mètres carrés par personne, constitue la clé de voute de l'analyse de l'évolution de la consommation. Si une telle dynamique se matérialisait, l'impact serait majeur sur la consommation d'électricité.

Ainsi, le scénario sobriété prévoit une très légère hausse du nombre de personnes par ménage (2,3 en 2050 contre 2,2 aujourd'hui) avec un accroissement des parts de logements en mutualisation, dans le collectif. Malgré une tendance globale actuelle en faveur de la décohabitation, l'apparition de certaines pratiques localisées montrent qu'une telle évolution relèverait du possible : dynamisme de développement de la colocation (choisie) dans les villes, appétence pour l'habitat partagé et émergence de l'habitat participatif.

D'autre part, l**a baisse volontaire de la température de consigne de chauffage** de 1°C d'ici à 2050 (hypothèse SNBC) est le second gisement le plus souvent évoqué, associé à l'hypothèse **de réduction de l'usage de l'eau chaude sanitaire** (environ -30 % d'ici à 2050). Les ressorts qui conduiraient à de telles autolimitations peuvent être débattus (contrainte politique et sociale, ou alors choix individuels et libres de chaque citoyen) et seront approfondis dans l'analyse complète.

Dans le **secteur tertiaire**, le gisement le plus important identifié repose sur un **développement poussé du télétravail,** de l'ordre de 50 % du temps à distance pour les emplois qui le permettent, contre 20 % dans une vision qui intègre *a minima* les enseignements de la crise sanitaire. Cette tendance s'accompagnerait d'une diminution des surfaces par emploi (principalement dans la branche des bureaux) et donc d'une réduction des consommations énergétiques, tous usages confondus.

Un autre gisement notable de sobriété identifié dans la discussion repose sur des actions de sobriété numérique en lien avec l'équipement informatique et son usage pouvant conduire à une réduction de 10 % de la consommation unitaire d'électricité spécifique, pour toutes les branches du secteur tertiaire.

De manière plus anecdotique, la diminution de la publicité aura un impact sur les consommations énergétiques directement associées (écrans, affichages vidéo), ainsi que sur la consommation de biens au sens large. Ainsi, la transformation des modes de consommation induite (circuits courts, produits frais et de saison, manger local, moins consommer de manière générale) entrainerait une réduction de la taille des surfaces d'environ 10 % pour la branche commerce.

Dans le **secteur des transports** (de personnes et de marchandises), plusieurs gisements de sobriété sont mobilisés et s'articulent autour de deux objectifs :

- d'une part, il s'agit de **se déplacer moins** : en évitant les déplacements professionnels (grâce aux outils numériques, télétravail), en limitant les déplacements quotidiens, par le développement de logements collectifs, par davantage de concentration des fonctions de vie, commerces et loisirs de proximité (ville du quart d'heure) et grâce au développement croissant des circuits courts pour les marchandises (diminution de 20 % des km.tonnes de biens contre 9 % dans le scénario de référence) ;
- d'autre part, il s'agit de **se déplacer différemment :** les reports modaux se font depuis la route vers des modes alternatifs nettement plus sobres – les modes doux et transports en commun ou partagés qui réduisent le nombre de véhicules en circulation pour une même distance parcourue (2,2 personnes par véhicule en 2050, contre 1,7 dans la trajectoire de référence) – Le scénario «sobriété» repose également sur des hypothèses de pratiques et comportements vertueux (réduction de la vitesse moyenne de circulation, véhicules plus légers), permettant de diminuer d'environ 10 % la consommation kilométrique des véhicules. Pour les marchandises, les reports se feront au profit du fret fluvial ou ferroviaire.

L'industrie étant un secteur intermédiaire, les effets de la sobriété chez les consommateurs influent directement sur la structure de l'appareil de production.

Ainsi, le fait **de privilégier les produits frais et non transformés** réduit la demande pour les produits issus de l'industrie agroalimentaire en faveur des produits agricoles « bruts ».

L'allongement des durées de vie des équipements, le réemploi et le recyclage de matière occasionnent également un ralentissement de la production de certains biens et de l'intensité énergétique associée à la production de certains matériaux. De plus, le changement des pratiques dans le secteur des transports réoriente la production, en baisse, vers des véhicules plus légers et performants.

Enfin, toutes les branches du secteur de la construction sont ralenties par l'augmentation de la cohabitation et de la réduction des surfaces tertiaires.

Figure 3.26 Décomposition des leviers de sobriété électrique par secteur d'activité

	Leviers de sobriété	Effet (TWh évités)	
Résidentiel	Habitat à espaces partagés et légère augmentation de la taille unitaire des ménages	11,9 TWh	◀
	Limitation de la consommation de chauffage résidentiel	4,0 TWh	◀
	Limitation de la consommation en eau chaude résidentielle	4,7 TWh	◀
	Moindre taux d'équipement en climatisation résidentielle	1,1 TWh	
	Limitation de la consommation des autres usages résidentiels	0,7 TWh	
Tertiaire	Recours au télétravail (impact sur la consommation dans les bureaux)	9,1 TWh	◀
	Limitation des besoins énergétiques sur le lieu de travail	4,7 TWh	◀
	Limitation de la consommation de chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire tertiaire	1,8 TWh	
	Réduction de la surface des commerces	1,1 TWh	
	Réduction des écrans publicitaires	0,5 TWh	
	Limitation de la consommation des autres usages tertiaires	0,8 TWh	
Transports	Report des déplacements individuels en voiture vers le covoiturage	9,8 TWh	◀
	Réduction moyenne de la vitesse de circulation et véhicules plus petits	5,4 TWh	◀
	Recours au télétravail (impact sur les déplacements domicile-travail)	2,8 TWh	
	Reconcentration des fonctions de vie	2,7 TWh	
	Recours aux produits issus de circuits courts	0,7 TWh	
	Report modal vers les moyens de mobilité douce	0,7 TWh	
Industriel	Consommation d'une alimentation moins transformée	5,8 TWh	◀
	Moins d'engrais azotés dans l'agriculture *(y compris effet sur la production d'hydrogène)*	3,4 TWh	◀
	Allongement des durées de vie des équipements	3,3 TWh	◀
	Baisse de la vente de véhicules/fabrication de véhicules plus petits	2,8 TWh	
	Réduction de la construction	2,2 TWh	
	Économie circulaire	2,1 TWh	
	Limitation des emballages et de la publicité	1,7 TWh	
	Limitation du plastique à usage unique	0,9 TWh	
	Recours à des matériaux biosourcés dans la construction	0,6 TWh	

3.5.6 Des économies d'énergie potentiellement significatives, mais une trajectoire de consommation qui reste néanmoins orientée à la hausse à l'horizon 2050

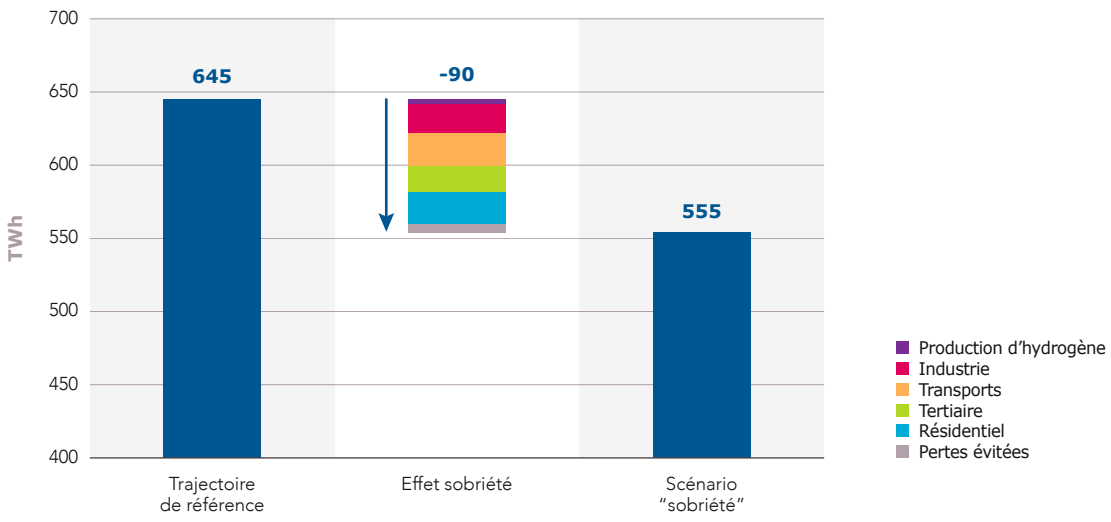
Les économies d'énergie permises par l'activation des gisements de sobriété sont importantes. À l'horizon 2050, elles sont estimées à environ 90 TWh.

Juger du réalisme de ces gisements n'entre pas dans le champ du présent rapport, et renvoie très largement à des représentations politiques ou symboliques déjà évoquées plus haut. Il est certain que le scénario « sobriété » des « Futurs énergétiques 2050 » constitue en lui-même un système différent de celui d'aujourd'hui, et implique des changements organisationnels importants (organisation des villes et de l'habitat de manière générale, inversion de la tendance à l'augmentation de la taille des véhicules, etc.). Toutefois, il représente une société dont les traits principaux ont été conservés : la mobilité demeure essentiellement individuelle, l'habitat est toujours organisé de manière prédominante autour des cellules familiales, etc. Des lectures antagonistes seront donc possibles sur ce scénario : pour en déplorer le manque d'ambition ou au contraire en souligner le caractère déjà très normatif.

L'enseignement le plus important pour la prospective réside, de manière plus fondamentale, dans le fait que **l'activation simultanée des leviers du scénario sobriété n'apparaît pas de nature à infléchir la tendance prévisionnelle d'augmentation de la consommation d'électricité dans un cadre de neutralité carbone.**

En effet, la consommation atteindrait 555 TWh en 2050 dans le scénario sobriété contre 475 TWh en 2019. Si elles permettent d'infléchir de manière significative l'évolution de la consommation, les mesures de sobriété ne remettent donc pas en cause son caractère haussier. *A contrario,* cela signifie que les scénarios impliquant une stabilité voire une réduction de la consommation d'électricité reposent soit sur une organisation sociale plus fondamentalement en rupture par rapport à aujourd'hui, soit sur un renoncement à la trajectoire de neutralité carbone dans un cadre proche de la SNBC.

