

L'évolution de la demande en électricité décarbonée

Par Pierrick DARTOIS

Doctorant en cryptographie post-quantique au centre Inria de l'Université de Bordeaux

Et Marie SUDERIE

Directrice de cabinet adjointe à la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF)

Sortir des énergies fossiles tout en réindustrialisant la France conduit à électrifier fortement les usages d'ici 2050. S'il existe des alternatives à l'électricité décarbonée, telles que la biomasse, leur gisement est trop limité pour couvrir les besoins futurs. Selon nos estimations, la consommation électrique de la France pourrait atteindre jusqu'à 850 TWh en 2050. Pour répondre à une telle demande électrique, une relance ambitieuse du nucléaire est indispensable.

Introduction

Aujourd'hui, le rôle majeur de l'électricité dans l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 et des objectifs climatiques européens pour 2030 (Fit-for-55) fait de plus en plus consensus parmi les grands acteurs de l'énergie et les pouvoirs publics. L'évolution des prévisions de RTE en atteste. Tandis que le bilan prévisionnel 2017 estimait que la consommation électrique devait baisser ou au mieux se stabiliser à l'horizon 2035 (RTE, 2017), le rapport Futurs énergétiques 2050 (RTE, 2021) estimait qu'elle devait croître progressivement pour atteindre 550 à 750 TWh d'ici 2050 (contre 475 TWh aujourd'hui). Le dernier bilan prévisionnel (RTE, 2023) estime que la consommation pourrait atteindre 580 à 640 TWh dès 2035 dans le scénario de référence. Dans les scénarios de l'ADEME (ADEME, 2022), la consommation d'électricité ne pourrait baisser d'ici 2050 qu'avec des efforts de sobriété considérables.

Si l'électricité est aussi importante, c'est non seulement parce qu'elle contribue à l'atteinte de nos objectifs climatiques, mais aussi parce qu'elle est devenue un enjeu stratégique dans le contexte géopolitique actuel. Produire de l'électricité en France, permet de s'affranchir des combustibles fossiles importés et de réindustrialiser le pays. En nous appuyant notamment sur notre étude « Couvrir nos besoins énergétiques » éditée par la Fabrique de l'Industrie (Dartois et Suderie, 2023), nous expliquerons le rôle de l'électricité dans la transition énergétique et sa déclinaison dans différents secteurs.

Électrifier pour décarboner

Guidée par des objectifs communautaires et nationaux, la France doit réduire ses émissions de 50 %

d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990 et atteindre la neutralité carbone en 2050. Bien qu'elle dispose déjà d'un des mix électriques les moins carbonés parmi les pays développés, principalement grâce à sa production nucléaire, l'électricité ne représente qu'un quart de sa consommation énergétique. En 2021, les énergies fossiles représentaient 58 % de la consommation d'énergie finale. Pour atteindre ses objectifs climatiques, la France doit y substituer des énergies bas carbone (électricité, biomasse et chaleur renouvelable).

La stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC) envisage d'y parvenir grâce à une baisse de la consommation d'énergie finale de 44 % d'ici 2050 grâce à des gains d'efficacité énergétique et la sobriété, une électrification des usages (à hauteur de 56 %), le développement de la chaleur renouvelable (pompes à chaleur) et un très fort recours à la biomasse (2 fois le niveau de consommation actuel). Plusieurs acteurs, notamment RTE et France Stratégie (2021), alertaient sur l'ambition très forte de l'ex-stratégie nationale bas carbone (SNBC), ancêtre de la SFEC, en matière de mobilisation de la biomasse. Bien que l'ambition de la SFEC soit plus modeste que la SNBC (340 TWh contre 460 TWh), l'ambition reste élevée et la production française de biomasse pourrait ne pas couvrir les besoins nationaux. Produire des agrocarburants et du biogaz pourrait entrer en concurrence avec l'alimentation humaine, et par ailleurs, l'augmentation des prélèvements de bois pour la production d'énergie pose question en raison de la dégradation des puits de carbone forestiers depuis 2014 (CITEPA, 2023). C'est pourquoi la SFEC nuance ses propres estimations : « Il convient de souligner que les objectifs fixés dans le présent document pour la production de chaleur renouvelable, de biogaz ou de biocarburants, sont étroitement liés à la disponibilité suffisante de biomasse. Ces objectifs ne pourront pas

