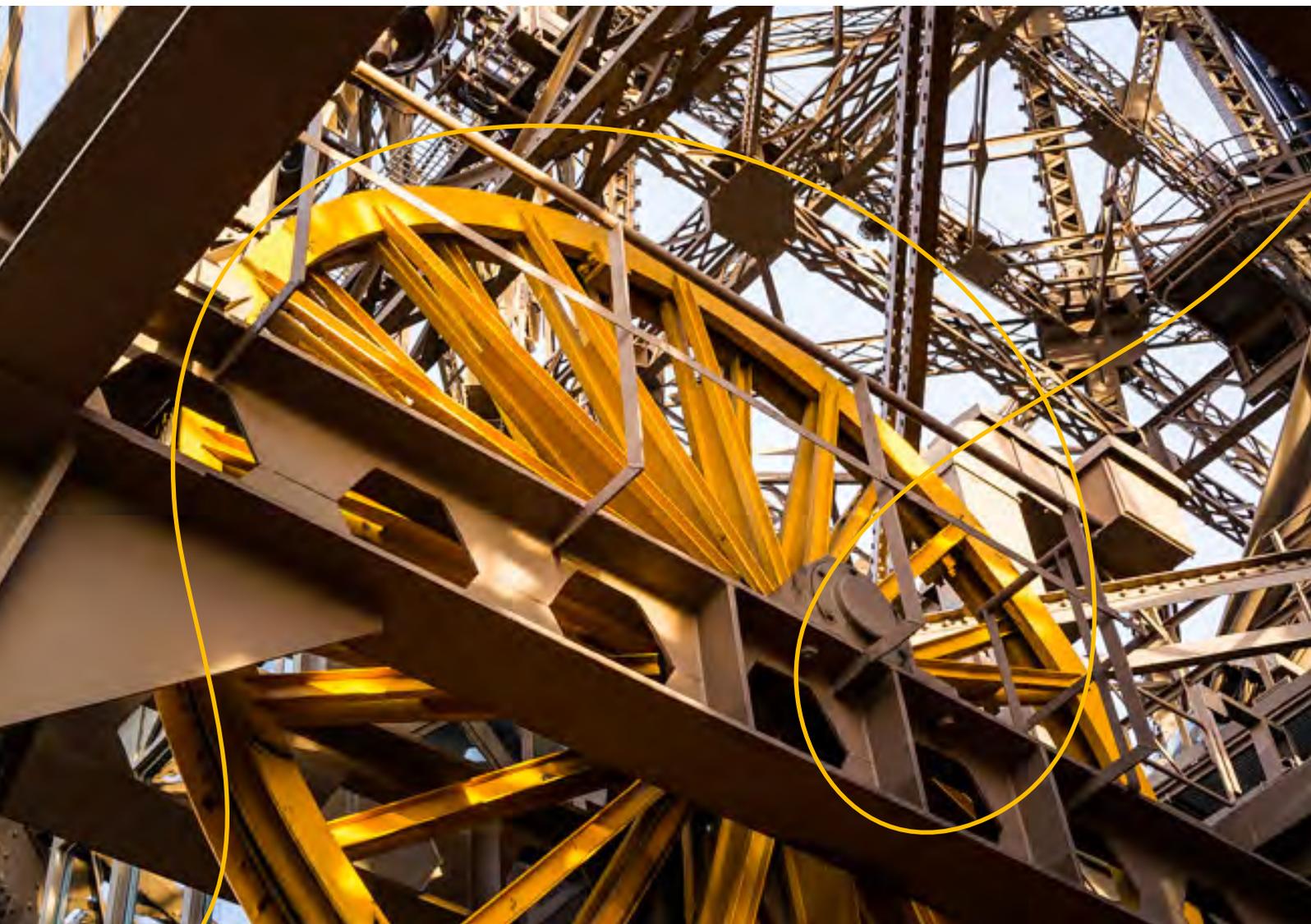




ASSOCIATION
négaWatt



4

● LE SCÉNARIO EN DÉTAIL

Scénario négaWatt 2022

4.

LE SCÉNARIO EN DÉTAIL

SOMMAIRE

4.1. Une approche méthodologique solide et complète.....	3
4.1.1. Démarche globale du scénario.....	3
4.1.2. Méthodologie et hypothèses générales.....	6
4.1.3. Deux nouveautés : impacts matières et empreinte carbone.....	9
4.2. La demande en énergies et matières peut diminuer.....	14
4.2.1. Fort potentiel de sobriété dans la construction résidentielle et tertiaire.....	14
4.2.2. Booster la performance intrinsèque des bâtiments.....	16
4.2.3. Sobriété et efficacité des équipements essentiels du bâtiment.....	23
4.2.4. Transport : de multiples enjeux et leviers.....	26
4.2.5. De nouvelles habitudes de mobilité à prendre.....	28
4.2.6. Des véhicules routiers plus sobres, plus efficaces et aux carburants décarbonés.....	35
4.2.7. Consommer et utiliser plus sobrement des produits éco-responsables.....	39
4.2.8. Demande en produits alimentaires et en produits biosourcés, et usage des terres.....	49
4.3. Matières et biens de consommation : une production repensée pour minimiser les impacts négatifs.....	51
4.3.1. Reconfigurer la production des surfaces agricoles et forestières.....	51
4.3.2. Une industrie plus locale et moins gourmande en matériaux.....	56
4.3.3. Produire en maîtrisant le recours aux ressources minérales.....	64
4.3.4. Des process industriels moins énergivores.....	70
4.4. Une production d'énergie 100% renouvelable.....	72
4.4.1. La décroissance inéluctable des énergies fossiles.....	72
4.4.2. La production d'énergie biosourcée au premier plan.....	72
4.4.3. Les autres sources d'énergie renouvelable thermique.....	77
4.4.4. L'éolien primordial pour la production d'électricité.....	78
4.4.5. Le solaire photovoltaïque investit les territoires.....	82
4.4.6. Les autres sources renouvelables électriques.....	86
4.4.7. L'empreinte matière des énergies renouvelables est limitée.....	87
4.4.8. Sans EPR, la filière nucléaire s'arrête en 2045.....	88
4.5. Faire se rencontrer intelligemment l'offre et la demande d'énergie.....	105
4.5.1. Lien entre consommation et production : quels vecteurs pour quels usages ?.....	105
4.5.2. La sécurité d'approvisionnement : enjeux et solutions.....	108
4.5.3. Une urgence : accélérer le rythme de développement des énergies renouvelables.....	112
4.5.4. Une gouvernance faisant confiance aux territoires.....	113

4.

LE SCÉNARIO EN DÉTAIL

4.1. Une approche méthodologique solide et complète

Comprendre le scénario négaWatt, c'est d'abord en saisir les postulats méthodologiques. La démarche conduit à intégrer en priorité des paramètres physiques et les flux auxquels ils sont soumis sous certaines hypothèses de sobriété, d'efficacité et de substitution. Les différents usages de l'énergie, et désormais les matériaux nécessaires à nos biens de consommation, sont listés dans cette grande matrice des flux afin que l'empreinte environnementale de toutes nos activités soit la plus minime possible. Elle ne doit pas dépasser le volume des ressources disponibles au prorata du poids démographique de la France dans le monde.

4.1.1. Démarche globale du scénario

Les experts de l'Association négaWatt ont construit le scénario en s'appuyant sur la version de 2017 et en l'enrichissant (voir section 4.1.3). Sa structure n'a donc pas fondamentalement changé car la démarche qui le sous-tend reste la même, résumée par les trois points suivants.

La demande

Sur la base des flux physiques d'énergies et de matières à l'échelle nationale, le scénario définit tout d'abord une évolution de la demande entre 2020 et 2050. Les hypothèses de changement sont élaborées au niveau des consommations d'énergie finale et de l'usage des biens de consommation. En partant ainsi des besoins de la vie courante, le scénario inverse la logique auparavant prédominante d'autres approches prospectives qui ne proposent qu'une modification de l'offre. Pour négaWatt, la demande doit être traitée en premier car c'est elle qui conditionne l'atteinte réelle de tout objectif environnemental ou social. Les leviers de sobriété et d'efficacité sont puissants

pour arriver à contenir la frénésie de consommation dans laquelle le monde s'est lancé depuis le milieu du XX^e siècle. Le premier levier permet de ramener le besoin de services au plus près de leur utilité réelle (sobriété dimensionnelle, sobriété d'usage, sobriété organisationnelle), tandis que le second cherche à réduire les pertes liées à un service (efficacité à la fabrication, efficacité à l'utilisation, efficacité des appareils, efficacité du système productif). Par ces choix structurants, le scénario négaWatt divise par deux la consommation d'énergie finale et diminue de 30% l'empreinte matière de la France d'ici 2050.

La production

Une fois les besoins étudiés dans l'ensemble des secteurs de l'économie française (résidentiel, tertiaire, transports, industrie, agriculture), le scénario négaWatt remonte la chaîne de production afin d'identifier et quantifier les ressources mobilisables pour satisfaire la demande. Tant en énergies qu'en matériaux, la priorité est donnée aux sources dont les flux sont renouvelés constamment chaque jour par la nature : le soleil, le vent, la biomasse végétale et dans une moindre mesure l'eau et les sols. Le recours à des sources d'énergie et à des matières présentes dans le sous-sol est limité autant que possible, à l'exclusion de la géothermie. L'arrêt de l'utilisation des produits pétroliers, du charbon et de l'uranium à des fins énergétiques clôt une ère extractive qui n'a pas su faire rimer progrès et protection de l'environnement. D'ici à 2050, les énergies

renouvelables et les matériaux biosourcés / recyclés prennent le dessus afin que la société réduise enfin son empreinte écologique. Là où on ne sait pas encore les remplacer, seuls quelques usages marginaux de ressources fossiles sont maintenus, notamment pour l'industrie chimique. Le dimensionnement des outils de production se fait au regard de l'état actuel de chaque filière et de son potentiel de développement futur. Lorsque c'est possible et pertinent, la relocalisation d'activités industrielles est préférée aux importations. Il ne s'agit pas d'une recherche d'autarcie car les échanges d'énergie, de matières et de biens de consommation, bien que limités, sont maintenus avec d'autres pays. Le scénario négaWatt arrive ainsi à un taux global de 94% de sources renouvelables pour l'énergie et les matières premières.

Les vecteurs

Entre les diverses ressources primaires et les multiples consommations finales, de nombreux vecteurs transportent et/ou permettent de transformer l'énergie et la matière. Le scénario négaWatt évalue dans chaque cas d'usage les vecteurs les plus appropriés en privilégiant les plus efficaces, les moins polluants, les plus disponibles, et ceux apportant plus de résilience à l'échelle d'un territoire. S'y ajoute une logique globale d'équilibre entre les vecteurs afin de réussir la bonne adéquation entre ressources, infrastructures et usages. Ainsi, au fur et à mesure de la décroissance du recours

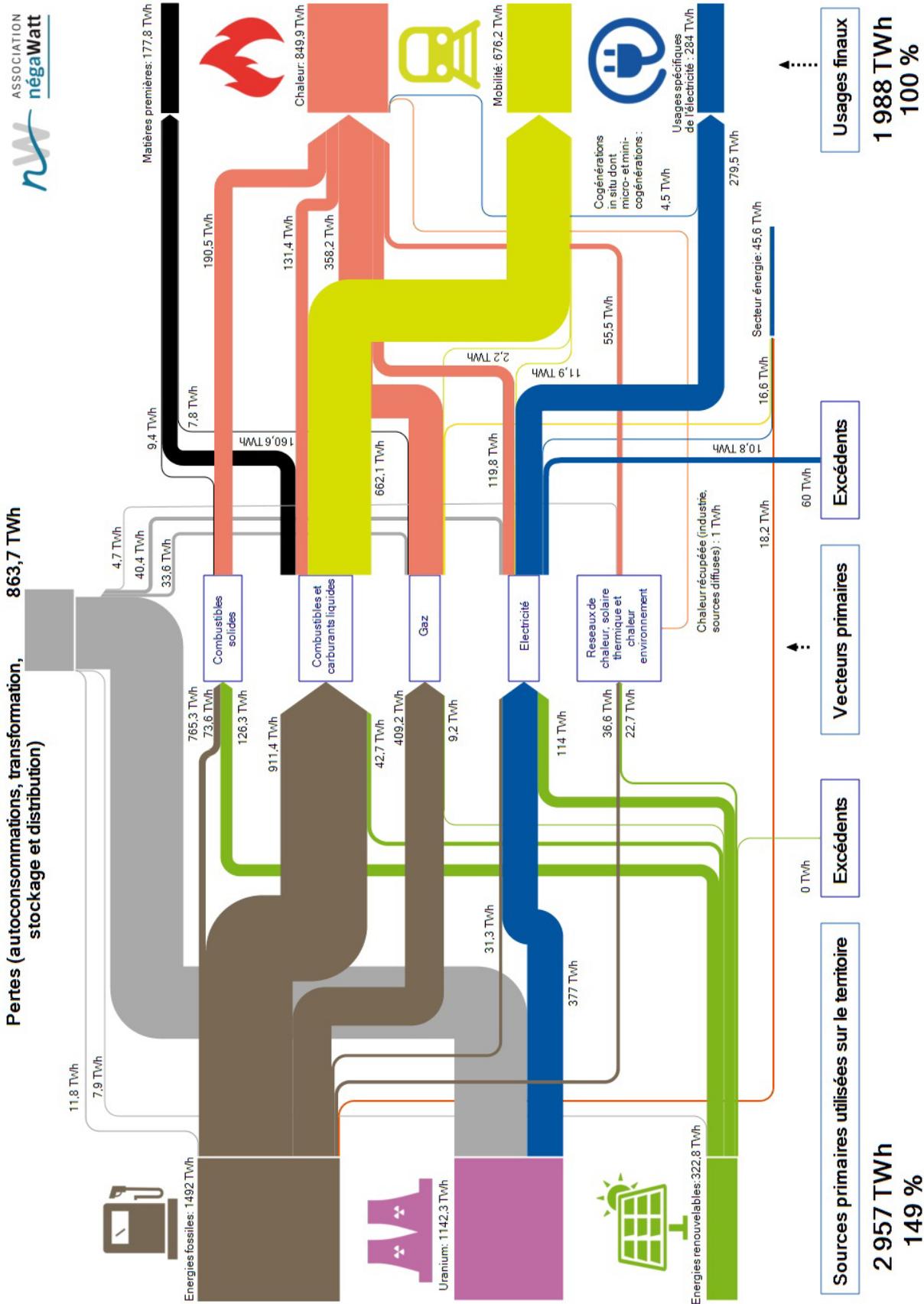
aux carburants fossiles liquides, les trois vecteurs énergétiques principaux deviennent l'électricité, les combustibles et carburants gazeux, et la biomasse solide dont les consommations finales, en 2050, sont respectivement de l'ordre de 350 TWh, 280 TWh et 100 TWh. La gestion des vecteurs intègre le pilotage dynamique des productions en fonction de leurs différentes flexibilités et des capacités de stockage. Grâce à cette approche, le scénario négaWatt maintient toujours l'équilibre entre l'offre et la demande jusqu'en 2050.

Les chapitres suivants sont structurés autour de ces trois aspects (demande, production et vecteurs) afin d'en expliquer plus finement le contenu. Certains secteurs d'activité regroupent à la fois de la demande et de la production, selon le point de vue où on se place (voir encadré suivant).

QU'APPELLE-T-ON DEMANDE ET PRODUCTION ?

La demande examinée dans le scénario négaWatt est en premier lieu celle des consommateurs finaux : besoins en chauffage, en déplacement, en alimentation, en biens d'équipements et produits de la vie courante, etc. Ces besoins, pour être satisfaits, induisent eux-mêmes une demande d'énergie et de matériaux, soit directement (l'électricité pour l'éclairage par exemple) soit indirectement (pour une ampoule LED, il faut du métal, du plastique, du verre, des composants électroniques). Pour les biens de consommation issus de l'industrie, la production de matériaux transformés induit une demande en matériaux de base qui eux-mêmes exigent une demande en matières premières. Du point de vue du consommateur final, tout cela est de la production ; mais pour les industriels, il y a différents niveaux de demande qui sont concernés. Par exemple, la construction d'infrastructures dans le bâtiment ou dans le transport entraîne une demande en matériaux qui est donc traitée en tant que telle dans le scénario négaWatt, et pas comme une production pour le consommateur final (même si dans les faits c'en est une).

Représentation des flux d'énergies : des ressources primaires aux usages



Nota :
 1) Ce diagramme n'est pas une représentation physique des réseaux, mais une représentation des flux et pertes liées aux différentes transformations des énergies depuis les sources primaires jusqu'aux usages finaux.
 2) La plupart des valeurs sont arrondies au dixième, pour ne pas alourdir le schéma. Il peut en résulter des bilans non parfaitement équilibrés.
 3) Energies renouvelables = solaire thermique et photovoltaïque, hydraulique, énergies marines, éolien, géothermie, biomasse solide et liquide, biogaz et déchets
 4) Electricité spécifique : regroupe les différents services spécifiquement rendus par l'électricité, incluant l'éclairage, l'électroménager (y compris le froid), l'informatique et l'électronique, la force motrice (moteurs électriques), etc.

Figure 1 - Diagramme de Sankey - Représentation de l'articulation entre les besoins finaux (à droite), les vecteurs d'énergie et de matières (au centre) et la production par des ressources primaires (à gauche), pour la France métropolitaine en 2019

4.1.2. Méthodologie et hypothèses générales

La méthodologie utilisée pour construire l'ensemble du scénario négaWatt est de type *bottom-up*. Elle consiste à partir de la réalité actuelle décrite par les données statistiques disponibles les plus récentes (en général 2019 pour le présent exercice) et à la faire évoluer progressivement vers l'objectif d'un système plus durable à l'horizon le plus proche possible. Cette évolution est obtenue par la mise en œuvre raisonnable d'actions volontaires de maîtrise de la consommation (sobriété + efficacité) et de développement des énergies renouvelables.

Les étapes de la construction du scénario

Côté consommation, ces évolutions sont qualifiées et quantifiées par usage, par « sous-usage » et même par « sous-sous-usage » lorsque c'est possible : par exemple la consommation d'électricité hors chauffage dans le secteur résidentiel (sous-usage de l'usage « électricité spécifique ») est évaluée à partir d'une décomposition en sept usages de base (éclairage, lavage, froid, cuisson, loisirs, gestion/hygiène et veilles) qui regroupent une vingtaine d'appareils différents (lave-linge, lave-vaisselle, ordinateurs, aspirateurs, luminaires, etc.). Une catégorie non définie intitulée « nouveaux usages » laisse la place à de possibles évolutions aujourd'hui impossibles à qualifier et *a fortiori* à quantifier (voir par exemple page 42).

Le chiffrage année par année de ces évolutions est réalisé à dire d'experts sur la base d'une généralisation progressive des meilleures technologies disponibles aujourd'hui et des meilleures pratiques. Pour cela, il

est tenu compte à la fois des opportunités existantes ou envisageables et des contraintes prévisibles. Par exemple : on peut envisager la mise en place d'une mesure incitative au remplacement d'un équipement mais elle va être contrainte par la durée de vie de ces produits. Ou on peut prévoir une obligation de rénovation des logements ce qui suppose le besoin de formation dans le secteur du bâtiment. On décrit ainsi une trajectoire de la baisse des consommations la plus rapide, la plus cohérente avec les [Objectifs de développement durable](#) mais aussi la plus réaliste possible.

La même démarche est adoptée pour la production à partir d'énergies renouvelables, filière par filière et par types d'installation à l'intérieur de chaque filière en veillant à l'équilibre offre-demande (voir encadré suivant). Tout ce qui concerne l'agriculture et l'alimentation est issu du scénario Afterres¹, un scénario de transition agricole, sylvicole et alimentaire.

Le scénario négaMat, qui traite de l'évolution des matériaux et matières premières, fonctionne sur le même principe de dimensionnement progressif des besoins et de structuration de la production selon les impacts des matériaux utilisés.

Globalement, au regard de l'urgence de l'action, un engagement politique et sociétal fort est présumé, à tous les échelons, qui ne se traduise pas seulement par la fixation d'objectifs ambitieux mais surtout par des mesures adéquates pour accélérer les évolutions dans les meilleures conditions aussi bien pour les acteurs individuels (échelle micro-économique) que pour la collectivité dans son ensemble (échelle macro-économique).

MAINTENIR L'ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE : UNE PRIORITÉ ABSOLUE

L'équilibre global entre l'offre et la demande d'énergie est regardé année par année, avec comme variables d'ajustement d'une part la réduction aussi rapide que possible de l'usage des énergies fossiles, d'autre part l'effacement programmé des réacteurs nucléaires atteints par la limite d'âge tout en conservant une certaine flexibilité dans le cadre d'une gestion responsable d'un parc vieillissant.

En particulier, le scénario négaWatt dispose d'un module permettant de calculer l'équilibre du réseau électrique dont les exigences en matière de sécurité d'approvisionnement sont très strictes. Relié aux bilans énergétiques annuels de tous les vecteurs, l'équilibre offre-demande d'électricité est assuré heure par heure jusqu'en 2050.

1. <https://afterres2050.solagro.org/>

Quels vecteurs pour quels usages ? Une question essentielle pour la soutenabilité

Les évolutions à chaque extrémité du système énergétique induisent des modifications au niveau des étapes intermédiaires de transformation et d'acheminement de l'énergie portées par différents vecteurs.

Les produits pétroliers représentent aujourd'hui plus de 45 % de nos approvisionnements en énergie finale, essentiellement pour la mobilité. Leur disparition n'est possible qu'en leur substituant d'autres vecteurs n'ayant pas les mêmes impacts climatiques (voir section 4.5).

L'adéquation de chaque vecteur à tel ou tel usage ou sous-usage est donc analysée dans le cadre d'une vision systémique se projetant au-delà de 2050. Elle intègre les problématiques opérationnelles : existence ou non d'infrastructures de stockage, transport et distribution de l'énergie, vitesse de remplissage et autonomie des véhicules, disponibilité en quantités suffisantes et/ou à coût abordable des matières premières critiques indispensables à certaines options.

Le choix prudent et rationnel des technologies à déployer

La transition écologique est un processus vital où le droit à l'erreur est inversement proportionnel à l'urgence ! Il faut à tout prix éviter de se retrouver

dans une impasse faute d'avoir identifié dès maintenant des limites et des contraintes qui peuvent être de natures très différentes (physiques, techniques, environnementales, économiques, organisationnelles, sociétales, etc.).

À l'heure où le verrou de l'orthodoxie budgétaire européenne a sauté pour faire face à la crise sanitaire de la Covid-19, le soutien public au déploiement de nouvelles technologies doit être appréhendé avec la plus grande prudence. Les dizaines de milliards d'euros injectés dans l'économie attisent déjà la convoitise des offreurs de solutions toutes faites qu'ils parent de toutes les vertus. Pour éviter de futurs déboires, leur pertinence est jaugée à partir des échelles couramment utilisées dans le monde de la recherche pour évaluer les technologies émergentes, notamment leur maturité technique (TRL pour « Technical Readiness Level »²) ou industrielle (MRL pour « Manufacturing Readiness Level »³). Dans la logique des [Objectifs de développement durable](#), une échelle de maturité environnementale et sociétale (ESRL) développée par l'Association négaWatt à partir du modèle SRL (pour « Societal Readiness Level ») de la Fondation danoise de l'innovation⁴ complète cette panoplie.

Les correspondances entre ces différentes échelles sont données dans la figure ci-dessous. Seules les technologies d'un niveau général actuellement supérieur à 7 sont retenues dans le scénario négaWatt.

Maturité des nouvelles technologies			
	Technologique (TRL)	Industrielle (MRL)	Environnementale et sociale (ESRL)
7	Démonstration du système	Prototype en environnement opérationnel	Impacts génériques estimés par modèles
8	Validation par des tests et des démonstrations	Développement et démonstration du système complet réel	Impacts analysés à partir des données réelles du pilote
9	Système réel prouvé à travers des opérations réussies	Déploiement et mise en fabrication	Evaluation systémique toutes échelles
10	Système optimisé	Production à pleine échelle	Impacts mesurés en opération
11		Déploiement massif, intégration système	Acceptabilité sociale et environnementale, mesure des effets indirects

Figure 2 - Échelles des niveaux de maturité des nouvelles technologies utilisées dans le scénario négaWatt

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level#Utilisation_des_TRL

3. https://en.wikipedia.org/wiki/Manufacturing_readiness_level

4. https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2018-08/societal_readiness_levels_-_srl.pdf

Autres éléments de cadrage

D'autres hypothèses de cadrage structurantes ont été prises dans le scénario négaWatt. La croissance démographique correspond au scénario "Fécondité basse, espérance de vie centrale, flux migratoire central" de l'INSEE⁵ qui amène à une population en France métropolitaine de 69,8 millions d'habitants en 2060 puis une stabilisation à un peu moins de 70 millions d'habitants après 2070⁶.

En revanche, aucune hypothèse économique normative (croissance du PIB, inflation, taux d'actualisation, etc.) n'est prise puisque le modèle utilisé est purement physique et que l'analyse économique est effectuée *ex-post*.

Par rapport à la précédente version, l'outil de calcul du scénario négaWatt a été réorganisé et enrichi. En plus d'être connecté à un module négaMat sur les matériaux, il permet désormais :

- de prolonger les calculs jusqu'en 2070 au pas de temps annuel et 2100 au pas de 5 années ;
- de mieux modéliser le secteur de l'industrie de l'énergie (autoconsommation des raffineries, usage de combustibles dans les raffineries et production d'hydrogène pour désulfurer les carburants, autoconsommation des digesteurs de méthanisation, consommations internes d'électricité, etc.) ;
- d'enrichir le module de calcul horaire de l'équilibre du réseau électrique avec des nouveaux moyens de stockage (batteries stationnaires) ;
- de prendre en compte comme vecteur énergétique les combustibles solides de récupération (CSR) ;
- de modéliser l'utilisation des réseaux de chaleur selon un ordre de mérite : chaleur fatale industrielle > déchets (cogénération) > déchets > géothermie > biomasse solide (cogénération) > biomasse solide > biomasse solide (chaleur pyrogazéification) > gaz (cogénération) > gaz ;
- d'intégrer une fraction d'hydrogène dans le réseau gazier existant et d'anticiper la création de réseaux dédiés à l'hydrogène pour les usages industriels et le transport ;
- de donner pour l'industrie une vision complète des quantités de matières par secteur, et de la consommation d'énergie par vecteur ;
- de calculer les émissions de tous les gaz à effet de serre pour tous les secteurs d'activités et en empreinte, avec, au choix, les coefficients d'émissions AR4 ou AR5 définis par le GIEC.