Figure 3.27 Décomposition des effets d'actions de sobriété sur la consommation en 2050



3.5.7 Synthèse des principales hypothèses du scénario de sobriété

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Scénario sobriété		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	479 TWh *(508 TWh)*	509 TWh *(567 TWh)*	555 TWh *(645 TWh)*
Gisement de sobriété	Nombre moyen de personnes par ménage	2,17	2,23 *(2,07)*	2,28 *(2,01)*	2,33 *(1,98)*
	Baisse moyenne de la température de consigne du chauffage	-	0,3°C *(0°C)*	0,7°C *(0°C)*	1°C *(0°C)*
	% du temps de télétravail	-	20 % *(4 %)*	35 % *(8 %)*	50 % *(10 %)*
	Taux d'occupation moyen des véhicules légers	1,62	1,73 *(1,65)*	1,97 *(1,68)*	2,20 *(1,70)*
	Dépense annuelle moyenne par personne en produits de l'industrie agroalimentaire par rapport à 2019	-	stable *(+3 %)*	stable *(+12 %)*	stable *(+21 %)*
	Évolution de la part de marché des citadines dans les ventes par rapport à 2019	-	+4 % *(stable)*	+8 % *(stable)*	+10 % *(stable)*

3.6 Une trajectoire « accélération 2030 » pour atteindre le nouvel objectif européen de -55 % sur les émissions nettes

3.6.1 Un nouvel objectif de réduction des émissions impliquant une électrification accrue à court terme

Dans le cadre de son nouveau « Pacte vert », l'Union européenne a fixé l'objectif d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55 % net en 2030 (contre -40 % brut) par rapport aux niveaux de 1990 et l'atteinte de la neutralité carbone à l'échelle de l'Union d'ici 2050. Il s'agit d'une réévaluation significative du degré d'ambition par rapport à l'objectif précédent.

Ces nouvelles ambitions sont susceptibles d'accélérer le transfert de certains usages d'énergie vers l'électricité. Plusieurs mesures contenues dans le paquet « Ajustement à l'objectif 55 » publié en juillet 2021 vont dans ce sens, notamment la mise en place d'un système d'échange de quotas d'émissions pour le transport routier et le bâtiment. La Commission européenne a également proposé un objectif de réduction de 100 % des émissions dans les parcs de véhicules légers (voitures et véhicules utilitaires légers) vendus dès 2035.

La proposition de modification du règlement européen sur la répartition des efforts, concernant les émissions des secteurs non couverts à l'origine par le système d'échange de quotas d'émissions, établirait une réduction de 47,5 % des émissions françaises dans ces secteurs. D'autre part, la révision du système d'échange de quotas (SEQE), également proposée par la Commission européenne en juillet 2021, rehausserait l'objectif européen de réduction des émissions couvertes par le SEQE, qui passerait de -43 % à -61 % en 2030.

L'accélération de l'électrification est un des leviers efficaces pour permettre l'atteinte des nouveaux objectifs 2030, d'autant plus que la production d'électricité bas-carbone en France restera excédentaire à cet horizon.

La variante « accélération 2030 » implique des évolutions dans les rythmes de déploiement de l'électricité sur les trois principaux secteurs émetteurs : les transports, l'industrie et le bâtiment.

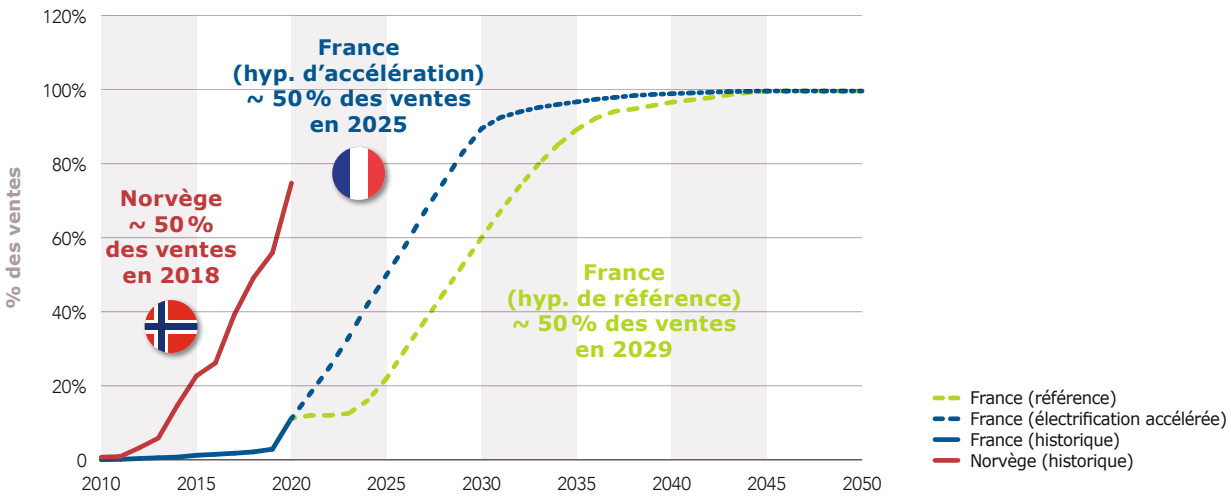
3.6.2 Une accélération marquée dans le secteur des transports

Le secteur des transports apparaît le plus propice à une accélération.

D'une part, le taux de renouvellement naturel du parc automobile est élevé (6 à 7 % par an pour les véhicules légers, contre 1 à 2 % par an dans le logement) : il s'agit donc de remplacer des véhicules polluants en fin de vie par des véhicules neufs utilisant un combustible bas-carbone. D'autre part, sous certaines conditions, la bascule vers le véhicule électrique présente une bonne efficacité économique au regard d'autres actions de décarbonation (les coûts d'abattement des émissions sont relativement faibles : l'étude finale présentera des évaluations réactualisées sur ce point). Enfin, la dynamique industrielle est engagée : la part de marché de l'électrique progresse, les constructeurs automobiles électrifient leur flotte bien plus rapidement qu'initialement escompté et les nouveaux objectifs annoncés à l'échelle européenne (fin de la vente de véhicules thermiques en 2035) sont de nature à accélérer la transition.

La trajectoire « accélération 2030 » prolonge la dynamique positive observée en 2020-2021, en supposant notamment une part de marché de 50 % pour l'électrique (tout électrique et hybride rechargeable) sur le segment des voitures particulières en 2025, contre 2029 dans la trajectoire de référence.

Figure 3.28 Part de marché des véhicules électriques (tout électriques et hybrides rechargeables) dans les ventes de voitures particulières



3.6.3 Une bascule vers les pompes à chaleur plus rapide dans le secteur du bâtiment

Dans le secteur du bâtiment, aussi bien résidentiel que tertiaire, la trajectoire de référence prend déjà en compte une électrification volontariste des usages, en particulier du chauffage. En effet, le rythme des transferts vers des solutions électriques de chauffage dans l'existant entre 2021 et 2030 est doublé par rapport à la décennie précédente dans le résidentiel et même triplé dans le tertiaire. Cette rupture de tendance répond aux orientations publiques de décarbonation des usages, portées par la SNBC.

Dans une variante d'électrification plus poussée, cette accélération est davantage marquée, mais avec un effet cependant limité à l'horizon 2030. Ainsi, la part de chauffage électrique dans le bâtiment est rehaussée de l'ordre de quelques pourcents en 2030 par rapport à la trajectoire de référence, et par le biais de pompes à chaleur, c'est-à-dire d'appareils très performants sur le plan énergétique.

De ce fait, à un horizon de temps relativement court à l'échelle de la durée de vie d'un système de chauffage et en raison de l'inertie importante propre au secteur du bâtiment, cette augmentation n'a qu'un impact limité sur la consommation d'électricité en 2030. Ainsi, pour le résidentiel et le tertiaire, la variante d'électrification poussée conduit à une consommation en hausse d'environ 4 TWh en 2030 par rapport à la trajectoire de référence.

Une accélération de la transition du secteur des bâtiments au-delà de ces niveaux est possible mais elle nécessite un effort structurel très important sur le parc de bâtiments existants, avec des incitations ou des obligations largement renforcées par rapport aux mesures en vigueur.

3.6.4 Un effet sur l'industrie dans le cadre du plan de relance

La trajectoire de référence intègre déjà une forte intensification des transferts d'usage dans le secteur industriel, tant sur les procédés que sur les besoins de chaleur, des combustibles carbonés vers l'électricité. Calibrée en s'appuyant sur la base de données industrielle et les analyses du CEREN, elle est fondée sur une estimation du potentiel techniquement réalisable d'électrification et de la cible atteignable en 2050 compte tenu des temps de retour des différentes technologies.

Le scénario « réindustrialisation profonde » présenté en partie 3.4 décrit une France structurellement réindustrialisée, en allant significativement plus loin que le scénario de référence. Néanmoins, ce scénario produit des effets marquants à long terme, et donc notamment aux échéances 2040 et 2050.

Dans la trajectoire « accélération 2030 », un rythme d'électrification encore plus rapide de l'industrie est retenu, en considérant que les soutiens publics mis en place dans le cadre de France Relance, puis du nouveau plan d'investissement « France 2030 », permettent d'atteindre un rythme de conversion plus soutenu des énergies fossiles (principalement le fioul) vers l'électricité et les réseaux de chaleur.

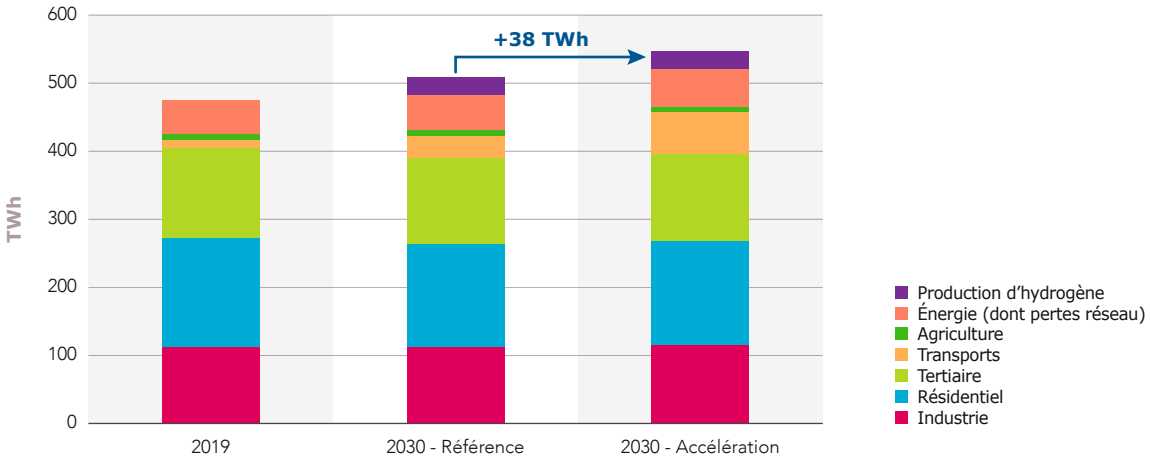
Cette trajectoire peut s'appuyer sur des exemples concrets de projets d'investissements dans les grandes zones industrielles françaises (par exemple à Dunkerque ou à Fos) pouvant concerner des secteurs très énergivores comme la sidérurgie.