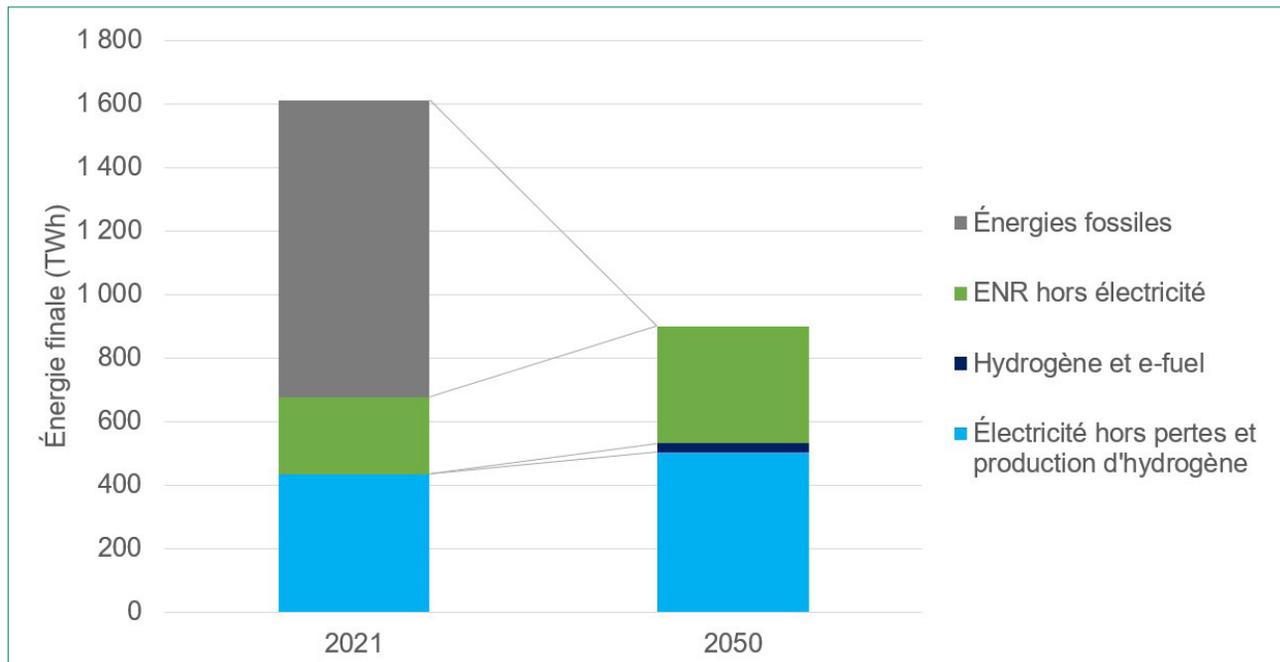


Figure 1 : Consommation d'énergie finale en 2021 et en 2050 selon les projections de la SFEC (Source : ministère de la Transition énergétique, 2023).

tous être atteints en cas d'évolutions défavorables de cette disponibilité. » (SFEC, 2023, p. 87).

À moyen terme, les documents de la planification écologique publiés par le Secrétariat Général à la Planification Écologique alertent déjà sur les tensions d'approvisionnement en biomasse à l'horizon 2030 (SGPE, 2023). Sur la base de ces considérations, nos modélisations (Dartois et Suderie, 2023) ont été volontairement prudentes sur la biomasse agricole, et en particulier sur le biogaz¹, ce qui implique une électrification accrue.

Dans le bâtiment et les transports, l'électricité est le vecteur énergétique le plus efficace

Le secteur du transport routier a consommé 466 TWh en 2021, dont 92,5 % de carburants fossiles (SDES, 2023). Compte tenu des contraintes très fortes sur la biomasse, l'électrification de ce secteur est indispensable à sa décarbonation, notamment parce que l'électricité est le vecteur énergétique le plus efficace. Tandis que le rendement d'un moteur thermique se situe autour de 30 %, celui d'un moteur électrique peut atteindre 90 %. Le vecteur hydrogène parfois promu comme une alternative est moins efficace en raison des pertes de conversion. L'électricité doit être convertie en hydrogène par électrolyse (avec rendement de 65 à 70 %), l'hydrogène stocké et transporté, puis reconverti en électricité par une pile à combustible à bord du véhicule

(avec un rendement de 50 %). Le rendement global (du puits à la roue) est comparable à celui des véhicules thermiques. Le bilan est encore pire pour les carburants de synthèse dont la production nécessite elle-même de l'hydrogène combiné avec du CO₂ issu de la gazéification de la biomasse ou capturé à la sortie de sites industriels émetteurs². L'usage le plus rationnel de ces deux derniers vecteurs énergétiques est de les réserver en priorité aux secteurs particulièrement difficiles à électrifier (transport aérien, maritime et fluvial...).

Ainsi, dans nos travaux de modélisation (Dartois et Suderie, 2023), le parc de véhicules légers est quasi-complètement électrifié à l'horizon 2050 et nous avons retenu un mix technologique diversifié pour les poids lourds (électricité pour les courtes et moyennes distances, biogaz et hydrogène pour les longs trajets). En 2050, le transport routier consomme 125 TWh d'électricité directement et pour la production d'hydrogène et 19 TWh de biogaz. L'électrification de ce secteur permet donc d'importantes économies d'énergie mais nécessite de mettre en service de nouvelles sources d'électricité bas carbone.