Dans le scénario négaWatt, pour rendre plus cohérents les calculs et les chiffres affichés, c'est le Pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui est indiqué pour les combustibles et les carburants (voir explication en Annexes).

5. Voir sur <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2517966?sommaire=2020101>

6. Le scénario retenu est cohérent avec le ralentissement de l'accroissement de la population métropolitaine observé ces dernières années, et avec d'autres projections internationales (Eurostat, ONU, IHME).

4.1.3. Deux nouveautés : impacts matières et empreinte carbone

La démarche négaWatt commence par l'analyse de nos besoins énergétiques avant de proposer une offre parmi différentes sources. Sur le même modèle, l'actualisation du scénario a été l'occasion de mener une démarche négaMat posant en premier la question des besoins présents et futurs en biens de consommation et d'équipement, puis dans un deuxième temps, où, comment et avec quels matériaux les produire. Ce travail a permis d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre dues à ces flux de matières. En prenant en compte les importations (et d'autres postes comme les transports internationaux), le scénario négaWatt calcule l'empreinte carbone totale de la France métropolitaine.

La démarche négaMat renforce l'aspect systémique du scénario

Ce ne sont pas des barres d'acier, ni de l'éthylène que nous achetons en magasin mais des biens de consommation et d'équipement issus de ces matériaux. Quels biens va-t-on acheter et en quelle quantité en 2050 ? Le scénario négaMat explore les solutions permettant de réduire notre empreinte en matériaux à partir de plusieurs leviers :

- la sobriété d'usage des objets entraîne une moindre nécessité de renouveler les parcs car les produits s'usent moins si l'on s'en sert moins ;
- la sobriété dimensionnelle (par exemple des tailles de voiture, d'écrans, d'appareils ménagers plus raisonnables) permet une économie de matériaux pour un service similaire ;

- l'allongement de la durée de vie par le biais de la réparation et de la réutilisation des produits implique un moindre besoin de produits neufs. La réutilisation se développe aujourd'hui avec les ventes d'occasions et les ressourceries. La réparation sera favorisée si les appareils sont démontables, si les pièces détachées sont standardisées et pérennes et les garanties prolongées. Toutes ces pratiques d'économie circulaire font dès aujourd'hui partie des objectifs du *Green Deal*⁷ lancé par la Commission européenne ;
- les innovations technologiques devront abandonner les pratiques d'obsolescence programmée bannies par la loi de transition énergétique de 2015 et se mettre au service de biens plus robustes et plus légers.

Dans le scénario négaWatt 2022, la consommation de biens neufs est calculée dans un modèle dynamique qui intègre toutes ces dimensions à travers des hypothèses de sobriété mais aussi de réutilisation et d'évolution de la durée de vie. Ce modèle calcule également la quantité de biens hors d'usage et leurs taux de collecte et de recyclage.

Le besoin de biens d'équipement et de consommation (BEC) se différencie de la production par les flux du commerce international, c'est-à-dire les importations et les exportations. Leur modélisation prospective fait l'objet d'une analyse de stratégie industrielle évaluant les possibilités de relocalisation de certaines chaînes de production (voir section 4.3.2). Enfin la consommation et la production de matériaux dans les années à venir est déduite de celle des BEC par une grande matrice de correspondance qui inclut également les matériaux recyclés (voir encadré suivant).

7. https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en

Le scénario passe des émissions territoriales à l'empreinte carbone

Deux approches permettent d'évaluer la pression qu'un pays exerce sur le climat à travers ses émissions de gaz à effet de serre (GES) : l'inventaire national et l'empreinte carbone. Ces deux méthodes sont complémentaires et différent du fait de leur périmètre de calcul⁸.

L'inventaire national évalue sur une période donnée (un an généralement) la quantité de gaz à effet de serre émis à l'intérieur des frontières d'un pays par la consommation des ménages et l'ensemble des activités de production, y compris celles liées aux exportations. Il s'agit notamment du chauffage des bâtiments, de

l'utilisation des véhicules, de la consommation d'énergie fossile des différents secteurs d'activités, des procédés industriels et des émissions de l'agriculture.

L'empreinte carbone évalue la quantité de gaz à effet de serre qu'un pays génère sur une période donnée non seulement par son activité de production mais aussi du fait de ses échanges commerciaux. L'empreinte carbone s'intéresse donc aux émissions induites par la demande finale du pays. Cette dernière prend en compte les émissions directes des ménages (logement et transport), ainsi que les émissions des activités nationales de production (hors exportations) et les émissions dites « importées » liées aux activités de production à l'étranger destinées au marché français.

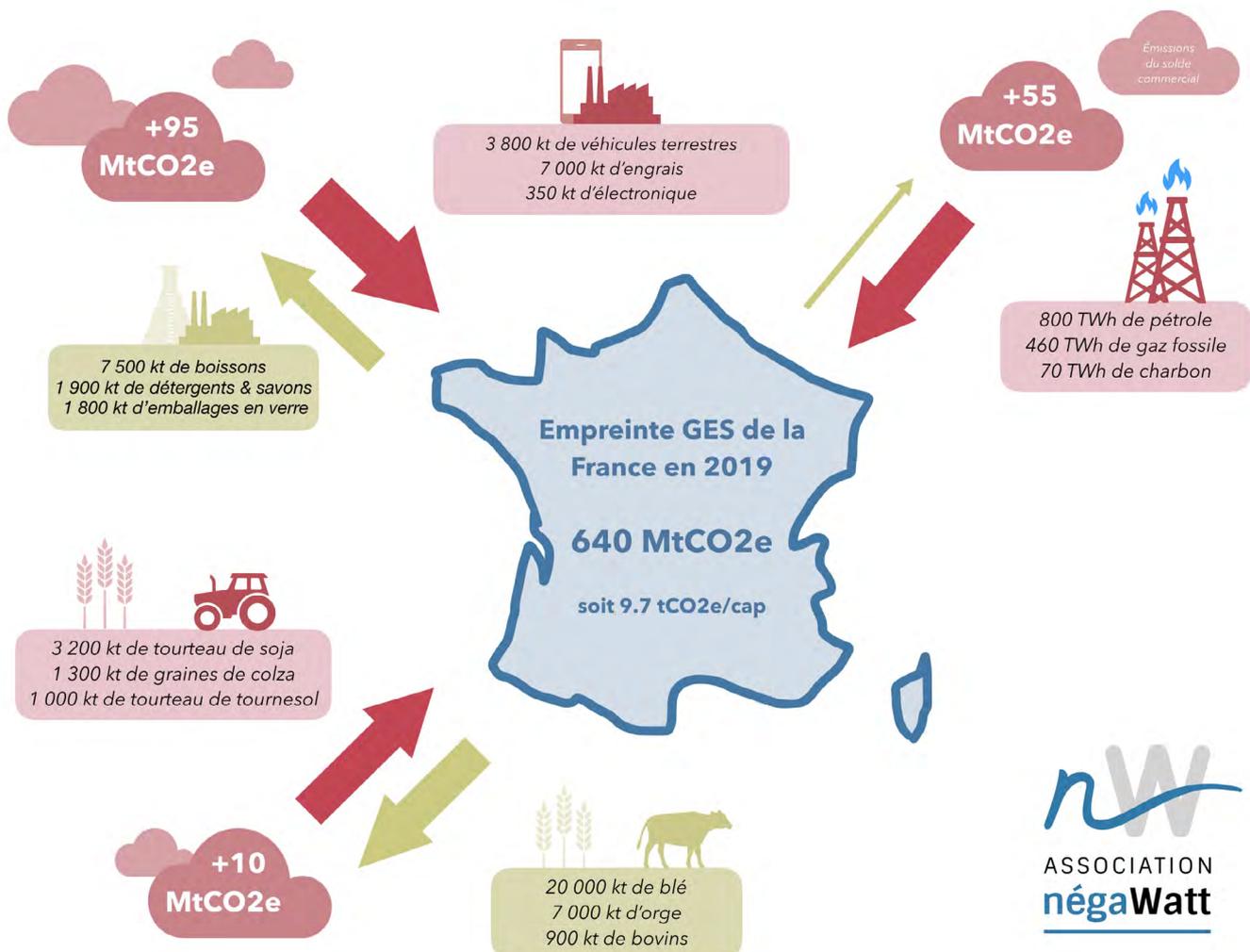


Figure 4 - Évaluation de l'empreinte carbone pour la France en 2019

8. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/5-empreinte-carbone-et-emissions-territoriales>

Jusqu'à présent, l'ensemble des scénarios de prospective réalisés en France présentaient uniquement une approche territoriale propre aux inventaires nationaux. Il existe néanmoins une limite majeure à considérer uniquement cette approche. En effet, celle-ci ne comptabilise pas la totalité des émissions de gaz à effet de serre dont la France est responsable ; elle ne prend pas en compte par exemple la fabrication des ordinateurs, voitures ou vêtements que nous achetons et utilisons mais qui sont importés d'autres pays comme la Chine ou le Bangladesh. D'après le service français des données et études statistiques (SDES), l'écart entre ces émissions territoriales et l'empreinte carbone en France était d'environ 40% en 2014.

A travers un outil développé suivant une méthodologie innovante (voir encadré et chapitre suivant), le scénario négaWatt 2022 permet d'effectuer l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre selon les deux approches, inventaire national et empreinte carbone. En réalisant le calcul à partir des flux physiques de matières, il intègre la réalité de nos modes de vie. C'est ainsi le premier scénario de transition énergétique français à intégrer les émissions liées à l'extraction de minerai, à la production de nos métaux, à la fabrication de nos biens d'équipement, mais aussi au fret maritime international, ou encore au secteur agricole qui importe des engrais mais aussi du soja avec des conséquences, telle que la déforestation, qui sont non-négligeables dans les pays concernés.

L'approche innovante de négaWatt pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre

La comptabilité carbone nationale ne se base pas sur une mesure physique des émissions de chaque activité émettrice de GES. Il s'agit d'une évaluation (ou d'une estimation) des émissions engendrées par les activités émettrices. Il existe des conventions comptables permettant de convertir les données d'activité, comme la consommation d'un litre d'essence ou la fabrication d'un vélo électrique, en émissions de GES, soit 3 kg et 262 kg de CO₂eq respectivement⁹.

Le calcul de l'inventaire national dans le monde fait l'objet de conventions, au contraire du calcul de l'empreinte carbone qui n'est pas encadré par des règles nationales ou internationales¹⁰. L'Association négaWatt a développé un outil innovant d'évaluation

de l'empreinte carbone de la France présentant la particularité de se baser uniquement sur un modèle en flux physiques ; c'est-à-dire en se basant sur les échanges de matières premières et de produits en tonnes ou en kWh et non pas en euros, afin d'en déduire les gaz à effet de serre émis (CO₂, CH₄, N₂O et les gaz fluorés HFC, PFC, NF₃ et SF₆). Cette méthode permet d'identifier les leviers techniques et comportementaux permettant d'arriver à la neutralité climatique d'ici 2050 au plus tard.

Méthodologie et périmètre de calcul de l'empreinte carbone

La méthodologie d'évaluation de l'empreinte des gaz à effet de serre développée par négaWatt se base principalement sur l'empreinte matière calculée dans négaMat. Elle vise à prendre en compte les émissions du solde commercial (importations - exportations) associées aux matières premières minérales, énergétiques et agricoles, aux matériaux, aux produits dits « intermédiaires » et à l'ensemble des biens d'équipement et de consommation. Elle considère aussi les émissions liées au transport international (aérien, maritime, routier et ferroviaire) et au transport indirect de « premier ordre » du secteur agricole : par exemple, pour les importations françaises de soja brésilien, on ajoute aux émissions du transport maritime entre les ports brésiliens et les ports français celles liées au transport routier qui achemine le soja entre les zones de production et les ports d'exportations au Brésil. Cette méthodologie prend également en compte les émissions des bâtiments à l'étranger (les usines principalement) dédiés au marché français, par exemple les émissions de GES liées à la construction des usines chinoises d'assemblage de smartphones. Par contre nous ne comptons pas les émissions associées aux logements, à l'alimentation et aux transports des travailleurs de ces usines ou zones agricoles car dans tous les cas ils vont avoir besoin de se loger, de se nourrir ou de se déplacer. Les émissions induites par la déforestation pour des zones agricoles ne sont pas non plus comptabilisées (voir encadré suivant).

Afin de réaliser ce travail prospectif, deux étapes ont été suivies : d'abord une reconstitution de l'empreinte GES de la France en 2014, avec la méthodologie présentée ci-dessus, puis une évaluation prospective à 2050 en faisant évoluer les hypothèses des flux physiques

9. Source : base carbone ADEME

10. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/note_methodologique_empreinte_carbone.pdf

d'importation et d'exportation, et en considérant trois scénarios pour l'industrie, les intensités énergétiques et les facteurs d'émission :

- le scénario développement durable “SDS” de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) qui aboutit à une forte réduction des émissions de GES sans aboutir à la neutralité climatique ;
- le scénario politiques actuelles “SPS” de l'AIE où les émissions de GES à l'échelle mondiale se stabilisent au niveau actuel ;
- une trajectoire mondiale “artificielle”, nommée “MnW”, où les évolutions dans le monde sont les mêmes que celles du scénario négaWatt en France, soit un monde très décarboné.

Cela permet ainsi d'étudier l'évolution de l'empreinte GES de la France en fonction des hypothèses de décarbonation du système énergétique mondial.

L'évaluation de l'empreinte carbone de la France par l'outil négaWatt cherche à être le plus exhaustif possible. Néanmoins, le manque ou l'insuffisance des données constitue une des limites de ce calcul engendrant une fourchette d'incertitude autour de la valeur calculée. Les détails de la méthode de calcul employée pour les grands secteurs importateurs et exportateurs sont précisés en Annexes.

PRODUITS IMPORTÉS ET DÉFORESTATION

La déforestation à l'étranger causée par la production de biens que l'on importe en France est actuellement bien réelle. Pour que la France baisse la pression qu'elle exerce sur les forêts à l'étranger, le scénario négaWatt prévoit une diminution des importations de produits agricoles et forestiers (voir section 4.3.1), de pâte à papier, de cuir, de fibres textiles et de caoutchouc. Néanmoins, la réduction de ces importations ne rime pas forcément avec baisse de la production à l'étranger. Ainsi, si la France importe moins de soja brésilien, le Brésil pourrait continuer à en produire autant (sans que ces hectares de plantation soient reforestés) pour exporter davantage vers un autre pays. La lutte contre la déforestation appelle donc une réponse internationale, et un changement des modes de consommation dans les autres pays importateurs. En initiant une démarche en ce sens, la France peut inciter d'autres pays à s'engager sur la même voie.

Du point de vue du calcul des émissions de gaz à effet de serre, le manque de données statistiques sur les surfaces utilisées dans les pays producteurs et sur le type de végétation impactée empêche de pouvoir calculer l'effet, en 2050, de la baisse de nos importations sur l'empreinte française de GES. L'empreinte carbone calculée dans le scénario négaWatt est donc “hors déforestation importée”. Mais en réalité, les choix du scénario conduisent bien à une réduction des “surfaces importées” et donc des émissions de CO₂ importées..



4.2. La demande en énergies et matières peut diminuer

Fidèle à son approche, et comme expliqué dans la partie précédente, le scénario négaWatt quantifie d'abord les besoins dans les domaines les plus structurants pour les consommations d'énergie et de matières : le bâtiment, le transport, les biens d'équipement et de consommation, et l'alimentation. Même si l'efficacité reste un levier majeur pour diminuer la demande, le choix de la sobriété (dans ses différentes composantes dimensionnelle, d'usage et coopérative) est renforcé dans ce nouveau scénario, permettant des économies substantielles en améliorant la qualité de vie. Le concept de sobriété étant de plus en plus partagé, les orientations prises par le scénario pourraient être rapidement démultipliées dans la société dès lors que le questionnement sur les besoins s'insère dans un débat démocratique.

En répercussion de la baisse de la demande, le secteur industriel est impacté à la fois sur la nature et la quantité des matériaux qu'il utilise, mais également dans la façon de penser la conception et l'usage de ses produits. Les filières agricole et sylvicole sont dans la même dynamique, portées par une évolution du régime alimentaire, le développement des matériaux biosourcés et la renaturation de 10 000 hectares par an.

4.2.1. Fort potentiel de sobriété dans la construction résidentielle et tertiaire

Le secteur des bâtiments résidentiel-tertiaire représente en France plus de 41 % de la consommation d'énergie finale et 15 % des émissions de gaz à effet de serre. Au-delà de la nécessaire rénovation thermique de l'ensemble du parc bâti, levier majeur de réduction des consommations, il existe un véritable potentiel de sobriété dans la conception et la construction des bâtiments, dans leur utilisation ou dans leur aménagement.

Le parc bâti, qui comprend les logements et le secteur tertiaire, croît actuellement plus vite que la population. Si cette tendance se poursuit, 365 millions de m² de surfaces tertiaires et plus de 4 millions de logements seraient à construire entre 2020 et 2050, du fait de l'augmentation de la population (+6%), et de la hausse des surfaces par habitant (+11 % constatés entre 1984 et 2013). Cet accroissement des surfaces bâties serait non seulement consommateur d'énergie pour le chauffage des locaux et l'alimentation électrique des équipements installés, mais aussi d'énergie et de matériaux pour leur construction. Il contribuerait également à l'augmentation des surfaces artificialisées (et donc à la réduction des puits de carbone).

Dans le scénario négaWatt, ces tendances sont infléchies grâce à des actions de sobriété. Les plus importantes dans le secteur résidentiel sont les suivantes.

La stabilisation du nombre de personnes par logement au niveau actuel (2,2 personnes par logement) alors que les projections plus classiques envisagent une moyenne de 2 en 2050. Grâce au développement de la colocation et de la cohabitation intergénérationnelle (via des mesures fiscales, des programmes locaux d'accompagnement, etc.), cette évolution qui semble mineure a un impact considérable. En effet, le passage de 2 à 2,2 personnes par logement induit une diminution de plus de 3 millions de logements nécessaires.

La diminution de la proportion de maisons individuelles dans la construction neuve : cette proportion est déjà sur une pente décroissante, puisqu'elle est passée de plus de 60 % entre 2002 et 2004 à 40 % en 2017. Dans le scénario négaWatt, cette tendance est prolongée pour atteindre un taux de 20 % en 2050.

La stabilisation de la taille des logements neufs : après une augmentation qui a conduit à des surfaces moyennes passant par un maximum de 165 m² en maison individuelle et 57 m² en logement collectif entre les années 2000 et 2017, les valeurs se stabilisent à environ 138 m² en maison individuelle et 49 m² en logement collectif en 2020. Elles sont maintenues constantes entre 2020 et 2050.

La diminution du nombre de résidences secondaires et de logements vacants : ces dernières années, le taux de résidences secondaires est resté stable à environ 10 %, alors que celui des logements

vacants a augmenté depuis 2000 de 6 à 8% environ. Le scénario négaWatt prévoit une légère baisse du premier jusqu'à 8% (il est possible et souhaitable de mutualiser des résidences secondaires en les partageant entre plusieurs occupants) et du second jusqu'à 4%, taux observé dans un passé plus lointain avant 2000, et qui parait le minimum souhaitable et nécessaire pour assurer la fluidité des mutations (locations et ventes).

La mutualisation de certains espaces dans l'habitat collectif (buanderie, chambre d'amis, etc.) peut également contribuer à la maîtrise des surfaces bâties.

De même, dans le secteur tertiaire, deux axes sont envisagés.

L'évolution des surfaces construites dans le tertiaire en fonction des besoins. Alors que l'évolution tendancielle dans la plupart des branches conduit à une augmentation des surfaces plus rapide que la population, la sobriété préconisée par négaWatt consiste à l'augmenter proportionnellement à certaines tranches d'âge de la population. Ainsi, la surface des locaux d'enseignement et de recherche augmente proportionnellement à la tranche d'âge des moins de 25 ans, celle des bureaux à celle des 25-65 ans, et celle des établissements de santé à celle des plus de 65 ans. Dans certaines branches du tertiaire, les conséquences de la pandémie pourraient même conduire à un ralentissement beaucoup plus marqué que celui indiqué ci-dessus car le développement du télétravail, ainsi que des espaces de co-working et des bureaux flexibles, conduisent à une moindre demande de bureaux attribués. Cette évolution récente, difficile à chiffrer, n'a pas été intégrée dans le scénario.

La mutualisation des usages et la modularité des espaces, encouragées par des incitations fiscales, afin de mieux utiliser les surfaces construites, et de limiter ainsi la consommation de matériaux non renouvelables et l'artificialisation des sols. On peut ainsi imaginer par exemple des écoles qui seraient utilisées partiellement en locaux associatifs en soirée ou les week-ends, conduisant à la réduction des surfaces nécessaires.

Résultat de ces mesures de sobriété : une stabilisation des surfaces bâties. Dans le résidentiel, la stabilisation de la population et du taux d'occupation des logements conduit mécaniquement à une contraction de la demande de logements neufs. En 2050, celle-ci ne correspond plus qu'au renouvellement des logements par démolition/reconstruction d'une fraction d'entre eux, de l'ordre de 36 000 par an.

Les surfaces totales de logements et de bâtiments tertiaires se stabilisent en 2050 aux alentours, respectivement, de 2750 et 1055 millions de m².

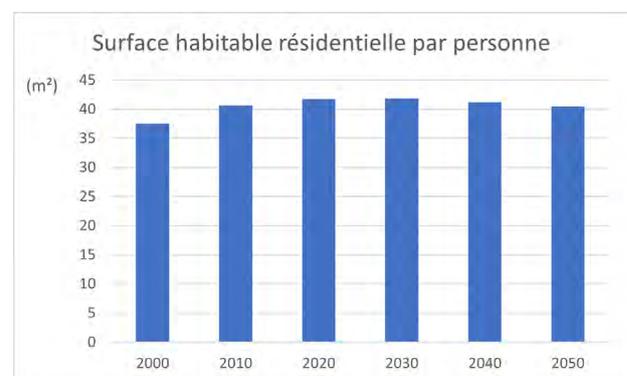


Figure 5 - Évolutions des surfaces occupées par personne dans le résidentiel, entre 2000 et 2050 dans le scénario négaWatt



Figure 6 - Évolutions des surfaces occupées par personne dans le tertiaire, entre 2000 et 2050 dans le scénario négaWatt

4.2.2. Booster la performance intrinsèque des bâtiments

La mise en place d'un grand programme de rénovation du parc bâti à un niveau performant, ainsi que le renforcement de la réglementation sur la performance et l'analyse de cycle de vie des bâtiments neufs, font partie des incontournables d'une trajectoire vers la neutralité climatique.

Le chantier prioritaire de la rénovation énergétique performante

Aujourd'hui, la construction annuelle de logements neufs représente environ 1% du parc total de logements¹¹, et cette proportion a déjà tendance à baisser. Si la moitié environ de ces logements neufs s'ajoute au parc, seulement la moitié remplace des bâtiments existants démolis. Cela signifie qu'il faudrait plus de 200 ans si l'on voulait remplacer l'ensemble des logements existants par des logements neufs performants ! Outre l'énergie grise considérable de cette option, elle ne permettrait de toute façon pas de diminuer suffisamment vite la consommation d'énergie du parc bâti. Il est donc absolument nécessaire de s'orienter vers une rénovation massive et au bon niveau de performance du parc ancien. La rénovation énergétique au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC) ou équivalent

est également une solution clé pour répondre aux problématiques sociales et sanitaires liées à la précarité énergétique. C'est de surcroît un des secteurs les plus dynamiques en matière de création de compétences et d'emplois non délocalisables sur nos territoires pour les années à venir.

La loi de transition énergétique de 2015 (LTECV) a fixé l'ambition de rénover l'ensemble du parc bâti au niveau BBC en moyenne d'ici 2050¹². Mais le constat établi par le Haut Conseil pour le Climat est sans appel : le rythme et la profondeur des rénovations réalisées aujourd'hui sont largement insuffisants pour atteindre cet objectif. Fin 2020, la France faisait partie des pays européens dont les logements sont les plus énergivores, avec une consommation de chauffage bien supérieure à la moyenne européenne¹³. Les politiques publiques mises en place jusqu'à présent par les gouvernements successifs sont restées fondées sur la seule incitation, et ce en majorité sur des gestes isolés de travaux plutôt que des projets complets. Il est aujourd'hui bien documenté¹⁴ que ces politiques inadaptées ont échoué à atteindre les objectifs, tant quantitatifs que qualitatifs, de la stratégie de rénovation. La trajectoire proposée ici est celle d'un "scénario de la dernière chance" : il est encore temps d'agir, à condition de mettre en œuvre très rapidement un programme d'ampleur de rénovation complète et performante en France.

LE CHOIX DE LA RÉNOVATION COMPLÈTE ET PERFORMANTE

Dans un récent rapport*, l'ADEME montre que l'atteinte du niveau BBC n'est rendue possible que lorsque l'on traite non seulement tous les postes de travaux (isolation des murs, toiture, plancher bas, remplacement des menuiseries, ventilation, chauffage et eau chaude) mais aussi les interfaces entre eux (continuité de l'isolation, étanchéité à l'air, bon dimensionnement des systèmes, renouvellement d'air, etc.). Cette coordination est rendue possible lorsque la rénovation est faite en une seule opération réalisée en moins de douze mois ; on parle alors de rénovation complète et performante. À l'inverse, plus la rénovation sera scindée en différentes étapes de travaux, plus celle-ci sera complexe d'un point de vue technique, coûteuse, et moins efficace au niveau des économies d'énergie générées. Au-delà de trois étapes, l'atteinte du niveau BBC à terme est impossible techniquement et économiquement.

* ADEME, « La rénovation performante par étapes », janvier 2021 <https://bibliothèque.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/4168-renovation-performante-par-etapes.html>

11. Sources : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-base-de-donnees-sitadel2-methodologie> et <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3620894>.

12. Loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte (LTECV, 2015), article L-100-4 Code de l'énergie.

13. Haut Conseil pour le Climat, Rénover mieux : leçons d'Europe, avril 2020

14. On peut citer, entre autres, les rapports suivants :

- Ademe, La rénovation performante par étapes, mars 2021.

- Cour des Comptes européenne, Efficacité énergétique des bâtiments : donner plus d'importance à la rentabilité, 2020.