En pratique, les conditions de réussite de la trajectoire « accélération 2030 » doivent encore être précisées. Elles impliquent la déclinaison rapide des perspectives d'électrification en projets concrets et une inversion de la logique décisionnelle sur le raccordement (les travaux de renforcement de la capacité d'accueil dans ces zones ne sont pas très coûteux mais peuvent être longs à cadre procédural inchangé et il sera nécessaire de faire démarrer les travaux en anticipation par rapport à certains projets, si ceux-ci doivent se concrétiser entre 2025 et 2030).

3.6.5 Bilan : un effet haussier sur la consommation d'électricité proche de 40 TWh à l'horizon 2030

Atteindre un objectif renforcé de réduction des émissions d'ici 2030 entraîne sans aucun doute un effet haussier sur la consommation d'électricité en France, dans un contexte favorable où la production d'électricité est à 93 % décarbonée. L'effet associé est estimé à environ 40 TWh par rapport à la trajectoire de référence. La trajectoire « accélération 2030 » est donc légèrement supérieure à la trajectoire haute du dernier Bilan prévisionnel, mais dans des proportions qui n'en modifient pas les conclusions s'agissant de la faculté à garantir la sécurité d'approvisionnement sous certaines conditions.

Figure 3.29 Consommation électrique dans les trajectoires de référence et « accélération 2030 »



3.7 D'autres configurations ont été étudiées, avec des évolutions contrastées sur le rythme de déploiement de l'efficacité énergétique, de l'électrification directe ou encore de l'hydrogène

Au-delà de la trajectoire de référence et des scénarios de réindustrialisation et de plus grande sobriété, les débats et les retours de consultation publique ont mis en exergue des positions divergentes sur les hypothèses associées à l'évolution de consommation à long terme.

Aussi, la trajectoire de référence retenue par RTE s'accompagne de l'étude d'autres configurations. Celles-ci visent à refléter des trajectoires contrastées s'agissant des modes de vie, des politiques publiques en matière de décarbonation de l'économie ou des rythmes de transformation du système et à en dégager les conséquences pour le dimensionnement du système électrique

3.7.1 Sur l'efficacité énergétique

Comme évoqué à plusieurs reprises dans le présent chapitre, la projection sur les gains futurs en matière d'efficacité énergétique est centrale en matière de prospective énergétique. En retenant une hypothèse de réduction de 40 % de la consommation d'énergie finale, la France a retenu une hypothèse qui se situe dans le haut de la fourchette des autres pays européens.

Lors de la consultation publique, plusieurs répondants ont remis en cause l'intérêt de certaines mesures d'efficacité prévues par la SNBC en mettant en avant leur coût important par rapport à d'autres leviers de décarbonation ou le caractère trop optimiste des trajectoires retenues.

À l'inverse, d'autres répondants indiquent que les leviers d'efficacité énergétique possèdent de nombreux bénéfices au-delà de la réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre et qu'ils sont sans regret et nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques que la France s'est fixés.

Pour apporter un éclairage sur ces questions, RTE a intégré aux « Futurs énergétiques 2050 » une analyse de sensibilité portant sur le rythme de déploiement des mesures d'efficacité énergétique. Cette variante, qui sera détaillée dans le rapport final, conduirait à une consommation d'électricité de l'ordre de 720 TWh en 2050.

3.7.2 Sur le rythme et le niveau cible d'électrification des usages

Les débats sur le niveau d'électrification pour atteindre la neutralité carbone sont tout aussi structurants dans l'élaboration des perspectives. Comme évoqué plus haut, s'il existe un consensus sur la nécessité d'utiliser l'électricité pour remplacer en partie les énergies fossiles et donc sur le fait que la part de l'électricité dans le mix énergétique est amenée à s'accroître, les proportions de cette augmentation demeurent sujet de débat.

Certains suggèrent que la SNBC accorde une place trop importante à l'électrification, notamment dans l'industrie voire dans le résidentiel et les transports, par rapport à d'autres sources comme la biomasse ou les imports de combustibles énergétiques décarbonés. D'autres soulignent à l'inverse les incertitudes sur le gisement de biomasse pouvant être consacrée à l'énergie (via le biogaz ou les biocarburants) ou encore la capacité à déployer plus rapidement des solutions électriques, et mettent ainsi en évidence l'intérêt de cibler une électrification plus rapide et/ou plus poussée des usages, notamment dans les transports.

Les travaux des « Futurs énergétiques 2050 » intègrent ainsi deux trajectoires contrastées sur le rythme d'électrification, avec un éclairage spécifique sur la possibilité d'accélérer l'électrification de certains usages (en particulier les transports) d'ici 2030 en vue d'atteindre les nouveaux objectifs européens sur les émissions de gaz à effet de serre (la trajectoire d'électrification soutenue coïncide, à l'horizon 2030, avec la trajectoire « accélération 2030 » présentée dans la partie 3.6).

3.7.3 Sur un recours renforcé à l'hydrogène

Le développement de l'hydrogène bas-carbone constitue l'une des solutions mises en avant pour atteindre la neutralité carbone, notamment pour décarboner certains usages dans l'industrie ou les transports (camions, bus, bateaux, avions…). Au cours des dernières années, des visions ambitieuses de développement de l'hydrogène se sont développées, et les pouvoir publics ont adopté en septembre 2020 une stratégie hydrogène en lien avec le plan de relance adopté à la suite de la crise sanitaire.

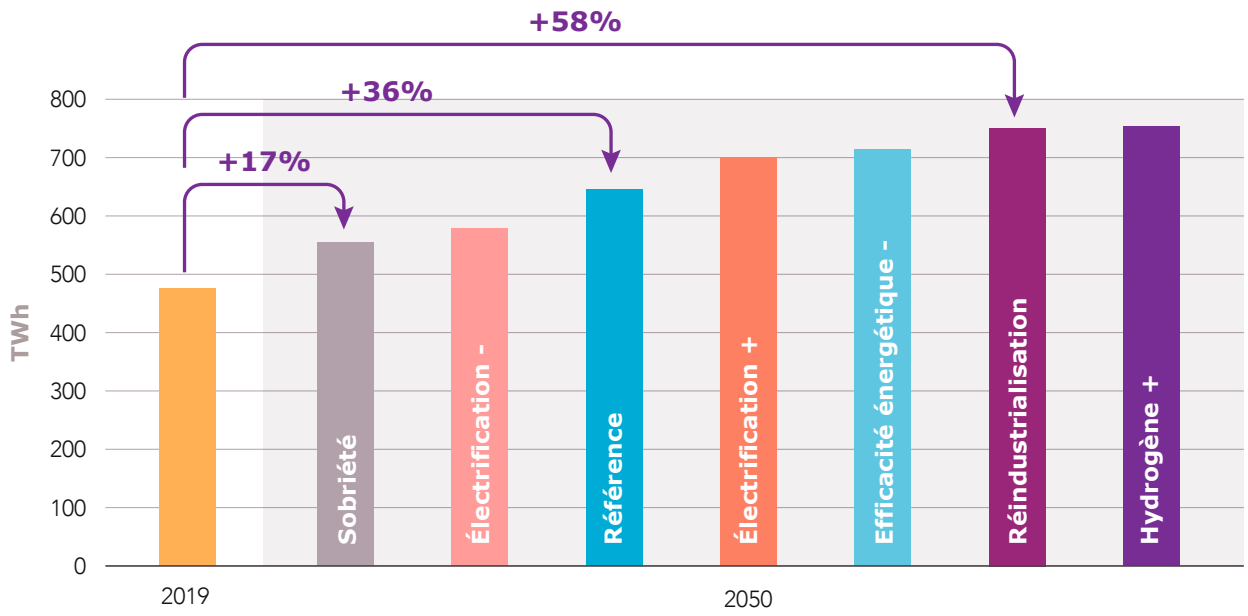
Dans ce contexte et suite aux demandes issues de la concertation, RTE a élaboré et étudié une trajectoire fondée sur une accélération forte du développement de l'hydrogène (trajectoire « hydrogène + »), conduisant à une demande finale d'hydrogène nettement plus élevée que dans la trajectoire de référence : plus de 120 TWh H_2 PCI à l'horizon 2050 contre environ 40 TWh H_2 PCI dans la trajectoire de référence (hors hydrogène nécessaire à l'équilibrage du système électrique). L'hydrogène ainsi développé se substitue à l'électrification directe dans certains secteurs compliqués à électrifier (sidérurgie…) ainsi qu'à l'utilisation de biomasse (transport lourd, chaleur industrielle).

Dans le cas où tout ou partie de ce complément d'hydrogène est produit par électrolyse en France, il en résulte une consommation d'électricité supplémentaire, qui s'avère structurante pour le dimensionnement du système électrique.

3.7.4 Bilan des scénarios et variantes

In fine, en complément de la trajectoire de référence, ce sont six trajectoires de consommation qui font l'objet d'une analyse détaillée dans cette étude.

Figure 3.30 Synthèse des trajectoires de consommation modélisées dans l'étude



3.7.5 Synthèse des principales hypothèses des différentes variantes étudiées

Figure 3.31 Synthèse des principales hypothèses des différentes trajectoires de consommation

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Variante efficacité énergétique moindre		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	527 TWh *(508 TWh)*	610 TWh *(567 TWh)*	714 TWh *(645 TWh)*
Efficacité énergétique	Rénovations dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	400000 par an	470000 *(680000 par an)*	680000 *(830000 par an)*	700000 *(830000 par an)*
	Gains d'une rénovation dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	30%	45% *(50%)*	45% *(50%)*	40% *(40%)*
	Pompes à chaleur dans les logements existants *(moyenne sur dix ans)*	+40000 par an	+180000 par an *(+270000 par an)*	+220000 par an *(+330000 par an)*	+230000 par an *(+350000 par an)*
	Rénovations dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	1,5% du parc par an	1,8% du parc par an *(2% du parc par an)*	2% du parc par an *(2,5% du parc par an)*	2% du parc par an *(2,5% du parc par an)*
	Gains d'une rénovation dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	15%	20% *(25%)*	30% *(40%)*	30% *(50%)*
	Consommation kilométrique des véhicules légers	18,6 kWh/ 100 km	17,4 kWh/ 100 km *(17,1 kWh/100 km)*	16,3 kWh/ 100 km *(15,6 kWh/100 km)*	15,2 kWh/ 100 km *(14,1 kWh/100 km)*
	Taux d'atteinte des gisements d'efficacité énergétique	-	20% *(30%)*	40% *(50%)*	50% *(70%)*

