

Quelle consommation électrique dans une France bas carbone ?

L'ensemble des grands secteurs d'activité français sont encore majoritairement dépendants des énergies fossiles : à plus de 90% dans les transports, et à 40 à 55% dans le résidentiel, le tertiaire et l'industrie.

Les options de décarbonation explorées par les scénarios sont associées dans tous les cas (sauf un) à une hausse de la consommation électrique : elle atteint entre 520 et 840 TWh en 2050 (contre 475 TWh aujourd'hui). L'électrification dans tous les secteurs majeurs, et la production d'hydrogène par électrolyse, sont communs à tous les scénarios. Ces leviers augmentent la consommation d'électricité, et ne sont que partiellement compensés par l'efficacité énergétique, elle aussi poussée dans tous les scénarios.

La grande variabilité entre scénarios reflète des différences marquées d'orientations politiques, qui sont cependant toutes proposées dans un cadre de cohérence : l'adéquation globale entre les consommations énergétiques du scénario et les ressources qu'il mobilise pour répondre à ces consommations (électricité bas carbone, biomasse, importations).

Les politiques d'accompagnement et de facilitation de la sobriété, les politiques industrielles, l'électrification des équipements, et la production d'hydrogène sur le sol français, sont déterminantes sur la consommation française d'électricité en 2050. Le choix d'un mix électrique avec une forte proportion de renouvelables pourra également contribuer à une hausse, sensible mais modérée, de la consommation.

Enfin, un scénario propose une orientation politique privilégiant la croissance forte des services énergétiques et de la production industrielle. Par manque de ressources décarbonées pour répondre à ces orientations, la consommation d'énergies fossiles y est encore significative en 2050, requérant le déploiement massif de technologies de captation et stockage de carbone d'ici là. Ces technologies consomment alors une quantité sensible d'électricité.

Ce que vous allez trouver dans cette fiche :

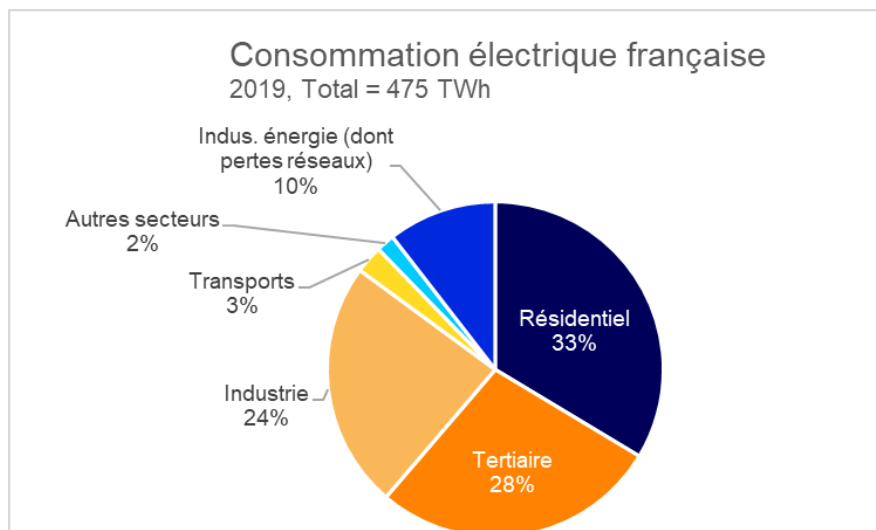
- Les évolutions possibles de la consommation annuelle moyenne d'électricité en France
- Les raisons principales de ces évolutions

Pour comprendre les enjeux de cette fiche, vous pouvez lire les zooms sur l'évolution de la consommation électrique dans les transports, dans le bâtiment et dans l'industrie, ainsi que celle sur le système énergétique et celle sur la place de l'hydrogène dans la transition.

Tous les leviers de décarbonation concernent potentiellement le système électrique

Les usages de l'électricité sont aujourd'hui concentrés dans le bâtiment résidentiel (c'est-à-dire les logements), le bâtiment tertiaire (bureaux, hôtels/restaurants, commerces, infrastructures sportives, enseignement/recherche, data centers), et dans l'industrie.

L'électricité alimente des équipements des logements ou des locaux professionnels (systèmes de chauffage, chauffe-eau, électroménager, éclairage, cuisson, hi-fi, numérique...) et des procédés industriels (production d'air comprimé, de froid, pompage, ventilation, force motrice, éclairage) en grande partie via des moteurs électriques.



Or l'ensemble des grands secteurs d'activité français sont encore majoritairement dépendants des énergies fossiles : à plus de 90% dans les transports, et à 40 à 55% dans le résidentiel, le tertiaire et l'industrie. Ces secteurs vont donc être amenés à se décarboner, et l'électrification des équipements énergétiques est l'un des leviers clés envisagés.

L'électrification pourra se combiner avec un ensemble d'autres leviers que proposent les scénarios, et qui concourent tous à l'objectif de décarbonation : évolution de la consommation en services énergétiques et en biens manufacturés ; évolution de l'efficacité des machines et équipements ; désindustrialisation ou réindustrialisation ; production d'hydrogène.

Chacune de ces évolutions peut avoir des répercussions sur le niveau global de consommation électrique des activités françaises d'ici 2050.

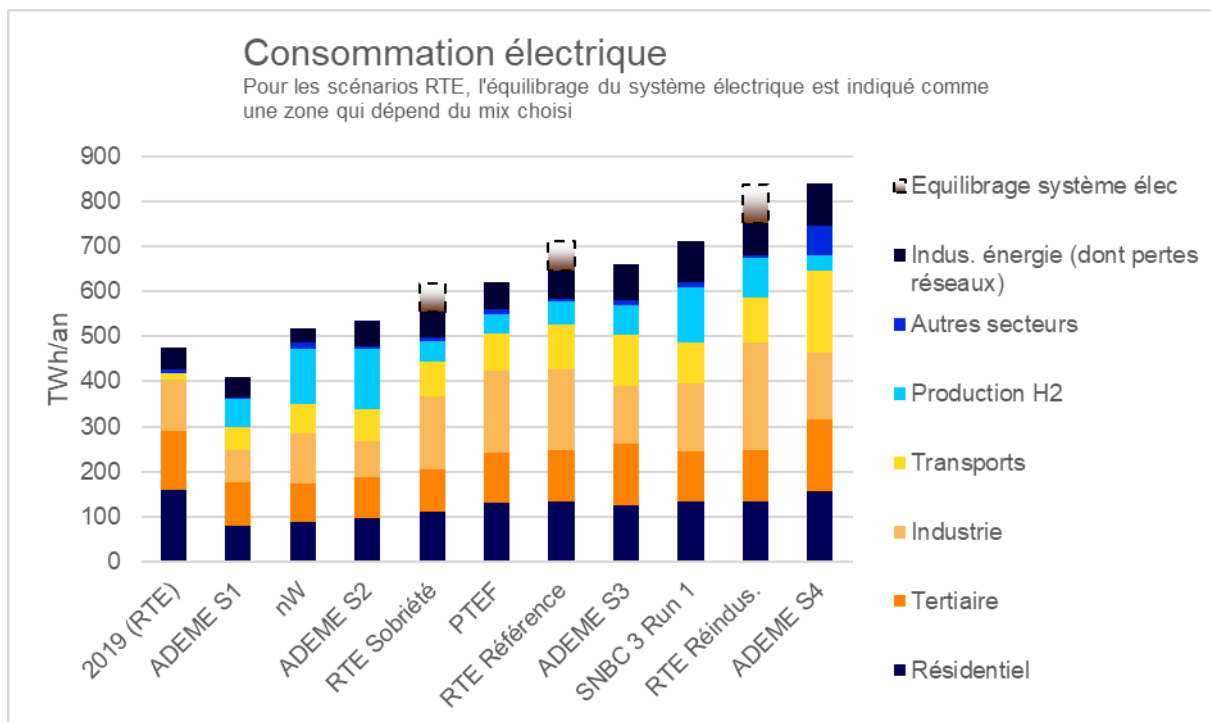
Une croissance plus ou moins marquée du système électrique français d'ici 2050, fonction d'orientations politiques structurantes