- Descoeurs, V., Meynier Millefert, M., Rapport d'information de la mission d'information sur la rénovation thermique des bâtiments, février 2021

- France Stratégie, Comment accélérer la rénovation énergétique des logements, septembre 2020

- Haut Conseil pour le Climat, Rapport annuel, juin 2021 / Rénover mieux : leçons d'Europe, avril 2020.

- Sichel, O. Rapport pour une réhabilitation énergétique massive, simple et inclusive des logements privés, avril 2021.

Une trajectoire progressive de rénovation prenant en compte les réalités de la filière bâtiment

La trajectoire de rénovation du scénario négaWatt est construite pour mettre en œuvre concrètement la rénovation du parc au niveau BBC ou équivalent, tout en intégrant les réalités actuelles de la filière. Une montée en charge progressive du rythme de rénovation est prévue sur les sept premières années pour laisser le temps nécessaire aux dynamiques de structuration d'offres de rénovation complète et performante (formation aux chantiers BBC, organisation

en groupement d'artisans, dynamiques d'optimisation des coûts). Dans un premier temps, il s'agit de remplacer au plus vite la pratique actuellement majoritaire de rénovation par « gestes » comme le comptabilise la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), à volume de travaux équivalent, puis d'accompagner la montée en capacité de la filière (accroissement de la main d'œuvre). Une fois que la filière est en mesure de répondre à une demande de plusieurs centaines de milliers de chantiers de rénovation BBC par an, le rythme s'accélère (voir graphique ci-dessous).

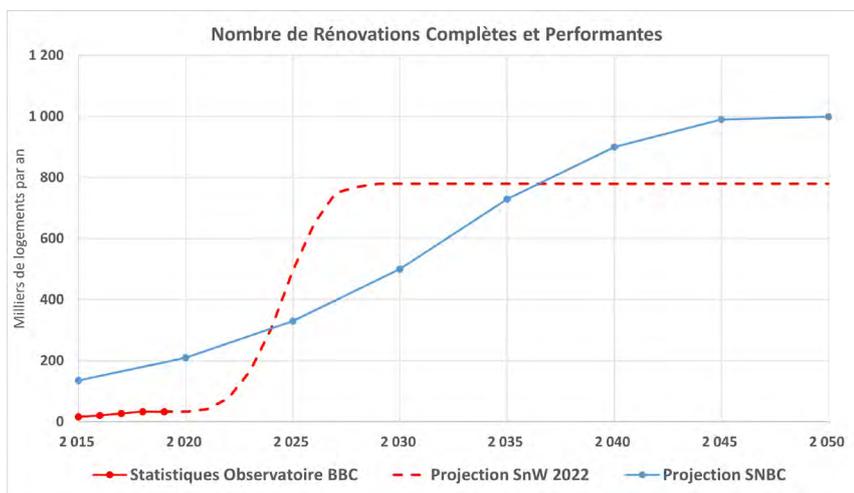


Figure 7 - Évolution du nombre de rénovations complètes et performantes par an entre 2015 et 2050

Le rythme de rénovation envisagé dans la SNBC (en bleu) est fondé sur une comptabilité en « équivalents rénovation performante », regroupant artificiellement des « gestes » de travaux isolés pour en faire des rénovations performantes, ce qui gonfle les statistiques mais ne permet malheureusement pas d'atteindre la performance BBC à terme¹⁵. La trajectoire négaWatt (en rouge) ne prend en compte que les rénovations complètes et performantes (éventuellement réalisées en 2 ou 3 étapes encadrées et évitant les nombreuses impasses techniques et économiques). Elle part donc d'un rythme plus faible, mais monte rapidement en puissance en réorientant tout la main d'œuvre et les aides publiques sur la rénovation BBC ou équivalent.

La priorité est donnée dans un premier temps aux logements les plus énergivores construits avant la réglementation thermique de 1988, dans lesquels les situations de précarité énergétique sont les plus

fréquentes. Dans le scénario négaWatt, le taux annuel de rénovation complète et performante monte en une quinzaine d'années pour se stabiliser à 780 000 logements par an à partir de 2030.

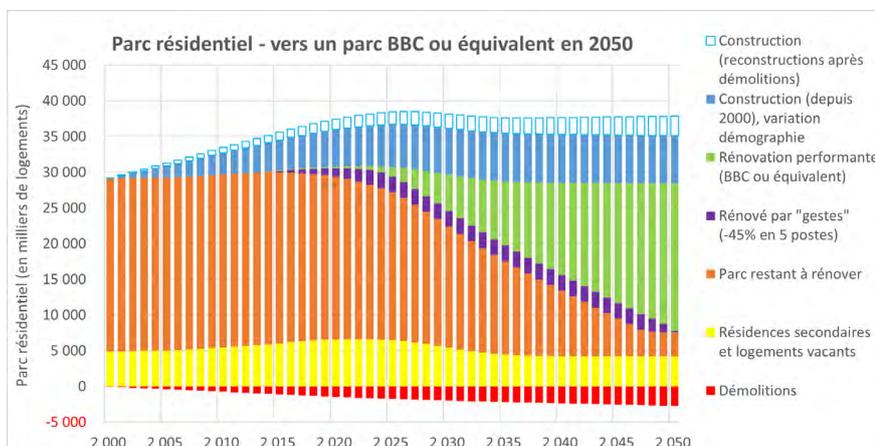


Figure 8 - Historique de rénovation du parc de logements de 2000 à 2020 et évolution dans le scénario négaWatt jusqu'en 2050

La pratique majoritaire actuelle de rénovation par gestes ne permet pas d'atteindre la performance BBC ou équivalent à terme¹⁶. C'est pourquoi il est urgent d'y substituer la rénovation complète et performante, qui la remplace totalement dès 2025. La plupart des logements qui auront été rénovés par gestes seront à rénover à nouveau après 2045 pour que 90% du parc d'avant 1975 puisse atteindre le niveau BBC ou équivalent en 2050.

15. Voir notamment <https://www.ademe.fr/renovation-performante-etapes>

16. Voir notamment <https://www.ademe.fr/renovation-performante-etapes>

UN EXEMPLE DE RÉNOVATION PERFORMANTE : À CHALON SUR SAÔNE, 650 LOGEMENTS RÉNOVÉS AU NIVEAU BBC !

Bien qu'elles ne soient toujours pas massifiées, des rénovations performantes sont déjà constatées sur le terrain depuis de nombreuses années. Des milliers de logements, en maison individuelle comme dans le collectif, ont déjà vu leur facture d'énergie chuter drastiquement.



Entre 2012 et 2015, l'OPAC de Saône et Loire a mené une rénovation d'ampleur de neuf bâtiments de quatre à onze étages : isolation conséquente de toutes les parois, mise en place de menuiseries performantes, traitement des ponts thermiques (notamment des balcons), installation de dispositifs de régulation du chauffage, etc. Des niveaux de consommation de l'ordre de 50 kWh_{EP}/an pour le chauffage et 25 pour la production d'eau chaude ont été atteints, permettant ainsi de réaliser l'une des premières opérations de rénovation massive à très basse consommation. Le coût des travaux de rénovation thermique s'est élevé à 278 € HT/m². Cette expérimentation, reconduite depuis sur d'autres bâtiments, montre que la rénovation directement en classe A* de logements initialement en classe G est possible, à des coûts maîtrisés.

* Le diagnostic de performance énergétique classe les logements de A (les plus performants) à G (les moins performants).



◀ À Chalon sur Saône (71), 650 logements rénovés au niveau BBC : photos du bâtiment avant travaux, pendant le chantier et après travaux

Crédit photo : Energetech

À l'horizon 2050, c'est la quasi-totalité du parc résidentiel qui est porté au niveau BBC rénovation ou équivalent, à l'exception de 10% du parc d'avant 1975 correspondant à des logements pour lesquels ce type de rénovation n'est pas envisageable notamment pour des raisons architecturales ou de protection du patrimoine.

Un plan d'action dans le secteur résidentiel passe par l'obligation conditionnelle de rénovation performante

S'assurer de la faisabilité de cette trajectoire nécessite de choisir des politiques et mesures adaptées : obligation progressive de rénovation performante, dispositifs de financement adaptés, simplifiés et accessibles à tous, dynamiques encadrant et soutenant la structuration d'offres économiques de rénovation performante, formation des acteurs, constitution de services d'accompagnement des ménages, mobilisation des territoires pour soutenir des dynamiques locales, etc.

C'est tout l'enjeu du plan d'action proposé par l'Association négaWatt en faveur de la rénovation performante en France. Notamment, une proposition de mécanisme d'obligation conditionnelle de rénovation performante (OCRP), adapté aux contraintes opérationnelles de terrain et progressif dans le temps¹⁷, a été construite avec une coalition de plus de soixante acteurs (industriels, financiers, syndicats, collectivités territoriales, associations environnementales, de consommateurs et de lutte contre la précarité, think tanks, etc.). Cette obligation s'appliquerait dans un premier temps lors des mutations de maisons individuelles, notamment de classe F&G, et serait conditionnée à la présentation d'offres techniques et financières pertinentes aux ménages. Elle est possible si l'Etat planifie le rythme des rénovations, développe l'encadrement et le soutien (notamment par la formation) à ces rénovations, accompagne les ménages, met en place les mécanismes financiers adéquats et des services dédiés à la lutte contre la grande précarité énergétique (voir chapitre 3). La proposition de l'OCRP est détaillée en Annexes.

Pour les logements collectifs en copropriété, l'approche est nécessairement différente car la mutation n'est pas la bonne étape pour déclencher une rénovation énergétique. C'est dans la plupart des cas le besoin de ravalement des façades qui conduira à isoler le bâtiment et, par la même occasion, à mettre en œuvre une rénovation complète et performante permettant de réduire au maximum la consommation d'énergie du bâtiment. L'isolation thermique est d'ailleurs déjà obligatoire lors d'un ravalement. Le respect de cette disposition doit être plus sérieusement contrôlé, et les dispositifs d'aides doivent évoluer pour que le ravalement avec isolation déclenche systématiquement une rénovation performante.

L'action politique doit être guidée et évaluée à la lumière d'indicateurs sur les économies d'énergie effectivement générées et non plus sur le nombre de gestes de rénovation, sur l'effet de levier produit en matière d'investissements et d'emplois sur les territoires, et sur les améliorations sur la santé des habitants.

Viser la performance dans les bâtiments tertiaires

Actuellement, le décret tertiaire publié en 2019¹⁸ apporte une brique essentielle à la dynamique de rénovation dans ce secteur, par la mise en place d'une obligation de réduction de la consommation en énergie finale de 40 % en 2030, 50 % en 2040 et 60 % en 2050. En revanche, les conditions de mise en œuvre de cette nouvelle réglementation incitent encore trop peu les gestionnaires de parc tertiaires, qu'ils soient privés ou publics, à engager une planification et la réalisation de travaux performants permettant l'atteinte du niveau BBC ou équivalent. La tentation est grande de capter les économies à faible temps de retour pour atteindre l'objectif de 2030, mais cette stratégie rend plus difficile l'atteinte des objectifs suivants. Par exemple, la mise en place d'une chaufferie performante permettra un gain immédiat, mais pour aller plus loin il faudra isoler l'enveloppe du bâtiment et la chaufferie sera alors surdimensionnée, ce qui constitue un coût échoué. Le risque de « tuer » le gisement d'économie d'énergie doit être considéré plus sérieusement. L'enjeu du confort d'été et de la maîtrise des consommations liées à la climatisation doit également être mieux pris en compte dans les obligations du secteur.

Tout comme pour le résidentiel, les dispositifs actuels d'aides restent peu adossés à des objectifs de performance, alors que ceux-ci encourageraient les gestionnaires à planifier puis à investir dans des travaux complets permettant l'atteinte du niveau BBC ou équivalent. Enfin, les gestionnaires sont souvent confrontés à un manque d'accompagnement technique et de compétence interne dédiée à la gestion énergétique du parc dans son ensemble. Les actions en la matière sont souvent réalisées isolément, entre différents départements, limitant ainsi la capacité des gestionnaires à développer une vision globale de leur parc, à valoriser les retours d'expérience techniques entre service maintenance et service en charge de la rénovation et à réinvestir les économies d'énergie réalisées dans de nouvelles rénovations énergétiques

17. <https://www.capital.fr/immobilier/rendons-la-renovation-energetique-obligatoire-lorsquelle-est-interessante-pour-les-menages-1399362>

18. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000038812251&categorieLien=id>

Dans le scénario négaWatt 2022, la rénovation du tertiaire suit une dynamique similaire à celle envisagée pour le logement, et atteint une réduction de 52 % des consommations d'énergie en 2050. Le rythme de croisière, après une montée en charge progressive, se base sur un taux annuel de rénovation égal à 3,3 % des surfaces d'avant 2000. Ainsi, en 2050, 65 % du parc tertiaire d'avant 2000 est rénové au niveau BBC rénovation.

Si on compare les résultats obtenus dans le scénario négaWatt aux objectifs du décret tertiaire (voir tableau ci-dessous), on observe deux points importants :

- les valeurs de réduction des consommations sont plus basses dans le scénario négaWatt car le pourcentage est calculé sur le parc total, alors que les objectifs du décret tertiaire ne concernent que les bâtiments ou locaux de plus de 1000 m², soit environ deux-tiers des surfaces. Dans le scénario négaWatt, on commence par appliquer ce décret tertiaire, les bâtiments de moins de 1000 m² sont rénovés dans un second temps ;
- une montée en régime plus réaliste pour le scénario négaWatt, avec un écart sur les résultats très marqué en 2030, mais qui s'atténue par la suite.

Année	Objectifs du décret tertiaire	Résultats dans le scénario négaWatt (ensemble du parc tertiaire)	Commentaires
2030	-40 %	-18 %	Application du décret tertiaire aux bâtiments > 1000 m ² . Montée en charge progressive
2040	-50 %	-42 %	Intervention sur l'ensemble du parc, accélération du rythme.
2050	-60 %	-52 %	

Tableau 1 - Comparaison entre les objectifs de réduction de consommation d'énergie du décret tertiaire et les résultats obtenus dans le scénario négaWatt

FOCUS SUR LA CLIMATISATION

Dans le secteur du bâtiment, la climatisation est certainement l'usage le plus complexe à modéliser :

- consommations très dépendantes de la qualité des enveloppes des bâtiments, de la gestion des apports gratuits internes (durée d'utilisation d'appareils électriques ou d'éclairages plus ou moins performants) et solaires (orientation des façades, inclinaison des toits, surfaces vitrées, protections solaires installées, bon usage de celles-ci), de la ventilation nocturne, des températures de consignes choisies par les occupants ;
- grande variété de systèmes (climatiseur mobile, mono- ou multi-splits, PAC réversibles, ...) ;
- grande dépendance au climat (températures moyennes en été, fluctuations quotidiennes de la température avec la possibilité ou non de rafraîchissement nocturne). Se pose aussi la question du réchauffement global de ce dernier, qui ne sera pas homogène à l'échelle du territoire. Par exemple, dans le Nord des Alpes, le réchauffement devrait être deux fois plus marqué que la moyenne française.

Le scénario négaWatt fait l'hypothèse d'une augmentation progressive des taux d'équipements en climatisation qui conduit en 2050 à une proportion de logements équipés supérieure à 50 %, et de 15 à 60 % de surfaces équipées selon les branches pour le tertiaire. Parallèlement, deux effets viennent compenser et annuler cet accroissement : des usages mieux maîtrisés sur les facteurs de sobriété décrits ci-dessus, et une augmentation de l'efficacité des appareils de climatisation. Ainsi, pour l'ensemble des deux segments, les consommations d'électricité restent relativement stables, passant de 16 TWh en 2020 à 13 TWh en 2050, à comparer aux consommations totales de chauffages valant respectivement 429 TWh et 134 TWh.

PROPOSITIONS D' ACTIONS DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT TERTIAIRE

Plusieurs propositions en matière des politiques et mesures sont formulées par l'Association négaWatt pour répondre aux enjeux du bâtiment tertiaire.

+ Engager une révision du décret tertiaire afin de privilégier les rénovations complètes et performantes :

- mettre en place des obligations plus fines en matière de transmission d'information pour permettre aux maîtres d'ouvrage de disposer d'un véritable inventaire sur le bâtiment et faciliter leur action sur les différents leviers (rénovation de l'éclairage, mise au point des systèmes, isolation de l'enveloppe et rénovation du chauffage, cuisine collective performante, confort d'été résilient et peu énergivore, etc.) ;
- privilégier la rénovation complète et performante pour remplir les obligations du décret en déclinant les objectifs de réduction des consommations en valeur absolue à 2050 au niveau du parc global plutôt que par bâtiment. L'objectif doit être d'inciter les gestionnaires à se projeter directement au niveau BBC et à valoriser les rénovations performantes par bâtiment comme moyen de remplir les objectifs progressifs et à long terme sur l'ensemble du parc.

+ Encourager la conditionnalité des subventions régionales, des dotations de soutien à l'investissement local et des aides à l'ingénierie à l'atteinte d'un niveau BBC ou équivalent.

+ Pérenniser un service technique d'assistance aux rénovations complètes et performantes pour accompagner les gestionnaires de parcs tertiaires.

+ Déployer le principe d'intracting* pour identifier les économies d'énergie dans les budgets de fonctionnement, y compris sur des gains à temps de retour rapide comme la maîtrise des usages électriques, et en flécher tout ou partie pour alimenter un fond travaux permettant d'envisager des rénovations plus complètes.

* L'intracting consiste à créer un fonds d'investissement en interne à une structure (par exemple une collectivité) afin de financer des actions d'économies d'énergie dont les gains alimente le même fonds.

L'impact limité de la construction neuve ne doit pas minimiser les objectifs de performance

La nouvelle réglementation environnementale 2020 (RE2020) pour les bâtiments neufs a impulsé une prise de conscience de l'impact de la fabrication et de la mise en œuvre des matériaux. L'évaluation, pour l'instant limitée à l'impact climatique, sera calculée et encadrée par des objectifs de plus en plus exigeants, encourageant progressivement les modes constructifs

les moins impactants. Dans le scénario négaWatt, cette dynamique a été intégrée, prolongée et renforcée dans la modélisation de l'impact des matériaux de l'ensemble du BTP (voir section 4.2.7).

Sur le plan énergétique, on peut regretter la dégradation de l'ambition initiale de la RE2020 de viser les bâtiments à énergie positive, en simple renforcement incrémental de la RT2012. C'est pourquoi les hypothèses de performance des bâtiments neufs à court terme ont

été dégradées par rapport aux hypothèses du scénario négaWatt 2017 et l'atteinte du niveau Passif (15 kWh/m² de besoin de chauffage) est décalé à après 2030, en espérant un renforcement de la réglementation énergétique à cet horizon.

L'impact de la construction neuve sur la trajectoire de consommation énergétique du parc bâti est limité par

le rythme de construction et de démolition. La priorité est de réduire l'impact environnemental des matériaux de construction en développant les filières biosourcées et géosourcées, et de maintenir un niveau d'exigence énergétique élevé, tout en favorisant l'intégration des énergies renouvelables aux bâtiments ainsi qu'à leur environnement (ombrières solaires sur parking par exemple).

UN EXEMPLE DE CONSTRUCTION NEUVE PERFORMANTE DANS LE TERTIAIRE : LE LOWCAL, À PONT DE BARRET

Livré en 2016, ce bâtiment de bureau de 620 m²_{SU} (deux étages) a été le premier en France à être labellisé au niveau E4C2 du label E+C-, soit le plus haut niveau sur le plan de l'énergie et du bilan carbone, le tout à un coût très raisonnable : 1120 €/m²_{SHON} (hors voirie et réseaux divers), soit un coût inférieur aux pratiques couramment constatées. Ce résultat exemplaire a été atteint par la mise en œuvre systématique, partout où cela était possible, des principes de sobriété et d'efficacité énergétique.

Conçu principalement en bois, terre et paille, ce bâtiment présente un excellent bilan en énergie grise. En complément, sa compacité et son isolation permettent de se passer totalement de système de chauffage, hormis lors de périodes de grand froid. Sa consommation d'électricité reste minime, grâce notamment à l'efficacité accrue des équipements (ordinateurs, serveur, ventilation, éclairage, etc.).

Tous usages confondus, la consommation d'énergie globale mesurée du bâtiment est de 7 kWh_{élec}/m²/an. L'installation solaire photovoltaïque qui le recouvre produit 6 fois plus !

◀ Le Lowcal, un bâtiment exemplaire à Pont de Barret (26)

Crédit photo : Eneritech



4.2.3. Sobriété et efficacité des équipements essentiels du bâtiment

La consommation d'énergie permettant d'assurer le confort intérieur dans les bâtiments provient en majeure partie des équipements de chauffage, eau chaude, climatisation et ventilation.

Tant dans les bâtiments résidentiels que tertiaires, une plus grande sobriété peut conduire à des économies substantielles sans perte de confort, par le biais notamment :

- d'un choix d'habillement mieux adapté à la saison ;
- d'une maîtrise des températures intérieures tant en hiver qu'en été (zonage et programmation des températures pour prendre en compte les scénarios d'occupation des locaux, respect des limites légales, consignes glissantes en fonction de la température extérieure dans les locaux climatisés) ;
- d'un moindre apport intérieur de chaleur grâce à des appareils qui deviennent de plus en plus efficaces et chauffent moins (éclairage, audiovisuel, produits de couleur blanche, etc.) ;
- de comportements adaptés pour limiter les apports solaires en été (installation et usage beaucoup plus systématiques d'occultations à l'extérieur) ;
- d'un bon usage de la ventilation nocturne pour le rafraîchissement là où cela est possible ;
- d'une maîtrise des consommations d'eau chaude sanitaire, par les comportements et les choix d'équipements (douchette à économie d'eau, limiteurs de débit sur robinets, temporisation sur les points de distribution dans le tertiaire) non seulement pour économiser l'énergie, mais également l'eau, pour laquelle des tensions sur la ressource sont déjà perceptibles dans certains territoires.

Privilégier une diversité de modes de chauffage efficaces

En matière d'efficacité, au-delà des actions sur l'enveloppe des bâtiments évoquées précédemment, il convient évidemment d'installer les systèmes de chauffage et production d'eau chaude sanitaire les plus performants possibles. Ainsi, seront privilégiés l'usage "intelligent" de l'électricité à travers des pompes à chaleur à rendement élevé (sur aquifère ou sonde géothermique de préférence à l'aérothermie, avec émission par planchers chauffants basse température, permettant d'afficher des COP¹⁹ de 4 à 6), les chaudières à condensation consommant du gaz de plus en plus renouvelable au fil des années, et les chauffe-eau thermodynamiques. Environ 12% des logements et 5% des surfaces tertiaires en 2050 resteront chauffés par des convecteurs électriques de dernière génération car ce sont des locaux inadaptés aux solutions précédentes (manque de place, investissements trop importants, etc.).

À mesure que les bâtiments sont rénovés et que les solutions de chauffage central performantes s'imposent, les taux d'équipement en ventilation mécanique et pompes de circulation vont croître. Ces auxiliaires ont des consommations d'électricité loin d'être négligeables. Mais les technologies progressent vite et des réglementations européennes ont déjà commencé à favoriser les appareils les plus efficaces. Leur adoption ainsi qu'une bonne conception et l'optimisation des réglages permettront de contenir les consommations de ce poste²⁰.

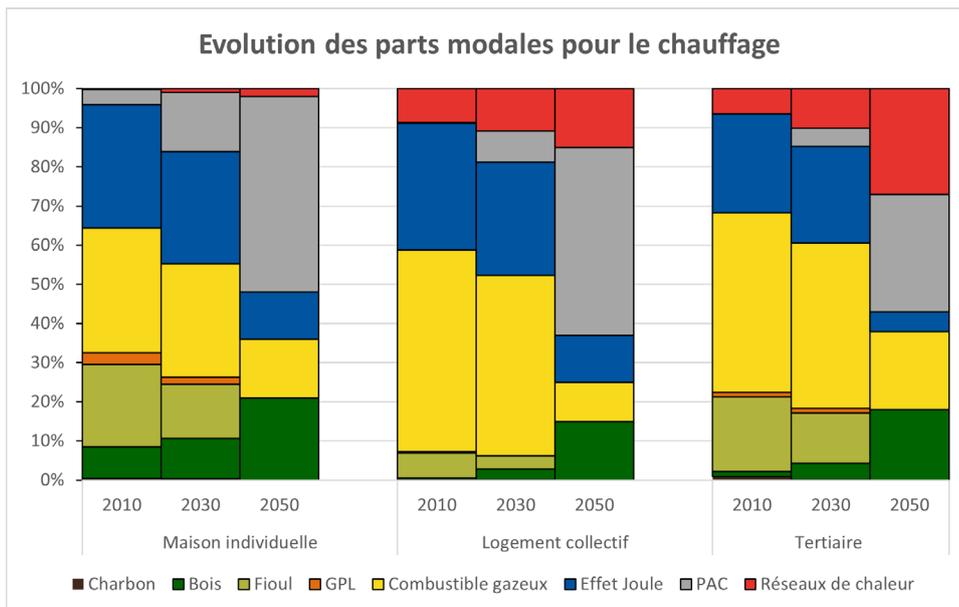
Enfin, un changement conséquent sur les parts respectives des différents vecteurs énergétiques conduira en 2050 à :

- l'abandon des vecteurs carbonés fossiles : charbon pour lequel c'est quasiment déjà le cas, fioul et GPL. L'utilisation du gaz distribué par le réseau sera également fortement réduite (division par 2 en 2035, division par 5 en 2050), pour favoriser son utilisation dans les transports longue distance. Ce gaz sera de plus en plus décarboné, puisqu'il intégrera une part croissante de méthane et d'hydrogène renouvelables ;

19. COP = coefficient de performance. Il s'agit du rapport entre l'énergie thermique délivrée par la pompe à chaleur et l'électricité consommée. Les COP annuels couramment observés sont de l'ordre de deux, mais lorsque les installations sont bien conçues, dans des bâtiments performants, ils peuvent augmenter considérablement. Des COP annuels de 6 ont déjà été mesurés.