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Variante électrification +		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	546 TWh *(508 TWh)*	636 TWh *(567 TWh)*	700 TWh *(645 TWh)*
Électrification	Transferts vers chauffage électrique dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	65000 par an	150000 par an *(130000 par an)*	220000 par an *(165000 par an)*	300000 par an *(250000 par an)*
	Transferts vers chauffage électrique dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	2,5 Mm^2 par an	9,8 Mm^2 par an *(7,5 Mm^2 par an)*	14,6 Mm^2 par an *(10,5 Mm^2 par an)*	14,6 Mm^2 par an *(10,5 Mm^2 par an)*
	Nombre de véhicules électriques *(y compris véhicules hybrides rechargeables)*	0,3 millions	13,1 millions *(7,3 millions)*	31,1 millions *(24,7 millions)*	37,2 millions *(35,9 millions)*
	Part des camions électrifiés	0%	24% *(2%)*	60% *(8%)*	76% *(21%)*
	Transferts vers l'électricité depuis 2019 dans l'industrie	-	12 TWh *(9 TWh)*	43 TWh *(34 TWh)*	88 TWh *(77 TWh)*

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Variante électrification -		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	493 TWh *(508 TWh)*	527 TWh *(567 TWh)*	578 TWh *(645 TWh)*
Électrification	Transferts vers chauffage électrique dans le résidentiel *(moyenne sur dix ans)*	65000 par an	90000 par an *(130000 par an)*	130000 par an *(165000 par an)*	135000 par an *(250000 par an)*
	Transferts vers chauffage électrique dans le tertiaire *(moyenne sur dix ans)*	2,5 Mm² par an	5 Mm² par an *(7,5 Mm² par an)*	7 Mm² par an *(10,5 Mm² par an)*	7 Mm² par an *(10,5 Mm² par an)*
	Nombre de véhicules électriques *(y compris véhicules hybrides rechargeables)*	0,3 millions	5,4 millions *(7,3 millions)*	19,1 millions *(24,7 millions)*	28,8 millions *(35,9 millions)*
	Part des camions électrifiés	0%	2% *(2%)*	6% *(8%)*	16% *(21%)*
	Transferts vers l'électricité depuis 2019 dans l'industrie	-	7 TWh *(9 TWh)*	21 TWh *(34 TWh)*	46 TWh *(77 TWh)*

Entre parenthèses, hypothèses retenues pour la trajectoire de référence

Variante Hydrogène +		2019	2030	2040	2050
Consommation	Consommation intérieure d'électricité	475 TWh	525 TWh *(508 TWh)*	635 TWh *(570 TWh)*	754 TWh *(645 TWh)*
Production d'hydrogène et débouchés	Consommation d'électricité pour la production d'hydrogène	-	40 TWh *(25 TWh)*	98 TWh *(33 TWh)*	171 TWh *(50 TWh)*
	Dont usage non énergétique de l'hydrogène *(ammoniac, sidérurgie, etc.)*	-	20 TWh *(18 TWh)*	19 TWh *(16 TWh)*	24 TWh *(17 TWh)*
	Dont usage énergétique direct de l'hydrogène *(chaleur industrielle, transport routier et ferroviaire, etc.)*	-	20 TWh *(7 TWh)*	44 TWh *(13 TWh)*	75 TWh *(23 TWh)*
	Dont combustibles de synthèse *(transport maritime et aérien, méthanation)*	-	-	36 TWh *(5 TWh)*	72 TWh *(9 TWh)*

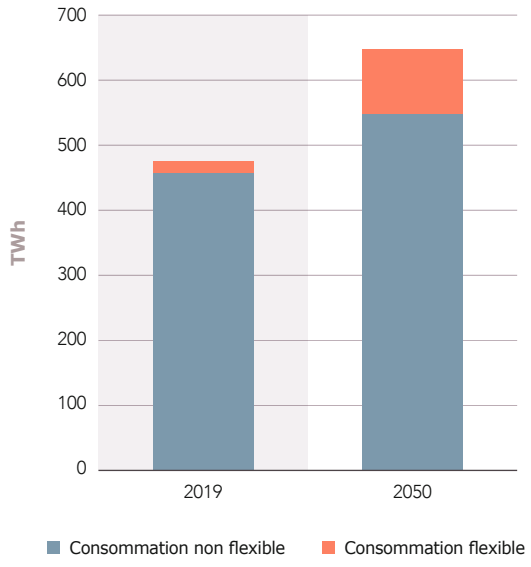
3.8 L'analyse en puissance : des usages flexibles qui représentent une part de la consommation d'électricité en forte croissance

3.8.1 La consommation sera largement plus flexible à l'horizon 2050 qu'elle ne l'est aujourd'hui

La consommation d'électricité fluctue au cours du temps, en fonction des besoins des utilisateurs. Ceux-ci sont largement dictés par le rythme des activités économiques et domestiques et le cycle des saisons : la consommation est plus élevée le jour que la nuit, en jours ouvrés qu'en week-end, en hiver qu'en été.

Cette cyclicité de la demande et son caractère régulier et prévisible sont appelés à être largement modifiés par les évolutions structurelle envisagées à l'horizon 2050, avec notamment la perspective que la demande électrique devienne plus flexible.

Figure 3.32 Évolution de la consommation flexible entre 2019 et 2050



La notion de flexibilité de la consommation couvre deux notions distinctes :

- une part de la consommation peut être déplacée, *a minima* au sein de la journée, pour être activée aux moments les plus favorables pour l'exploitation du système électrique ;
- une part de la consommation peut être interrompue, lors de périodes de tension sur le système électrique.

La consommation est aujourd'hui déjà partiellement flexible. D'une part, les périodes de charge des ballons d'eau chaude sont placées sur les plages horaires les plus favorables : près de 80 % de la consommation pour la production d'eau chaude sanitaire est ainsi activée sur les creux de nuit, alors que, sans pilotage, elle serait activée en cours de journée sur les plages les plus chargées. D'autre part, les dispositifs d'effacement contribuent à la sécurité d'approvisionnement avec près de 3 GW pouvant être activés.

À l'horizon 2050, les usages de consommation considérés comme flexibles sont appelés à être en forte progression, d'une part avec un recours accru au pilotage de la charge, et notamment celle des véhicules électriques, d'autre part à travers des dispositifs d'effacements renforcés (essentiellement les effacements des électrolyseurs).

La part de la consommation flexible passe ainsi de 4 % aujourd'hui à 15 % en 2050 dans la trajectoire de référence, et différentes variantes explorent la possibilité que la flexibilité se développe plus ou moins vite.

La flexibilité de la consommation n'est en effet pas limitée techniquement, et pourrait concerner d'autres secteurs : elle dépend avant tout de son

acceptation sociale. Les hypothèses retenues dans la trajectoire de référence de la consommation sont relativement prudentes, permettant de ne pas faire reposer les résultats relatifs à la sécurité d'approvisionnement sur des hypothèses incertaines *(cf. chapitre 7)*. Différentes variantes de flexibilité de consommation permettent d'illustrer l'apport des flexibilités sur le système électrique.

3.8.2 La thermosensibilité de la consommation restera élevée en hiver et augmentera en été

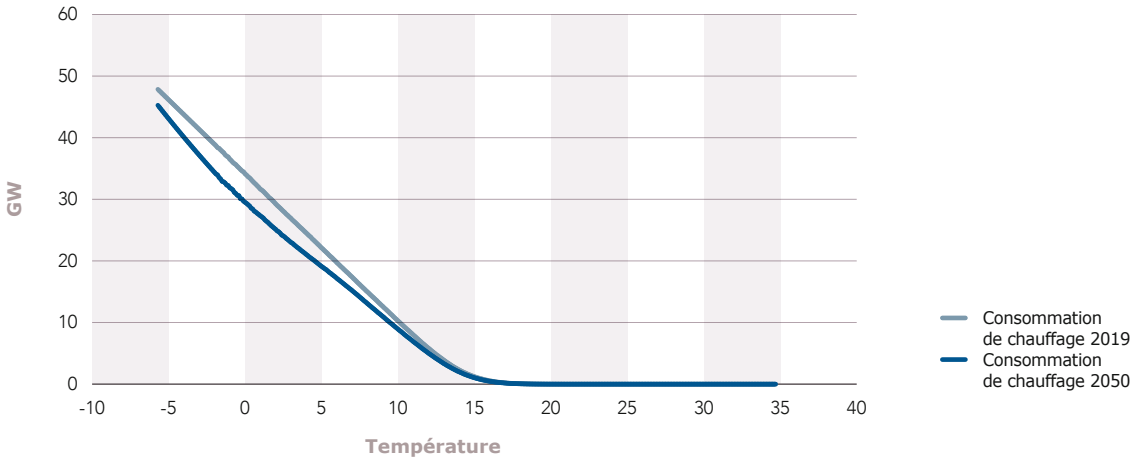
La consommation d'électricité est influencée par les températures extérieures en été, via la climatisation, et surtout en hiver via le chauffage électrique – largement répandu en France puisqu'il équipe près de 40 % du parc de logements et 30 % des surfaces du parc tertiaire.

Le système électrique français se caractérise par une forte thermosensibilité induite par le chauffage électrique : lors d'une vague de froid intense, les besoins de chauffe peuvent être beaucoup plus importants et contribuer à une augmentation significative de la puissance appelée. Le gradient hivernal (sensibilité de la consommation à la baisse de température en hiver) est aujourd'hui estimé à 2 400 MW/°C.

Les transferts de chauffage au fioul ou au gaz vers les pompes à chaleur électriques pour une partie significative du parc de logements vont accroître de manière sensible la part des logements chauffés à l'électricité à l'horizon 2050[19] (70 % contre 40 % environ aujourd'hui). Toutefois, dans le même temps, l'amélioration de l'isolation du bâti (réglementation environnementale dans le neuf, rénovations renforcées dans l'existant), combinée à une performance accrue des systèmes de chauffe (au travers des pompes à chaleur notamment) et à l'effet du réchauffement climatique, devrait permettre de stabiliser puis de faire décroître la consommation en énergie du chauffage électrique d'environ 24 % à l'horizon 2050. En corollaire, la sensibilité de la consommation à la température devrait décroître d'environ 13 %.