Dans le secteur du bâtiment, l'électrification devrait aussi s'imposer à l'horizon 2050. Si l'isolation permet de réduire des consommations énergétiques de 30 % dans le cas d'une rénovation performante (RTE et ADEME, 2020), elle ne peut suffire à elle seule à décarboner un secteur très consommateur d'énergies fossiles (213 TWh de gaz et 80 TWh de fioul en 2021).

¹ En revanche, elles étaient sans doute trop optimistes sur le bois-énergie, car elles s'inscrivaient dans la trajectoire de la SNBC, sur la base d'une étude de l'INRA et de l'IGN (2017) qui devrait être révisée prochainement.

² Sur le sujet des carburants de synthèse, nous recommandons la lecture du rapport de l'Académie des technologies sur les carburants d'aviation durables et son complément plus récent (Académie des technologies, mars 2023 ; Académie des technologies, octobre 2023).

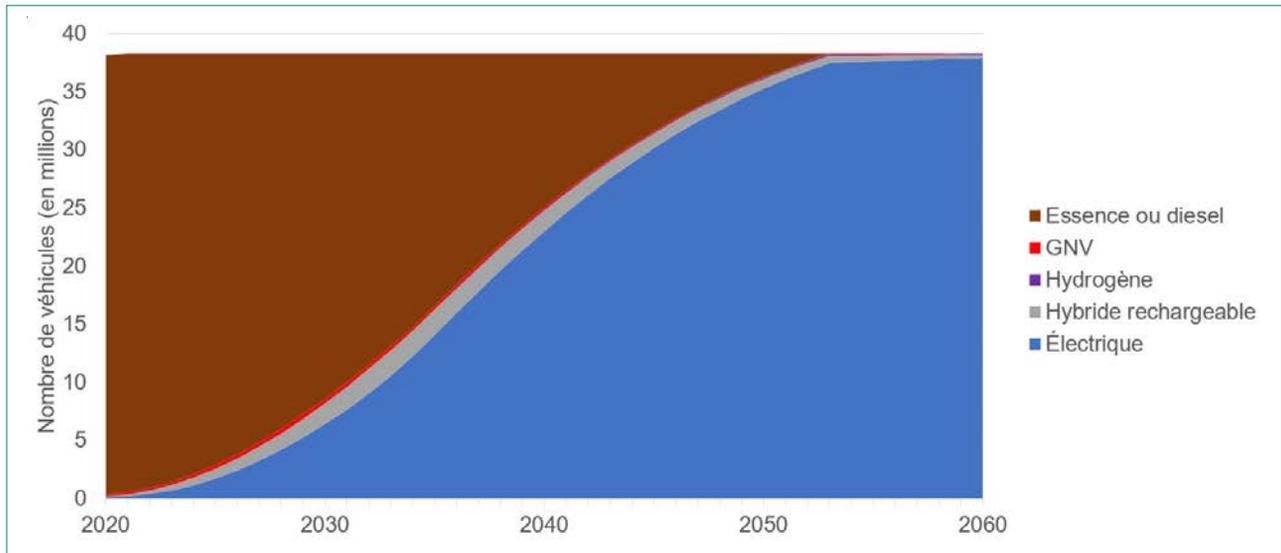


Figure 2 : Évolution du parc de véhicules particuliers entre 2020 et 2060 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

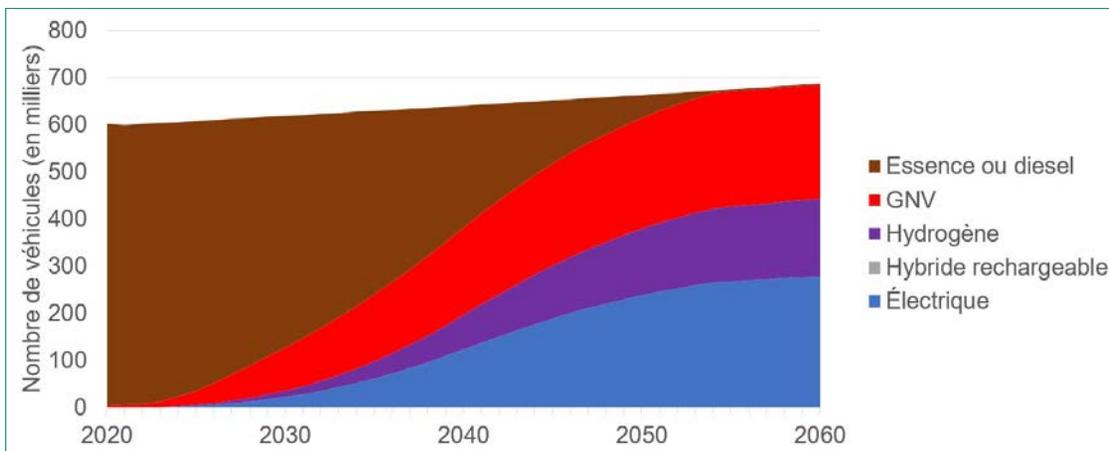


Figure 3 : Évolution du parc de poids lourds entre 2020 et 2060 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