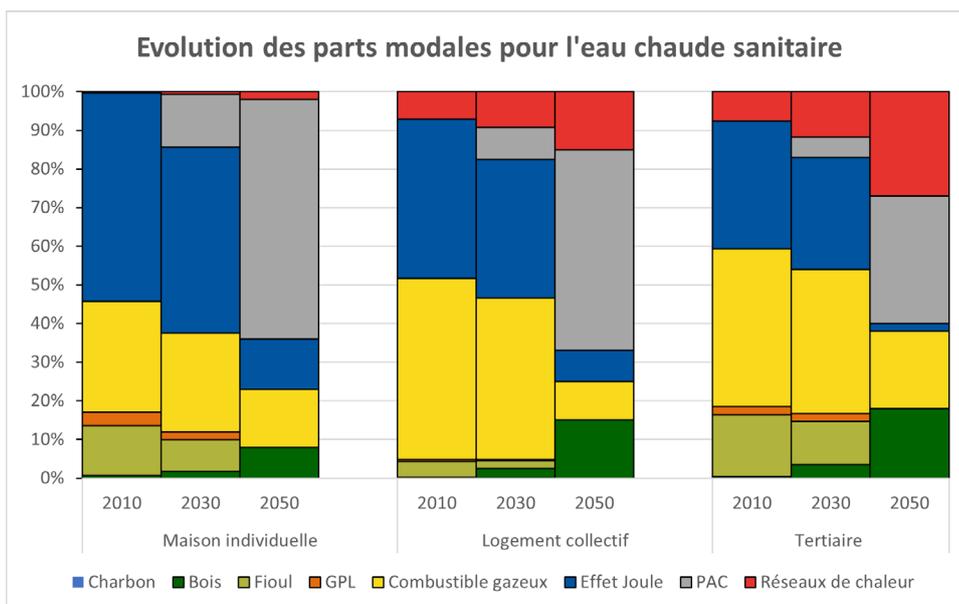
20. Un gain de 30 à 40% sur la consommation d'électricité des VMC est possible *via* leur dimensionnement, le réglage des consignes et la programmation

- un usage accru de la biomasse (bûches, plaquettes et granulés) dans des appareils performants (poêles et chaudières) ;
- une place assez réduite pour le solaire thermique, compte tenu des évolutions récentes du marché ;
- un développement des réseaux de chaleur valorisant une part de plus en plus importante d'énergies renouvelables (96% en 2050, le reste provenant de déchets incinérés).



◀ Les graphiques détaillent la répartition des systèmes (et non les consommations d'énergie) pour les maisons individuelles, les logements collectifs et les bâtiments tertiaires en 2010, 2030 et 2050.

Figure 9 - Répartitions des parts modales des énergies utilisées pour le chauffage, dans le scénario négaWatt



◀ Les systèmes solaires thermiques contribuent à hauteur de 2 TWh en 2050 pour le chauffage et l'ECS. Ils n'apparaissent pas dans ces graphiques car leur source d'énergie est le soleil, non comptabilisée car « gratuite ». Mais les énergies d'appoint (gaz, électricité, etc.) qu'ils utilisent sont incluses dans les parts modales représentées ici.

Figure 10 - Répartitions des parts modales des énergies utilisées pour l'eau chaude sanitaire, dans le scénario négaWatt

Les progrès très encourageants sur l'éclairage peuvent se poursuivre

Dernier poste de consommation directement lié au bâti : l'éclairage. Il s'agit d'un domaine où de forts progrès technologiques couplés à une réglementation ambitieuse ont permis des gains de consommation spectaculaires. L'abandon des ampoules à incandescence et leur remplacement par les ampoules à LED (dix fois plus efficaces et durant dix fois plus longtemps) ont un impact tout à fait visible : la consommation moyenne d'éclairage par ménage a déjà été divisée par plus de deux sur la dernière décennie²¹. La poursuite du renouvellement des stocks et des efforts réglementaires

dans le résidentiel et le tertiaire continuera à porter ses fruits et à faire de l'éclairage un poste bien moins problématique que par le passé.

La question d'un « effet rebond » se pose toutefois. La facilité d'usage des LED favorise une multiplication des installations lumineuses, dont l'utilité est parfois discutable. Du bon sens et des efforts de sobriété sont donc nécessaires, notamment dans l'espace public. La généralisation des initiatives de réduction de la pollution lumineuse, déjà adoptées par plusieurs centaines de communes²², permettra de limiter cet effet rebond et de protéger la biodiversité.

ÉCONOME DE FLUX : UNE FONCTION ESSENTIELLE

À l'échelle des grandes entreprises, des bailleurs ou des collectivités, la gestion de leur parc de bâtiments est devenu un enjeu essentiel, non seulement pour répondre aux obligations du décret tertiaire (voir section 4.2.2) mais aussi plus globalement pour s'assurer de la pérennité des actions d'économies d'énergie. Une équipe dédiée à la maîtrise de l'énergie - ou a minima une personne en charge de ce sujet - permet d'organiser les opérations les plus pertinentes. Dans les collectivités locales, la nomination d'un économe de flux (pouvant gérer les énergies et l'eau) s'avère rapidement rentable.

La ville de Montpellier en a fait l'expérience depuis plus de 35 ans en mettant en place une connaissance fine de ses consommations, une détection des anomalies, une gestion rigoureuse des équipements (réglage et contrôle des consignes de température de chauffage, extinction de l'éclairage des locaux inoccupés, etc.) et des contrats de fourniture (tarifs et puissance souscrite). En associant son service Énergie à tous les dossiers de construction neuve ou de réhabilitation, la Ville cherche aussi à éviter le sur-dimensionnement des nouvelles installations. Ainsi, par ses efforts répétés, Montpellier dépense deux fois moins en énergie, eau et déchets que la moyenne des villes françaises* qui est de 45€ par an et par habitant.

Dès 10 000 habitants, une commune peut rentabiliser un économe de flux avec 10% de dépenses évitées grâce à une bonne gestion et par exemple la détection précoce des fuites d'eau. En ce sens, l'Association négaWatt propose de généraliser la création des économes de flux dans les collectivités, notamment en renforçant leur mise en place grâce au dispositif des Certificats d'Économie d'Énergie, et en prévoyant des formations adaptées dans les cursus de l'enseignement supérieur.

* Source : enquête de l'ADEME/AITF/FNCCR sur les dépenses 2017 des communes et intercommunalités.

21. ADEME, RTE (2021), Panel Usages Electrodomestiques – Rapport Final Année 1

22. <https://www.amf.asso.fr/documents-364-communes-franaises-dans-76-departements-labellisees-villes-villages-etoiles-4-territoires-distingues-par-lanpcen/40783>

4.2.4. Transport : de multiples enjeux et leviers

Cinquante années de politiques publiques en faveur de l'automobile ont considérablement transformé nos paysages, notre urbanisme, et plus globalement notre manière d'aménager et d'utiliser l'espace. La France a construit le premier réseau routier d'Europe, le fret routier est devenu la norme et le fret ferroviaire l'exception, et nos villes ont toutes suivi un même schéma de développement : disparition progressive des commerces de proximité au profit de centres commerciaux installés en périphérie, loin des zones résidentielles, contraignant les consommateurs à l'utilisation d'une voiture individuelle. La multiplication de zones pavillonnaires a progressivement allongé les distances domicile-travail tout en grignotant toujours plus sur des espaces agricoles pourtant nécessaires à l'alimentation des populations. Archi-dominé par le trafic routier et hyper-dépendant au pétrole, le secteur des transports représente aujourd'hui en France la première source d'émissions de gaz à effet de serre.

La nécessité d'une politique de sobriété en matière de transports

Si l'enjeu climatique justifie à lui seul une mutation profonde de nos habitudes de déplacement et de nos modes de transport, ces évolutions sont tout autant nécessaires pour répondre aux autres enjeux sociaux et environnementaux liés à ce secteur. Pour une partie significative de la population soumise à la fluctuation des cours du pétrole, il est urgent de fournir des alternatives aux déplacements contraints et aux coûts qu'ils génèrent. Alors que l'imaginaire publicitaire fait rimer voiture individuelle avec liberté, dans bien des cas ce mode de transport est synonyme de poids financier pour les ménages, n'ayant d'autres alternatives pour travailler, effectuer ses achats ou pratiquer des loisirs. Les transports sont aussi un des premiers contributeurs aux fortes concentrations de polluants atmosphériques locaux relevés dans nos villes, responsables chaque année de plusieurs dizaines de milliers de morts rien qu'en France. Cet enjeu sanitaire a également un coût, évalué à plusieurs dizaines de milliards d'euros par an²³. Sans compter les millions d'heures perdues dans les congestions routières à l'échelle du pays...

Face à ces constats, les politiques publiques doivent rendre possible les nécessaires évolutions technologiques mais aussi les changements de comportement. Ces derniers n'advieront pas tout seuls et ne doivent pas avoir comme approche la culpabilisation individuelle. La sobriété est d'abord collective avant d'être individuelle.

Dans les transports comme ailleurs, l'absence de sobriété, constatée aussi bien dans la taille et le poids des véhicules que dans le nombre de kilomètres parcourus, est venue gommer tous les efforts d'efficacité énergétique poursuivis depuis plusieurs décennies. L'essor fulgurant des SUV²⁴ observé ces dernières années montre, s'il fallait encore le prouver, l'impact délétère de la publicité, où le besoin du consommateur naît du besoin du producteur (automobile dans ce cas précis). Le bon sens énergétique doit nous permettre de retrouver une logique inversée, basée sur une consommation intelligente où le produit est adapté à nos besoins, pas l'inverse.

Modélisation des voyageurs et des marchandises

La multiplicité des typologies de déplacement, liées à la fois à leurs motifs et aux lieux où ils se déroulent ou qu'ils relient, nécessite une multiplicité de réponses, qui relèvent aussi bien de la technique pure que de l'organisation sociétale de nos villes et de nos campagnes.

Dans le scénario négaWatt, grâce aux statistiques nationales, l'ensemble des déplacements de personnes réalisés en France a pu être classé en 25 catégories et sous-catégories, selon la typologie du déplacement (trajets pendulaires, occasionnels de loisir, professionnels, etc.), sa longueur, et son espace (du centre parisien à l'espace rural). Dans chacune d'entre elles, le scénario fait évoluer de façon différenciée le nombre de voyageurs.km parcourus, ainsi que leur répartition entre une dizaine de modes de transport.

Pour chacun d'entre eux, des hypothèses d'évolution des consommations unitaires et des motorisations développées ont été définies. Les taux de remplissage des véhicules particuliers ont également fait l'objet d'évaluations. Enfin, une hypothèse d'évolution de la vitesse maximale autorisée sur voie rapide (100 km/h) et autoroute (110 km/h) est également intégrée.

23. <https://www.gouvernement.fr/risques/pollution-de-l-air>

24. Sport Utility Vehicle. Modèle de véhicule généralement plus haut, plus lourd et plus consommateur de carburant que son homologue citadine/berline.

Pour le transport de marchandises, la méthodologie suivie est relativement proche. Les déplacements sont différenciés selon les types (national, international et transit) et les modes de transport. Les consommations unitaires et la répartition des motorisations sont également des indicateurs intégrés dans la modélisation, tout comme le taux de remplissage des poids-lourds.

À l'inverse d'autres scénarios de prospective, le scénario négaWatt tient compte des trafics internationaux, aériens (voyageurs) et maritimes (marchandises).

Un virage à prendre rapidement par des politiques adaptées

L'évolution du secteur des transports doit également rimer avec vision et stratégie industrielle adaptée. La filière automobile a perdu près de 300 000 emplois au cours des vingt dernières années (près de la moitié de son effectif)²⁵. Il est urgent de stopper cette hémorragie tout en transformant l'outil industriel pour l'adapter aux nécessaires mutations.

La réponse à l'ensemble de ces enjeux sociaux, industriels et environnementaux ne peut passer que par une approche décloisonnée et transversale, activant des leviers en lien avec le rapport au travail, l'urbanisme, l'organisation familiale, la fiscalité, ou encore les infrastructures. À ce titre, il est nécessaire d'engager des politiques adaptées, de poursuivre la recherche et de soutenir des innovations sociales autour de la sobriété pour, par exemple, augmenter le covoiturage lors des trajets domicile-travail ou développer davantage l'autopartage. Parmi les actions à entreprendre, les trois suivantes sont prioritaires.

+ Une fiscalité donnant un signal prix juste

Le mouvement des Gilets jaunes l'a montré, les politiques environnementales ne peuvent faire fi des considérations sociales. Un juste prix doit être instauré sur le trafic routier, incitant les consommateurs au changement d'habitudes lorsque cela est possible. Cette politique doit également permettre de réduire les inégalités en distribuant aux plus modestes une partie des recettes. Elle doit aussi s'appliquer à rendre plus cohérente la fiscalité des différents modes de transport. L'ensemble des aides accordées au secteur aérien (comme la non-taxation du kérosène), qui profitent en priorité à une minorité plutôt aisée de la population, sont de plus en plus incompréhensibles pour le citoyen à

qui on demande d'en faire plus pour le climat. Cette réforme fiscale d'ensemble doit être progressive et planifiée, en lien avec les nécessités de report modal et de développement des infrastructures associées. Elle doit prendre en compte l'ensemble des externalités associées au trafic routier, pas uniquement le CO₂. Une logique en analyse de cycle de vie doit être appliquée et plusieurs critères doivent être intégrés, permettant un modèle de financement pérenne des infrastructures.

+ Un programme de financement des infrastructures à la hauteur des besoins et cohérent

Aujourd'hui, aucun scénario d'investissement dans les infrastructures de transport n'est corrélé avec un scénario de transition énergétique permettant de répondre aux enjeux climatiques. Pour les mettre en adéquation, les pouvoirs publics doivent définir des règles d'investissement publics, en prenant en compte les enjeux de gouvernance locale, les Régions ayant des compétences propres en matière de mobilité. Un programme de formation et de relance de la filière ferroviaire doit également être élaboré, pour permettre le développement et le maintien de ces infrastructures. Le vélo a lui aussi besoin d'infrastructures adaptées pour se massifier. Permettant de réduire les émissions de GES, la pollution de l'air et le bruit en ville, il engendre de multiples bienfaits sanitaires. L'impulsion à son développement constatée ces dernières années, notamment par l'essor du vélo électrique, doit se poursuivre et s'amplifier.

+ Faire évoluer les motorisations vers un mix 100% renouvelable

La décarbonation des transports peut prendre plusieurs formes. Électricité, hydrogène, bioGNV ou biocarburants sont autant de solutions vers la neutralité carbone. Pour autant, d'autres critères doivent entrer en compte : analyse en cycle de vie, disponibilité de la ressource énergétique, disponibilité des matières premières non énergétiques, efficacité de l'ensemble de la chaîne énergétique, faisabilité technique, opérationnelle et économique, etc.

Cette évaluation multicritères et systémique pousse à s'orienter vers un mix diversifié entre différentes motorisations, et non vers une solution électrique unique et universelle. Chaque vecteur énergétique a son domaine de pertinence !

25. <https://resources.grouperandstad.fr/anticipations/levolution-de-lemploi-dans-la-filiere-automobile-francaise/>

4.2.5. De nouvelles habitudes de mobilité à prendre

La nécessaire et souhaitable réduction des déplacements

La réponse aux multiples enjeux précités ne peut pas être que technologique. Aussi peu émettrice de CO₂ soit-elle, toute solution de déplacement présente ses limites. Il convient donc, en premier lieu, de s'interroger sur la nature des trajets effectués et sur leur pertinence.

Dans le scénario négaWatt, la population française continue de se déplacer mais, grâce à plusieurs leviers, on aboutit à une réduction du nombre et de la longueur des déplacements, notamment ceux qui sont contraints car liés à l'activité professionnelle et

qui sont coûteux pour les ménages. Le premier levier est le déploiement du télétravail. Encore marginal jusqu'en 2019, il s'est fortement développé en 2020, crise sanitaire oblige. En 2050, 40% des travailleurs pratiquent le télétravail dans le scénario négaWatt, en moyenne la moitié du temps.

Le développement du télétravail s'inscrit plus globalement dans une réduction de déplacements rendue possible par les outils numériques aujourd'hui à notre disposition. Dans l'enseignement supérieur, des cours à distance à temps partiel se développent ; une vigilance accrue devra néanmoins être apportée aux conditions de mise en œuvre, afin de ne pas exclure encore davantage certaines catégories de population subissant d'ores et déjà la fracture numérique et/ou l'isolement.

QUELLE PLACE POUR LE TÉLÉTRAVAIL DANS LE SCÉNARIO NÉGAWATT ?

Les conditions dans lesquelles, le 16 mars 2020, des millions de travailleurs se sont retrouvés du jour au lendemain en télétravail, ne sont évidemment pas celles envisagées dans le scénario négaWatt. Son déploiement doit se faire dans des conditions acceptables par le salarié - la cuisine n'est pas nécessairement le meilleur endroit pour travailler ! - comme par l'entreprise. Cette période a néanmoins permis de faire évoluer les regards sur le télétravail : considéré auparavant par certains comme un moyen pour les salariés d'échapper aux contraintes professionnelles, il est désormais suffisamment expérimenté pour que salariés comme employeurs voient l'intérêt de cette pratique. Il reste désormais à préciser, au cas par cas, entreprise par entreprise, le cadre dans lequel ce télétravail peut se déployer. Ce cadre ne saurait être universel. Le télétravail peut s'envisager à 20% du temps de travail dans certains cas, à 80% dans d'autres ; il peut se faire à domicile, ou dans un tiers-lieu approprié, permettant de mutualiser des équipements (imprimantes, salles de réunion, etc.) et de conserver un lien social avec d'autres professionnels ; au sein de l'entreprise, le choix devra être fait entre bureaux fixes (le salarié occupe toujours le même poste) et bureaux tournants (permettant à l'employeur de réduire la surface de bureaux pour un même nombre de salariés).

Enfin, la réduction de la longueur des déplacements est engendrée par une relocalisation de nos modes de vie. Après des décennies à prôner le «plus vite, plus loin», une partie de nos concitoyens aspire à moins se déplacer, à consommer plus local, à profiter des atouts de leur territoire. Cette réduction de la longueur des déplacements pourra être facilitée par un renouveau de l'urbanisme.

Les trajets de longue et très longue distance s'effectuent aujourd'hui principalement en avion. Son essor

a été fulgurant, avec un doublement des passagers.km observés en à peine plus de 20 ans. Ce déploiement n'étant pas compatible avec les enjeux énergie-climat (voir encadré), le scénario négaWatt envisage une forte réduction du trafic aérien. En conséquence, la longueur des déplacements est inexorablement réduite : on part toujours aussi souvent en vacances, mais moins loin ; ou si on va loin, on y va moins souvent.

LE TRANSPORT AÉRIEN DOIT ÊTRE MODÉRÉ

Dans la plupart des pays de l'OCDE, l'avion, autrefois mode de déplacement exceptionnel, s'est banalisé pour une certaine catégorie de la population. Si son usage a fortement augmenté, il reste un mode de transport utilisé par une minorité de personnes : 20% des Français et 90% des habitants de la planète ne sont jamais montés dans un avion.

Si le trafic aérien national est très souvent intégré dans les exercices de prospective énergétique, les trajets internationaux le sont beaucoup moins. Et pour cause : ils échappent aux engagements nationaux et internationaux de réduction des émissions de GES. Pourtant, ces émissions sont bel et bien présentes. Leur impact sur le climat est par ailleurs renforcé lorsque l'on prend en compte l'effet des traînées de condensation. Au global, en France, le trafic aérien est responsable d'environ 8% des émissions françaises de gaz à effet de serre. Sa décarbonation est donc indispensable, et ne pourra passer par le seul salut technologique. Par souci d'équité, parce que les ressources renouvelables manquent pour l'alimenter et parce que l'avion « propre » n'est pour l'instant qu'un mirage, le trafic aérien doit être réduit.

Au niveau mondial, le transport aérien anticipe un doublement du trafic en 20 ans, conduisant à une consommation de kérosène qui passerait de 356 à 600 milliards de litres (en supposant un gain d'efficacité énergétique de 20%).

La demande d'agrocarburant nécessaire pour substituer ce kérosène serait de 722 Mt, soit une surface utilisée d'environ 190 millions d'hectares en cas de cultures dédiées, ce qui n'est pas envisageable vu les contraintes qui vont peser sur la production agricole alimentaire à cause du bouleversement climatique.

L'extension au monde des hypothèses de sobriété de négaWatt conduirait à diviser par deux cette demande en agrocarburant, demande qui restera significative et qui ne pourra être produite par des cultures dédiées. Des agrocarburants de 2^{ème} ou 3^{ème} génération devront prendre le relai.

L'ensemble de ces hypothèses conduit à une réduction globale de 9% des km/habitant/an entre 2019 et 2030, et de 23% entre 2019 et 2050. Un Français parcourt ainsi en moyenne 19 000 km en 2019, 17 000 km en 2030 et 14 500 km en 2050.

Report modal et covoiturage permettent une baisse du trafic routier

En complément de la réduction des déplacements, le trafic routier peut être réduit grâce au report modal vers les transports en commun et modes actifs, et grâce à une augmentation du nombre moyen de personnes par véhicule. Cette réduction présente de multiples bénéfices en diminuant l'emprise de la voiture en milieu urbain, les émissions de polluants locaux, les consommations d'énergie et émissions de GES associées, etc.

Les hypothèses de report modal sont différenciées selon la nature et la zone de déplacement. Plus le territoire est dense, plus ce report modal peut s'envisager. Un juste équilibre est visé entre augmentation des transports en commun et maîtrise des investissements associés, de nombreuses agglomérations ayant déjà, par le passé, mis en œuvre des infrastructures lourdes. En parallèle, grâce notamment au déploiement de l'assistance électrique qui rend son utilisation accessible pour des trajets allant jusqu'à plus de 10 km, le vélo connaît une très forte progression.

ZOOM SUR LA MONTÉE EN PUISSANCE DU VÉLO GRENOBLOIS

Grenoble est depuis longtemps dans le peloton de tête des villes cyclables en France, aux côtés de Strasbourg et de Bordeaux notamment. En plus d'un contexte géographique très favorable, des politiques cyclables ont permis l'essor de ce mode de déplacement comme l'obligation depuis 2005 de créer des emplacements vélos (un par logement) au rez-de-chaussée des nouveaux immeubles.

À l'instar d'autres collectivités, la municipalité et l'agglomération grenobloise ont décidé depuis quelques années de favoriser encore davantage le vélo. Parmi les mesures mises en œuvre, on trouve :

- le doublement du nombre d'emplacements vélos obligatoires dans les nouveaux logements collectifs ;
- le renforcement des aménagements cyclables (autoroutes à vélo, réseau secondaire, franchissement sécurisé des coupures) ;
- l'augmentation des places de stationnement vélo (plus de 1200 places en gare de Grenoble) ;
- l'apprentissage du vélo ;
- le renforcement du service de location de vélo avec 9000 vélos en prêts longue durée (à titre de comparaison, le service de vélo en libre service à Lyon compte 5000 cycles).

Une grande partie de ces mesures sont inscrites dans le plan de mobilité de l'aire grenobloise, approuvé à l'échelle des 49 communes de la métropole. Ce plan nécessite 1,4 million d'euros (soit 3 € / hab) en fonctionnement annuel pour l'entretien courant du réseau cyclable (y compris les ouvrages d'art), et un investissement vélo à programmer de 114 millions d'euros sur 2021-2026 (43 € / hab / an). Le montant investi sur la période 2015-2020 a été de 24 millions d'euros.

Des compteurs permanents installés sur le territoire permettent de suivre l'évolution de l'utilisation du vélo. Ils indiquent une hausse de 50% des trajets à vélo entre 2010 et 2019, faisant désormais de Grenoble la ville où la part modale du vélo est la plus élevée de France pour les trajets domicile-travail : 17% selon l'INSEE, une valeur élevée pour la France, mais encore faible au regard d'autres villes européennes.

Certains véhicules routiers particuliers voient eux aussi leur part modale augmenter. C'est le cas du deux-roues motorisé et de la microvoiture. Ces deux modes sont particulièrement pertinents pour les trajets domicile-travail, lorsque des alternatives en transport

en commun ou en vélo ne sont pas accessibles. Avec des motorisations électriques, ils présentent une excellente efficacité énergétique par passager transporté. Pour les trajets longue distance, le train est privilégié face à l'avion.

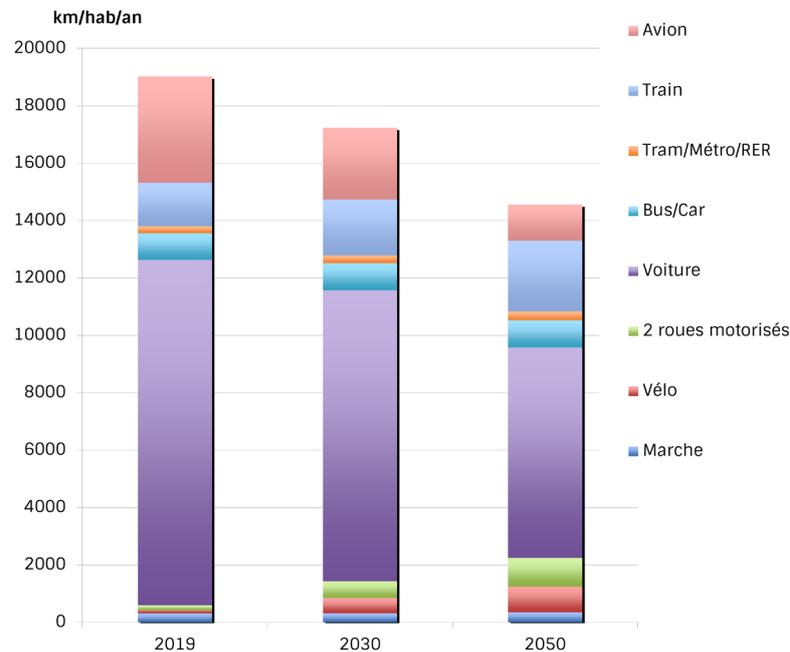


Figure 11 - Nombre de km/habitant/an par mode de déplacement dans le scénario négaWatt, en 2019, 2030 et 2050

L'utilisation des modes ferroviaires (tramway, métro et surtout le train), est fortement développée pour atteindre plus de 20% du nombre de km/hab/an en 2050 (voir figure 11) alors qu'ils représentaient moins de 10% en 2019. Le recours au vélo et aux deux-roues motorisés est aussi en forte augmentation.

L'augmentation du taux de remplissage des voitures est aussi un levier de réduction du trafic routier. Si le covoiturage longue distance a pu se développer

depuis une quinzaine d'années en France grâce à l'essor de plateformes dédiées, le covoiturage courte distance n'en est encore qu'à ses débuts. Facilités par le déploiement d'outils numériques, de nouveaux modèles sont en train d'émerger dans certains territoires pilotes (voir encadré suivant).

Dans le scénario négaWatt, le nombre moyen de personnes par véhicule particulier passe de 1,7 aujourd'hui à 1,85 en 2030 et à 2 en 2050.