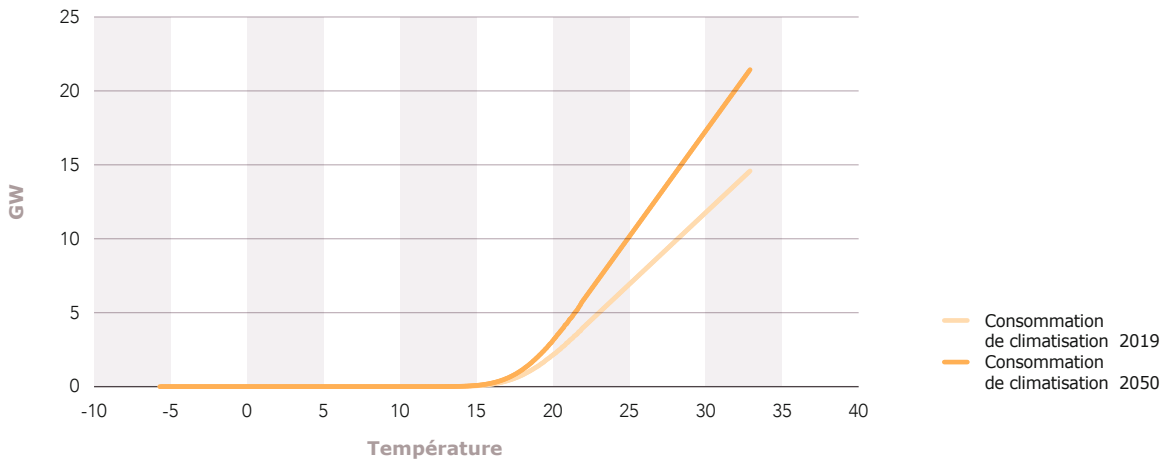
Dès lors, les transferts importants vers les solutions de chauffe électriques prévus dans le cadre de la SNBC ne conduisent pas à accroître la pointe de consommation du chauffage.

Figure 3.33 Appel de puissance moyen du chauffage en fonction de la température



19. Le développement des pompes à chaleur a des conséquences sur les consommations en énergie mais également sur les appels en puissance. En effet, le profil de charge des pompes à chaleur est différent de celui du chauffage par effet Joule : leur coefficient de performance (COP), rapport entre l'énergie restituée et l'énergie consommée, diminue lorsque l'écart de température entre le milieu de prélèvement et le milieu de restitution des calories augmente, d'où le caractère non linéaire qui apparaît sur la figure 3.33.
La technologie de la pompe à chaleur a toutefois connu des progrès importants sur les dernières années. Les anciens modèles étaient dotés de résistances thermiques d'appoint, ce qui pouvait conduire à une consommation équivalente à celle de convecteurs électriques lors de vagues de froid. Aujourd'hui, elles sont en voie de disparition, car elles ne respectent pas les exigences requises par les labels de qualité ; la dégradation du COP à températures très froides est ainsi limitée.+

Figure 3.34 Appel de puissance moyen de la climatisation en fonction de la température



Les débats relatifs à la thermosensibilité de la consommation et aux contraintes associées sur le système électrique sont aujourd'hui centrés sur les périodes de grand froid. Les perspectives de diffusion accrue de la climatisation et le réchauffement climatique font toutefois apparaître de nouvelles interrogations sur les contraintes de sécurité d'approvisionnement lors des vagues de chaleur.

La part de logements climatisés en France, en fort développement ces dernières années, a atteint 22 % en 2019. Elle reste toutefois bien inférieure à ce que l'on peut voir dans le sud de l'Europe ou dans les États de l'Ouest américain. Les perspectives de développement de la climatisation dans la trajectoire de référence dans le bâtiment font passer la part de logements climatisés à 55 % en 2050. **La sensibilité de la consommation à la température (gradient d'été) devrait fortement augmenter d'ici 2050 et atteindre 1 400 MW/°C en moyenne journalière et 2 100 MW/°C à 17 h.**

L'évolution de cette thermosensibilité, couplée au réchauffement climatique qui va d'une part conduire à un accroissement de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et, d'autre part, faire apparaître des contraintes accrues sur la disponibilité des moyens de production, font l'objet d'analyses dans les études de sécurité d'approvisionnement des différents scénarios *(cf. infra)*. Ces analyses ne font pas apparaître de contraintes d'approvisionnement spécifiques aux vagues de chaleur.

3.8.3 Du fait de la flexibilité accrue de la consommation, les profils journaliers d'appel de puissance n'auront plus le caractère relativement cyclique qu'ils présentent aujourd'hui

Aujourd'hui, le profil journalier de consommation constitue essentiellement un reflet des modes de vie. À titre d'illustration, la figure 3.35 représente les variations de la consommation d'électricité sur une semaine type de janvier et sur une semaine type de juin, décomposée par grands secteurs et usages.

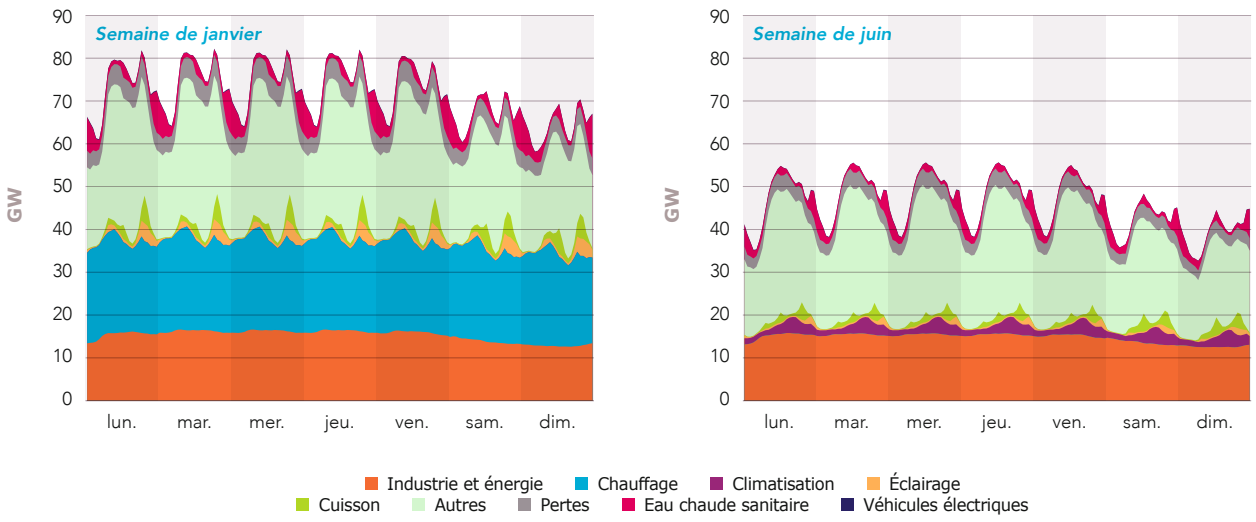
Si les courbes de charge hivernales et estivales en jours ouvrés présentent des différences notables, tant en forme qu'en niveau, elles possèdent néanmoins des caractères communs :

- un minimum de consommation atteint en fin de nuit (vers quatre ou cinq heures du matin), période où les consommations émanent essentiellement des procédés industriels à feu continu, de l'éclairage public, des appareils de froid, des veilles des appareils électroniques et, en hiver, du chauffage ;
- une rapide montée de charge à partir de six heures, liée à la reprise d'activité chez les particuliers, dans les transports ferroviaires et dans les établissements industriels (industrie légère travaillant à un ou deux postes par jour sur cinq jours par semaine) et tertiaires (commerces et bureaux notamment), conduisant à la formation d'un « plateau du matin » ;
- une lente diminution à partir de 13 h, suivie d'un rebond en fin d'après-midi, où se conjuguent activité de fin de journée dans les bureaux, reprise de la consommation résidentielle, et pic d'activité des transports en commun.

Les différences saisonnières sont principalement dues :

- au chauffage, qui explique l'essentiel de la différence générale de niveau entre hiver et été ;
- à des consommations additionnelles d'éclairage, qui sont à l'origine des écarts de forme : combinée avec une charge de même ampleur liée à la cuisson résidentielle, l'apparition d'une charge supplémentaire de l'ordre de 4 GW à la tombée de la nuit provoque une pointe à 19 h au cœur de l'hiver, un peu plus tardive et moins haute

Figure 3.35 Profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages aujourd'hui (à températures de référence)



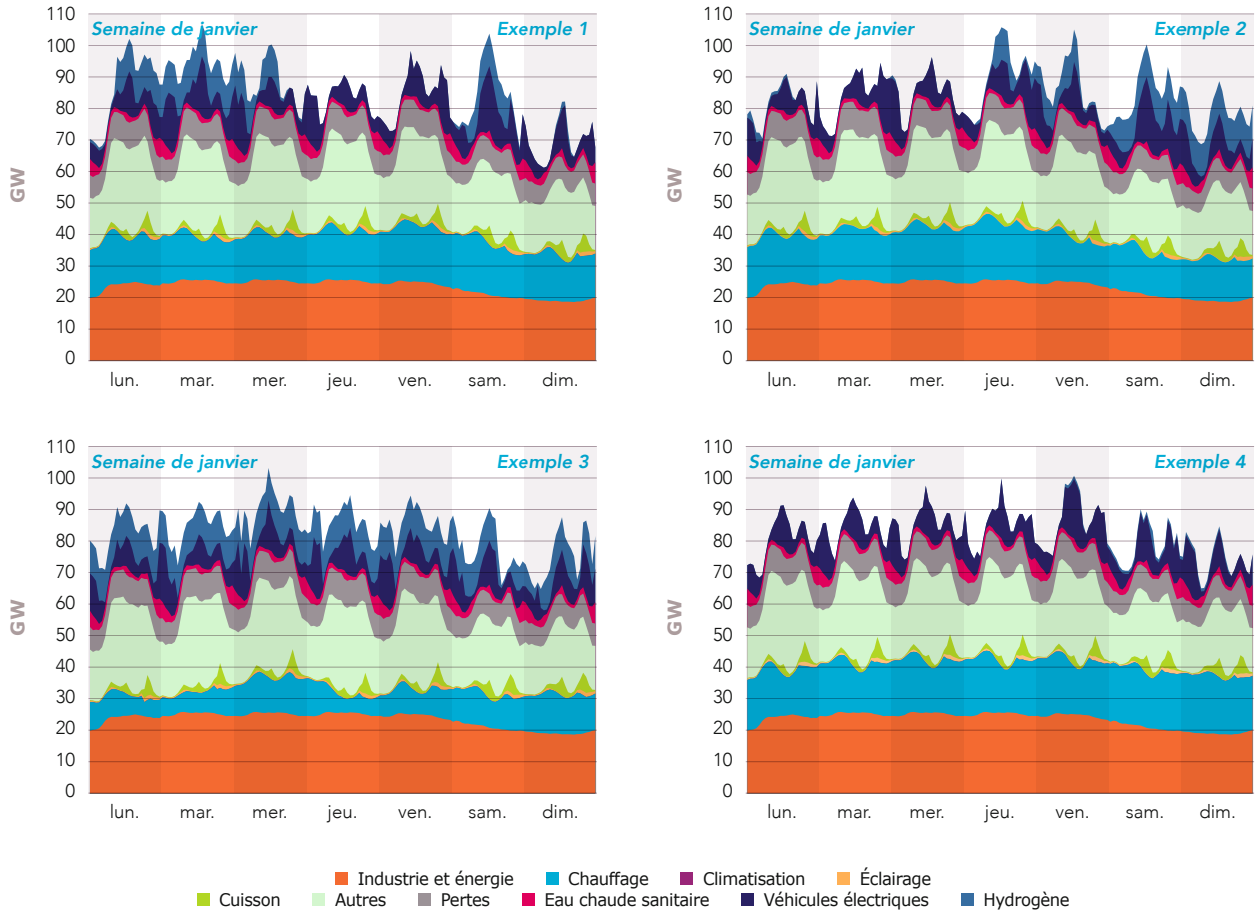
en demi-saison et en été ; symétriquement, le matin, l'éclairage induit en décembre et janvier un supplément de consommation qui positionne la pointe du matin vers 9 h. Avec de moindres besoins d'éclairage, cette pointe tend à se décaler vers midi au fur et à mesure que le jour se lève plus tôt.