Les options de décarbonation explorées par les scénarios sont associées dans tous les cas (sauf un) à une hausse de la consommation électrique

Pour l'ensemble des scénarios (sauf S1), la consommation électrique augmente, sous les effets combinés de l'électrification dans tous les secteurs majeurs (transports, résidentiel, tertiaire et industrie) et de la production d'hydrogène (essentiellement pour alimenter certaines industries, pour équilibrer le système électrique, et dans certains scénarios pour alimenter les

transports lourds, que ce soit sous forme d'hydrogène directement ou de combustibles de synthèse fabriqués à partir de cet hydrogène). **Elle atteint entre 520 et 840 TWh en 2050 (contre 475 TWh aujourd'hui).**

Ces effets haussiers ne sont que **partiellement compensés par l'efficacité énergétique, poussée dans tous les scénarios** (essentiellement via la rénovation thermique des bâtiments, le déploiement des pompes à chaleur, des équipements domestiques plus efficaces et des équipements industriels plus efficaces).



Les différentes orientations politiques (sobriété, politiques industrielles, électrification, hydrogène) induisent une croissance du système électrique plus ou moins forte

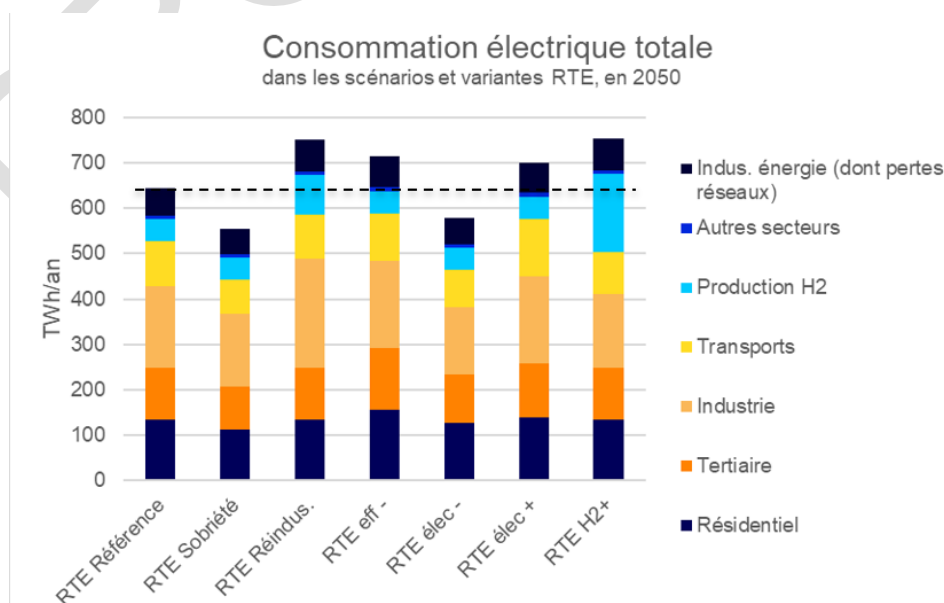
La grande variabilité entre scénarios reflète des différences marquées d'orientations politiques, qui sont cependant toutes proposées en lien avec une adéquation globale entre les consommations énergétiques du scénario et les ressources qu'il mobilise pour répondre à ces consommations (électricité bas carbone, biomasse, importations) :

- **la sobriété** est plus ou moins facilitée et accompagnée dans certains scénarios (ADEME S1, S2, nW, PTEF, RTE Sobriété), menant à des réductions de consommation de [services énergétiques] par les individus, et sur la consommation de biens qui requièrent eux-mêmes de l'énergie pour leur production (voir *fiches sur l'évolution des usages* et sur *l'évolution de l'industrie*). Dans d'autres scénarios, les modes de vie sont inchangés par rapport à aujourd'hui (RTE Référence, RTE Réindustrialisation profonde, ADEME S3). Enfin, dans S4, la consommation de services énergétiques et de biens est accompagnée à la hausse. Ces évolutions mènent à des consommations énergétiques différenciées, les évolutions vers la sobriété étant notamment justifiées par de moindres consommations d'énergie et une meilleure adéquation avec les ressources décarbonées mobilisables d'ici 2050.

- **Les politiques industrielles** restent dans la tendance actuelle (déindustrialisation), comme dans ADEME S3 et S4, ou proposent au contraire une rupture vers la réindustrialisation (nW, ADEME S1, S2, et les scénarios RTE), ce qui implique des besoins énergétiques différenciés. posant ici aussi la question de l'adéquation avec les ressources décarbonées mobilisables d'ici 2050.
- **L'électrification** est plus ou moins poussée, via le déploiement de parcs d'équipements différents, qui consomment alors plus ou moins d'électricité, et par vase communicant, plus ou moins d'autres énergies (carburants liquides, carburants gazeux, combustibles solides ou chaleur). Globalement, l'électrification est forte dans le PTEF, ADEME S4, et dans une moindre mesure pour ADEME S3, les scénarios RTE et nW.
- **L'hydrogène** est plus ou moins développé dans les transports (alimentant jusqu'à un quart du transport de marchandises dans S2) et pour accompagner l'évolution des systèmes électrique et gazier dans la transition (S1, S2, S3, nW) (voir *fiche sur la place de l'hydrogène dans la transition*). Tous les scénarios privilégient sa production à partir d'électricité (via le procédé d'électrolyse), mais une partie peut également être importée (comme dans S3).

Les scénarios et variantes d'RTE illustrent ces effets sur la consommation électrique, toutes choses égales par ailleurs par rapport à leur scénario Référence :

- L'accompagnement et la facilitation vers une sobriété (modérée) mènent à une réduction de consommation d'électricité de 90 TWh (scénario Sobriété).
- Une politique forte de réindustrialisation (Réindust.) mène à une consommation supplémentaire d'électricité de 100 TWh ;
- Une politique de fort déploiement de l'hydrogène (H2+), en particulier dans les transports lourds, mais aussi dans l'acier et la chaleur industrielle, mène à une consommation supplémentaire de 100 TWh ;
- Une politique d'électrification poussée (élec+) induit 50 TWh de consommation électrique supplémentaire (mais par vase communicant permet de moindres consommations d'autres énergies) ;
- Une politique d'électrification moindre (élec-) induit 50 TWh de consommation électrique en moins (mais par vase communicant induit des consommations supplémentaires d'autres énergies) ;
- Des politiques d'efficacité énergétique déficientes (objectifs non atteints sur les rénovations thermiques des bâtiments en termes de rythme et de qualité, sur le déploiement des pompes à chaleur, ou sur l'efficacité des voitures électriques) mèneraient à 70 TWh d'électricité consommée.



Le choix du **mix électrique induit en lui-même une potentielle consommation annuelle d'énergie pour garantir son équilibre** (en particulier la flexibilité inter-saisonnière, voir *fiche sur la flexibilité du système électrique*). Si cet équilibrage est réalisé à partir d'électricité (par exemple via une boucle électricité → hydrogène → électricité, ou une boucle électricité → hydrogène → méthane → électricité), alors il requiert environ 60 à 70 TWh pour un mix 100 % renouvelables (et aucune consommation si les renouvelables représentent moins de 60 % du mix).