PENSER LE COVOITURAGE COMME UN TRANSPORT COLLECTIF

Crédit photo : monkeybusinessimages



La jeune société Ecov déploie des lignes de covoiturage à haut niveau de service dans les territoires périurbains et ruraux. Elle ouvre la voie à un nouveau système de mobilité permettant d'accroître le taux d'occupation des véhicules. En effet, le partage et l'optimisation de l'usage de la voiture individuelle qu'elle propose vont plus loin que le covoiturage traditionnel (type plateforme web regroupant offre et demande). En lien et avec le soutien des collectivités locales intéressées, Ecov déploie des « lignes de covoiturage », structurées par des hubs (comme des micro-gares), où passagers et conducteurs se retrouvent pour un segment de trajet, comme s'ils partageaient ce trajet dans un bus ou un métro. La grande différence avec le covoiturage historique est l'absence de planification : la mise en relation est faite en temps réel, en quelques minutes, ce qui permet aux conducteurs et aux passagers de préserver leur liberté de mouvement. Ces lignes de covoiturage sont combinées à d'autres services de transport (vélo, trottinettes, etc.) grâce aux hubs. À l'image d'un bus, des voies réservées permettent aux véhicules partagés d'aller plus vite.

Sur le premier réseau de lignes déployé par Ecov, entre Bourgoin-Jallieu et Lyon, les temps d'attente sont ceux d'un transport en commun (moins de 4 minutes en moyenne) et 80 % des passagers sont d'anciens autosolistes. Le report modal est donc bien réel : les autosolistes abandonnent leur véhicule pour profiter de ce nouveau genre de transport collectif. Les conducteurs, eux, bénéficient d'une récompense financière lorsqu'ils réalisent les trajets géolocalisés sur la ligne à certains créneaux horaires.

Les politiques d'urbanisme, leviers majeurs d'évolution de la mobilité

Le scénario négaWatt mise sur un changement profond de notre manière de penser le développement urbain et rural. L'accès pour tous à des services de proximité - par cette notion, on entend aussi bien des services publics que des commerces, mais aussi des infrastructures de transport en commun ou encore l'accès aux réseaux d'énergie - doit être la norme, sans recourir à davantage d'artificialisation. Pour continuer à accueillir les logements et les zones d'activité qu'il sera nécessaire de construire, il convient à la fois de

densifier les zones déjà artificialisées qui s'y prêtent et de revitaliser les zones rurales, tout en favorisant la mixité des fonctions et des usages au sein des quartiers, voire des îlots et des bâtiments, afin de réduire les distances à parcourir.

Ce nouvel aménagement de l'espace doit laisser une plus grande place aux transports en commun comme aux modes actifs, tels que le vélo et la marche à pied. La continuité entre les modes de déplacement et la flexibilité que permettent progressivement les technologies numériques peuvent faciliter cette évolution.

AUTOPARTAGE : L'EXEMPLE DE CITIZ

L'autopartage permet de louer une voiture en libre-service de manière occasionnelle ou régulière, à l'heure, à la journée ou plus. Ce service permet de réduire le nombre de véhicules en circulation : une voiture en autopartage remplace 5 à 8 voitures personnelles et libère 1,5 à 3 places de stationnement en voirie. L'inscription à un service d'autopartage fait, en moyenne, varier fortement à la baisse l'utilisation de la voiture personnelle (-31 % de jours d'utilisation). En parallèle, elle incite généralement à augmenter l'usage des principaux modes alternatifs à l'automobile (vélo, transports en commun et marche à pied)*. L'impact de l'autopartage au niveau national reste pour l'instant marginal, le nombre d'utilisateurs étant relativement faible. L'enjeu est donc de le massifier, partout où cela est pertinent.

En France, le réseau Citiz, porté par la société coopérative France-Autopartage fondée en 2002, rassemble plusieurs opérateurs d'autopartage. En 2021, il permet à ses 60 000 adhérents d'utiliser plus de 1600 véhicules accessibles sur plus de 800 stations réparties dans 160 villes françaises. Ce déploiement se concentre principalement dans les zones urbaines, mais le milieu rural n'est pour autant pas totalement délaissé ; certaines stations sont situées dans des territoires peu denses, par exemple au sein de parcs naturels régionaux.

* Source : <https://bibliothèque.ademe.fr/consommer-autrement/458-enquete-nationale-sur-l-autopartage-edition-2019.html>, ADEME - 6-t

Réformer la fiscalité, pour un juste prix des modes de transports

La fiscalité sur l'énergie a été fortement marquée ces dernières années par le mouvement des Gilets jaunes, qui protestait notamment contre la hausse de la composante carbone appliquée sur les carburants, sans perspective d'alternatives. Cette contestation a entraîné un gel de la trajectoire d'évolution de cette composante carbone. Sans qu'elle soit l'alpha et l'omega de la politique énergétique, la hausse de la fiscalité est considérée comme étant l'un des leviers incontournables pour l'atteinte de nos objectifs.

S'il est donc indispensable de fixer à nouveau une trajectoire à la hausse du prix du carbone, il est tout autant nécessaire de mettre en place les dispositifs permettant aux ménages les plus impactés - plus particulièrement les ménages modestes - de pouvoir supporter cette évolution de la fiscalité. Des mécanismes de redistribution doivent pour cela être instaurés, en complément d'une action forte de développement des alternatives à la voiture individuelle.

Parmi les dispositifs mis en place, le bonus/malus à l'achat d'un véhicule neuf bénéficie d'un retour d'expérience conséquent. Mis en place depuis 2008, il a permis les premières années de renforcer la baisse de consommation d'énergie et d'émissions de GES des véhicules neufs mis sur le marché. Depuis 2017, il s'avère insuffisant pour freiner le boom des SUV, qui représentent aujourd'hui près de 40 % du marché français et annulent tout effort d'efficacité énergétique. Pour y remédier, l'instauration d'un bonus-malus renforcé, basé sur une analyse de cycle de vie et intégrant un critère « consommation de ressources », semble indispensable.

Mécanisme plus récent, la prime à la conversion a pour vocation d'accélérer le renouvellement du parc automobile. Si son bilan est positif dans de multiples cas, permettant à des ménages modestes équipés de véhicules polluants en fin de vie de se tourner vers des modèles plus récents, elle s'apparente aussi dans bien des cas à une prime à l'obsolescence programmée, entraînant la mise au rebut de véhicules encore aptes à rouler. Là encore une analyse en cycle de vie montre

l'intérêt de conserver le parc roulant encore en état de fonctionner. Dans ce contexte, le rétrofit, consistant au remplacement sur un véhicule du moteur thermique par un moteur électrique, pourrait être davantage encouragé.

Ces deux mécanismes du bonus-malus et des primes à la conversion sont aujourd'hui centrés sur la voiture individuelle. Si la conversion du parc roulant vers des véhicules moins émetteurs est nécessaire, le changement de pratiques l'est tout autant. À cet effet, l'aide à l'achat de vélo à assistance électrique, réduite²⁶ aujourd'hui, pourrait être considérablement élargie.

Pour les déplacements longue distance, la fiscalité de l'aérien doit quant à elle être profondément revue. Seul mode de déplacement bénéficiant d'exonérations massives, son coût pour l'usager rend le train beaucoup plus difficilement concurrentiel. Avant qu'une taxation du kérosène puisse être mise en place au niveau international, il est urgent de revoir sensiblement à la hausse l'éco-contribution sur les billets d'avion, d'instaurer une TVA sur ces billets, et de réduire les subventions allouées aux aéroports locaux.

Marchandise : baisse des tonnages transportés

Comme dans chaque secteur de consommation, le scénario négaWatt analyse les besoins afin de déterminer les hypothèses de consommation. Pour le transport

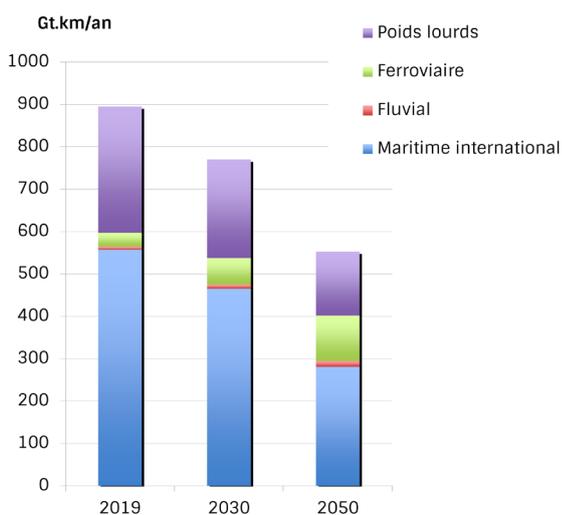


Figure 12 - Nombre de tonnes.km transportées dans le scénario négaWatt (en Gt.km) en 2019, 2030 et 2050

de marchandises, la démarche consiste avant tout à évaluer les tonnages qui doivent être transportés. Cette évaluation se base notamment sur l'évolution des tonnages consommés par chacun des secteurs industriels ; les secteurs industrie et transport sont reliés, et les hypothèses du premier influencent les besoins du second.

La relocalisation de nos modes de vie est également intégrée pour le transport de marchandises ou denrées pouvant être produites localement.

Combinées, ces différentes hypothèses permettent d'aboutir à une réduction globale des tonnes.km transportées de 14% en 2030 et 38% en 2050 par rapport à 2050 (hors véhicules utilitaires légers mais incluant le transport maritime international).

Une réduction du trafic routier

Dans le scénario négaWatt, le fret routier diminue d'abord grâce à la baisse globale des tonnes.km transportées. D'autres leviers permettent d'amplifier cette tendance : l'augmentation de la charge moyenne transportée et le report modal.

Sur le territoire national circulent à la fois des poids lourds immatriculés en France et à l'étranger. Les premiers affichent aujourd'hui une charge moyenne de 6,4 tonnes, contre 14 tonnes pour les seconds. Si la seconde reste relativement stable, la première atteint 7,1 t en 2030 et 8,3 t en 2050 dans le scénario. Cette augmentation est encouragée par une fiscalité adaptée, et facilitée par la numérisation du secteur de la logistique.

Les alternatives au transport routier - le ferroviaire et le fluvial - se caractérisent par une consommation énergétique par tonne.km transportée beaucoup moins élevée. Le ferroviaire permet également d'utiliser beaucoup plus simplement le vecteur électrique, réduisant ainsi aussi bien les émissions de gaz à effet de serre que celles de polluants atmosphériques. Dans le scénario négaWatt, le fret routier transporte 75% des marchandises en 2030 et 53% en 2050, contre 89% en 2019.

26. En 2021, l'aide d'État à l'achat de vélo électrique est conditionnée à l'existence d'une aide de la collectivité territoriale, plafonnée au montant de cette aide, et ne peut dépasser 200 €. Par ailleurs, elle ne concerne pas les vélos à assistance électrique bridés à 45 km/h (appelés speedbike), qui présentent pourtant un potentiel important de déploiement.

Les hypothèses présentées ci-dessus ne concernent que le trafic lourd de marchandises. Les véhicules utilitaires légers, à mi-chemin entre transport de marchandises (véhicules de livraison) et mobilité des personnes (artisans), voient leur charge moyenne transportée rester stable. L'évolution des véhicules. km parcourus est proportionnelle à l'évolution de la population.

Un juste prix du trafic routier pour financer les alternatives

Comme pour la mobilité des personnes, le coût des différents modes de transport doit refléter les exter-

nalités induites. Aujourd'hui, ce n'est pas le cas du trafic routier. Près de nos frontières, plusieurs pays ont mis en place une redevance kilométrique visant à prendre en compte ces externalités. Renchérissant le coût du fret routier, cette redevance permet le financement d'infrastructures ferroviaires. La Suisse a mis en place ce dispositif dès 2001 avec de bons résultats : elle constate depuis 20 ans une diminution des poids lourds à travers les Alpes suisses, alors que tous ses voisins voient le nombre de camions augmenter. La France doit suivre cet exemple en remettant sur les rails le projet de redevance kilométrique poids lourds.

4.2.6. Des véhicules routiers plus sobres, plus efficaces et aux carburants décarbonés

La consommation unitaire des véhicules est également l'un des paramètres influant sur la consommation d'énergie du secteur des transports. Différentes hypothèses sont intégrées dans le scénario négaWatt.

Les véhicules particuliers voient leur taille et leur poids se réduire, notamment grâce au développement des microvoitures (Renault Twizy, Citroën AMI, etc.). Adaptées aux courts trajets, elles présentent une réduction notable des consommations unitaires. Les autres segments de voitures s'orientent vers des véhicules plus sobres en poids, taille et carburant, les constructeurs y étant incités par un bonus-malus adapté (voir page 33). Les véhicules thermiques sont rendus plus efficaces grâce à l'introduction de technologies hybrides. Ces différentes hypothèses permettent d'envisager une baisse moyenne des consommations unitaires de 25% en 2030 et 57% en 2050 par rapport à 2019.

En complément des actions de sobriété et d'efficacité énergétique, l'utilisation de carburants décarbonés est indispensable. Quatre solutions sont aujourd'hui techniquement matures : l'électricité, le bioGNV, les biocarburants et l'hydrogène.

Le véhicule électrique, outil massif de décarbonation

Le véhicule électrique présente plusieurs atouts majeurs : il émet peu de particules fines (abrasion des pneus, des freins et de la route uniquement) ; il est beaucoup plus silencieux que ses homologues thermiques ; dans le cas d'une électricité produite à partir de sources renouvelables, c'est le plus efficace des véhicules routiers « du puits à la roue ».

Toutefois, son développement massif est aujourd'hui confronté à plusieurs freins :

- une autonomie limitée, qui de plus se dégrade dans le temps (sauf à renouveler la batterie) ;
- un nombre insuffisant de bornes de recharge et une normalisation en devenir de la connectique ;
- une durée de recharge soit longue (8 heures) avec un impact modéré sur le réseau électrique, soit rapide (1/2h) voire ultra-rapide (une dizaine de minutes) avec une puissance appelée très élevée et des conséquences sur le réseau ;
- le coût d'acquisition du véhicule, aujourd'hui encore élevé même avec des aides importantes.

Ces freins pourraient à l'avenir être au moins partiellement levés car la capacité des batteries a augmenté de manière sensible ces dernières années, et cette tendance devrait se poursuivre. De plus, l'objectif de 7 millions de bornes de recharge - lentes et rapides - à travers le territoire français devrait entraîner une dynamique d'équipement ; et des progrès technologiques attendus couplés à un effet d'échelle permettent d'envisager une baisse conséquente du coût de production du véhicule électrique.

Si ces perspectives pourraient en première approche conduire à considérer le basculement vers le tout-électrique comme possible et souhaitable à moyen terme, une analyse plus approfondie incite à une certaine prudence. En effet, si l'augmentation de la capacité et de la taille des batteries est une bonne nouvelle pour le consommateur, la conclusion n'est pas forcément la même d'un point de vue énergétique. Plusieurs analyses de cycle de vie²⁷ montrent la nécessité de ne pas les accroître davantage sous peine de présenter un bilan environnemental négatif. De plus, un point d'attention doit impérativement être porté sur la puissance délivrée par ces bornes de recharge, et sur la répartition des recharges dans le temps. Si le "véhicule-to-grid" se développe, le déploiement du véhicule électrique pourrait être une source de flexibilité pour le réseau électrique, facilitant ainsi le déploiement des énergies renouvelables électriques. C'est dans ce sens que les modes de recharge doivent être développés. Enfin, la

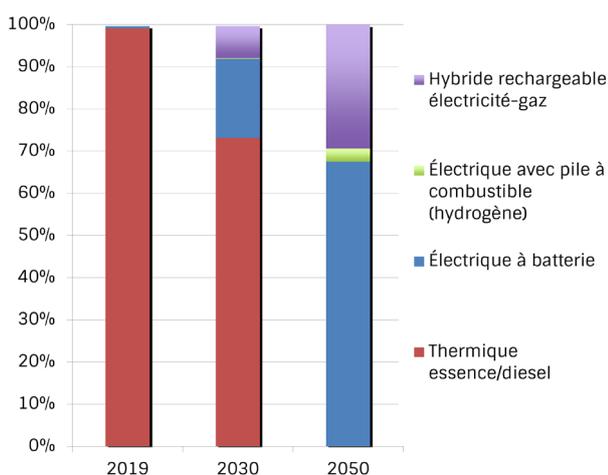


Figure 13 - Répartition des motorisations pour les véhicules particuliers (en % des véhicules.km) dans le scénario négaWatt en 2019, 2030 et 2050

question de la disponibilité des matières premières nécessaires pour la fabrication est un élément crucial. Si le parc routier mondial devait basculer entièrement vers le véhicule électrique, le lithium et le cobalt pourraient commencer à manquer après 2030-2040 (voir section 4.3.3).

Dans le scénario négaWatt, la solution électrique est fortement déployée, sans devenir pour autant l'unique motorisation. Ainsi, les voitures 100 % électriques représentent 67 % des véhicules particuliers en 2050 (19 % en 2030) et 30 % des véhicules utilitaires légers (VUL) (10 % en 2030). Les hybrides rechargeables gaz-électricité représentent en 2050 30 % des voitures (8 % en 2030) et 20 % des VUL (7 % en 2030).

Le bioGNV, complémentaire de l'électricité

Le méthane utilisé comme carburant est aujourd'hui presque exclusivement d'origine fossile (GNV), mais il peut également être produit selon différents procédés utilisant des sources renouvelables (bioGNV). Quelle que soit son origine (voir page / partie 4.4.2), le méthane-carburant permet de réduire fortement les émissions de polluants atmosphériques (particules fines, NOx), et le bruit est réduit de 3 décibels par rapport aux véhicules thermiques actuels, à vitesse égale.

Des millions de véhicules roulent déjà au GNV à travers le monde, et le réseau de transport et de distribution de gaz est bien développé en France (il dessert 77 % de la population). Le déploiement d'un parc important de véhicules au méthane-carburant ne se heurte donc à aucun obstacle technique ou industriel majeur. Sa diffusion doit par contre être impérativement couplée à une politique ambitieuse de développement du méthane renouvelable, sous peine de ne réduire qu'à la marge les émissions de CO₂ du secteur des transports. Elle reste de toute façon contrainte par le potentiel de production de ce carburant renouvelable, et doit donc être réservée en priorité aux véhicules lourds. Elle trouve aussi sa place dans les véhicules légers nécessitant des autonomies importantes, avec des motorisations hybrides.

27. Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment, ADEME, avril 2018.

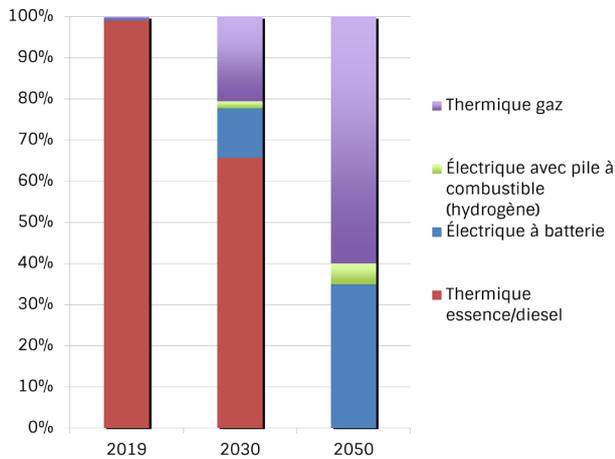


Figure 14 - Répartition des motorisations pour les véhicules utilitaires légers (en % des véhicules.km) dans le scénario négaWatt en 2019, 2030 et 2050

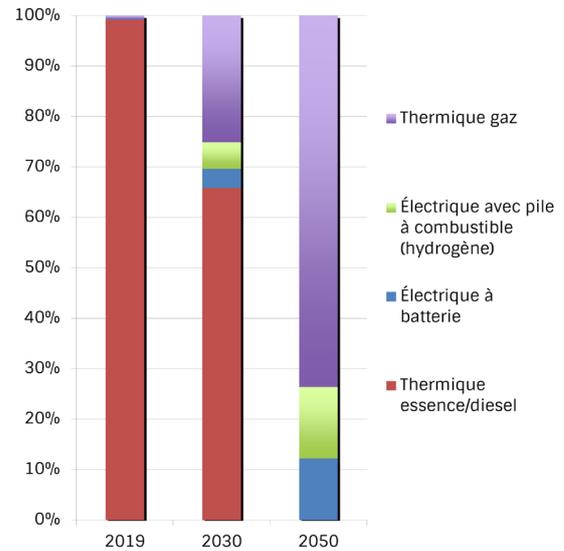


Figure 15 - Répartition des motorisations pour les poids lourds (en % des tonnes.km transportées) dans le scénario négaWatt en 2019, 2030 et 2050

Les biocarburants réservés à l'aviation

Composés aujourd'hui essentiellement de produits pétroliers mais contenant d'ores et déjà environ 7% de biocarburants, les carburants liquides qui alimentent nos voitures et nos camions peuvent demain provenir exclusivement de la biomasse. Pour ne pas entrer en concurrence avec des productions alimentaires, ces biocarburants doivent de préférence être de 2^e génération²⁸. Malgré des travaux de R&D visant à produire l'équivalent de gazole ou d'éthanol, il existe assez peu de pilotes industriels ayant donné satisfaction à ce jour pour ces biocarburants de 2^e génération. Face à l'incertitude (en particulier sur les coûts de production complets), le scénario négaWatt conserve les biocarburants de 1^{ère} génération là où il n'y a pas d'autre alternative. On évite ainsi une impasse technique jusqu'à ce que la substitution de la première par la deuxième génération soit possible.

Un frein majeur lié à un mix de carburants liquides de type gazole 100% biosourcés réside dans la difficulté

d'obtenir une composition homogène de tous les produits (c'est le seul vecteur énergétique étudié ici à présenter cette difficulté), étant donné la complexité et le nombre de molécules. Or pour massifier il faut standardiser. Demain il n'y aura plus la souplesse du mélange pétrole/biocarburants ; la composition du carburant devra être strictement identique d'une pompe à une autre, ce qui est loin d'être une chose aisée sur le plan technique.

Enfin, même s'ils sont biosourcés, les carburants liquides de type gazole restent une source importante d'émission de particules fines et d'oxydes d'azote (entraînant la formation d'ozone), deux polluants majeurs en zone urbaine. Pour combattre le fléau de la pollution de l'air, il est indispensable de s'orienter vers d'autres vecteurs énergétiques.

Les biocarburants liquides ne sont pour autant pas totalement à exclure. Leur utilisation semble indispensable dans le secteur aérien, pour lequel aucune autre alternative n'est aujourd'hui suffisamment mature.

28. L'enjeu est non seulement de ne pas utiliser des sources de biomasse alimentaire, mais également de ne pas utiliser des terres agricoles susceptibles de produire des biomasses alimentaires. Les biocarburants 2G utilisent donc des résidus de l'agriculture ou de la forêt, ou des plantes entières cultivées sur des terres les plus pauvres.

L'hydrogène, « carburant » d'avenir pour le transport routier de très longue distance

Produit aujourd'hui à partir de gaz naturel fossile²⁹, l'hydrogène pourrait demain être produit par électrolyse de l'eau³⁰, à partir d'électricité décarbonée.

Si certains acteurs industriels se positionnent dès aujourd'hui en faveur de ce vecteur énergétique, sa pertinence dans les transports routiers semble limitée :

- il n'existe pas de réseau de transport et de distribution de l'hydrogène en France, ni d'espaces de stockage³¹. Une partie du réseau actuel de transport du gaz naturel pourrait être converti pour transporter l'hydrogène, et complété par quelques nouvelles infrastructures sur certains axes. Un réseau de distribution dédié semble par contre hors de portée : son déploiement impliquerait un niveau d'investissement considérable ;
- le véhicule équipé d'une pile à combustible est gourmand en platine, matériau classé comme potentiellement critique³² ;
- les véhicules roulant à l'hydrogène présentent aujourd'hui des coûts prohibitifs (à cause notamment du platine) ; si des réductions de coût par effet d'échelle sont envisageables en cas de fort déploiement de ces véhicules, leur compétitivité économique face à des véhicules électriques ou thermiques a peu de chance d'être atteinte ;
- le bilan en analyse de cycle de vie des solutions à hydrogène et pile à combustible conduit à une consommation d'énergie primaire environ 3 fois plus élevée que celle des véhicules à batteries.

Pour ces différentes raisons, l'hydrogène - alimentant une pile à combustible, et donc un moteur électrique - est principalement utilisé dans le trafic routier très longue distance ; les poids lourds pourront alors s'alimenter le long d'un futur réseau de transport dédié à ce vecteur énergétique.

Anticiper une nouvelle stratégie industrielle de la mobilité

La France est historiquement un acteur industriel majeur du secteur des transports. Berceau de plusieurs constructeurs automobiles de référence, notre pays abrite également des filières aéronautique et ferroviaire d'excellence. Les conséquences des évolutions de nos besoins et modes de déplacement sur la demande adressée à l'industrie doivent être anticipées, au niveau national comme international. Le court-termisme doit laisser place à l'élaboration d'une feuille de route partagée avec les industriels et les partenaires sociaux.

La filière automobile française classique est en déclin depuis vingt ans. La crise en cours ne fait que renforcer cette tendance, tout comme la massification du parc de véhicules électriques : du fait de la simplicité du moteur électrique qui entraîne moins de besoin de main d'œuvre dans les chaînes de fabrication et moins d'entretien des véhicules, des dizaines de milliers d'emplois sont menacés par cette évolution.

De surcroît, face aux enjeux écologiques, la place de l'automobile doit inévitablement décroître. La création de filières dédiées sur le territoire national permettrait de compenser au moins en partie la perte d'activité constatée dans la voiture « traditionnelle ».

La stratégie industrielle française ne peut pas être uniquement centrée sur le passage au véhicule électrique. Il est nécessaire d'amorcer les éléments nécessaires à une flotte de véhicules fonctionnant au bio-GNV et de fonder une approche industrielle de la mobilité qui inclut les deux-roues, les microvoitures, les flottes d'autopartage. Dans l'électricité, les potentiels de synergie dans la chaîne de fabrication autour de composants communs (batterie, moteurs 48V) doivent être considérés pour générer des économies d'échelle. Anticiper ces marchés en donnant les bons signaux peut permettre à la filière française de structurer une offre électrique de qualité, accompagnée par une politique anti-dumping aux frontières, telle que ce qui est fait aujourd'hui sur les vélos électriques.

Les conditions de relocalisation peuvent aussi permettre de compenser partiellement les destructions d'emploi liées à la baisse de volume : revenir à une balance

29. Les gisements naturels d'hydrogène découverts ces dernières décennies ne sont toujours ni bien quantifiés, ni techniquement exploitables.