Hormis des différences de niveaux liées aux conditions de température *(cf. infra)*, les appels de puissance hivernaux présentent un profil cyclique similaire sur les jours ouvrés, et il en va de même sur la période estivale. Les profils des samedis et dimanches diffèrent en revanche de celui des jours ouvrés du fait de la baisse de l'activité économique.

Cette relative constance de la forme journalière des appels de puissance est appelée à disparaître à l'horizon 2050 avec une part croissante de consommation flexible, dont le pilotage sera optimisé en fonction des contraintes du système électrique. Cette optimisation sera fonction non seulement des besoins de consommation, mais également de la production fatale et donc du mix électrique *(ce point sera détaillé au chapitre 7).*

Pour chaque scénario, l'équilibre offre-demande du système électrique ouest-européen a été simulé au pas horaire pour 1 000 années différentes représentant la variabilité météorologique (chroniques différentes de température, vent, ensoleillement,

Figure 3.36 Profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages d'une semaine de janvier en 2050 pour quatre chroniques climatiques différentes



précipitations) et diverses disponibilités des moyens de production. La figure 3.36 présente, à titre d'illustration, les appels de puissance d'une semaine de janvier, à l'horizon 2050, pour quatre de ces tirages dans un des scénarios d'étude.

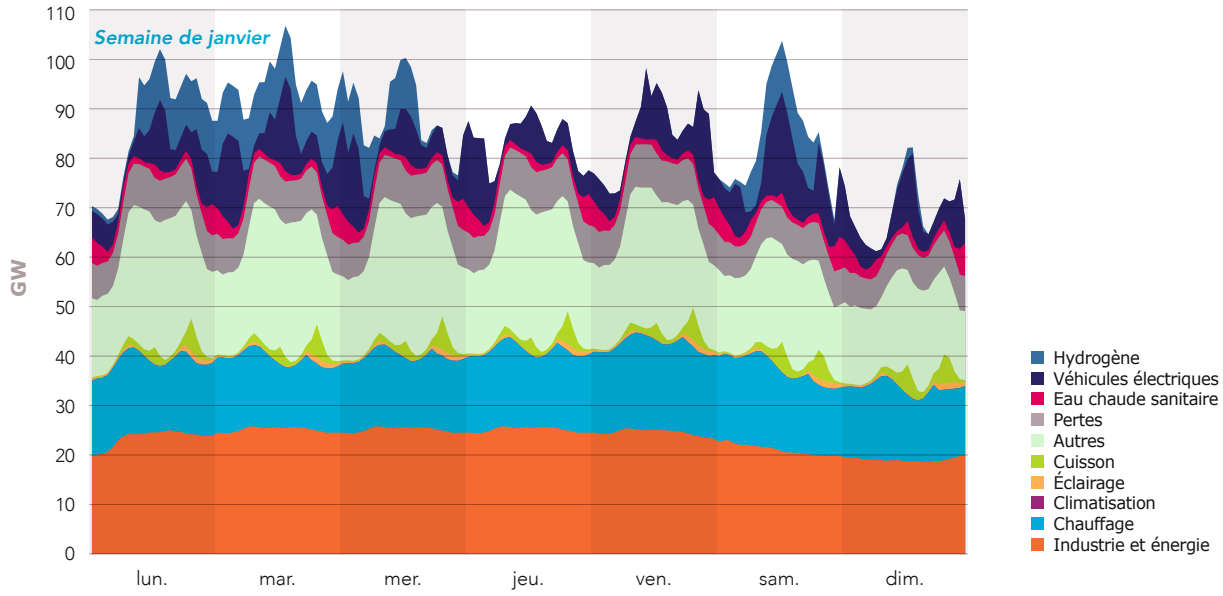
Le contraste est patent par rapport à la situation actuelle : le pilotage optimisé des flexibilités (eau chaude sanitaire, véhicules électriques, production électrolytique d'hydrogène) se traduit par une plus grande volatilité de leurs appels de puissance selon les contraintes du système, notamment le niveau de la production fatale (photovoltaïque, éolien, etc.). En particulier, la consommation des électrolyseurs pour la production d'hydrogène pourra être présente sur tout (exemple 3) ou partie (exemples 1 et 2) de la semaine, ou être totalement absente (exemple 4).

Ainsi, la pointe journalière n'intervient plus à la même heure d'un jour à l'autre, et la pointe du week-end peut être supérieure à celle de certains jours ouvrés.

Si l'on examine, toujours à titre d'exemple, plus en détail un de ces tirages *(cf. figure 3.37)*, on constate qu'une partie de la demande, correspondant aux usages peu ou pas pilotables (industrie, éclairage, cuisson, autres usages…), conserve un profil relativement cyclique, avec des jours ouvrés de forme similaire et un certain décrochage baissier le week-end. La réduction marquée du poids de l'éclairage en 2050 par rapport à aujourd'hui apparaît également, du fait de la poursuite du passage à la technologie LED.

Sur cet exemple, un niveau de production éolienne relativement important du lundi au mercredi autorise une production électrolytique d'hydrogène en l'absence de contrainte sur l'équilibre du système électrique. Cette production d'hydrogène est interrompue sur les deux jours suivants essentiellement du fait d'une production éolienne beaucoup plus faible. Un nouvel épisode venteux lors de la journée du samedi conduit toutefois à la réactiver. Combinée avec une importante production photovoltaïque autorisant un placement poussé de la recharge méridienne des véhicules électriques, la

Figure 3.37 Exemple de profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages d'une semaine de janvier en 2050 pour une chronique climatique possible



pointe de consommation du samedi est sensiblement supérieure à celle des deux jours ouvrés précédents. Cette recharge méridienne des véhicules électriques est observable sur les autres journées, mais avec une profondeur variable selon le niveau de production fatale.

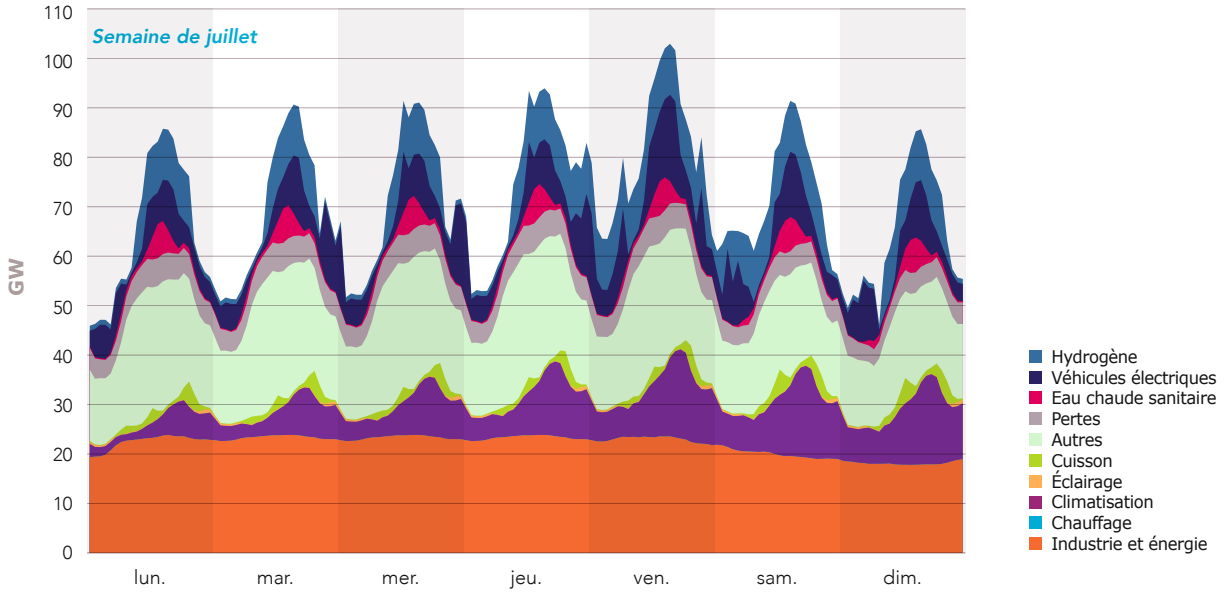
Au global, **les pointes de consommation observées dans cet exemple ne reflètent donc pas des situations de tension sur l'équilibre du système électrique mais résultent au contraire d'un pilotage optimal de la consommation flexible.**

L'impact de ce pilotage est également patent en période estivale. La figure 3.38 fournit un exemple de courbe de charge d'une semaine de juillet en 2050 pour un tirage d'aléas.

Plusieurs constats peuvent être dressés :

- le développement important de la climatisation à l'horizon 2050 se traduit par des appels de puissance élevés. Les niveaux de puissance appelée peuvent, sur des épisodes de très forte chaleur, approcher 35 GW (contre un peu plus de 20 GW aujourd'hui) ;
- la production photovoltaïque abondante en période estivale permet de concentrer une part importante de la demande flexible (véhicules électriques et eau chaude sanitaire notamment) sur les heures méridiennes ;
- la charge des véhicules électriques, plus forte les vendredis d'été en raison des départs en vacances, explique le pic d'appel de puissance sur la semaine ce jour-là.

Figure 3.38 Exemple de profil hebdomadaire de puissance de la consommation par usages d'une semaine de juillet en 2050 pour une chronique climatique possible



3.8.4 Avec le pilotage de la demande flexible, les pointes estivales de consommation pourront atteindre des niveaux élevés, du même ordre que celui des pointes hivernales, et varier dans une plage bien plus large

Outre le profil des appels de puissance, le pilotage d'une demande de plus en plus flexible selon les contraintes du système se traduira par des niveaux globalement bien plus élevés des pointes estivales de consommation.