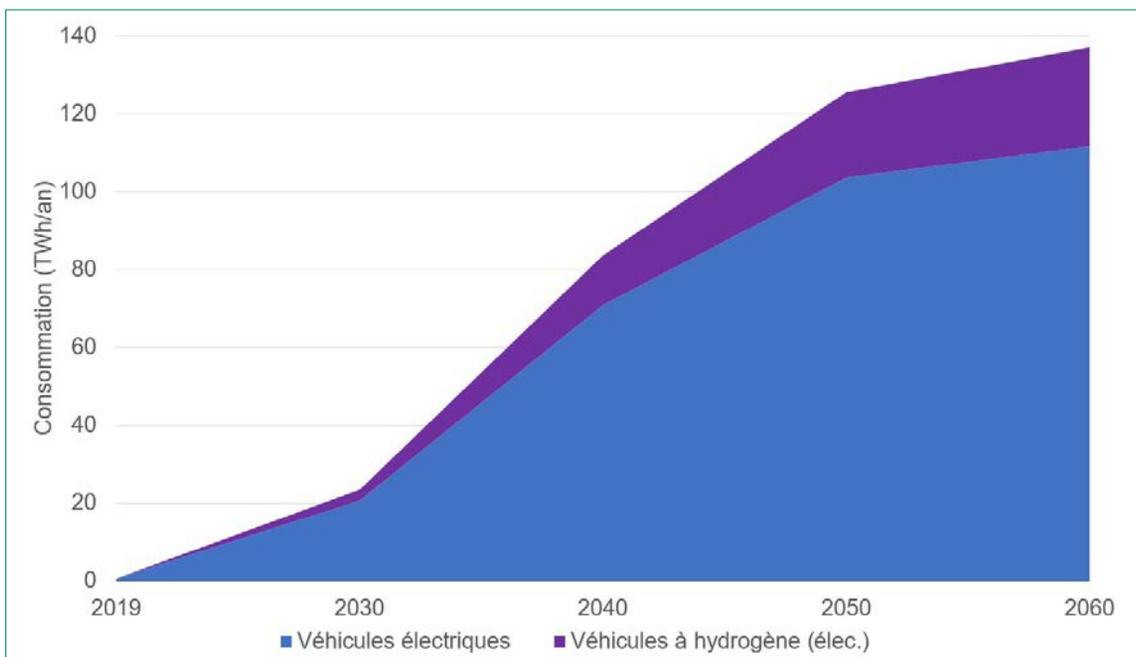


Figure 4 : Consommation d'électricité des véhicules électriques et à hydrogène (Source : Dartois et Suderie, 2023).

À quel besoin répond un programme de nouveau nucléaire ?