30. Une voie thermo-chimique existe également, mais elle reste au stade d'étude.

31. Quatre sites de stockage sont recensés dans le monde, trois aux États-Unis et un au Royaume-Uni. Un site pilote est en cours d'expérimentation en France ([en savoir plus sur ce lien](#))

32. BRGM, <http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite> - Le platine, 2 novembre 2017

commerciale équilibrée avec la relocalisation d'activités à plus forte valeur ajoutée que le seul assemblage permettrait de créer plusieurs dizaines de milliers d'emplois directs dans la branche automobile et d'emplois indirects dans les autres branches (métallurgie, plastique, caoutchouc, électricité, etc.).

4.2.7. Consommer et utiliser plus sobrement des produits éco-responsables

A partir de la démarche négaMat (voir section 4.1.3), il est possible d'obtenir la quantification des matériaux nécessaires à la satisfaction des besoins en biens d'équipement et de consommation chaque année en France, jusqu'au terme du scénario. Les choix de sobriété et d'efficacité, la préférence de certaines technologies pour certains usages, et des orientations stratégiques industrielles propices à la transition écologique ont pour conséquences des changements importants et positifs. Ces évolutions sont détaillées ici pour l'électroménager, le numérique, l'habillement, le BTP et le transport, les produits chimiques de l'agriculture et les emballages.

Des équipements électriques plus durables et moins consommateurs

Nous utilisons de plus en plus d'appareils électriques pour répondre à nos besoins. Mais il n'y a pas de fatalité à ce que leur durée de vie se réduise. Par un bon entretien, une meilleure réparabilité, la mutualisation de certains équipements et une lutte individuelle et collective contre l'obsolescence, le recours systématique à l'achat neuf peut être plus limité qu'aujourd'hui.

Il n'y a pas non plus de fatalité à ce que la consommation d'électricité de l'ensemble des appareils augmente sans cesse. Grâce à la mise en place de réglementations et étiquettes énergie, et aux progrès des fabricants, des gains importants d'efficacité énergétique ont déjà été faits et se poursuivront ; d'autant plus si ces efforts réglementaires sont menés plus rapidement et à des niveaux d'ambition élevés, ce que suppose le scénario négaWatt.

La manière la plus efficace de modéliser l'impact des appareils électriques et électroniques dans les logements est d'utiliser des modèles de stock. Ceux-ci reconstruisent mathématiquement les parcs d'appa-

reils actuels et futurs, en fonction des caractéristiques et évolutions supposées des ventes annuelles et des hypothèses de durées de vie moyennes. À partir d'un vaste corpus de données historiques (chiffres de vente, enquêtes, études techniques, etc.), négaWatt a pu développer de tels modèles pour 17 catégories d'appareils les plus consommateurs (voir tableau ci-dessous), ce qui lui permet d'anticiper finement l'impact de tous les facteurs, y compris comportementaux (voir encadré page suivante) sur les consommations domestiques.

reils actuels et futurs, en fonction des caractéristiques et évolutions supposées des ventes annuelles et des hypothèses de durées de vie moyennes. À partir d'un vaste corpus de données historiques (chiffres de vente, enquêtes, études techniques, etc.), négaWatt a pu développer de tels modèles pour 17 catégories d'appareils les plus consommateurs (voir tableau ci-dessous), ce qui lui permet d'anticiper finement l'impact de tous les facteurs, y compris comportementaux (voir encadré page suivante) sur les consommations domestiques.

Catégories modélisées	Sous-catégories
Réfrigérateurs	Combinés & 2 portes - 1 porte - Américain
Congélateurs	Congélateurs coffres - Congélateurs armoires
Lave-linge	
Sèche-linge	
Lave-vaisselle	Modèles standards - Petits modèles (45 cm)
Aspirateurs	Aspirateurs traîneaux - Aspirateurs balais Aspirateurs robots
Fours	Fours encastrés - Fours de cuisinières Mini-fours
Micro-ondes	
Plaques de cuisson	Plaques indépendantes - Plaques de cuisinières
Petits appareils de cuisine	Cafetières & bouilloires - Cuiseurs spéciaux Hottes
Téléviseurs	TV principales - TV secondaires
Ordinateurs	Fixes & moniteurs - Portables
Box & décodeurs	Box internet - Box TV - Autres décodeurs
Consoles de jeux	
Ventilations	VMC simple flux - VMC double flux
Circulateurs de chaudière	
Sources d'éclairage	Ampoules - Spots - Ampoules décoratives

Tableau 2 - Les 17 catégories d'appareils électriques modélisées dans le scénario négaWatt

Pour chacune de ces catégories, des hypothèses ont été formulées sur la progression attendue de l'efficacité énergétique dans les ventes annuelles (effets des progrès technologiques et des réglementations), les stratégies d'allongement des durées de vie, et les évolutions de sobriété possibles (éviter le suréquipement, meilleur dimensionnement, usage raisonnable, etc.).

Les hypothèses de sobriété tiennent notamment compte :

- des co-bénéfices qui peuvent les rendre désirables (par exemple sur la facture énergétique ou la santé) ;
- des technologies et ce qu'elles peuvent apporter pour mieux adapter le fonctionnement des appareils aux besoins réels ;

- des effets des politiques et mesures de sobriété préconisées par négaWatt ;
- mais aussi des limites possibles à l'adoption généralisée de nouveaux comportements.

En sortie des modèles, on obtient une estimation de la consommation énergétique annuelle de ces appareils sur l'ensemble des logements français jusqu'à 2050.

MIEUX UTILISER SES APPAREILS

Des comportements informés et responsables sur la manière de paramétrer et utiliser les appareils sont nécessaires pour éviter que les gains de performance soient annihilés par des pratiques déraisonnables. Grâce à l'éducation, à l'évolution de certaines normes et représentations sociales, et à des appareils plus intelligents, la sobriété peut progresser : poursuite de la baisse des températures de lavage du linge, alternatives au sèche-linge, cuisson des aliments au plus près, taille de frigos adaptée aux besoins réels, etc. Ces hypothèses de modération ne remettent pas en cause le confort apporté par l'électroménager mais visent à éviter des excès.

Dans le domaine tertiaire, où les usages d'appareils sont diffus et moins bien renseignés, le scénario négaWatt se contente d'une approche de modélisation plus simplifiée portant sur les principaux postes de consommation : opérateurs de télécom, data centers, production de froid professionnel, éclairage de bureaux et commerces, éclairage public, parc informatique tertiaire, et autres secteurs (recherche, génie civil, secteur sanitaire, etc.). Dans ce domaine aussi, des réductions significatives des consommations d'énergie peuvent être attendues et stimulées par des réglementations sur la performance énergétique des bâtiments et appareils tertiaires.

Entre 2015 et 2050, la durée de vie moyenne de la plupart des appareils électroménagers et électroniques augmente de plusieurs années, et la consommation d'électricité de l'ensemble des appareils résidentiels et tertiaires installés en France est réduite de 38%. Entre 2015 et 2030, celle-ci est déjà réduite de 18%.

DES CONSOMMATIONS RÉDUITES DE PLUS DE 40%

L'hôtel du Département du Bas-Rhin a fait l'objet il y a quelques années d'un diagnostic de ses consommations d'électricité. Plusieurs actions ont été définies permettant de réduire sensiblement la facture énergétique de différents usages, notamment :

- l'éclairage (détecteurs de présence, luminaires performants) ;
- l'informatique (arrêt des appareils inutilement allumés, matériel performant) ;
- la ventilation et les pompes de circulation (mise en place d'horloges de programmation).

Ces mesures relativement simples et bon marché ont permis de réduire la consommation d'électricité de 20 à 65% en fonction des postes. Au global, elle est réduite de 42% sur l'ensemble du bâtiment. Le temps de retour économique des investissements consentis est de moins de trois ans.

Ce retour d'expérience a depuis été conforté par d'autres diagnostics et mises en œuvre d'actions du même type. Il peut dès demain être généralisé à une multitude d'autres bâtiments tertiaires. Le potentiel est considérable.

Pas de haro sur le numérique mais un usage plus responsable

Le numérique est en train de s'imposer dans tous les secteurs de l'économie et de la vie courante. Son impact énergétique et environnemental inquiète, à juste titre. Il semble toutefois difficile d'imaginer stopper net son développement ou de s'en émanciper totalement.

Le scénario négaWatt anticipe une poursuite des usages du numérique, tout en s'inscrivant dans une prise de conscience bien plus marquée de ses problématiques environnementales. Cela se traduit par une mobilisation de tous ses acteurs, des politiques et du secteur éducatif pour faire progresser des principes et mesures de « sobriété numérique » :

- soutenir systématiquement les évolutions permettant de réduire les besoins en appareils supplémentaires : intégration des fonctions, mutualisations, lutte contre l'obsolescence, allongement des durées de vie et du réemploi ;

- réguler et plafonner les consommations énergétiques des opérateurs de télécommunications ;
- contraindre la prolifération d'usages et flux de données dont l'utilité n'est pas avérée, et imposer la concertation avant le lancement de nouvelles technologies à fort impact environnemental ;
- mieux informer sur l'empreinte environnementale des produits et favoriser les mieux-disant. L'introduction de l'indice durabilité, prévu pour 2024, doit être effectuée sur l'ensemble des produits électriques et électroniques ;
- modérer les temps d'écran et d'usage des technologies, notamment chez les jeunes (par exemple par une régulation très stricte des techniques de manipulation, dites "dark patterns", et des modes de jeux gratuits provoquant l'addiction).

Du fait des dynamiques en cours, le scénario négaWatt ne prévoit pas d'inflexion immédiate dans le développement des usages numériques. Toutefois, à partir de 2030, l'empreinte du numérique commence à se stabiliser, puis décroît grâce aux progrès soutenus d'efficacité et une maîtrise progressive des usages. Dans les foyers, le télétravail et les loisirs numériques se développent mais de plus en plus par le biais d'appareils mobiles, légers et intégrés dont les fonctions migrent en partie dans le *cloud*. Cela entraîne un recul des gros appareils

“traditionnels” (ordinateurs fixes, téléviseurs multiples, consoles de jeux de salon, etc.) et rend l'équipement domestique sensiblement moins consommateur en électricité qu'aujourd'hui. Les consommations restent en revanche importantes dans le fonctionnement des réseaux et dans les applications professionnelles, mais elles sont contenues par la priorisation donnée aux applications les plus utiles socialement (comme l'e-santé).

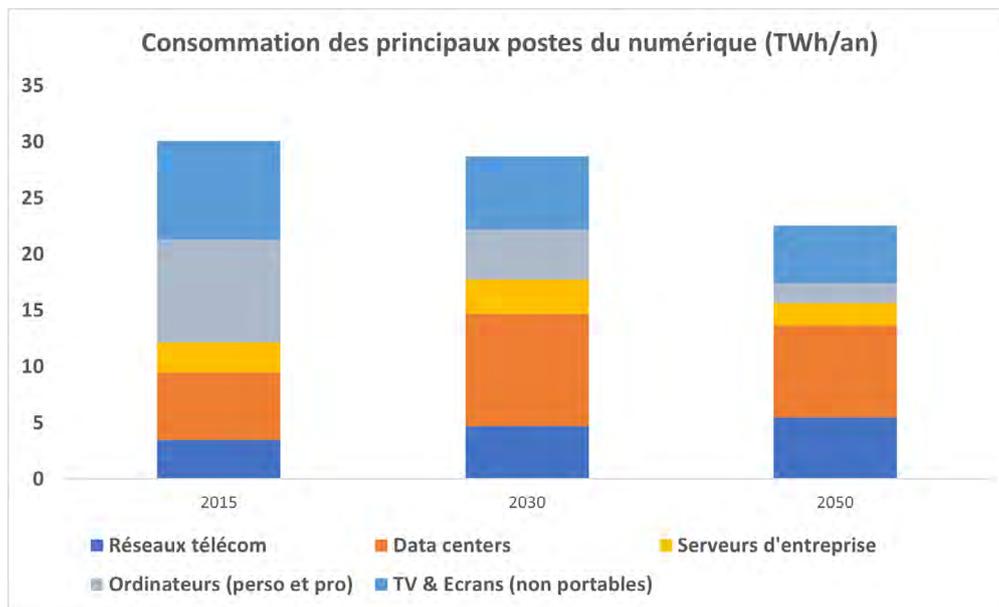


Figure 16 - Consommation des principaux postes du numérique³³ dans le scénario négaWatt en 2015, 2030 et 2050

Les évolutions d'usages et de technologies restant difficiles à prévoir dans ce secteur, le scénario inclut aussi une “réserve de sécurité” pour des usages inédits qui n'existent pas encore. Celle-ci représente 1,5 TWh en 2030, et jusqu'à près de 5 TWh en 2050 (c'est à dire pas loin de 10% de la consommation d'électricité spécifique résidentielle à cet horizon).

Réduire le gâchis de produits textiles et relocaliser leur production

On observe depuis 30 ans une augmentation importante des quantités de vêtements vendus. Ainsi la population

française achète par exemple deux fois plus de manteaux qu'il y a 25 ans alors que le besoin n'a pas augmenté : on ne peut porter qu'un seul manteau à la fois et globalement il fait moins froid...

Cette augmentation globale de la consommation est liée à une durée de vie plus faible des habits, elle-même la conséquence de la course aux prix les plus bas et à la logique commerciale de la fast fashion : les fabricants rognent sur la qualité pour baisser les coûts de production, les vendeurs cherchent à augmenter les volumes de ventes pour compenser leur perte de chiffre d'affaires, en multipliant les collections (jusqu'à

33. La forte réduction de la consommation des ordinateurs s'explique par la disparition des modèles fixes (qui consomment en moyenne 4 fois plus que les ordinateurs portables) et par la poursuite des progrès technologiques (par exemple la disparition des disques durs au profit des mémoires SSD)

douze par an) et les opérations promotionnelles. Avec cette fast fashion, le bénéfice n'est pas réel pour le consommateur qui perd en durabilité ce qu'il gagne en prix.

L'évolution du secteur du textile s'est faite au détriment de l'environnement. L'augmentation des volumes et la délocalisation de la fabrication dans des pays avec un mix énergétique très carboné conduisent à une empreinte carbone annuelle de l'habillement en France d'environ 26 millions de tonnes CO₂eq. Elle a aussi pénalisé les travailleurs du secteur, pour les pays importateurs comme la France où 300 000 emplois ont disparu en 30 ans, et pour les pays producteurs : les conditions de travail sont très mauvaises dans les pays asiatiques et la filière a été détruite dans les pays africains en raison des importations des textiles usagés provenant d'Occident. Ces conditions difficiles et la précarité d'une grande partie des salariés de la chaîne de valeur de l'industrie textile dans les pays exportateurs témoignent d'un manque de respect

des droits humains dans ce secteur et questionnent la viabilité de son modèle économique.

Sortir de ce système dangereux pour la planète et l'industrie elle-même passe par la décarbonation du secteur de l'habillement, et une démarche vertueuse. Dans le scénario négaWatt, il est possible d'agir sur toutes les sources d'émission en incitant à une moindre consommation (durée de vie plus longue des produits, augmentation de la réutilisation, hausse du taux de recyclage, etc.), en relocalisant une partie de la production en France et en maîtrisant l'utilisation de l'énergie lors de la fabrication (voir section 4.3.4).

L'application de ces différentes hypothèses conduit le secteur de l'habillement à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2035 (voir graphe ci-dessous). L'impact sur le dérèglement climatique sera encore diminué par l'emploi de coton bio et la production des fibres synthétiques à partir de polymères biosourcés.

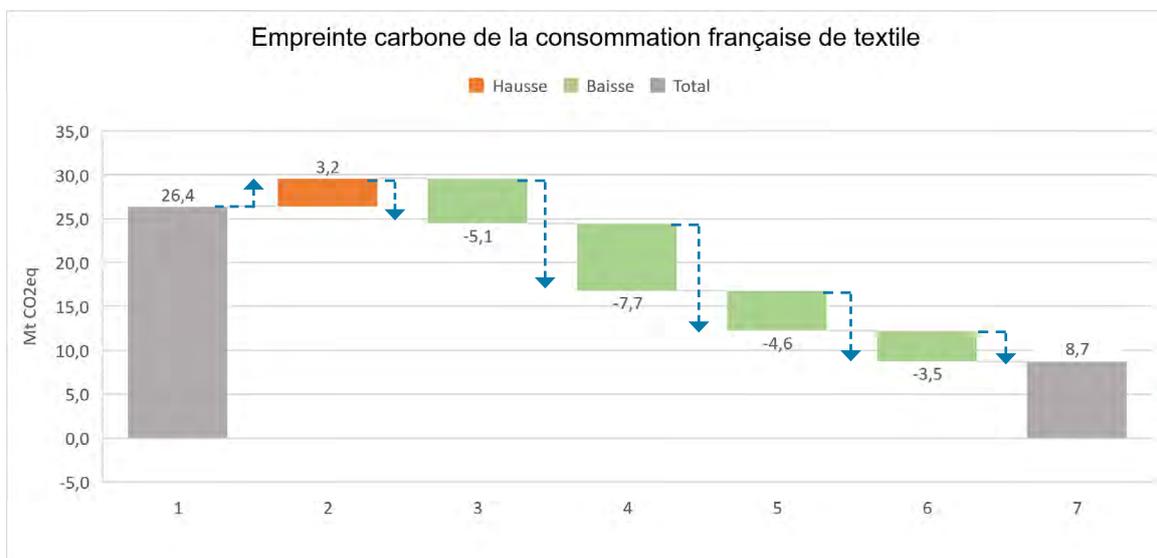


Figure 17 - Réduction de l'empreinte CO₂ de la consommation française de textile à l'horizon 2035

▲ (1) Empreinte carbone de la consommation française de textile en 2014, (2) Impact de l'augmentation de la population ; (3) Impact de la relocalisation ; (4) Impact des mesures de sobriété ; (5) Impact du recyclage ; (6) Évolution du mix énergétique mondial ; (7) Empreinte carbone de la consommation française de textile à l'horizon 2035.

Pour mettre en œuvre l'évolution du secteur de l'habillement, un ensemble de politiques et mesures aux échelles nationale, européenne, et internationale est nécessaire. Cinq aspects sont essentiels.

+ Contenir la *fast fashion* par la mise en place d'une politique de sobriété aux échelles européenne et nationale sur le secteur textile, portant sur :

- l'offre *via* la régulation du nombre de renouvellements des collections et des logiques d'influence menées par la publicité, et l'encadrement de la mise en marché de neuf (quotas européens par nombre de pièces pour les metteurs en marché) ;
- la demande grâce à l'affichage environnemental, l'information et la sensibilisation aux bonnes pratiques d'usage d'un vêtement (lavage, etc.).

+ Soutenir la mise en place d'une industrie textile durable et circulaire, notamment par le biais de la directive Eco-design, suscitant :

- l'augmentation des durées de vie qui permettra de diminuer les volumes achetés des produits, et de développer leur éco conception, par exemple par la mise en place d'un cadre réglementaire européen pour le secteur textile instaurant des normes qualité, des garanties minimales, une conception de produits plus facilement recyclables ;
- l'emploi de matières premières naturelles bio et de fibres recyclées par des normes minimales d'intégration.

+ Développer une filière européenne du recyclage textile, reposant sur un modèle économique compétitif. Aujourd'hui l'éco-organisme en charge de la collecte, du tri et du recyclage en France n'atteint qu'un tiers des produits textiles mis sur le marché et, parmi les vêtements usagés et collectés, 80% d'entre-deux sont exportés. Par ailleurs, l'éco-contribution est trop faible et ne permet pas de financer la filière de recyclage en France. Il est nécessaire de mettre en place un cadre réglementaire et économique permettant de construire un modèle pérenne et compétitif pour cette filière en :

- augmentant l'éco-contribution des producteurs pour rendre le tri et le recyclage rentables, ainsi que les objectifs affiliés à l'éco-organisme ;

- privilégiant la réutilisation au recyclage, et le recyclage à la valorisation énergétique ;
- renforçant la réglementation limitant l'export des textiles / déchets voués à être recyclés en dehors de l'Union Européenne ;
- multipliant les points d'apport volontaire et sensibiliser les consommateurs à l'enjeu du tri et du recyclage des textiles.

+ Soutenir la décarbonation du mix énergétique des pays producteurs et l'application des principes de diligence raisonnable des entreprises en matière de droits humains.

+ Porter une stratégie industrielle de relocalisation en France d'une partie de la fabrication - en commençant par la filière du lin dont la France est le premier producteur mondial - qui permettra de décarboner plus rapidement le mix énergétique de la fabrication et de recyclage en circuit court.

Deux secteurs impactés par la baisse de la demande : le BTP et les transports

Le secteur du BTP (bâtiments et travaux publics) représente aujourd'hui 26% des consommations d'énergie dans l'industrie, principalement pour produire les matériaux nécessaires : ciment, céramiques, acier, aluminium, plastiques.

Dans le scénario négaWatt, la part de la production industrielle liée au BTP n'est plus que de 14% en 2050. Cela signifie que la baisse des consommations est plus importante ici que dans les autres secteurs. Les causes sont :

- une moindre construction de logements neufs liée au ralentissement de l'accroissement démographique (voir section 4.2.1) ;
- une progression de la construction bois qui atteint 80% des maisons individuelles dès 2030 conformément à l'évolution annoncée des objectifs d'impact carbone de la construction de la réglementation environnementale (RE2020), et 95% en 2050. Dans le logement collectif et le tertiaire, elle

atteint 20% dès 2030 pour tenir compte également de l'effet incitatif de l'abaissement des seuils carbone à cette date dans la RE2020, et 40% en 2050 ;

- pour assurer le confort d'été, une part croissante de bâtiments neufs trouvent leur inertie thermique dans les matériaux géo-sourcés (terre crue sous forme d'adobe, pisé, terre coulée, etc.). Ces procédés moins consommateurs concernent 15% des maisons et 7% des bâtiments collectifs et tertiaires en 2050 (respectivement 5% et 3% en 2030).

Ceci a une forte conséquence sur les matériaux énergivores : Par rapport à aujourd'hui, la consommation de béton baisse de 46% en 2050 (et de 33% en 2030), celle de l'acier de 40% (27% en 2030). La consommation de clinker baisse de 60% en 2050 (40% en 2030) parce que sa proportion dans le ciment passe de 80%

à 66% (74% en 2030) grâce au développement du béton dit bas carbone. Quant au bois, la forte hausse de sa part de marché est compensée par la baisse de la construction neuve.

Dans le même temps, la rénovation énergétique performante (à un niveau BBC ou équivalent) est déployée à grande échelle sur l'ensemble du parc (voir section 4.2.2), et se substitue progressivement aux millions de « gestes » de travaux mis en œuvre aujourd'hui. Cette rénovation énergétique performante fait augmenter le besoin en matériaux isolants, qui sont de plus en plus biosourcés, à hauteur de 100% pour les toitures et 75% pour les murs en 2050 (respectivement 60% et 50% en 2030). Le besoin en verre plat pour les menuiseries double et triple vitrage augmente également. L'usage du PVC est globalement réduit de 60% en 2030 et 80% en 2050.

PRIORITÉ À LA RÉDUCTION DE L'ÉNERGIE GRISE

L'énergie grise liée aux activités de construction et de rénovation reste encore aujourd'hui trop peu prise en compte dans les travaux prospectifs et les politiques mises en œuvre en matière d'efficacité énergétique. L'enjeu est de taille puisque sans maîtrise de celle-ci, la consommation annuelle d'énergie grise (en énergie finale) cumulée de la construction neuve et de la rénovation pourrait venir annuler les économies d'énergie générées par le programme de rénovation et de renouvellement du parc*. La nécessité d'une meilleure optimisation des modes de construction et d'une utilisation accrue des matériaux bio-sourcés figure donc parmi les axes prioritaires à mettre en place en matière d'action politique. Celles-ci apportent des économies d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre substantielles.

* Voir sur ce point : Sidler, O. « [Les insuffisances du plan de rénovation et de la loi Climat et Résilience](#) », juin 2021

Dans les travaux publics, la construction d'autoroutes ralentit progressivement avant de disparaître en 2035 ; seules restent les activités d'entretien de ces infrastructures. La construction des nationales, départementales et routes communales, ainsi que les ouvrages d'art associés est ralentie (en moyenne -10% en 2030 et -25% en 2050). Au contraire, le rythme de construction des voies ferrées s'accélère (en moyenne +13% en 2030 et +40% en 2050 sur l'ensemble des voies ferrées) avec les ouvrages d'art associés. Globalement dans le secteur des travaux publics, l'usage de l'acier

et du bitume (recyclé à 95%) est stable, maintenu par l'entretien du parc d'infrastructures. La demande en béton, granulats et sable est en diminution de 15% en 2030 et 29% en 2050, liée à la moindre construction de nouvelles infrastructures.

Le secteur des transports se caractérise par une plus grande maîtrise de la demande de transports routiers, une vigilance quant à la taille et le poids des véhicules, une mutualisation accrue et un report modal vers les transports en commun (voir sections 4.2.4 ; 4.2.5 et 4.2.6).

Malgré ces efforts de sobriété, les ventes de véhicules particuliers restent importantes. Il faut alors résoudre l'équation difficile d'un abandon des énergies fossiles vers différentes solutions (véhicules électriques, bioGNV, hydrogène, hybrides, etc.) qui présentent des avantages et inconvénients du point de vue des matériaux. Par exemple, le développement des véhicules électriques est contraint par les ressources en lithium et cobalt et ceux à l'hydrogène par la ressource en platine, le carburant biométhane est dépendant de la mise en place des filières méthanisation et méthanation, etc.

A contrario d'autres scénarios ne retenant qu'une seule de ces technologies, le scénario négaWatt privilégie un mix de ces solutions complémentaires qui permet de réaliser les délicats équilibres entre usage, baisse des émissions de gaz à effet de serre, maturité technologique, mobilisation raisonnable des matériaux, etc.

La quantité globale de matériaux consommés en 2050 dans le secteur des transports baisse de moitié (voir tableau). Ce résultat est la combinaison entre une baisse sur les voitures individuelles (en partie sur la réduction du parc, mais aussi *via* une hypothèse forte de sobriété dimensionnelle équivalente à -30% du poids du véhicule hors batterie), les véhicules utilitaires et les poids lourds, compensée par une légère augmentation sur le train, les deux roues et les vélos, les autres moyens de transport ayant une influence moindre.

Le problème le plus critique est celui des batteries pour lesquelles le scénario négaWatt 2022 a élaboré un modèle avec trois types différents de technologies (voir section 4.3.2 et Annexes).