Le scénario S4 présente un cas particulier : **les technologies de CCS** (y compris BECCS et DACCS) y sont déployées massivement. Elles servent à compenser la consommation d'énergies fossiles sur le territoire, qui est rendue nécessaire dans ce scénario parce que la consommation d'énergie est trop grande par rapport aux ressources décarbonées mobilisables (électricité bas carbone, biomasse). Ces technologies CCS sont consommatrices d'électricité, menant à une consommation supplémentaire sensible dans ce scénario (60 TWh).

Le scénario S1 est le seul à ne pas mener à une augmentation de la consommation électrique totale. Il repose sur une sobriété importante, sur une électrification modérée des usages et de l'industrie, et mobilise relativement peu l'hydrogène par électrolyse.

Quelle consommation électrique de l'industrie vers une société bas carbone ?

L'électricité représente aujourd'hui un tiers de l'alimentation énergétique de l'industrie française contre 55 % pour les sources fossiles.

Les différentes options de décarbonation de l'industrie, qu'elles jouent sur la consommation d'énergie de l'industrie ou sur la part de l'électricité dans cette énergie, concernent potentiellement le système électrique.

Les différents scénarios imaginent des consommations électriques pour l'industrie française de demain très contrastées, allant de 70 à 240 TWh (pour 115 TWh aujourd'hui).

Les écarts importants entre scénarios reflètent des décisions politiques de rupture ou de continuité : orientations industrielles stratégiques (continuité des mécanismes de désindustrialisation, ou rupture vers une réindustrialisation), évolutions contrastées des usages des français (continuité dans l'accompagnement des modes de vie vers plus de consommation ou rupture vers un accompagnement à la sobriété), niveaux d'électrification (avec un rythme d'électrification tendanciel, ou accéléré).

Ce que vous allez trouver dans cette fiche :

- Les évolutions possibles de la consommation annuelle moyenne d'électricité par l'industrie française
- Les raisons principales de ces évolutions

Pour comprendre les enjeux de cette fiche, vous pouvez lire les *fiches sur l'évolution de l'industrie*, sur l'évolution des usages (mobilité, logement, alimentation) ainsi que celle sur le système électrique.

Les transformations de l'industrie vers une société bas carbone posent des enjeux pour le système électrique

L'électricité représente aujourd'hui un tiers de l'alimentation énergétique de l'industrie française contre 55 % pour les sources fossiles. Ce sont ainsi 115 TWh d'électricité qui sont consommés par l'industrie.

Comme détaillé dans la *fiche sur l'évolution de l'industrie*, les scénarios posent un certain nombre d'enjeux pour l'évolution de l'industrie, liés plus ou moins directement à l'objectif de décarbonation :

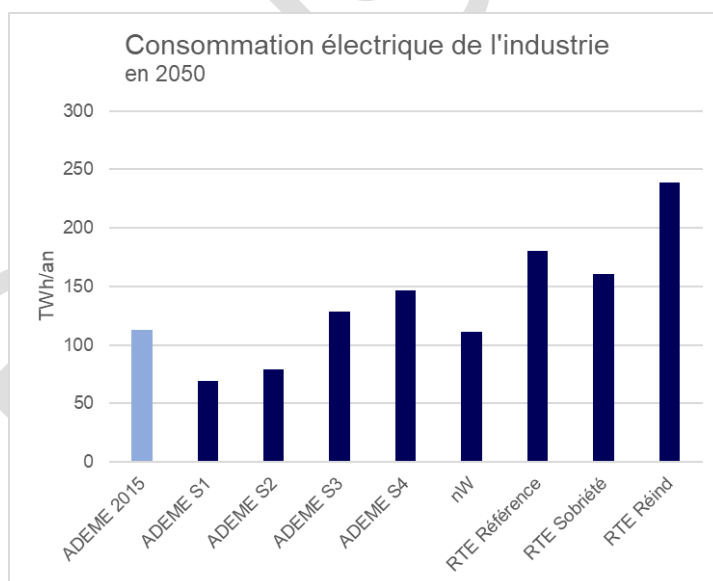
- **L'évolution de la demande intérieure pour l'industrie** (en quantité et en nature de biens), en cohérence physique avec les évolutions proposées dans les autres secteurs pour décarboner la société française. Par exemple, une proposition de réduction de la construction de bâtiments neufs doit être mise en cohérence avec une réduction de la production de ciment dans l'industrie ;

- **La possibilité de réindustrialisation**, parfois justifiée sous l'angle de la décarbonation - l'installation sur le territoire français pour bénéficier d'une potentielle énergie décarbonée, mais aussi sous l'angle stratégique (indépendance), économique, social (emploi), culturel (made in France, rayonnement des produits décarbonés français) ;
- **Les possibilités de recyclage**, permettant une baisse de la consommation d'énergie et donc une décarbonation facilitée de la production de matières premières ;
- **Les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique** des procédés industriels (amélioration des moteurs électriques, meilleure récupération de la chaleur) ;
- **Les possibilités de décarbonation** des procédés industriels et de la chaleur industrielle.

Chacun de ces enjeux, qu'il joue sur la consommation d'énergie de l'industrie ou sur la part de l'électricité dans cette énergie, concerne potentiellement le système électrique.

La consommation électrique de l'industrie pour une France bas-carbone est tributaire de décisions de rupture sur la réindustrialisation, la sobriété et l'électrification de ses procédés

Les différents scénarios imaginent des consommations électriques pour l'industrie française de demain très contrastées, allant de 70 à 240 TWh (pour 115 TWh aujourd'hui). Les scénarios RTE, y compris le scénario Sobriété, aboutissent à des consommations électriques plus élevées (supérieures à 160 TWh) que celles de tous les autres scénarios (ADEME et nW, dont les consommations sont comprises entre 70 et 150 TWh).



Cette variabilité peut s'expliquer par le **contraste des hypothèses sur deux facteurs clés** : le **niveau de production industrielle en France**, qui requiert une certaine quantité d'énergie, et le **niveau d'électrification** des procédés industriels et de la chaleur industrielle. Le recyclage des matériaux et l'efficacité énergétique des machines sont globalement proposés à des niveaux similaires entre les différents scénarios et restent assez peu différenciants.

Le **niveau de production industrielle résulte d'hypothèses sur les modes de consommation des français (voir fiches sur les usages) et d'hypothèses sur le degré d'industrialisation de la France**. Les scénarios S1 et S2 de l'ADEME imaginent une baisse

drastique de la consommation intérieure mais une relative relocalisation de la production (préférence pour le « made in France », stratégie d'exportation). Les scénarios S3 et S4 imaginent une consommation intérieure en légère baisse ou stabilisée, mais une tendance à la désindustrialisation qui se prolonge. Le scénario nW propose une baisse drastique de la consommation mais une politique forte de production sur le sol français. Enfin, les scénarios RTE proposent une augmentation sensible du niveau d'industrialisation dans toutes les branches industrielles, plus marquée pour les industries stratégiques et celles contribuant à la transition énergétique (produits électriques et électroniques, pharmacie, industrie agroalimentaire...).