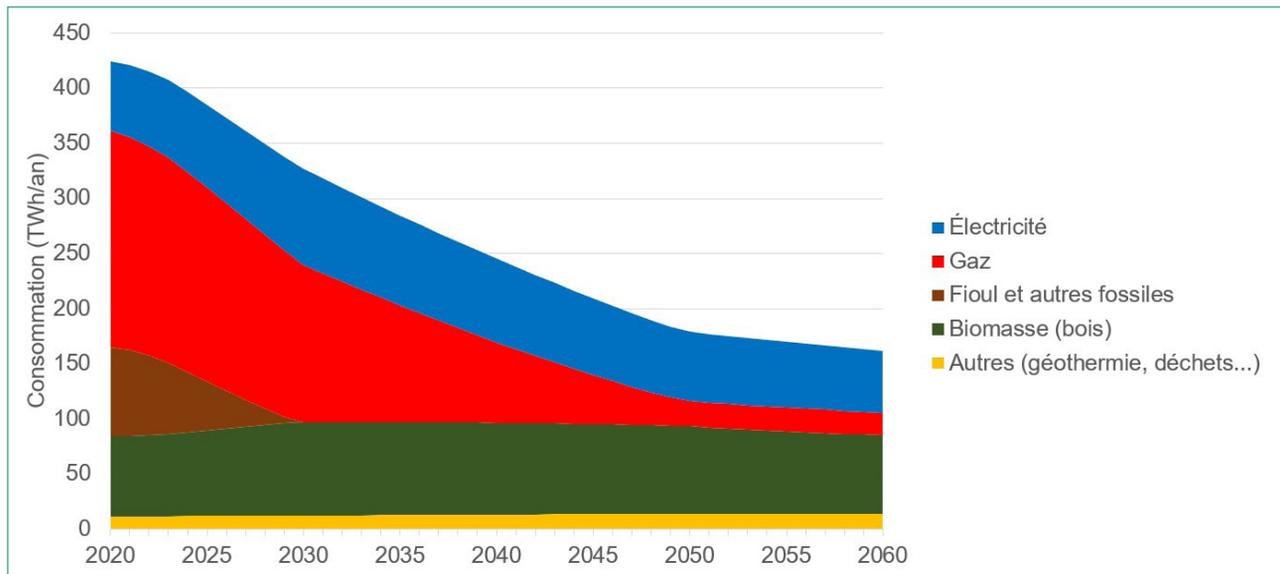


Figure 5 : Répartition de la consommation énergétique liée au chauffage résidentiel et tertiaire par source d'énergie (Source : Dartois et Suderie, 2023).

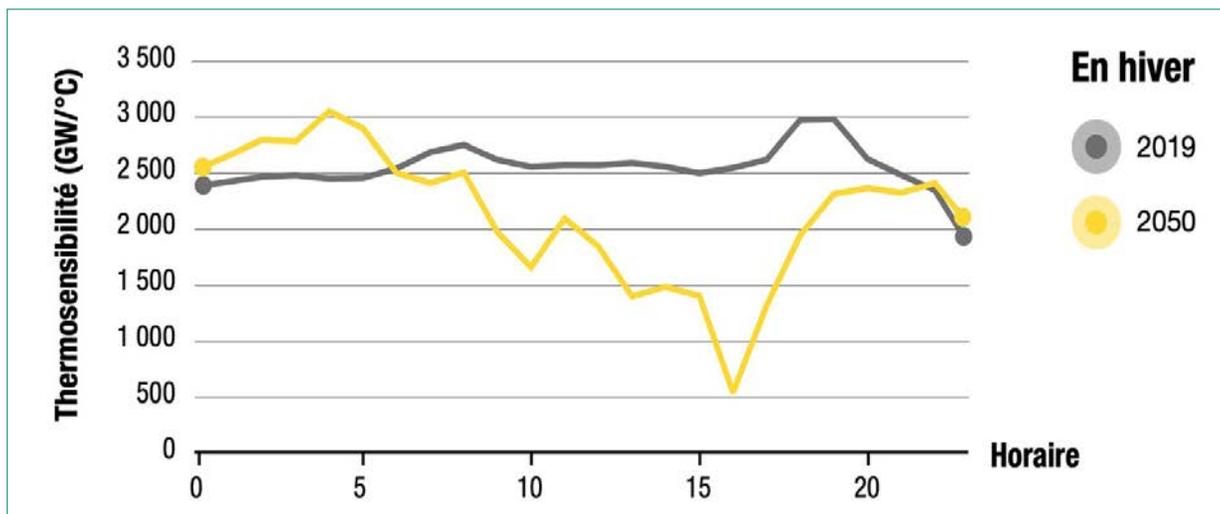


Figure 6 : Évolution de la thermosensibilité hivernale entre 2019 et 2050 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

Le gisement limité de biogaz, réservé prioritairement à l'industrie, doit conduire à privilégier l'électrification.

De même que pour les transports, le vecteur électrique est le plus efficace. En exploitant l'énergie de l'air ambiant, une pompe à chaleur classique restitue 3 kWh de chaleur pour 1 kWh d'électricité. Dans nos modélisations (Dartois et Suderie, 2023), le déploiement généralisé de cette technologie devrait permettre de passer la part de l'électricité dans le chauffage des bâtiments de 26 à 74 %, de sortir du fioul en 2030 et de diviser la consommation de gaz par 10 en 2050. Pour autant, la consommation d'électricité pour le chauffage serait maintenue à son niveau actuel (63 TWh) grâce à la rénovation thermique et à l'efficacité des pompes à chaleur. L'explosion de la pointe électrique en hiver en raison du chauffage n'est donc pas à craindre, puisque

la thermosensibilité³ de la consommation électrique devrait même légèrement baisser.

L'électricité est essentielle à la décarbonation et à la relance de l'industrie

Avec 19 % des émissions de gaz à effet de serre en 2021, l'industrie est le troisième secteur le plus émetteur en France derrière les transports (30 %) et l'agriculture (19 %) (SGPE, 2023). Si les émissions du secteur se sont réduites de moitié depuis 1990, c'est en grande partie à cause de la désindustrialisation. Il

³ Pour rappel, la thermosensibilité est la variation de la consommation électrique par degré de moins en hiver. Elle se situe autour de 2,5 GW/°C aujourd'hui.