Pour illustrer cette évolution, la figure 3.39 représente, sur la dernière semaine de juillet, la plage de variation des appels de puissance horaires modélisés pour les mille tirages annuels des différents aléas sur le système électrique de 2019. Elle fait apparaître, pour une heure donnée, une plage de fluctuation maximale de l'ordre d'une dizaine de gigawatts et, à l'échelle de la semaine, la variabilité totale des appels de puissance est de l'ordre de 30 GW.

La figure 3.40 fournit les mêmes éléments pour l'année 2050. Globalement, le niveau des puissances appelées est bien plus élevé : il peut approcher 120 GW sur les cas de figure extrêmes.

Pour une heure donnée, la plage de variation des appels de puissance apparaît bien plus large qu'en 2019, de l'ordre de plus de 30 GW sur certaines heures (soit trois fois plus qu'en 2019). Ceci est dû au fait qu'à la thermosensibilité estivale (seul paramètre d'influence en 2019) s'ajoute la variabilité du pilotage de la demande flexible en fonction des contraintes du système électrique.

Enfin, on peut noter l'amplitude hebdomadaire bien plus élevée pour les appels de puissance horaires, de près de 75 GW. Ceci est notamment dû au creusement de l'écart jour/nuit, la demande flexible étant largement positionnée sur les heures méridiennes pour offrir un débouché à la production photovoltaïque.

Le même type d'analyse mené sur une semaine hivernale (troisième semaine de janvier) fait apparaître des évolutions de moindre ampleur entre 2019 (figure 3.41) et 2050 (figure 3.42).

En effet, le niveau de la plage de variation des appels de puissance se trouve, compte tenu de la forte croissance de la demande électrique, légèrement rehaussé (d'une quinzaine de gigawatts) en 2050 par rapport à 2019, mais bien moins que dans le cas d'une semaine estivale. La baisse d'un peu plus de 10 % de la consommation de chauffage électrique à cet horizon contribue à modérer la hausse des appels de puissance.

Sur les heures méridiennes de production photovoltaïque, la puissance appelée peut atteindre jusqu'à 130 GW pour certains tirages d'aléas, du fait du placement de la demande flexible sur ces périodes quand l'état du système électrique l'autorise. Ces niveaux élevés de puissance appelée ne sont donc pas nécessairement le reflet d'une tension sur l'équilibre du système électrique.

Figure 3.39 Plage de variation des appels de puissance horaires sur 1 000 années de Monte-Carlo pour la dernière semaine de juillet – Année 2019

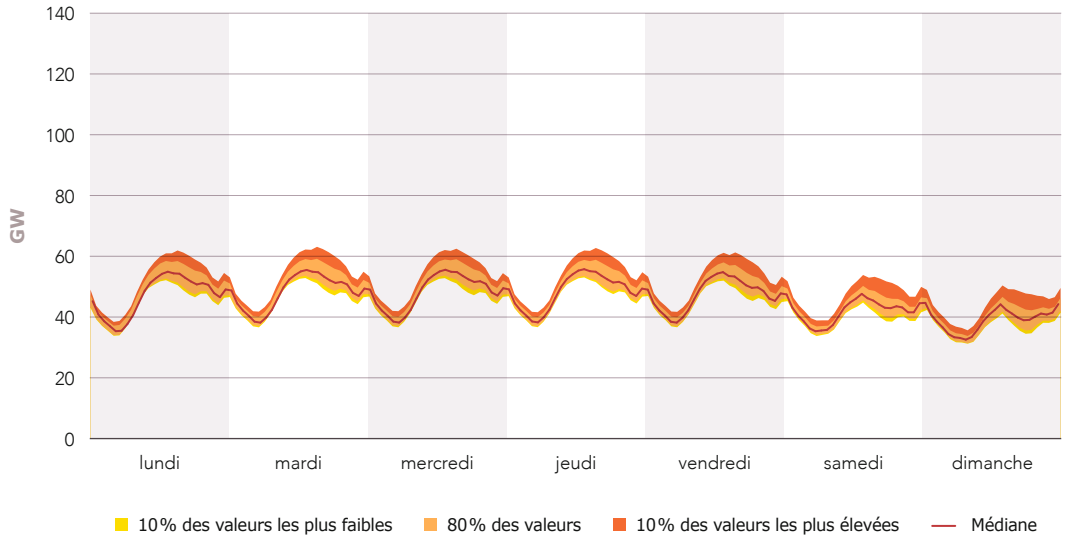


Figure 3.40 Plage de variation des appels de puissance horaires sur 1 000 années de Monte-Carlo pour la dernière semaine de juillet – Année 2050

Figure 3.41 Plage de variation des appels de puissance horaires sur 1 000 années de Monte-Carlo pour la troisième semaine de janvier – Année 2019

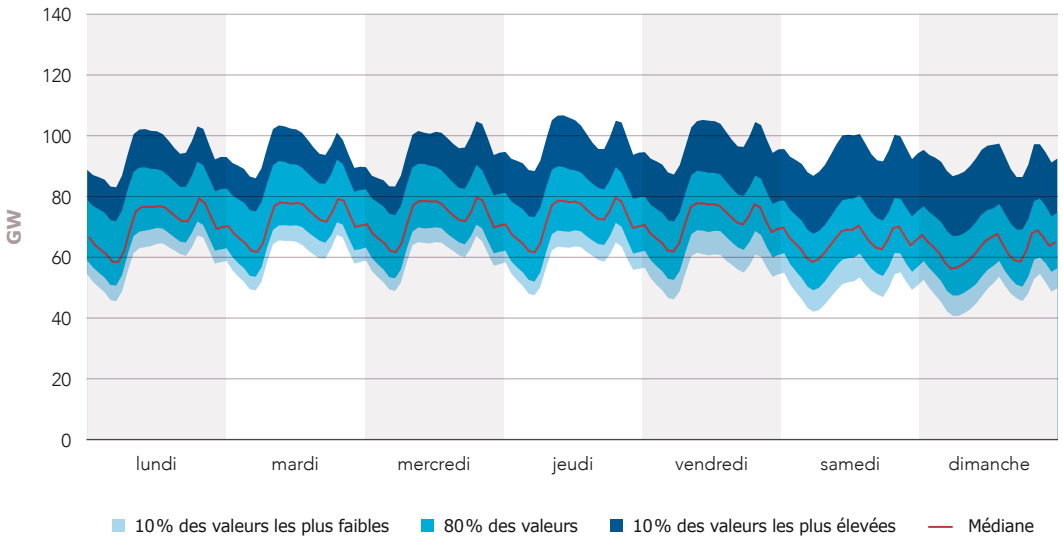
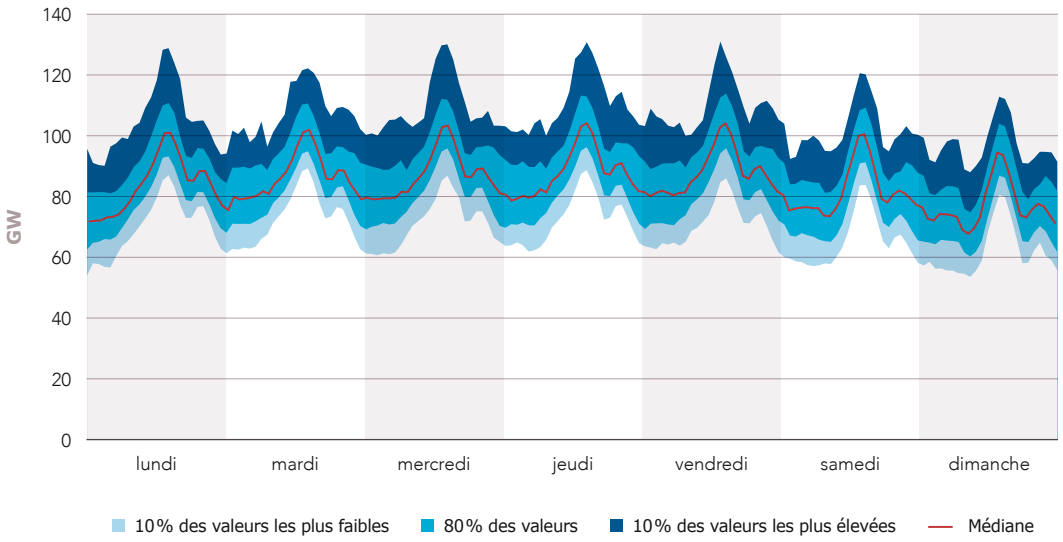


Figure 3.42 Plage de variation des appels de puissance horaires sur 1 000 années de Monte-Carlo pour la troisième semaine de janvier – Année 2050



3.8.5 Les pointes de consommation seront potentiellement élevées, mais l'élément dimensionnant pour l'exploitation du système est la consommation résiduelle

À l'horizon 2050, les valeurs atteintes par la consommation seront projetées comme pouvant être bien plus élevées que celles rencontrées aujourd'hui. Dans le scénario de référence, la consommation atteint une valeur supérieure à 100 GW près de 2,4% du temps, alors que la probabilité d'atteindre cette valeur est aujourd'hui exceptionnelle (0,02%). En 2050, certaines pointes pourront dépasser 120 GW.

Ces valeurs atteintes par la consommation ne reflètent qu'imparfaitement la tension sur l'équilibre offre-demande. En effet, la consommation qui doit être couverte par des moyens pilotables est la consommation résiduelle, consommation défalquée des productions fatales, et cette production fatale sera importante à l'horizon 2050 dans tous les scénarios étudiés.

Les instants qui présenteront le plus de contraintes sur l'équilibre offre-demande seront les instants à plus forte consommation résiduelle, et non pas les instants de plus forte consommation.

Le graphique ci-dessous, basé sur une semaine d'hiver d'un des scénarios d'étude, permet de représenter des instants où la consommation résiduelle atteint des valeurs très basses, voire négatives alors que la consommation dépasse 120 GW.