Le scénario « Réindustrialisation profonde » d'RTE vise à « explorer les implications d'une reconquête industrielle assise sur une électricité compétitive et bas-carbone ». Il implique une progression importante de l'activité industrielle fondée « sur un investissement spécifique sur les secteurs stratégiques, 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 ». Cette configuration requiert environ 60 TWh d'électricité en plus que dans le scénario Référence (et 50 TWh de combustibles en plus, qui pourraient venir de la biomasse ou de l'hydrogène par électrolyse).

L'électrification des procédés et de la chaleur industriels se fait a minima de manière tendancielle, mais s'accélère dans la plupart des scénarios. Les scénarios S1 et S2 de l'ADEME proposent un usage important de la biomasse dans la décarbonation de l'industrie (et une électrification qui reste tendancielle), quand les autres scénarios (S3, S4, nW, RTE) proposent une accélération de l'électrification des procédés et de la chaleur industriels.

Les écarts importants entre scénarios reflètent des décisions politiques de rupture ou de continuité : orientations industrielles stratégiques (continuité des mécanismes de désindustrialisation, ou rupture vers une réindustrialisation), évolutions contrastées des usages des français (continuité dans l'accompagnement des modes de vie vers plus de consommation ou rupture vers un accompagnement à la sobriété), niveaux d'électrification (avec un rythme d'électrification tendanciel, ou accéléré).

Combien d'électricité pourraient consommer les transports de demain ?

L'électricité est marginale dans l'énergie qui alimente les transports aujourd'hui en France, quand les carburants fossiles en représentent plus de 90%. Or ces derniers seront difficilement remplaçables à la bonne échelle par des substituts qui seraient de même forme (des carburants liquides) tout en étant décarbonés.

L'électrification des véhicules fait alors partie des options sérieuses de décarbonation. Cela pose deux enjeux pour le système électrique français : la hausse de la consommation électrique, et l'incertitude sur cette hausse.

La consommation électrique des transports devrait très fortement augmenter selon tous les scénarios. D'environ 13 TWh aujourd'hui, elle atteindrait entre 50 et 180 TWh en 2050.

Cette hausse est très différenciée entre les scénarios, bien qu'ils proposent tous des niveaux très poussés d'électrification des voitures. Cette hausse s'explique par l'évolution du volume de transport proposés par les scénarios, en cohérence avec les modes de vie (pour le transport des personnes) et les modes de production marchands (pour le transport des marchandises) envisagés. Également, concernant le transport de marchandises, les écarts entre scénarios s'expliquent par le niveau d'électrification des camions.

Ces écarts constituent un champ des possibles pour la décision politique, mais induisent des exigences et des risques différenciés sur la capacité du système électrique à alimenter les transports de demain.

Ce que vous allez trouver dans cette fiche :

- Les évolutions possibles de la consommation d'électricité dans les transports de personnes et de marchandises
- Les raisons principales de ces évolutions

Pour comprendre les enjeux de cette fiche, vous pouvez lire les *fiches sur l'évolution des transports de personnes et de marchandises*, ainsi que celle sur le système électrique.

L'électrification des transports est un enjeu pour le système électrique français

L'électricité est marginale dans l'énergie qui alimente les transports aujourd'hui en France : elle ne représente que 2 % de l'énergie des transports (ces 2% étant essentiellement dans le ferroviaire), quand les carburants fossiles en représentent plus de 90%. Or ces derniers seront difficilement remplaçables à la bonne échelle par des substituts qui seraient de même forme (des carburants liquides) tout en étant décarbonés (fiche01, sur le système énergétique).

La décarbonation des transports de personnes (ou [mobilité] (infobulle){le concept de mobilité se réfère aux déplacements des personnes, en mettant l'accent sur le besoin exprimé et le motif des déplacements plutôt que sur les solutions techniques permettant ces déplacements. Il complète

le concept de *transports*, qui met plutôt l'accent sur les solutions techniques. Par exemple, le télétravail peut être une solution de mobilité mais ne fait pas appel au transport.}) et celle des transports de marchandises posent des enjeux différents pour le système électrique.

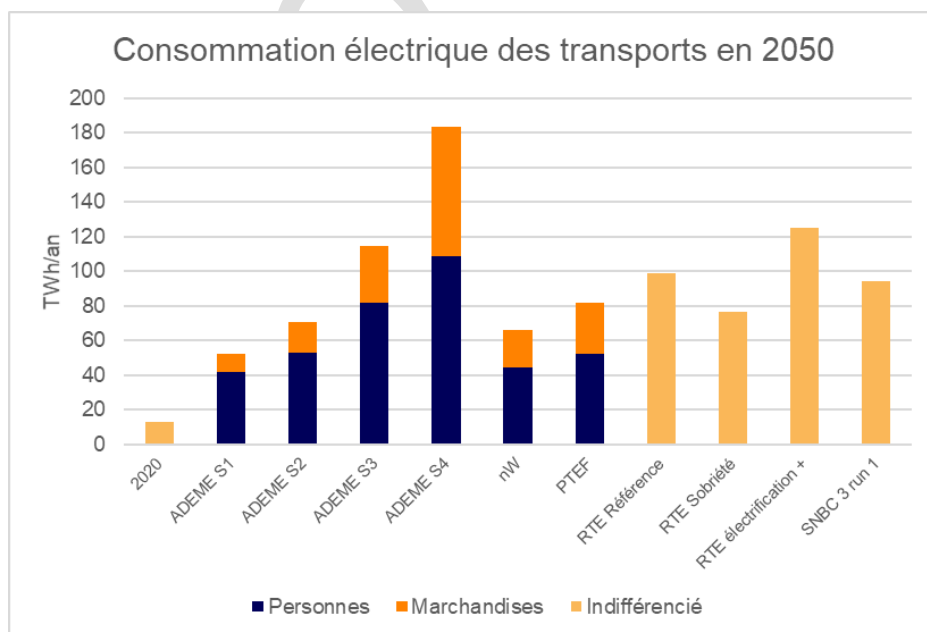
Comme détaillé dans la *fiche sur la mobilité* (fiche01) et dans la *fiche sur le transport de marchandises*, la décarbonation de la mobilité passe par un ensemble de transformations possibles, qui peuvent mener à une évolution de la consommation électrique de ces secteurs. Parmi ces transformations, l'évolution du volume global de transport et l'électrification des véhicules sont celles qui jouent le plus sur la consommation électrique future.

L'éventualité d'une électrification massive des voitures constitue un véritable enjeu pour le système électrique, de par l'augmentation sensible de consommation électrique qu'elle induirait. L'éventualité de l'électrification des camions constitue une incertitude significative sur la consommation globale d'électricité. L'électrification de l'avion de ligne, technologiquement inenvisageable à l'horizon 2050, n'est pas proposée par les scénarios. Quant à l'électrification du train de marchandises, déjà large (environ 80% du transport ferroviaire de marchandises est électrifié), elle ne pose pas d'enjeu particulier pour le système électrique.

Une hausse très significative de la consommation électrique des transports au cours de la transition

La consommation électrique des transports devrait très fortement augmenter selon tous les scénarios.

D'environ 13 TWh aujourd'hui, elle atteindrait entre 50 et 180 TWh en 2050. L'augmentation envisagée dans les différents scénarios s'explique essentiellement par les *volumes de transport* et par le *niveau d'électrification des véhicules*.



La mobilité devrait consommer beaucoup plus d'électricité qu'aujourd'hui, par une électrification très poussée du parc de voitures

La consommation électrique pour assurer la mobilité des personnes en 2050 se situe pour l'ensemble des scénarios entre 40 TWh et 110 TWh.