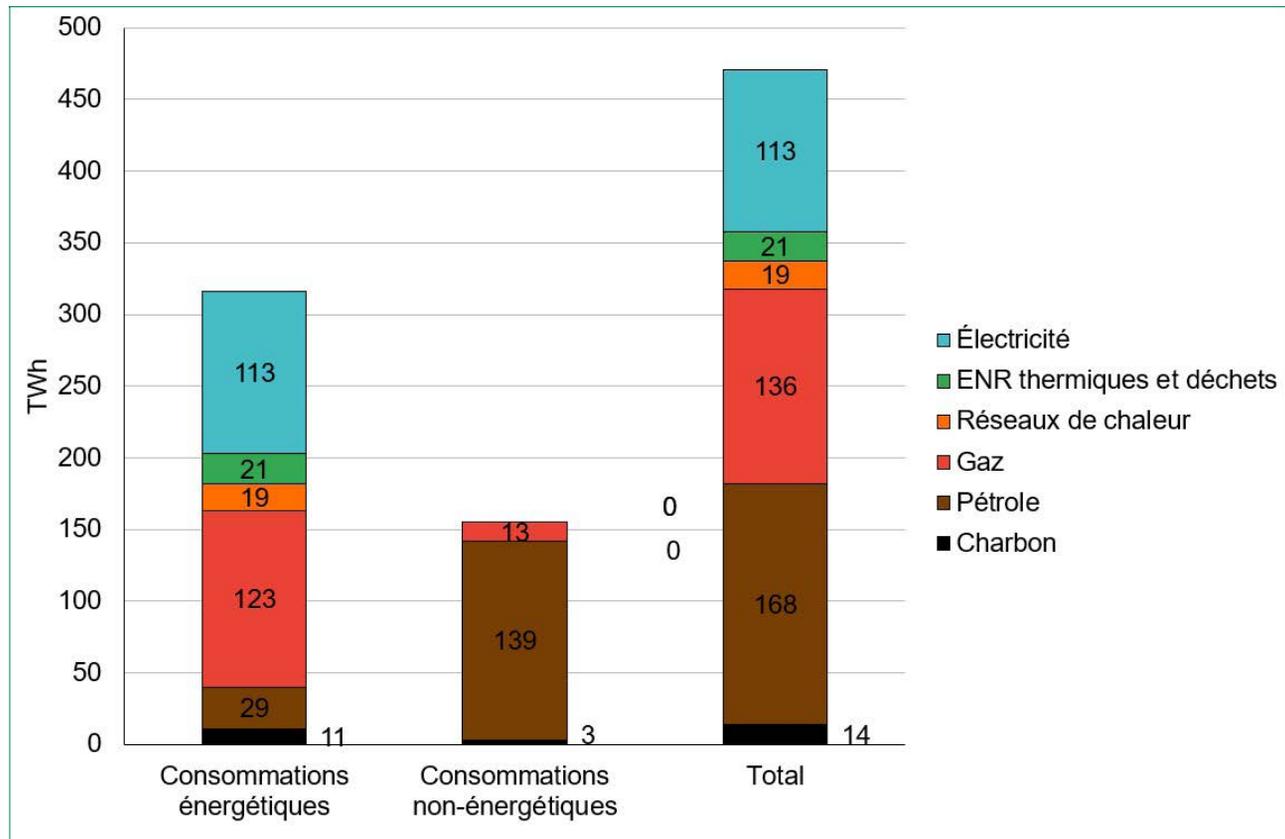


Figure 7 : Consommations d'énergie dans l'industrie en TWh (Source : SGPE, 2023).

n'est donc guère surprenant que la part des importations dans l'empreinte carbone des Français n'ait fait qu'augmenter depuis, passant de 39 % à 51 % entre 1995 et 2021 (SDES, 2022).

L'industrie française reste aujourd'hui très dépendante des combustibles fossiles. En 2021, charbon, pétrole et gaz représentaient 52 % des consommations énergétiques de l'industrie et la totalité des consommations non-énergétiques (en tant que matières premières pour la plasturgie, les engrais et la métallurgie).

Outre leur usage « matière », les combustibles fossiles servent principalement à produire de la chaleur. La biomasse peut s'y substituer facilement mais son gisement étant limité, elle ne doit prioritairement être utilisée qu'en l'absence d'alternatives décarbonées, notamment pour les procédés à très haute température (par exemple pour la production de ciment). Le développement des réseaux de chaleur industriels alimentés en chaleur fatale ont aussi leur rôle à jouer. Le gisement de chaleur fatale est estimé par l'ADEME (2022) à 99,6 TWh à fin 2020, mais moins de la moitié de ce gisement est à plus de 100 °C (donc potentiellement exploitable par l'industrie). En outre, ce gisement doit être partagé avec le secteur du bâtiment (pour les besoins de chauffage) et pourrait évoluer défavorablement avec les progrès de la décarbonation. Décarboner la production de chaleur dans l'industrie est donc impossible sans une électrification massive, même avec de gros efforts d'efficacité énergétique (RTE, 2021 ; Yggdrasill, 2021).