Figure 3.43 Évolution des monotones de consommation entre 2019 et 2050

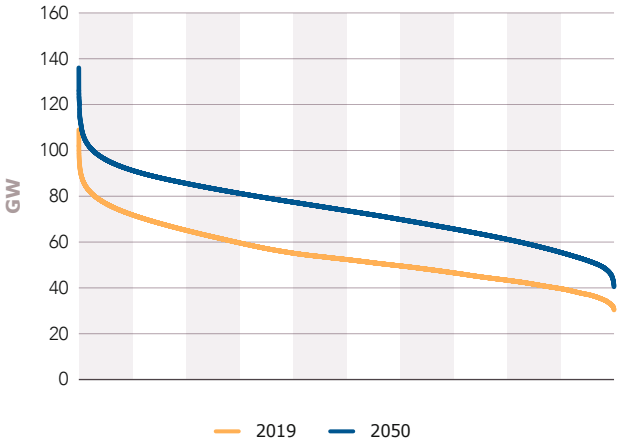
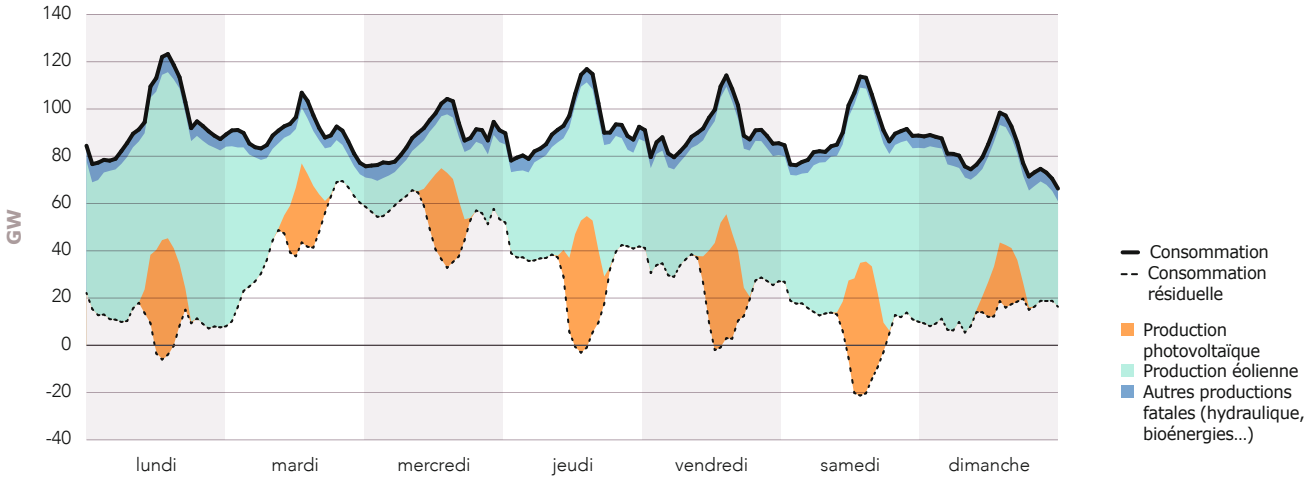


Figure 3.44 Écart entre consommation totale et consommation résiduelle



3.8.6 La flexibilité de la consommation permet de limiter le recours aux moyens de production et de stockage pilotables pour couvrir les pointes de consommation résiduelle

La pointe à couvrir par des moyens pilotables est historiquement représentée par la pointe de consommation à une chance sur dix. Cet indicateur a peu à peu perdu de sa pertinence avec (i) le développement de productions renouvelables variables et fatales (notamment éoliennes et photovoltaïques) et (ii) la flexibilité croissante de la consommation.

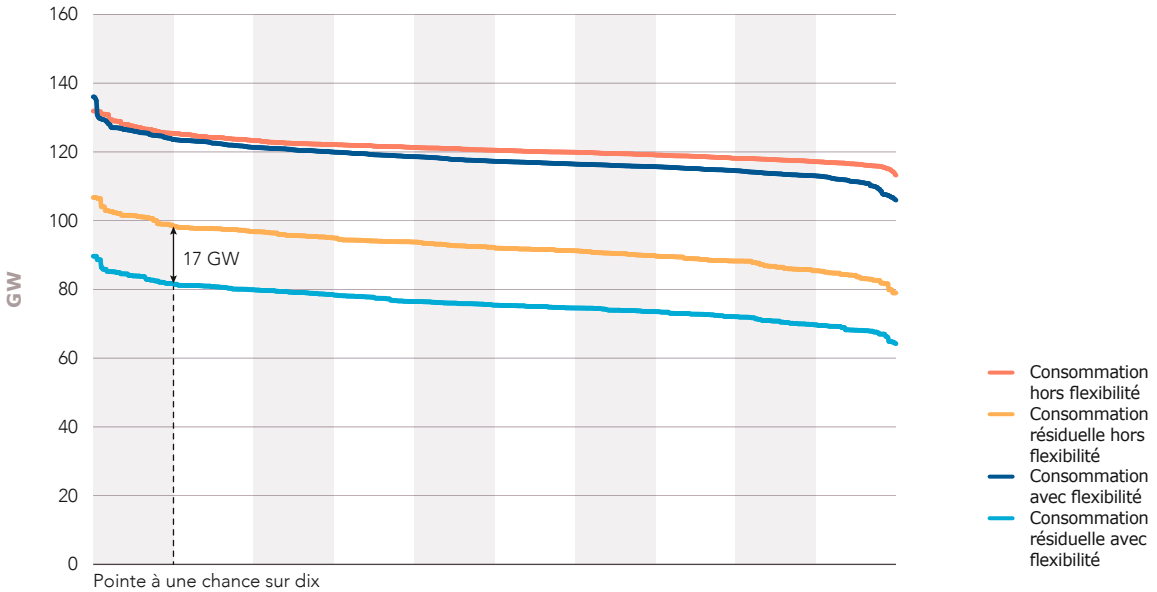
L'indicateur représentatif de la production à couvrir par les moyens pilotables est désormais la pointe à une chance sur dix de la consommation résiduelle après application des flexibilités. Cet indicateur est fonction des mix de production, et varie entre 82 GW et 88 GW dans les différents scénarios étudiés.

Un point notable est le bénéfice apporté par la flexibilité de la consommation. Sans flexibilité de la consommation, les pointes à couvrir par les moyens pilotables seraient significativement plus élevées. Ce bénéfice apporté sur la consommation résiduelle par les flexibilités est aujourd'hui de 3 GW et sera en 2050, selon les scénarios de l'étude, compris entre 16 GW et 18 GW.

Le graphique ci-après permet d'illustrer la réduction apportée par la flexibilité du système.

Des analyses détaillées sur la contribution de la flexibilité de la demande et des autres moyens de flexibilité (stockage, production thermique…) à la sécurité d'approvisionnement sont présentées dans le chapitre 7.

Figure 3.45 Monotones des pointes de consommation en 2050



LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION
À L'HORIZON 2050

Consommation finale d'électricité par secteur : Industrie, Résidentiel, Tertiaire, Transport, Hydrogène

SCÉNARIOS

	HYPOTHÈSES	NIVEAU 2050	PRINCIPALES ÉVOLUTIONS
Référence	Électrification progressive (en substitution aux énergies fossiles) et ambition forte sur l'efficacité énergétique (hypothèse SNBC). Hypothèse de poursuite de la croissance économique (+1,3% à partir de 2030) et démographique (scénario fécondité basse de l'INSEE). La trajectoire de référence suppose un bon degré d'efficacité des politiques publiques et des plans (relance, hydrogène, industrie). L'industrie manufacturière croît et sa part dans le PIB cesse de se contracter. Prise en compte de la rénovation des bâtiments mais aussi de l'effet rebond associé.	**645 TWh**	180 TWh 134 TWh 113 TWh 99 TWh 50 TWh

	HYPOTHÈSES	NIVEAU 2050 (par rapport à la référence)	PRINCIPALES ÉVOLUTIONS (+ écart par rapport à la référence)
Sobriété	Les habitudes de vie évoluent dans le sens d'une plus grande sobriété des usages et des consommations (moins de déplacements individuels au profit des mobilités douces et des transports en commun, moindre consommation de biens manufacturés, économie du partage, baisse de la température de consigne de chauffage, recours à davantage de télétravail, sobriété numérique, etc.), occasionnant une diminution générale des besoins énergétiques, et donc également électriques.	**555 TWh** (-90 TWh)	160 TWh (-20 TWh) 111 TWh (-23 TWh) 95 TWh (-18 TWh) 77 TWh (-22 TWh) 47 TWh (-3 TWh)
Réindustrialisation profonde	Sans revenir à son niveau du début des années 1990, la part de l'industrie manufacturière dans le PIB s'infléchit de manière forte pour atteindre 12-13% en 2050. Le scénario modélise un investissement dans les secteurs technologiques de pointe et stratégiques, ainsi que la prise en compte de relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger dans l'optique de réduire l'empreinte carbone de la consommation française.	**752 TWh** (+107 TWh)	239 TWh (+59 TWh) 134 TWh (0 TWh) 115 TWh (+2 TWh) 99 TWh (0 TWh) 87 TWh (+37 TWh)

VARIANTES

Électrification rapide	La part de l'électricité dans la consommation finale s'accroît de manière plus forte que dans la SNBC. Certains usages basculent plus rapidement ou fortement vers l'électricité. C'est particulièrement le cas dans le secteur des transports, dans lequel l'adoption du véhicule électrique et l'électrification de certaines catégories de poids lourds est beaucoup plus rapide. Le transfert vers le chauffage électrique se fait également plus rapidement et de manière plus volontariste.	**700 TWh** (+55 TWh)	192 TWh (+12 TWh) 139 TWh (+5 TWh) 120 TWh (+7 TWh) 125 TWh (+27 TWh) 50 TWh (0 TWh)
Moindre électrification	La part de l'électricité dans la consommation finale augmente de manière moins forte et moins rapide que dans la SNBC. Dans l'industrie, par exemple l'électricité ne parvient pas à être compétitive et la bascule vers l'électrification se fait moins rapidement. Il en est de même pour le transfert vers la mobilité électrique (véhicules légers et lourds) et vers les dispositifs de chauffage électrique dans les secteurs résidentiel et tertiaire.	**578 TWh** (-67 TWh)	150 TWh (-30 TWh) 126 TWh (-8 TWh) 107 TWh (-6 TWh) 81 TWh (-18 TWh) 50 TWh (0 TWh)
Efficacité énergétique réduite	Les hypothèses de progrès de l'efficacité énergétique des équipements électriques généralement retenues ne se matérialisent pas, ou s'accompagnent de phénomènes de surconsommation au-delà de ce qui est prévu dans la trajectoire de référence. Dans le secteur du bâtiment, les objectifs de rénovation et la conversion aux pompes à chaleur ne sont pas atteints, et le taux d'atteinte des gisements d'efficacité énergétique ne dépasse pas 50% en 2050 (contre 70% dans la trajectoire de référence).	**714 TWh** (+69 TWh)	191 TWh (+11 TWh) 156 TWh (+22 TWh) 135 TWh (+22 TWh) 105 TWh (+6 TWh) 50 TWh (0 TWh)
Hydrogène +	Le développement de la production d'hydrogène décarboné connait une forte accélération conduisant à une demande finale d'hydrogène nettement plus élevée que dans la trajectoire de référence. L'hydrogène se substitue à l'électrification directe dans certains secteurs difficiles à électrifier (sidérurgie…) ainsi qu'à l'utilisation de biomasse (transport lourd, chaleur industrielle).	**754 TWh** (+109 TWh)	164 TWh (-16 TWh) 134 TWh (0 TWh) 113 TWh (0 TWh) 93 TWh (-6 TWh) 171 TWh (+121 TWh)