Ce sont les pratiques de mobilité différenciées qui expliquent en premier lieu les écarts entre les scénarios, les hypothèses sur les technologies de véhicules restant relativement proches. Les scénarios proposant des évolutions importantes dans les pratiques de mobilité vers la sobriété (réduction des déplacements, de leur distance, reports modaux, meilleurs remplissages des véhicules, vitesses réduites sur les routes, véhicules plus petits et moins puissants) aboutissent à des consommations d'électricité dans une fourchette basse (entre 40 et 55 TWh pour S1, S2, nW, PTEF, RTE sobriété, AMS) quand les scénarios proposant une continuité des pratiques, voire une augmentation de la mobilité, des vitesses, et du confort mènent à des consommations environ deux fois plus élevées (entre 80 et 110 TWh pour S3 et S4).

Les scénarios sont relativement homogènes quant à la place de l'électricité dans la mobilité en 2050 (45 à 60% du mix énergétique). Ce relatif consensus émerge de la structure de notre mobilité, dominée par la voiture, de considérations sur les possibilités technologiques pour chaque type de véhicule (voitures, bus, autocars, trains, avions) et pour différents types d'usage (courte ou longue distance) et sur la disponibilité des ressources énergétiques, qui doivent également alimenter d'autres usages (logement, tertiaire, industrie, agriculture...). L'électricité représente ainsi entre 45% et 50% de l'énergie consommée par la mobilité, pour alimenter la grande majorité des voitures, des trains, et une partie des bus urbains. Le reste (dont les avions) est couvert par les carburants liquides, les carburants gazeux (méthane), et l'hydrogène. Seul le PTEF sort de cette fourchette : l'électricité y représente 60% du mix énergétique de la mobilité des personnes, par une électrification maximale de tous les modes routiers (voitures, utilitaires, bus, autocars) et une électrification totale des trains, faisant de ce scénario un seuil haut en termes d'électrification de la mobilité des personnes (scenario01). Ce scénario proposant par ailleurs des évolutions importantes dans les pratiques de mobilité, il aboutit à une consommation électrique dans la fourchette basse.

[Extrait de la *fiche sur l'électrification des voitures* : L'électrification massive des voitures est incontournable : tous les scénarios imaginent que plus de 70% des voitures sont électriques en 2050, et quasiment tous vont au-delà des 90% (seul le scénario négaWatt propose 70% de voitures électriques, mais complétées par 30% d'hybrides « électricité-méthane »).

Ce consensus sur une électrification très poussée de la voiture est justifié par la progression technologique observée des batteries, la plus grande efficacité énergétique de la batterie par rapport aux autres solutions basées sur l'électricité (hydrogène, méthane ou liquides produits à partir d'électricité), les limitations sur les ressources biomasse qui mènent à prioriser son utilisation dans les usages difficilement électrifiables (en particulier les véhicules plus lourds ou qui doivent parcourir de longues distances). Ce consensus est nuancé par les possibles limitations d'approvisionnement en matières premières pour les batteries (lithium, cobalt et nickel) (voir *fiche sur les matériaux dans la transition*).]

La consommation électrique du transport de marchandises devrait augmenter, mais dans une large fourchette des possibles

La consommation électrique pour assurer le transport des marchandises en 2050 est encore largement ouverte à un grand nombre de possibilités jugées physiquement réalistes par les scénarios.

La place envisagée pour l'électricité dans les scénarios dépend principalement des deux facteurs suivants (voir *fiche sur le transport de marchandises*) :

- L'évolution du volume global de transport de marchandises (tenant compte de la quantité de marchandises transportée et des distances qu'elles parcourent), qui découle des transformations par ailleurs dans l'économie, en particulier dans l'agriculture, l'agro-alimentaire, la grande distribution et l'industrie. Plus le besoin est réduit (moins de tonnes transportées, sur des distances plus courtes), plus l'énergie nécessaire est faible, que ce soit de l'électricité ou d'autres formes d'énergie.
- Les énergies privilégiées pour alimenter les poids-lourds (carburants liquides, méthane, hydrogène, et/ou électricité), en cohérence avec le déploiement des véhicules appropriés et des réseaux de distribution des différentes énergies, et en tenant compte de la disponibilité de chacune de ces énergies (voir *fiche sur le mix énergétique*). Plus la part de l'électrique est grande, plus les besoins en électricité sont grands.

Les scénarios illustrent la grande diversité des futurs possibles : l'évolution du volume de transport d'ici 2050 correspond à une forte baisse (-45%) dans S1 (circuits alimentaires de proximité, réduction du gaspillage, réduction de la construction de nouveaux bâtiments, baisse de la consommation de biens manufacturés), mais à une forte hausse (+35%) dans S4 (croissance économique soutenue, France au cœur de la mondialisation, e-commerce généralisé).

Pour les véhicules routiers (utilitaires, camions), les choix de types d'énergies sont très divers, et se répartissent essentiellement entre l'électricité, le gaz, et dans une moindre mesure l'hydrogène.

[Extrait de la *fiche sur l'électrification du transport de marchandises* : Le scénario S4 et le PTEF proposent des électrifications très conséquentes des camions (65 % pour S4 et 100 % pour le PTEF) reposant sur un progrès important des batteries dans S4, et au déploiement d'une infrastructure d'[autoroute électrique] (infobulle03){Infrastructure autoroutière permettant la recharge électrique pendant la circulation des véhicules, grâce à leur connexion à cette infrastructure. Plusieurs technologies sont envisagées : caténaires (comme pour les trains), rail au sol, induction par des bobines sous la route} dans le PTEF. Les scénarios S2, S3, E+ et AMS proposent des électrifications significatives (35 à 45% du parc de camions). Quant aux scénarios S1 et nW, ils proposent une électrification inférieure à 10%, le mix étant essentiellement complété par du méthane (et par des carburants liquides pour S1).]

Ainsi, **la place possible de l'électricité dans le transport de marchandises est très variable d'un scénario à l'autre**. Elle est minoritaire dans S1 (qui privilégie les carburants liquides et le méthane issus de la biomasse, complétés par des carburants fossiles), mais quasiment totale dans S4 ou le PTEF (où le transport routier est entièrement électrifié, et seul le fluvial et une part minoritaire du ferroviaire ne le sont pas). Le scénario S1 (scénario01) représente donc un seuil bas de consommation électrique pour le transport de marchandises, avec 10 TWh : cette consommation correspond à une hypothèse de forte réduction du volume de transport de marchandises, couplée à une part faible de l'électricité pour les camions. A contrario, le scénario

S4 (scénario02) représente un seuil haut de consommation électrique pour le transport de marchandises, avec 75 TWh : cette consommation correspond à une hypothèse de forte hausse du volume de transport de marchandises, couplée à une électrification quasiment totale des camions et véhicules utilitaires. Le reste des scénarios, dans la diversité de leurs hypothèses, aboutissent à une consommation électrique du transport de marchandises comprise entre 15 et 35 TWh.

PROVISOIRE

Quelle consommation électrique des bâtiments dans une France bas carbone ?

L'électricité représente aujourd'hui une part significative de l'énergie des bâtiments mais une part importante de cette énergie est encore fossile. La décarbonation du secteur, mais également de possibles évolutions des modes de vie, devraient jouer sur sa consommation d'électricité.

En fonction des scénarios, en 2050, la consommation électrique du bâtiment devrait se situer entre 160 et 300 TWh (pour 280 TWh aujourd'hui). Ce sont entre 80 et 140 TWh pour le logement, et entre 80 et 160 TWh pour le bâtiment tertiaire. Cette baisse est associée à la rénovation thermique des bâtiments et à l'amélioration de l'efficacité des équipements.