Cette nécessaire électrification directe des procédés repose sur des ruptures technologiques importantes, des prix de l'électricité compétitifs vis-à-vis des combustibles et un soutien public dans la durée. Elle s'accompagne aussi d'une électrification indirecte, qui prend la forme d'une substitution par l'hydrogène décarboné (produit par électrolyse de l'eau). L'exemple le plus emblématique est sans doute celui de l'acier. Aujourd'hui, les usines sidérurgiques de Fos-sur-Mer et Dunkerque sont les sites industriels les plus émetteurs de France et consomment l'essentiel du charbon utilisé par l'industrie pour réduire le minerai de fer. La voie la plus prometteuse pour les décarboner complètement est la réduction directe du minerai de fer par l'hydrogène, couplée au recyclage de la ferraille dans des fours à arcs électriques (procédé DRI-EAF).

Dans son étude sur les besoins en électricité de l'industrie en 2050 réalisée pour l'Uniden, le cabinet Yggdrasill (2021) estime que la sidérurgie et la chimie seront les principaux secteurs consommateurs d'hydrogène, le reste des consommations étant plus diffuses (principalement pour les besoins de chaleur). Au total, les besoins d'hydrogène dans l'industrie pourraient atteindre 29 à 77 TWh en 2050, et viendraient s'ajouter à la consommation directe de l'industrie, qui atteindrait 180 à 271 TWh, à comparer aux 113 TWh de 2019 (Dartois et Suderie, 2023 ; RTE, 2021 ; Yggdrasill, 2021). La fourchette basse correspond au scénario de référence de RTE où la part de l'industrie dans le PIB est maintenue à 10 %. La fourchette haute provient du cabinet Yggdrasil et s'inscrit dans une trajectoire de

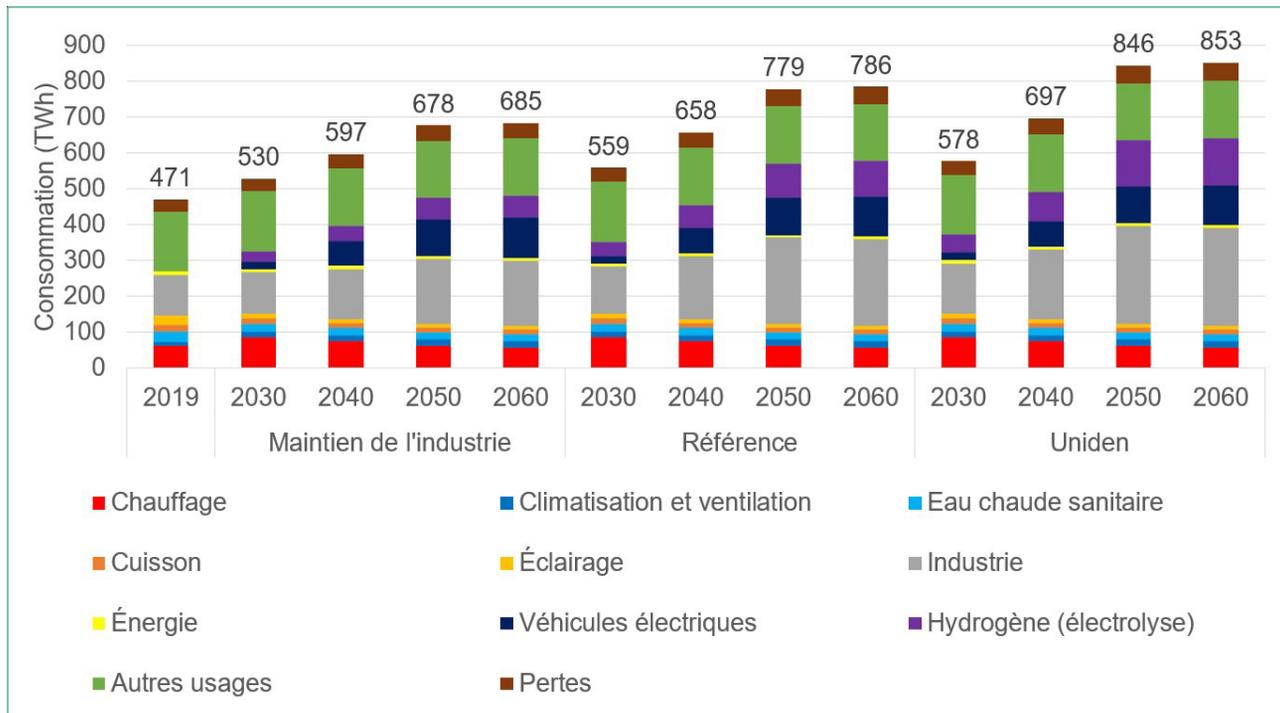


Figure 8 : Évolution de la consommation d'électricité dans trois scénarios prospectifs (Source : Dartois et Suderie, 2023).