	2020	2030	2040	2050
Aciers	2955	2475	1787	1167
Aluminium	292	257	187	138
Autres métaux non ferreux	73	77	61	43
Batteries*	215	330	334	296
Verre	144	122	96	74
Lubrifiants	341	281	234	208
Oxyde d'éthylène	128	106	86	76
Caoutchouc	663	541	427	352
Plastiques	528	456	344	224
Autres	10	10	8	5
Total (en kt/an)	5347	4654	3564	2585

Tableau 3 - Évolution de la consommation de matériaux pour le transport (en kt/an) dans le scénario négaWatt entre 2020 et 2050

◀ Les données sur les batteries incluent les batteries 12V et les batteries de traction. En conséquence, la baisse du nombre de batteries "classiques" dans les véhicules thermiques compense en partie la hausse des matières utilisées pour les véhicules hybrides et électriques. Les composants des batteries sont déduits des consommations des autres matériaux du tableau.

Une autre chimie pour l'agriculture

Dans le secteur de l'agriculture, un des enjeux est d'avoir un moindre recours aux produits issus de la chimie des énergies fossiles. Le scénario négaWatt s'appuie sur les données du scénario Afterres qui prévoit une évolution des pratiques agricoles permettant une baisse de consommation d'engrais azotés minéraux

de l'ordre de 20% en 2030 et 52% en 2050, et des produits phytosanitaires de 30% en 2030 et 73% en 2050 (voir section 4.3.1). En amont de ces usages, les flux de production et de consommation de la chaîne de l'ammoniac, du nitrate d'ammonium et de l'urée ont été déterminés à chaque étape dans le scénario négaMat.

Or, il se trouve que la France importe aujourd'hui deux-tiers des engrais azotés qu'elle consomme et 45 % de l'ammoniac. Baisser leur consommation ne signifie donc pas automatiquement baisser leur production et réduire les emplois dans ces filières en France. Comme le montre la figure suivante, on peut reporter l'impact de cette diminution d'usage sur les importations et/ou augmenter les exportations.

La production d'ammoniac est aujourd'hui génératrice de gaz à effet de serre car l'hydrogène qui le compose est récupéré sur des molécules de méthane issu de gaz d'origine fossile, en rejetant le carbone restant dans l'atmosphère. A partir de 2035, négaWatt prévoit de remplacer ce méthane fossile par de l'hydrogène « vert » c'est-à-dire une molécule H₂ produite par électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité d'origine renouvelable (voir section 4.5.2).

Toutes ces solutions (sobriété, efficacité, ammoniac « vert ») permettent en 2050 une économie de 2,4 TWh et 3 MtCO₂eq. En empreinte, c'est-à-dire en prenant en compte les importations/exportations, cette économie est de 4 TWh et 6 MtCO₂eq.

Réduire et réutiliser les emballages

Aujourd'hui les emballages représentent à eux seuls 70% des consommations de verre, 40% de thermoplastiques et 25% de papiers-cartons. Avant d'examiner le nécessaire recyclage (voir section 4.3.2), il faut s'interroger sur la possible diminution de ce volume actuel. On distingue trois catégories principales d'évolution.

- Les emballages pour le transport et l'entrepôt des marchandises : les palettes, les cartons, les conteneurs en plastique ou en métal. Leur volume est directement lié à la quantité de marchandises acheminées vers les centres de distribution. Leur quantité (en masse) s'accroît de +10% en 2050 (+6% en 2030) dans le scénario négaWatt à cause de l'augmentation de population et la relocalisation de la production de certains produits.
- Les emballages pour le conditionnement de marchandises solides : sacs, barquettes, films. Il est possible de prolonger les tendances actuelles à savoir la limitation du suremballage, le développement de la vente en vrac et la substitution des sacs

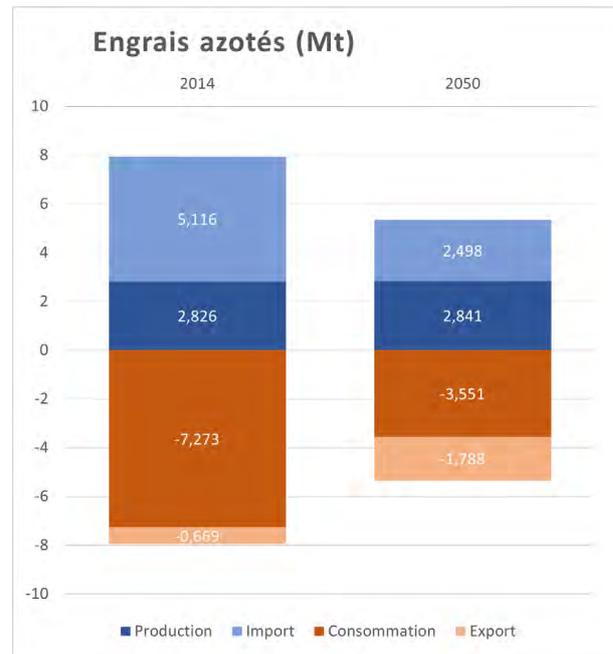


Figure 18 - Évaluation du commerce intérieur et extérieur pour les engrais azotés en 2014 et 2050, dans le scénario négaWatt

plastiques vers le papier. Ces différentes actions de sobriété induisent un recours en baisse de 40% en 2050 pour le plastique (18% en 2030) et un usage constant pour le papier.

- Les emballages pour le conditionnement des liquides. Les cartons alimentaires sont légers mais non réutilisables. Une bouteille en verre de 75 cl requiert 0,6 kWh d'énergie pour la fabriquer tandis qu'une bouteille plastique de 1,5 l ne demande que 0,5 kWh. Mais cette dernière est moins facilement réutilisable et convient pour l'eau alors que le verre est recommandé pour le vin ou l'huile. Une réduction de 10% est envisagée sur les bouteilles plastiques et 20% sur le verre en 2050 (respectivement 4% et 9% en 2030).

En plus de ces mesures, la réutilisation et la consigne sont des leviers importants pour réduire la quantité d'emballages neufs. De nombreuses initiatives existent dans ce sens (voir encadré suivant). Dans le scénario négaWatt, entre 2015 et 2050, le taux de réemploi passe de 48% à 70% pour les palettes en bois, de 0 à 25% pour les bouteilles en plastique et de 7 à 50%

pour le verre. En 2030, ces taux respectifs sont de 58 %, 11 % et 26 %. Dans ce dernier cas, le potentiel est limité par les exportations de vin qu'on suppose identiques en 2050.

L'ensemble de ces actions (avant de compter l'effet du recyclage et de l'amélioration de l'efficacité

énergétique) permet en 2050 une économie de 8 TWh de combustible et 12 TWh de matière fossile³⁴ pour les emballages.

PLUSIEURS EXPÉRIMENTATIONS EN COURS POUR LA CONSIGNE

La consigne des bouteilles en verre, utilisée en France jusqu'au début des années 1980, a disparu avec le développement des bouteilles plastiques à usage unique. Elle revient au goût du jour, par exemple dans la Drôme et l'Ardèche avec Locaverre, une structure qui porte le projet "Ma bouteille s'appelle reviens". Grâce à des points de collecte, les consommateurs peuvent rapporter leurs bouteilles en verre achetées dans les magasins partenaires, qui seront nettoyées puis redonnées à la quarantaine de producteurs engagés qui conditionnent des produits à l'intérieur.

Dans un autre registre, la plateforme Loop élabore des partenariats avec des enseignes pour vendre à leurs clients des produits dont l'emballage est consigné. Par exemple, certains magasins Carrefour en région parisienne utilisent ce système pour de la vente en ligne : après utilisation, le consommateur stocke ses emballages usagés dans un sac dédié (consigné lui aussi) qui sera récupéré par le livreur à la livraison suivante.

Ces expérimentations se multiplient pour réutiliser tous types d'emballages dont certaines sont référencées sur <https://www.lemballageecologique.com/>

Afin d'inciter les acteurs économiques et les consommateurs à réduire la quantité d'emballages, un ensemble de mesures doit être mis en œuvre pour le développement de l'économie circulaire (voir partie 3). La priorité est d'établir un système de consigne pour le réemploi des bouteilles en verre d'abord progressif puis généralisé en 2025 comme l'a proposé la Convention Citoyenne pour le Climat (proposition C3.2) et comme le réclament des entités telle que ZeroWaste France.

La consigne peut aussi concerner les emballages en PET (polyéthylène téréphtalate) dont la solidité permet d'envisager des réutilisations. Dans ce contexte, une attention doit être portée sur le risque de mettre en place des objectifs de recyclage qui ne répondraient pas aux enjeux de réemploi³⁵.

Enfin, une campagne nationale d'information pour le réemploi d'un maximum d'objets, dont certains emballages, gagnerait à être diffusée régulièrement pour sensibiliser les citoyens aux bonnes pratiques.

34. Si on combine avec recyclage et baisse de l'intensité énergétique, l'économie est moindre en valeur absolue et vaut respectivement 5 et 7,5 TWh

35. Ce risque est dénoncé par l'association Amorce dans son guide "L'élu, les déchets et l'économie circulaire", novembre 2020 (p.102), disponible sur <https://amorce.asso.fr/publications/guide-or-l-elu-les-dechets-et-l-economie-circulaire>

4.2.8. Demande en produits alimentaires et en produits biosourcés, et usage des terres

Vers une alimentation plus saine

L'alimentation est un levier majeur dans la lutte contre le bouleversement climatique. Il existe un consensus scientifique sur le fait que les produits d'origine animale représentent la grande majorité de l'empreinte climatique de notre assiette. En France, elle est d'environ 1,5 tonne de CO₂eq pour un consommateur moyen, dont plus de 80% pour les produits d'origine animale, viande, lait, poisson. Un régime demitarien³⁶ réduirait cette empreinte à 1 tonne CO₂eq, et un régime végétalien à 0,4 tonne CO₂eq. Le scénario Afterres, couplé au scénario négaWatt, repose sur l'hypothèse d'une division par deux de la consommation totale de produits animaux d'ici 2050, et une réduction de 10% d'ici 2030.

Par ailleurs, la consommation de protéines en général est très excédentaire. Elle est de 90 grammes par jour contre 50 grammes environ d'apports nutritionnels recommandés pour un adulte. Notre régime alimentaire est également excédentaire en valeur énergétique. Enfin les pertes et gaspillages tout au long de la chaîne d'approvisionnement représentent des quantités considérables de denrées comestibles perdues, de l'ordre de 20% des volumes produits. Le scénario Afterres 2050 a estimé qu'il était possible de diviser par deux les surconsommations de protéines et d'énergie, et par deux également les pertes et gaspillages. Les régimes alimentaires prévus dans ce scénario respectent l'ensemble des recommandations nutritionnelles.

Des matériaux biosourcés pour la construction, le textile, la chimie

La demande intérieure en biomatériaux pour la construction évolue peu dans le scénario négaWatt. La part du bois dans ses usages traditionnels – charpente, menuiserie – augmente et représente 80% dans la construction neuve des maisons individuelles en 2050, et 40% des logements collectifs. Cependant le nombre de nouvelles constructions diminuant, les quantités globales augmentent peu, voire diminuent. La consommation annuelle de bois d'œuvre passerait

ainsi de 4,36 à 4,07 Mt. Les isolants biosourcés remplacent en grande partie les autres matières, cependant les volumes concernés restent faibles, de l'ordre de 400 000 tonnes par an : ouate de cellulose, laine de bois, chènevotte, paille de céréales, etc.

La demande en bois d'industrie augmente légèrement. Les usages du papier graphique continuent à diminuer. De nombreux produits issus de la pétrochimie sont remplacés par des papiers-cartons, à commencer par les sacs plastiques et de nombreux types d'emballages.

La xylochimie se développe et mobilise 1 million de m³ de bois, pour produire des substituts aux produits issus de la pétrochimie. La culture de plantes fibreuses se développe pour répondre à la demande en textiles, en substitution à la fois aux fibres synthétiques et aux importations textiles comme le coton.

Utilisation des terres : zéro artificialisation nette et biodiversité

On compte aujourd'hui 5,1 millions d'hectares (ha) de surfaces déjà artificialisées et 61 000 ha supplémentaires chaque année³⁷. L'objectif du « zéro artificialisation nette » a été fixé dans le plan biodiversité de 2018. France Stratégie montre qu'il serait possible de diviser les surfaces artificialisées par cinq en 2030 par rapport à aujourd'hui. Cet objectif est possible en densifiant certaines formes urbaines et en limitant l'étalement urbain, grâce à des aménagements de l'espace et du temps de travail qui offrent plus de proximité entre les espaces de vie, de logement, de commerce et de travail. Ces aménagements, articulés avec de nouvelles modalités de travail, favorisent également la mobilité douce et diminuent les besoins d'infrastructures de transport. Le déplacement de populations entre territoires lié aux conditions d'emplois est aussi un facteur important (entre 2011 et 2016, 24 départements ont perdu de la population selon l'INSEE).

Le « zéro artificialisation nette » est obtenu dans nos scénarios par la renaturation de surfaces équivalentes, soit 10 000 ha par an. Ces surfaces sont rendues marginalement à des fonctions de production alimentaire mais peuvent constituer autant de surfaces vouées à la restauration de la biodiversité. L'objectif « zéro artificialisation nette » n'est atteint qu'en 2050 : bien

36. Demitarien : personne consommant deux fois moins de produits animaux que la moyenne

37. Il existe plusieurs façons de mesurer les surfaces artificialisées. Les valeurs citées ici sont issues de TERUTI-LUCAS. Corine Land Cover indique pour sa part 3 Mha de surfaces artificialisées en 2012 et 16 000 ha par an pour 2006-2012, tandis que les fichiers fonciers indiquent 3,5 Mha en 2016 et 23 000 ha par an entre 2006 et 2016. Voir France Stratégie, juillet 2019 : Objectif "zéro artificialisation nette": quels leviers pour protéger les sols ?

qu'une date plus précoce soit éminemment souhaitable, aucune inflexion de la tendance actuelle à l'artificialisation n'est observable, il semble même qu'elle s'accélère.

Ces chiffres intègrent les surfaces artificialisées pour les besoins de la transition énergétique. En 2050, l'ensemble des infrastructures nécessaires - centrales solaires au sol, parcs éoliens, unités de méthanisation, réseaux électriques, etc. - représente moins de 30 000 ha de surfaces artificialisées (soit en moyenne 1000 ha par an), dont 10% de surfaces imperméabilisées. Pour les parcs solaires au sol, qui constituent la majeure partie de l'emprise totale, il faut distinguer les surfaces totales incluant des co-usages ; les surfaces occupées dont une partie est végétalisée (sous les panneaux) ; et les surfaces imperméabilisées (socles). Il existe de nombreux exemples de co-usages des parcs solaires : productions agricoles, fonctions de maintien ou restauration de la biodiversité (dans des zones dégradées), périmètres de protection de la qualité de l'eau. Les surfaces strictement dédiées à la production d'énergie sont donc faibles.

La surface forestière poursuit son expansion. Elle gagne déjà en moyenne 70 000 ha par an depuis le milieu du XX^e siècle. Ce rythme s'accélère dans le scénario négaWatt / Afterres, les forêts passant de 17 à 20 millions d'hectares entre 2020 et 2050. Elles gagnent principalement sur les prairies et les terres

arables : 300 000 d'hectares sont boisés dans les régions de grande culture grâce à des opérations volontaires pour restaurer des corridors et des espaces favorisant la biodiversité. Les prairies poursuivent leur tendance séculaire à la baisse, elles perdent un million d'hectares au profit, à terme, des forêts. On veille, dans la mesure du possible, à ce que ces prairies ne soient ni mises en culture, ni artificialisées. Les terres arables perdent 1 million d'hectares (sans qu'il n'y ait de réduction globale de la biomasse agricole produite) au profit de l'artificialisation, de la forêt, et d'espaces naturels. Les espaces agricoles sont par ailleurs maillés systématiquement d'infrastructures agroécologiques, haies, bandes enherbées, arbres champêtres (y compris agro-foresterie), bosquets, jachères mellifères, mares, etc³⁸.



Crédit photo : Pixabay

38. Les très nombreux intérêts des IAE - infrastructures agroécologiques - sont expliquées sur le site OSAE : Osez l'agroécologie, Voir https://osez-agroecologie.org/imagesCK/files/bibliographie/f34_lesinfrastructuresagroecologiques-brochure09.pdf



4.3. Matières et biens de consommation : une production repensée pour minimiser les impacts négatifs

Après avoir examiné finement tous les postes de consommation d'énergie et de matières jusqu'en 2050, le scénario négaWatt s'attache à reconstruire tout aussi précisément la façon dont la production va satisfaire les besoins. L'enjeu de l'accès aux matières premières est important et va de pair avec la reconfiguration de stratégies agricoles et industrielles adaptées aux évolutions nécessaires pour une transition écologique réussie.

Entre la demande et l'offre, on considère plusieurs leviers à actionner : la juste mobilisation des surfaces agricoles et des ressources minérales dont les disponibilités ne sont pas infinies ; la substitution de matériaux par d'autres ayant un meilleur bilan environnemental ; le recyclage des matières pour minimiser l'extraction de sources premières ; l'efficacité énergétique des process industriels ; le commerce international en réduisant les importations ayant des effets négatifs et en relocalisant certaines productions.

Les approches d'Afterres et de négaMat expliquées précédemment donnent le cadre de ces nouveaux systèmes productifs plus respectueux des consommateurs et de l'environnement, créant de l'activité en France et restant équitables avec les autres pays et les générations futures.

4.3.1. Reconfigurer la production des surfaces agricoles et forestières

Le secteur agricole est au centre de nombreux enjeux. Tout en assurant sa fonction essentielle de nourrir la population, il doit se préparer aux effets du bouleversement climatique, qui sont déjà visibles et vécus par de nombreux agriculteurs en France. L'agriculture fait partie des secteurs les plus vulnérables, et l'adaptation aux variations du climat ne pourra pas se contenter de solutions partielles : un changement systémique est nécessaire. La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre peut aussi offrir des opportunités à l'agriculture qui a la capacité de fournir des services dont les principaux sont la séquestration et la substitution (c'est-à-dire le stockage de carbone dans le sol et les écosystèmes agricoles), et la production de matières renouvelables pour l'énergie et les matériaux. Enfin, comme tous les autres secteurs économiques, elle devra prendre sa part dans les stratégies d'atténuation et envisager une diminution importante de ses émissions brutes de gaz à effet de serre.

Un nouveau système agricole est nécessaire

L'agriculture doit ajouter à ses fonctions de production des fonctions de protection. Une attention plus grande doit être portée aux impacts sur l'eau, l'air, le sol, la biodiversité. Le concept de « santé globale » porte l'idée

d'une alimentation saine dans un environnement sain ; il est au cœur du nouveau paradigme agricole/alimentaire.

Le scénario négaWatt s'appuie sur le scénario Afterres qui généralise les principes de l'agroécologie (voir encadré suivant) et repose sur des modes de production à bas intrants et faibles impacts, comme l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation des sols, avec toute la gamme des formes qui s'en inspirent. Dans ces systèmes, l'agrosystème est considéré avant tout comme un écosystème. À la logique du contrôle, consistant à faire place nette à la plante cultivée en éradiquant les nuisibles, plantes adventices et ravageurs des cultures, et en apportant les nutriments nécessaires à une croissance maximale, on substitue la logique du pilotage, qui vise à trouver le meilleur compromis entre la production et la protection. On fait appel à des facteurs de production endogènes à l'agrosystème et non exogènes : lutte biologique intégrée, c'est-à-dire le contrôle des populations de ravageurs par des auxiliaires des cultures, légumineuses pour fixer l'azote atmosphérique par voie symbiotique, mycorhizes pour mieux capter le phosphore ou l'eau du sol, et de façon générale les différentes solutions fondées sur la nature. La biodiversité est ici considérée comme un facteur de production, qui ne doit pas être contrarié par le recours excessif aux biocides, qui sont également des facteurs de production.

PRINCIPES DE L'AGROÉCOLOGIE

De nombreuses définitions peuvent en être données. Les principes retenus ici sont les suivants :

- miser sur des approches « systèmes » et l'autonomie décisionnelle comme principal vecteur de progrès en agriculture ;
- optimiser et équilibrer les flux de nutriments, en particulier l'azote et le phosphore ;
- préserver les ressources naturelles, eau, sol, air, biodiversité ;
- minimiser l'usage des ressources sensibles, engrais, énergie, phytosanitaires ;
- favoriser la diversité spécifique et génétique ;
- contribuer au système local de consommation ;
- promouvoir les services écologiques, de la pollinisation à la régulation climatique en passant par la protection des ressources en eau et le paysage.

L'agriculture réoriente sa production vers plus de végétaux et plus de qualité

Les différentes formes d'agriculture à bas intrants telles que pratiquées aujourd'hui sont susceptibles d'évolution. L'agriculture biologique nécessite plus de surface, l'agriculture de conservation utilise des biocides : chaque modèle présente des avantages et inconvénients. L'agriculture idéale n'existe pas à ce jour, aussi le scénario Afterres mobilise ces deux systèmes à raison de 70% d'agriculture biologique (version améliorée sur notamment la gestion des sols) et 30% d'agriculture de conservation (version améliorée notamment sur l'emploi de biocides).

Ce choix de maintenir une part de produits de synthèse pour la production est expliqué en Annexes. Néanmoins, la consommation d'engrais azotés de synthèse est divisée par deux d'ici 2050 tandis que l'azote apporté par la fixation symbiotique est multiplié par trois et dépasse l'azote de synthèse. Le solde excédentaire d'azote au sol (susceptible de polluer les masses d'eau – cours d'eau, nappe, eaux côtières – *via* les transferts de nitrates) est divisé par deux. Les émissions d'ammoniac sont divisées par cinq. La consommation de produits phytosanitaires (autres que ceux autorisés en agriculture biologique) est divisée par dix. Enfin, la consommation d'énergie de l'agriculture est divisée par deux.

Les productions agricoles végétales sont maintenues globalement à un niveau proche du niveau actuel. Les productions de céréales et oléagineux sont réduites, celles de fruits et légumes augmentent. Les productions fourragères diminuent en même temps que les cheptels animaux sont réduits. La production de protéagineux et d'engrais verts en cultures intermédiaires augmente fortement afin de réduire les besoins en engrais minéraux azotés. Un tiers de ces engrais verts est utilisé *via* la méthanisation pour produire également de l'énergie.

Les productions animales sont ré-orientées vers des systèmes disposant d'un signe de qualité. Les élevages de poules pondeuses en cages sont totalement abandonnés. Pour les autres granivores (volailles de chair et élevages porcins), le scénario mise sur des modes de production plus extensifs (réduction des densités, allongement des durées d'élevage, accès plein air, etc.). Les élevages de ruminants (notamment les bovins pour le lait) ont plus recours à l'herbe et au pâturage qu'aujourd'hui, afin de conserver au mieux les prairies naturelles et de réduire l'utilisation des terres arables pour l'alimentation du bétail sous forme de maïs fourrager ou de concentrés (grains et tourteaux). La production de viande et de lait ramenée à la consommation d'aliments diminue, et le bien-être animal s'améliore significativement. Les cheptels sont largement redimensionnés, avec une division par

deux et demi des places de porcs, par deux des places de poulets, et par deux du nombre de vaches, et un basculement progressif vers des races mixtes capables de produire à la fois du lait et de la viande de qualité. Toutes les productions actuelles bénéficiant d'un signe de qualité (comme l'AOP ou l'IGP) sont conservées. Ces changements entraînent d'importantes modifications géographiques, car on cherche à maintenir autant que possible les élevages de ruminants en régions de montagne, là où les alternatives sont peu nombreuses et souvent limitées à l'afforestation. Ce sont les régions d'élevage intensif, notamment le Grand Ouest, tant pour les ruminants que les monogastriques, qui vont voir leurs cheptels diminuer et les productions agricoles basculer largement vers le végétal. Les productions animales réduites en quantité gagnent en qualité, en même temps que de nouveaux débouchés sont recherchés (légumes de plein champ, prés-vergers, céréales panifiables, légumineuses, etc.) pour répondre notamment à la demande alimentaire locale.

La forêt se développe avec une intervention humaine raisonnée

Les enjeux concernant la forêt sont majeurs. En Europe, les politiques forestières reposent sur le principe de la multifonctionnalité, avec une tendance à renforcer les dispositions en faveur de la biodiversité et du stockage du carbone. Les forêts sont sans doute l'écosystème qui sera soumis aux plus fortes tensions, à cause du changement climatique et des multiples attentes dont elles font l'objet. Le temps de la forêt est un temps long, bien plus que celui de l'agriculture. Or la forêt est déjà soumise à une multiplicité de stress qui se cumulent et se renforcent, générant une crise systémique. Les arbres ne peuvent pas supporter facilement des sécheresses à répétition, ils deviennent plus sensibles aux maladies et aux attaques de ravageurs, aux risques de tempête et aux incendies. En France, il est probable que des événements extrêmes conduisent à des dégâts au moins deux fois supérieurs à ceux des tempêtes Lothar et Martin en 1999, avec plus de 300 millions de m³ de bois abattus. Les risques postérieurs de maladies et d'incendie sont accrus, faisant craindre des impacts majeurs pour la forêt.

Face à ce risque, deux stratégies sont possibles. La première, dite d'extensification, repose sur l'idée qu'une forêt peu perturbée par l'activité humaine sera plus en

capacité de faire face à ces risques. La seconde dite d'intensification, considère au contraire que seule l'intervention humaine sera capable de restaurer les peuplements dégradés et de renouveler les essences adaptées au nouveau climat. Les travaux de recherche scientifique qui explorent ces différents scénarios sont récents. Il semble que les stratégies d'extensification soient gagnantes à court terme, mais que les stratégies d'intensification le soient à plus long terme³⁹. Toute la question est de savoir s'il faut privilégier les résultats de court terme ou ceux de long terme.

Le scénario négaWatt considère que la priorité est de laisser le carbone fossile dans le sous-sol. Il convient donc, au-delà des économies d'énergie, de poursuivre la substitution de bois énergie aux énergies fossiles, tant qu'il reste des énergies fossiles à substituer. Pour autant, les volumes qui peuvent être prélevés, aussi bien pour les usages matière que pour les usages énergie, ne doivent augmenter que modérément, d'une dizaine de millions de mètres-cubes par an.