Au-delà de la baisse de consommation envisagée par les scénarios, des incertitudes clés se profilent pour le système électrique : les éventuelles évolutions des modes de vie (25 à 50 TWh d'incertitude), le niveau de rénovation thermique (20 TWh d'incertitude) et d'électrification des chauffages (20 TWh d'incertitude), l'éventuelle montée en puissance de la consommation d'usages numériques via la croissance des *data centers* (20 à 30 TWh d'incertitude). Ils reflètent un éventail de futurs possibles, chacun associé à différents avantages, inconvénients et risques, en particulier en lien avec la disponibilité des ressources nécessaires pour assurer un niveau de confort donné, tout en atteignant une forte décarbonation de la société française.

Les besoins de ventilation/ climatisation, certes en hausse avec le changement climatique, aboutissent à une consommation modérée d'électricité en 2050.

Ce que vous allez trouver dans cette fiche :

- Les évolutions possibles de la consommation annuelle moyenne d'électricité dans les bâtiments résidentiels et tertiaires
- Les raisons principales de ces évolutions

Pour comprendre les enjeux de cette fiche, vous pouvez lire les *fiches sur l'évolution des secteurs résidentiels et tertiaires*, ainsi que celle sur le système électrique et celle sur la biomasse.

Des enjeux pour le système électrique au cours de la décarbonation du bâtiment

L'électricité alimente aujourd'hui une part significative des services énergétiques que nous rendent les bâtiments et tous leurs équipements (chauffage, cuisson, eau chaude, éclairage, lavage, divertissement...) : elle représente environ 35% de la consommation d'énergie des logements (secteur résidentiel) et 55% de la consommation d'énergie des bâtiments tertiaires (bureaux, hôtels/restaurants, commerces, infrastructures sportives, enseignement/recherche, data centers...). La consommation électrique du bâtiment (c'est-à-dire, des secteurs résidentiel et tertiaire pris ensemble) devrait évoluer avec leur décarbonation.

L'essentiel des enjeux de décarbonation du secteur résidentiel concerne le chauffage, qui génère à lui seul 82 % de ses émissions directes. Le chauffage résidentiel est majoritairement alimenté (environ 50%) par les combustibles fossiles.

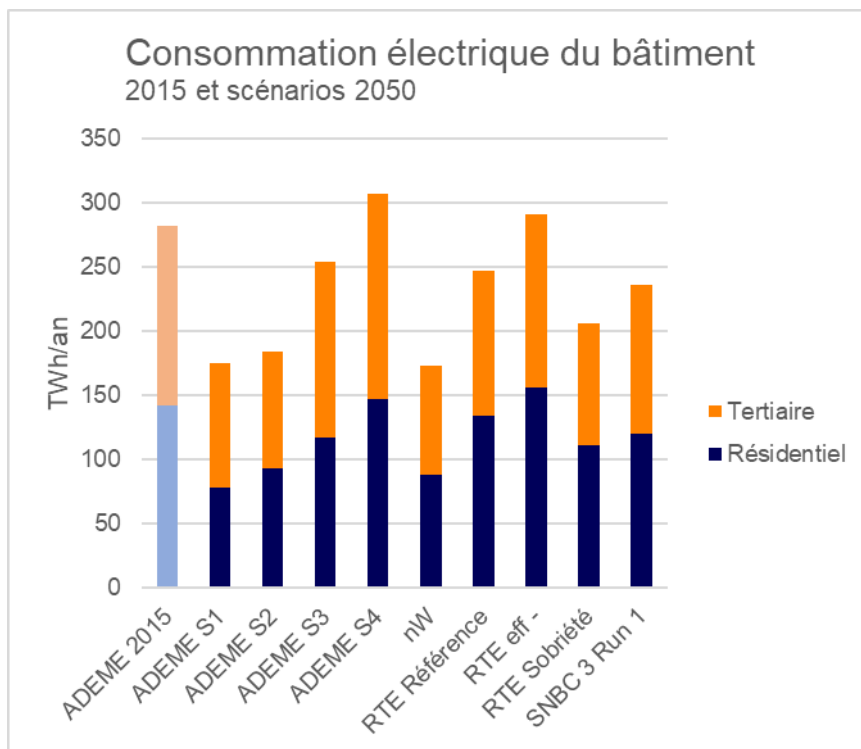
Les deux leviers proposés par la puissance publique consistent à réduire le besoin de chauffage par un effort de rénovation thermique des logements, et de décarboner le chauffage, en particulier par l'utilisation de pompes à chaleur électriques (2 à 3 fois plus efficaces que les dispositifs électriques « classiques » dits « à effet Joule »). Cela constitue en soi un enjeu pour le système électrique, et une incertitude – si la rénovation n'atteignait pas les objectifs fixés, le système électrique devrait alors compenser par une production d'électricité plus grande.

Deux autres enjeux sont relevés par RTE : l'augmentation potentielle des besoins en ventilation/climatisation avec le changement climatique, et les progrès tendanciels de consommation électrique unitaire (infobulle01){La consommation unitaire représente la consommation d'énergie à apporter à un équipement pour qu'il produise une unité de service donnée – par exemple, parcourir 1 km pour un véhicule, ou faire un cycle de lavage pour une machine à laver} des équipements ménagers.

Les enjeux sont sensiblement les mêmes côté bâtiment tertiaire, avec environ 40 % de l'énergie provenant de sources fossiles. Il faut ajouter à ces enjeux l'incertitude sur la croissance de la consommation des centres de données (data centers).

Une baisse de la consommation électrique du bâtiment au cours de la décarbonation, mais des incertitudes sur le niveau de cette baisse

La consommation électrique du bâtiment devrait se situer entre 160 et 300 TWh (pour 280 TWh aujourd'hui). Ce sont entre 80 et 140 TWh pour le logement, et entre 80 et 160 TWh pour le bâtiment tertiaire.



Une baisse de la consommation associée à la rénovation thermique des bâtiments et à l'efficacité des équipements

Un talon « incompressible » de consommation est observé, côté résidentiel comme côté tertiaire. Il se compose de :

- La consommation électrique pour le **chauffage**. Le chauffage est plus électrifié qu'aujourd'hui (sauf dans S3, qui mobilise majoritairement de la biomasse – biogaz, bois et chaleur urbaine produite essentiellement à partir de biomasse). Cette électrification se fait essentiellement par l'installation de pompes à chaleur, 2 à 3 fois plus efficaces que les systèmes de chauffage électriques classiques (dits à « effet Joule »), et dans des contextes où la thermique des bâtiments est en moyenne bien meilleure qu'aujourd'hui. Par conséquent, cette électrification mène à des consommations électriques pour le chauffage inférieures aux consommations actuelles ;
- La consommation d'électricité pour ses **usages spécifiques** (infobulle01){les usages spécifiques de l'électricité regroupent les équipements électroménagers, hi-fi, numériques, ventilation, éclairage}. Par l'amélioration progressive de l'efficacité des équipements, ce talon est inférieur à la consommation actuelle ;
- Dans le tertiaire, la consommation modérée de la **climatisation** (elle reste largement minoritaire dans le résidentiel) ;
- Et dans une moindre mesure, le chauffage de l'eau chaude et les équipements de cuisson, ainsi que les data centers dans le secteur tertiaire.

Des incertitudes significatives pour le système électrique : évolutions des modes de vie et des usages du numérique, bonne réalisation de la rénovation thermique, et niveaux d'électrification du chauffage

Une **forte variabilité existe entre les scénarios**. Elle reflète un éventail de futurs possibles, chacun associé à différents avantages, inconvénients et risques, en particulier en lien avec la disponibilité des ressources nécessaires pour assurer un niveau de confort donné, tout en atteignant une forte décarbonation de la société française.