rééquilibrage de la balance commerciale de l'industrie manufacturière dans la plupart des secteurs industriels et de forte électrification. Dans notre étude (Dartois et Suderie, 2023), cette estimation sert de référence au scénario le plus électro-intensif (dit « Uniden »), où la consommation électrique atteint 846 TWh en 2050, dont 43 % pour les seuls besoins de l'industrie.

Compte tenu des contraintes et des ambitions politiques françaises, ce dernier scénario prudent sur le gisement de biomasse et volontariste sur le plan industriel est une bonne référence sur les besoins électriques futurs. Y renoncer risquerait de conduire à un abandon de la réindustrialisation, dommageable à l'empreinte carbone de la France⁴ ou à une dépendance prolongée aux combustibles fossiles. D'où l'importance d'une production massive d'électricité décarbonée.

Conclusion

Le nucléaire à lui seul ne peut certes répondre à la hausse des consommations d'électricité d'ici 2035 et une accélération du déploiement des énergies renouvelables est indispensable à cet horizon (RTE, 2021 ; RTE, 2023). En revanche, le maintien d'une capacité nucléaire importante à l'horizon 2050 et au-delà est indispensable à la sécurité d'approvisionnement électrique. En effet, en l'absence de nouveau programme nucléaire, l'effet falaise qui commencerait en 2040 en raison de la fermeture des tranches nucléaires existantes à partir de 60 ans d'exploitation conduirait à installer 215 GW de solaire et 125 GW d'éolien à horizon

2050 pour faire face au double défi de la hausse de la consommation et de la réduction de la production nucléaire (Dartois et Suderie, 2023). Les rythmes de déploiement que cela implique (plus de 9 GW/an pour le solaire) s'approcheraient de l'Allemagne et devraient être poursuivis de 2030 jusqu'à 2060. En outre, des moyens de stockage intersaisonnier (notamment le stockage géologique de l'hydrogène) seraient nécessaires pour assurer l'équilibre offre-demande sur le système électrique à tout instant. La faisabilité d'un tel scénario pose question. De l'aveu même de RTE (2021) qui a étudié ce type de scénario de sortie du nucléaire : « Dans les scénarios où la fermeture des réacteurs nucléaires n'est pas compensée par de nouveaux, le maintien de la performance climatique nécessite un strict respect des rythmes de développement des renouvelables et implique un remplacement du gaz fossile utilisé dans les centrales thermiques par du gaz vert dès la décennie 2030-2040. Si ces conditions ne sont pas respectées, les émissions de gaz à effet de serre du système électrique augmenteront et rendront la neutralité carbone hors d'atteinte ».

Références bibliographiques

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (mars 2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables », Rapport, Paris.

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (octobre 2023), « Feuille de route vers la production de e-carburants », Avis, Paris.

ADEME (2022), *Récupération de chaleur fatale - État des réalisations et évolution du gisement à fin 2020*, Angers, La librairie de l'ADEME, coll. Expertises.

ROUX A. *et al.* (2017), « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? », étude de l'INRA et l'IGN.

⁴ RTE (2021) estime en effet qu'une politique de réindustrialisation réduirait les émissions cumulées de la France de 900 MtCO₂^{éq}, soit l'équivalent de deux années d'émissions au rythme actuel.

CITEPA (2023), « Bilan des émissions en France de 1990 à 2022 », rapport Secten.

DARTOIS P. & SUDERIE M. (2023), « Couvrir nos besoins énergétiques », éditeur la Fabrique de l'Industrie.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (2023), « Stratégie française pour l'énergie et le climat ».

MOURJANE I. & FOSSE J. (2021), « Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? », Paris, France Stratégie.

RTE (2017), « Bilan prévisionnel 2017, "Synthèse" », Courbevoie, p. 12.

RTE (2021), « Futurs énergétiques 2050 », Courbevoie, Chapitre 3, pp. 72-145.

RTE (2023), « Bilan prévisionnel 2023-2035 », Courbevoie.

RTE & ADEME (2020), « Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ? », rapport, 268 pages.

SDES (2023), « Bilan énergétique de la France pour 2021 », Paris.

SDES, BAUDE M. (2022), « L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021 ».

SGPE (2023), « La planification écologique dans l'énergie ».

YGGDRASIL & UNIDEN (2021), « Projection à 2050 de la consommation électrique de l'industrie manufacturière française ».