Cette variabilité provient de propositions contrastées entre les scénarios :

- **Des évolutions contrastées des usages spécifiques de l'électricité.** Une large plage de niveau d'usage est balayée, allant d'efforts importants de sobriété (moins d'équipements, utilisés de façons énergétiquement optimale, que cela soit à la maison ou au travail) à un mode de vie « à l'américaine » (plus d'équipements, pilotés numériquement) et des locaux de travail plus spacieux, intégrant plus de services et de confort. Les gains de confort et de service se paient alors en électricité consommée supplémentaire : l'écart est de 25 à 50 TWh entre les scénarios les plus sobres (S1, S2, nW) et ceux qui régulent le moins la croissance de ces usages (S3, S4) ;
- **Des évolutions contrastées de la consommation du chauffage :**
 - la première incertitude, note RTE, est celle d'une **rénovation thermique moyenne qui pourrait être moins importante qu'espérée**, menant à une plus forte consommation pour le chauffage (environ 20 TWh d'électricité en plus seraient nécessaires, comme dans leur variante « Eff - ») ;
 - la seconde porte sur la **quantité de systèmes de chauffage qui seront électriques** d'ici 2050, allant de 30 % à 60 % en fonction des scénarios (ce qui joue par vase communicant sur la consommation de biomasse).
- **Des hypothèses contrastées sur le développement de data centers sur le territoire**, en lien direct avec les hypothèses d'usages numériques plus ou moins sobres, et alors que l'efficacité des data centers s'améliore dans tous les scénarios. La consommation électrique croit donc avec les usages numériques, menant à des écarts de consommation de 20-30 TWh entre les scénarios sobres en numérique (comme S1, S2 ou nW) et les scénarios qui ne régulent pas ou peu sa croissance (S3, S4).

La variabilité quant au niveau de demande (modes de vie, niveau de rénovation thermique atteint, usages numériques) constitue un enjeu pour toutes les énergies concernées par cette demande, puisqu'elle pose la question de la capacité à produire ces énergies d'ici 2050.

La variabilité quant au niveau d'électrification (ici, l'électrification du chauffage) constitue un enjeu de vase communicant des consommations d'énergie entre plusieurs sources d'énergie (en l'occurrence, les sources électriques et la biomasse).

Quel rôle pour le consommateur dans le bon fonctionnement du système électrique de demain ?

L'émergence de nouveaux usages électriques et l'évolution du mix électrique français vers plus de renouvelables variables rendent la gestion de la consommation électrique cruciale pour équilibrer le réseau. Les nouveaux usages constituent de nouveaux moyens potentiels d'équilibrage, quand l'intégration croissante des énergies renouvelables variables génère de nouveaux besoins d'équilibrage pour le réseau.

La flexibilité de la demande implique d'ajuster la consommation d'électricité en fonction de sa disponibilité, marquant un changement dans notre rapport à l'énergie et remettant en question notre conception traditionnelle du confort énergétique.

Tous les scénarios proposent le développement de cette flexibilité, mais à différents niveaux et selon différentes techniques. Ces orientations différentes sont proposées en cohérence avec l'adoption de nouvelles pratiques par les consommateurs et du déploiement des outils techniques permettant la flexibilité.

Ce que vous allez trouver dans cette fiche :

- L'explication du mécanisme de la flexibilité de la demande et le rôle qu'il a joué historiquement
- Les enjeux de ce levier dans la transition
- L'évolution de celui-ci
- Les raisons principales de ces évolutions
- Comment son évolution a influencé le système électrique

Pour comprendre les enjeux de cette fiche, vous pouvez lire les fiches sur les besoins de l'équilibrage du système électrique, ainsi que celle sur la flexibilité du système électrique et celle sur le système électrique.

La flexibilité de la demande électrique est un mécanisme déjà largement utilisé en France

La flexibilité de la demande électrique renvoie à la capacité des consommateurs, qu'ils soient industriels, tertiaires ou ménages, à ajuster leur consommation en fonction de la disponibilité de l'électricité. Elle se traduit concrètement par des actions telles que le décalage de la charge d'un véhicule électrique ou le report de l'utilisation d'appareils énergivores vers des moments où l'électricité est plus abondante (et donc moins coûteuse), ou encore par la réduction temporaire de la consommation (« effacement ») lors des pics de demande. Ces actions peuvent être motivées par des incitations tarifaires, pilotées par un acteur tiers, voire automatisées par des technologies dites intelligentes.

En France, la flexibilité de la demande est pratiquée depuis les années 1980. Concrètement, elle passe par le pilotage des chauffe-eau électriques via les tarifs heures creuses, ce qui permet d'absorber la production nucléaire nocturne et de lisser la pointe de consommation de 19h. Un

autre mécanisme de flexibilité de la demande est le marché de capacité, piloté par RTE, qui incite les industriels à un effacement de leur consommation. Ces mécanismes permettent encore aujourd'hui de déplacer une partie significative de la consommation électrique vers des périodes moins chargées, contribuant à une meilleure stabilité du réseau.

Des possibilités d'augmentation de la flexibilité de la demande plus ou moins exploitées en fonction de l'adoption de nouvelles pratiques par les consommateurs

La décarbonation s'accompagne d'un gisement de flexibilité de la demande en hausse

Dans le système électrique, l'équilibre instantané nécessaire entre la production et la consommation a été historiquement assuré par des **moyens de production** qui étaient flexibles, adaptant leur production pour couvrir la demande d'électricité. L'essor rapide de nouveaux usages de l'électricité, couplé à l'augmentation des moyens de production renouvelables entraînant une variabilité accrue, nécessite un équilibrage de l'offre et de la demande qu'on appelle flexibilité du système électrique.

Ainsi, la flexibilité *de la demande* est l'un des trois leviers clés de flexibilité du système électrique, avec les **interconnexions** et les moyens de **stockage**. Son développement dans les scénarios est donc pensé en lien, voire en complément, des autres leviers.

La flexibilité de la demande pourrait être facilitée par l'objectif de décarbonation de la société. En effet, la décarbonation passera par une croissance de la **consommation d'électricité** (voir fiche sur l'évolution de la consommation électrique), notamment due à l'électrification de divers procédés. Cette consommation supplémentaire pourrait être arbitrée en fonction des tensions sur le système électrique et des besoins d'équilibrage qui y sont associés. Ces interventions sur la consommation peuvent se traduire de différentes manières et constituent différents gisements pour répondre aux **besoins de flexibilité du système électrique** :

- Le report de charge devrait s'accroître : la recharge des batteries des nouveaux véhicules électriques, le chauffage de l'eau chaude sanitaire ou la **production d'hydrogène** par électrolyse sont des usages qui ne conduisent pas forcément à une utilisation instantanée de l'énergie, mais plutôt à son stockage pour une utilisation future. Ces usages sont facilement décalables dans le temps. Le report de charge des voitures électriques et de l'eau chaude sanitaire répond aux besoins d'équilibrage dits « horaires », alors que la production d'hydrogène peut répondre jusqu'aux besoins d'équilibrage dits « inter-saisonniers ».
- Le potentiel d'effacement de la demande devrait également s'accroître : la notion d'effacement des industriels ou même des entreprises du tertiaire ou des ménages consiste à diminuer sa consommation sur des temps assez courts sans forcément la rattraper plus tard. Ce potentiel d'effacement est déjà exploité par RTE à travers le mécanisme de capacité et tend à se développer avec l'électrification des procédés.

Des déploiements de la flexibilité de la demande en hausse dans les scénarios, mais différenciés en fonction des hypothèses d'adoption de ce levier par les acteurs

La flexibilité de la demande dépend de l'adoption par le consommateur et du développement de moyens de pilotabilité dans les foyers notamment. Si, pour l'hydrogène ou les procédés industriels, le développement de leviers de modulation de la demande dépendra essentiellement de considérations économiques, la flexibilisation de certains usages dans le résidentiel (véhicule électrique, chauffage, eau chaude sanitaire, usages blancs...) sera largement tributaire de son adoption par les consommateurs.

De ce fait, les prospectivistes explorent la flexibilité de manières différentes :

- L'ADEME souligne l'importance de l'adhésion des consommateurs à la flexibilité de leur consommation, et explore les différents niveaux d'implications possibles du consommateur dans ses scénarios. De ce fait, la flexibilité est largement adoptée dans S1, S2 et S3 (grâce à des offres tarifaires innovantes, des équipements de pilotage à distance, et des mesures incitatives), beaucoup moins dans S4.
- RTE, de son côté, adopte une vision uniforme de la flexibilité à travers tous ses scénarios, soulignant une complexité des choix face aux incertitudes de développement et coûts associés des technologies. La flexibilité de la demande est ainsi fixée une bonne fois pour toutes, de la même manière il fixe les capacités apportées par les interconnexions, puis complétée par plus ou moins de stockage en fonction des mix électriques.

Après avoir évalué les potentiels de développement des différents gisements de flexibilité que ce soit du côté de la flexibilité dans le résidentiel (voiture électrique, production de chaud/froid), ou bien dans l'industrie (électrolyseur, procédés industriels), et une expression du besoin de flexibilité non couvert ni par les interconnexions ni par le stockage stationnaire, tous les scénarios obtiennent une estimation de la croissance de la pilotabilité de la demande.

RTE, après avoir exploré différents niveaux de flexibilité de la demande, fixe le gisement à 17 GW de puissance moyenne effaçable. Il correspond à un développement faible des flexibilités relatives au confort des consommateurs, comme le report de charge des systèmes de chauffage, afin de réduire l'incertitude sur l'acceptation des consommateurs. L'ADEME explore une palette de puissances moyennes effaçables entre 12 et 28 GW (selon les scénarios) avec des développements contrastés entre les différents leviers suivant les narratifs de chaque scénario, afin d'éclairer les implications contrastées des différents consommateurs.

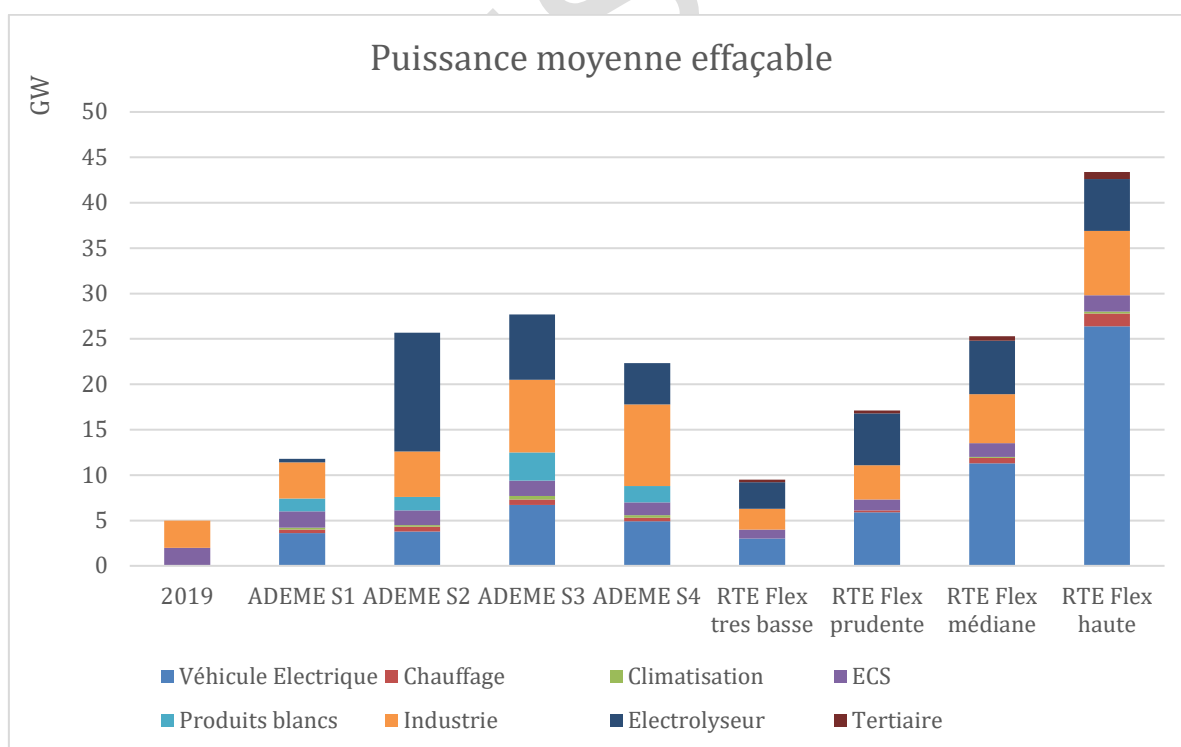
Ces gisements de flexibilité de la demande progressent dans tous les scénarios et s'étendent plus particulièrement à la recharge des véhicules électriques la production d'hydrogène par électrolyse, la production de chaleur, enfin le développement de l'effacement de certains procédés industriels.

Enfin, si une grande partie des nouveaux besoins de flexibilité pourra être couverte par des flexibilités structurelles déjà exercées et matures, tels que l'eau chaude sanitaire, et l'effacement de la demande industriels. Il reste à développer et industrialiser de nouvelles flexibilités plus fines et sur des pas de temps plus courts, comme le pilotage dynamique, la modulation à la hausse et la réinjection, dont le développement relève de la recherche.

L'opérationnalisation de la flexibilité de la demande coûte peu par rapport aux évolutions du système électrique d'ensemble mais doit être accompagné

L'intégration de la flexibilité de la demande électrique nécessite des équipements spécifiques, comme des boîtiers pour le pilotage du chauffage ou des bornes de recharge adaptées pour le véhicule-to-grid. Toutefois, les coûts associés à cette flexibilité sont généralement minimes par rapport aux coûts totaux du système électrique des scénarios étudiés. Intégrer la flexibilité directement dans la conception des bâtiments, des appareils électroniques et des véhicules engendre des coûts négligeables. En revanche, le coût augmente lorsque des systèmes dédiés, comme des boîtiers d'effacement diffus ou des bornes de recharge adaptées, doivent être déployés à grande échelle pour interfacier un grand nombre de consommateurs avec le système électrique.

Le développement de la flexibilité doit être accompagné. Pour cela, certaines études prospectives proposent quelques mesures pour favoriser le développement des gestes des consommateurs en faveur de la flexibilité (voir *fiche sur l'opérationnalisation de la flexibilité de la demande*). La sensibilisation aux enjeux du réseau électrique ainsi que les incitations économiques sont les principaux leviers d'action, et pour que le changement dans les habitudes ne soit pas perçu comme contraignant, des normes et incitations financières pour encourager le développement des technologies pilotables sont aussi recommandées par les scénarios.



**RTE explore différentes configurations, mais celle retenue pour tous leurs scénarios est la configuration "flex prudente".*