Autrement dit, entre les deux scénarios extrêmes, notre parti pris se situe désormais entre les deux, avec une inclination plus forte pour les stratégies d'extensification, qui paraissent également offrir plus de bénéfices écologiques et sociétaux. Les stratégies climatiques ne doivent pas reposer trop fortement sur la capacité de séquestration de la forêt, car elle est trop incertaine, ni sur une mobilisation beaucoup plus importante de bois, car il n'est pas suffisamment bien établi qu'une plus forte augmentation des prélèvements soit compatible avec les objectifs de restauration de la biodiversité et la préservation de la fertilité du sol.

Les productions de biomasse matière restent stables

En France, les prélèvements de bois en forêt sont stables, ils auraient même tendance à diminuer. En effet, les productions de bois d'œuvre (BO) et de bois d'industrie (BI) sont en légère diminution tendancielle, comme les statistiques le montrent. Le bois énergie suit un mouvement identique de baisse, même si les volumes prélevés actuellement en forêt ne sont pas connus avec précision (voir encadré suivant).

Dans le scénario négaWatt, la production de bois d'œuvre et de bois d'industrie reste proche des niveaux actuels,

39. Il existe de nombreux travaux sur ces sujets, beaucoup concernent le bois énergie mais la problématique s'applique également au bois matériau : Cowie A., Berndes G., Bentsen N. et al, Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy, CGB Bioenergy, Avril 2021 ; Roux A., Colin A., Dhôte J.F. et al, Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique, Novembre 2017 ; Camia A., Giuntoli J., Jonsson K. et al, The use of woody biomass for energy production in the EU, JRC, 2020.

avec respectivement 18 et 13 millions de m³ (Mm³) par an, soit près de 30 Mm³ pour l'ensemble BO-BI. Cette production permet de couvrir la demande intérieure, et également d'inverser le solde de la filière forêt-bois qui, en France aujourd'hui, est déficitaire en produits bois, pâte à papier, bois d'œuvre, et excédentaire en vieux papiers faute de capacité industrielle. En 2050, elle est en mesure de recycler l'intégralité de ses vieux papiers, et la diminution de la demande permet de dégager un solde excédentaire, contribuant à réduire les importations européennes en produits bois et dérivés.

La substitution de produits issus de la pétrochimie peut s'effectuer très schématiquement à partir de trois grandes voies, dont les deux premières sont des voies biosourcées :

- la xylochimie utilise des matières ligno-cellulosiques. Leur transformation en produits finaux substituables à des bases pétrochimiques nécessite des procédés complexes et coûteux ;
- les matières telles que l'amidon, l'huile, le sucre, sont plus faciles à convertir en matières de base pour la chimie, mais cet usage vient en compétition avec l'alimentation et de nombreux autres usages ;

- la troisième voie repose sur les technologies Power-to-X* qui permettent de produire du méthanol à partir d'hydrogène et de gaz carbonique.

Le scénario négaWatt privilégie le Power-to-X pour toutes les bases de chimie organique qui peuvent passer par des voies méthanol. Pour les autres, il est nécessaire de passer par la filière éthanol basée sur des cultures agricoles, avec des quantités limitées pour des questions de concurrence avec les autres usages. Enfin la xylochimie concerne des volumes assez modestes, de l'ordre d'un million de m³ de bois par an.

Les plantes à fibre comme le lin et le chanvre voient leurs surfaces doubler et passer à plus de 200 000 hectares.

* Le Power-to-X consiste à utiliser de l'électricité (power) pour fabriquer de l'hydrogène (H₂) à partir de l'électrolyse de l'eau. On a alors du Power-to-H₂. Mais si on transforme la molécule d'hydrogène en méthane ou en méthanol, on a alors du Power-to-gas ou du Power-to-methanol.

ÉVALUATION DES CONSOMMATIONS DE BOIS ÉNERGIE ACTUELLES

Il est notoire que le bois énergie échappe largement à l'appareil statistique compte tenu du poids des circuits courts. Sa production a été récemment estimée à 16 millions de m³, soit une chute importante depuis les années 2000, où les volumes de bois énergie issus de la forêt étaient estimés aux environs de 23 Mm³. Les nouvelles filières (bois plaquette pour les chaufferies biomasse, et granulés) ne compensent pas le déclin des usages traditionnels (bois bûche pour le chauffage domestique). Les raisons sont sans doute multiples : amélioration des rendements des appareils, de l'isolation des bâtiments, utilisation d'autres énergies de chauffage ; mais la principale est peut-être la diminution de la population agricole, actifs et retraités, qui jouaient un rôle important dans la production et la distribution du bois bûche.

40. Mora O., Le Mouél C., de Lattre-Gasquet M., Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. Plos One, Juillet 2020.

Importations et exportations évoluent avec une plus grande production nationale

Le scénario Afterres vise parmi ses objectifs à assurer une plus grande autonomie.

Les importations de matières sensibles ou critiques sont réduites voire supprimées lorsque cela est possible. Les exportations sont également réduites, mais dans de moindres proportions que les importations. Les travaux de prospectives menés à l'échelle mondiale convergent sur le constat d'une nécessité de maintenir certaines exportations vers les régions qui seront structurellement déficitaires⁴⁰, pour des raisons démographiques et climatiques. La France remplacerait ses exportations de céréales fourragères (destinées à l'alimentation des animaux en Europe) par des exportations de denrées destinées à l'alimentation humaine, avec une préférence pour des exportations dans l'espace méditerranéen et sahélien.

Il est en effet essentiel de raisonner en « empreinte carbone » de notre consommation et non en seules émissions territoriales correspondant à la production (voir section 4.1.3). La différence entre les deux correspond au solde import-export. Il ne suffit pas de réduire les importations pour réduire l'empreinte, il faut améliorer le solde, donc moins diminuer les exportations que les importations (voir page suivante).

Si nos importations contribuent à la « déforestation importée », nos exportations contribuent inversement à la « déforestation évitée », réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et améliorant la biodiversité. Le meilleur indicateur ici est celui des surfaces importées, car c'est le facteur principal de perte de biodiversité. L'alimentation d'un Français mobilise en moyenne 4300 m² dont un tiers de surfaces importées, qui se répartissent entre 114 m² pour les oléo-protéagineux (les fameux tourteaux de soja), 180 m² pour les fruits, légumes, café, cacao, et surtout 1030 m² pour la viande et le lait. Le poids des produits animaux dans la surface totale est de 3620 m² soit 85 % du total. Ce n'est donc pas simplement la diminution de la consommation de café et de chocolat, ni la relocalisation des protéagineux pour supprimer la déforestation au Brésil qui seraient les principaux facteurs, mais surtout la diminution de la consommation de produits animaux.

Les importations de soja, utilisées essentiellement pour l'alimentation animale, sont entièrement supprimées dans le scénario négaWatt, en combinant substitution

par des protéines produites en Europe, diminution des besoins en alimentation animale (notamment par l'allongement des durées d'élevage des granivores), et baisse des cheptels. La majorité des productions agricoles qui peuvent être relocalisées le sont, afin d'éviter le transport de matières pondéreuses sur de longues distances.

Les importations de café et cacao sont en grande partie maintenues, faute de substituts. Celles de fruits et de légumes sont réduites grâce à différents moyens :

- relocalisation des productions par exemple pour les légumes, ou les agrumes dans le Sud-Est qui verront leur aire de production s'élargir avec le changement climatique ;
- substitution des produits, comme les jus de raisin ou de pomme à la place du jus d'orange ;
- réduction modeste des importations de fruits tropicaux pour lesquels il n'existe pas de substituts.

Les produits de la pêche, en grande partie importés, sont fortement réduits dans le scénario négaWatt. La pêche dans le monde telle qu'elle est pratiquée actuellement n'est pas durable car les prélèvements dépassent les limites planétaires. Par ailleurs, bien que la pêche émette directement assez peu de gaz à effet de serre, elle a des effets indirects importants. On a évalué son impact à près d'un milliard de tonnes de CO₂ à cause principalement du chalutage profond, qui détruit la biomasse sous-marine⁴¹. Comparé aux 5 milliards de tonnes de CO₂eq émis par l'agriculture au niveau mondial, la protéine issue de l'exploitation halieutique présente donc un impact similaire à celle issue des élevages. Dans le scénario Afterres, les ressources halieutiques sont donc limitées à la capacité de production des eaux territoriales, ce qui implique une division par 2 à 3 des volumes consommés en France. Ces hypothèses pourront être révisées en fonction des résultats de programmes de recherche.

Le bois et les produits dérivés (papier, menuiseries) représentent actuellement un déficit commercial important, en volume et en valeur. Les importations sont réduites et compensées par des exportations, de produits transformés plutôt que de produits bruts. Les exportations de vieux papier sont supprimées grâce à l'augmentation de la capacité des usines de recyclage.

41. Sala E., Mayorga J., Bradley B. et al, Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate, 17 Mars 2021. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03371-z.epdf>

4.3.2. Une industrie plus locale et moins gourmande en matériaux

Largement concernée par le poids de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans sa production, l'industrie développe déjà de nombreux projets d'efficacité énergétique et de décarbonation. Certaines filières ont élaboré des feuilles de route pour baisser leurs émissions de gaz à effet de serre et l'ADEME, de son côté, construit des plans de transition sectoriels⁴² pour donner une vision globale des enjeux.

Les solutions sont connues et quantifiées dans le scénario négaWatt : leur déploiement doit être engagé au plus vite et soutenu sur le long terme, tant du côté de l'efficacité énergétique (voir section 4.3.4) que de la réduction de l'usage de matériaux. Cette dernière a été soigneusement considérée dans négaMat.

Quel développement pour la production et la consommation ?

Comme présenté dans les chapitres précédents, la transition énergétique a un fort impact sur la structure de la demande finale : les types de mobilité et les procédés constructifs changent, les biens de consommation sont plus durables, la demande de l'agriculture en intrants change. Cette évolution de la consommation impacte fortement le secteur industriel : les volumes baissent, les matériaux utilisés changent, la qualité augmente de façon à produire de manière plus durable et vraiment recyclable.

Ainsi, si certains secteurs ont une demande en croissance (les énergies renouvelables, le ferroviaire, les batteries, la chimie fine, etc.), d'autres secteurs ont au contraire une activité en baisse (les plastiques, le ciment, les engrais, etc.). Quel impact ces évolutions vont avoir sur la production industrielle ? Plusieurs cas sont à considérer (voir figure 19 ci-dessous) selon que le secteur est importateur ou exportateur net, c'est-à-dire que le coefficient P/C (voir encadré suivant) est inférieur ou supérieur à 1 :

- si la demande est amenée à augmenter : c'est une opportunité pour que la production accompagne cette hausse grâce à des mesures incitatives de production locale, voire de relocalisation, et éviter que la hausse se répercute sur les importations ;
- si la demande diminue pour un secteur exportateur, il est difficile d'imaginer que la production oriente ses excédents vers toujours plus d'exportations, surtout s'il s'agit de produits nuisant à l'environnement. Par contre, si le secteur est importateur, on peut répercuter cette baisse de consommation sur les importations et maintenir la production intérieure.

Pour aborder ce sujet complexe, le scénario négaWatt dispose d'un module de stratégie industrielle avec des hypothèses de modification du commerce international pour chaque matériau et chaque bien de consommation.

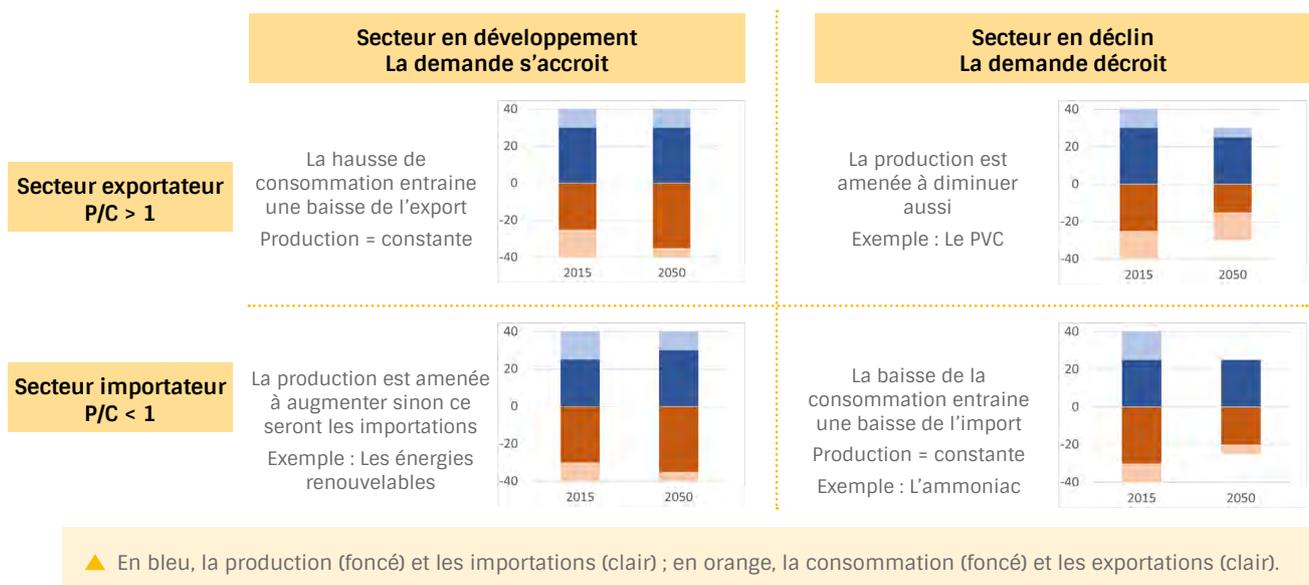


Figure 19 - Différentes configurations de développement de la production selon que le secteur est importateur ou non, et en croissance ou non

42. Voir sur <https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/actualites/plans-transition-sectoriels-decarboner-lindustrie>

LE COEFFICIENT P/C, UN INDICATEUR DE LA VITALITÉ DE LA PRODUCTION NATIONALE ET DE LA RELOCALISATION

La production, qu'elle soit réalisée à l'intérieur du territoire (P) ou importée de l'étranger (I), est égale à la consommation réalisée à l'intérieur (C) ou exportée à l'étranger (E). On a donc l'équilibre $P+I = C+E$ symbolisé par les barres bleues et oranges de la figure 19 en page précédente. Lorsque le secteur est globalement importateur ($I > E$), alors le rapport $P/C < 1$. Inversement, lorsque le secteur est globalement exportateur, on a $P/C > 1$. Le rapport $P/C = \text{Production} / \text{Consommation}$ est donc un indicateur de la vitalité de l'économie du secteur considéré. Augmenter P/C revient à relocaliser alors que sa diminution est synonyme de délocalisation.

Vertus et limites du recyclage

L'intérêt du recyclage n'est plus à démontrer. Il permet une économie réelle de matière première mais également d'énergie et de gaz à effet de serre dans les process de fabrication. L'économie d'énergie peut être supérieure à 90% entre un matériau primaire

et un matériau recyclé (voir figure 20 ci-dessous), surtout si l'on tient compte des combustibles entrant dans la composition (pétrole pour les plastiques, bois pour le papier).

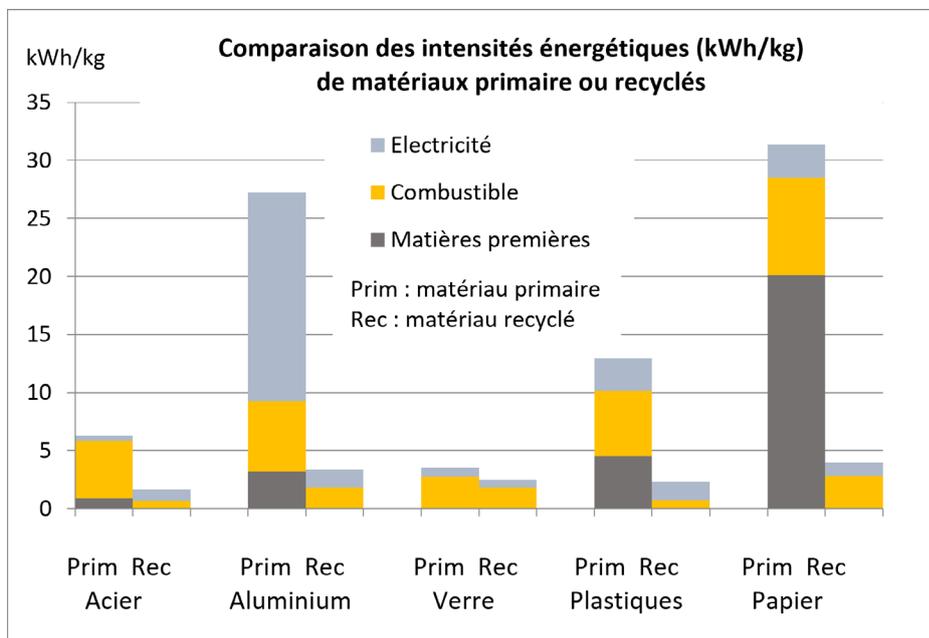


Figure 20 - Comparaison des intensités énergétiques (en kWh/kg) pour produire différents matériaux selon qu'ils sont primaires ou recyclés

DU BIEN USAGÉ AU RECYCLAGE INDUSTRIEL

Les biens usagés et les déchets ont quatre destinations possibles : enfouissement, valorisation agricole, incinération ou bien centre de tri avec un taux de collecte. Dans le centre de tri, tous les matériaux ne sont pas également récupérés. Pour l'acier, un électroaimant fait l'affaire et le taux de récupération est souvent très bon. Pour les plastiques, il est parfois difficile de les trier et de les séparer et le taux est moins bon. Le rebut repart en déchet. Du centre de tri à l'usine, les matières premières recyclées (MPR) sont souvent exportées ou importées. Une partie peut être refusée si le centre de fabrication juge que la qualité est insuffisante. La part qui est injectée dans le process de fabrication avec le matériau vierge contribue au taux d'incorporation de MPR.

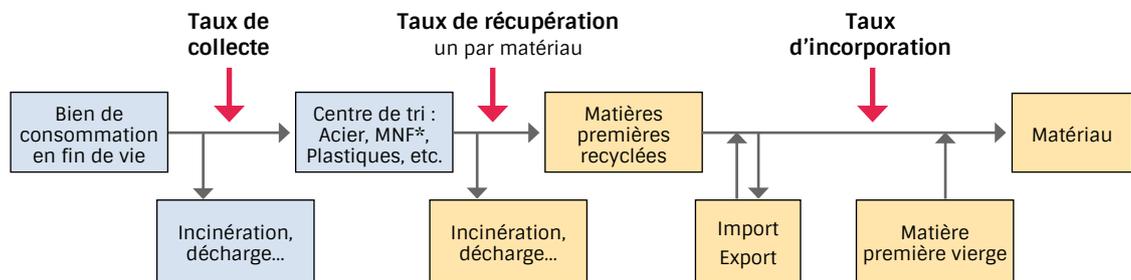


Figure 21 - Schéma de flux de matière recyclée depuis le déchet jusqu'à l'usine d'incorporation en vue de fabriquer de la matière régénérée.

* (MNF = matériaux non ferreux)

Plusieurs obstacles peuvent limiter le taux d'incorporation :

- la collecte de déchets et leur acheminement ne sont pas optimisés ;
- le centre de tri n'est pas performant et la récupération des différents matériaux se fait avec difficulté ;
- les MPR sont exportées au lieu de repartir dans le processus (c'est particulièrement le cas en France) ;
- le gisement de déchets est insuffisant pour la production. Le volume de déchets est théoriquement égal à la consommation du produit n années auparavant (si n est sa durée de vie). Or dans une économie en croissance (cuivre, batteries, etc.), ce volume de déchets sera inférieur au volume de la demande d'aujourd'hui ;
- la qualité (résistance, aspect, etc.) du produit à partir de MPR peut être jugée insuffisante pour certaines applications.

Avant de remplacer la matière primaire par de la matière recyclée dans le processus de fabrication, de nombreuses étapes sont nécessaires (voir encadré précédent) et plusieurs obstacles s'opposent à un taux d'incorporation aussi élevé que celui souhaité. Pour mieux évaluer la part du recyclage dans le futur, le scénario négaMat contient un modèle « déchets et récupération » qui intègre la durée de vie des objets, le gisement de déchets, les taux de collecte et de récupération. *In fine*, on compare le taux d'incorporation calculé avec ce gisement et le taux maximum possible compte tenu de la technologie. Le plus petit de ces deux taux est retenu comme taux d'incorporation réel (voir tableau 4). Au total, le recyclage permet un gain de 28 TWh en 2050, auquel il faut ajouter 46 TWh de matières premières économisées (essentiellement fossiles).

	2014	2050	2050
	Réel	Possible	Réel
Acier	43 %	80 %	80 %
Alu	55 %	85 %	68 %
Cuivre	17 %	95 %	70 %
Lithium	0 %	90 %	77 %
Verre creux	57 %	80 %	50 %
Bitume	0 %	90 %	90 %
Lubrifiants	0 %	90 %	90 %
Plastiques	6 %	90 %	41 %

Tableau 4 - Comparaison des taux d'incorporation de différents matériaux dans le scénario négaWat, en 2014 et en 2050 (taux cible et taux réel)

Plusieurs secteurs industriels se développent ou se relocalisent

Les plans de relance post-Covid de 2021 puis 2022 sont orientés vers une volonté d'autonomie stratégique et de leadership technologique. Ils s'appuient sur la préservation « quoi qu'il en coûte » de l'industrie française et particulièrement de ses poids-lourds actuels (automobile, nucléaire et transport aérien notamment) sans contrepartie pour la transition écologique. Le scénario négaWatt propose une orientation significativement différente, qui utilise les points forts du pays pour construire le futur et prend acte des évolutions du monde à venir.

La transition va provoquer la croissance - en France et dans le monde - de secteurs qu'il faut s'attacher à développer sur notre territoire :

- la demande pour le transport ferroviaire, en vélo et deux roues motorisés, les équipements pour le véhicule électrique (batteries, moteurs, électronique de puissance), ainsi qu'une relocalisation de la construction de véhicules légers vont permettre d'amortir la forte décroissance attendue de l'automobile et de l'aérien ;
- dans le secteur de la production et de la distribution d'énergie, il est possible de développer une offre en France sur les filières émergentes : éolien offshore, méthanisation, filière hydrogène, ainsi que de relocaliser la fabrication de modules photovoltaïques (voir encadré), très électro-intensive ;
- la rénovation énergétique des bâtiments se répercute sur une demande en hausse de matériaux de construction (isolants thermiques) et d'équipements mécaniques comme les pompes à chaleur ou les ventilations mécaniques.

LA FABRICATION DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN FRANCE EST NÉCESSAIRE



Crédit photo : Pixabay

Aujourd'hui, l'industrie photovoltaïque française est très majoritairement composée d'usines d'assemblage final des panneaux pour une capacité totale de production de 880 MW fin 2020. Ce chiffre est à mettre en regard d'un marché qui a stagné plusieurs années aux environs de 900 MW/an et a atteint 2000 MW seulement en 2021, alors qu'il doit être porté à 4000 MW/an pour atteindre les objectifs hauts de la Programmation pluriannuelle de l'énergie à 2028 (soit environ 10% du marché européen à cette échéance).

L'implantation en France d'usines de production des étapes amont (lingots, wafers et cellules, qui sont actuellement fabriqués presque exclusivement en Asie) est donc un enjeu à la fois stratégique (indépendance énergétique et industrielle), économique (valeur ajoutée), social (emploi) et environnemental (division entre 2 et 4 de l'empreinte carbone suivant les hypothèses retenues). Actuellement, seule l'entreprise Photowatt, filiale d'EDF, dispose d'une capacité de 50 MW/an de production de ces étapes amont.

Des projets d'usines beaucoup plus importantes (de 2 à 4 GW/an), portés aujourd'hui par des industriels européens, doivent être soutenus en France par l'État et les collectivités locales. En particulier, un malus basé sur un prix du carbone visant 50€/t en 2022 (voire plus si les marchés restent à la hausse comme début 2022) et 100€/t en 2030 doit être appliqué aux projets demandant de l'aide publique (dans le cadre des appels d'offres de la CRE ou des tarifs d'achat garantis) pour permettre de lutter à armes égales avec les fournisseurs utilisant un mix énergétique très carboné. Grâce au nombreux brevets déposés par le CEA via l'Institut National de l'Énergie Solaire*, la France dispose d'avantages compétitifs à un moment où le basculement de l'industrie photovoltaïque vers la technologie de l'hétérojonction ouvre la porte à des gains substantiels de rendement, de matières premières, d'empreinte et de coût. Relocaliser la fabrication des panneaux en France permettrait de gagner environ 3 MtCO₂eq/an sur l'empreinte carbone de la France, pour un rythme d'installation de 4 GW/an. Le surcoût, inférieur à 250 M€/an, serait largement compensé par les gains en empreinte et par les gains pour les finances publiques liés à l'activité économique relocalisée.

* voir www.ines-solaire.org/

Au-delà des secteurs en développement liés à la transition énergétique, des ré-industrialisations ciblées peuvent être engagées sur des secteurs industriels

pour lesquels la France est importatrice, quand cela présente un avantage environnemental et social.

	Solde commercial	Production	Consommation	P/C
	(Milliards d'euros)			
Habillement, cuir, textile	-13,1	22,9	36	0,64
Bois & Papier	-4,1	30	34,1	0,88
Chime	11	73,4	62,4	1,18
Pharmacie	1,8	38,3	36,5	1,05
Caoutchouc et plastique	-5,7	34,6	40,3	0,86
Métallurgie & produits métalliques	-5,8	83,4	89,2	0,93
Informatique, électronique, optique	-13,7	36,2	49,9	0,73
Équipements électriques	-3,8	31,8	35,6	0,89
Machines et équipements	-2,1	48,5	50,6	0,96
Automobile	-4,5	105,5	110	0,96
Autres matériels de transport	20,7	52	31,3	1,66
Meubles et autres	-8,1	21,8	29,9	0,73

Tableau 5 - Production, consommation et solde commercial (en milliards d'euros) de plusieurs secteurs de l'industrie française en 2014, et ratio production/consommation (P/C)

Les secteurs industriels présentent actuellement tous un solde commercial négatif, tant pour les biens de consommation que pour les biens intermédiaires, à l'exception du matériel de transport aérien, de la chimie – grâce aux parfums – et de la pharmacie qui restent exportateurs nets.

L'évolution des positions de la France, qui était exportatrice jusqu'en 2000, s'est faite malgré une croissance de la consommation française, et a des conséquences environnementales générées par la délocalisation des moyens de production (voir schéma). De plus, la désindustrialisation a provoqué des dommages sociaux importants.

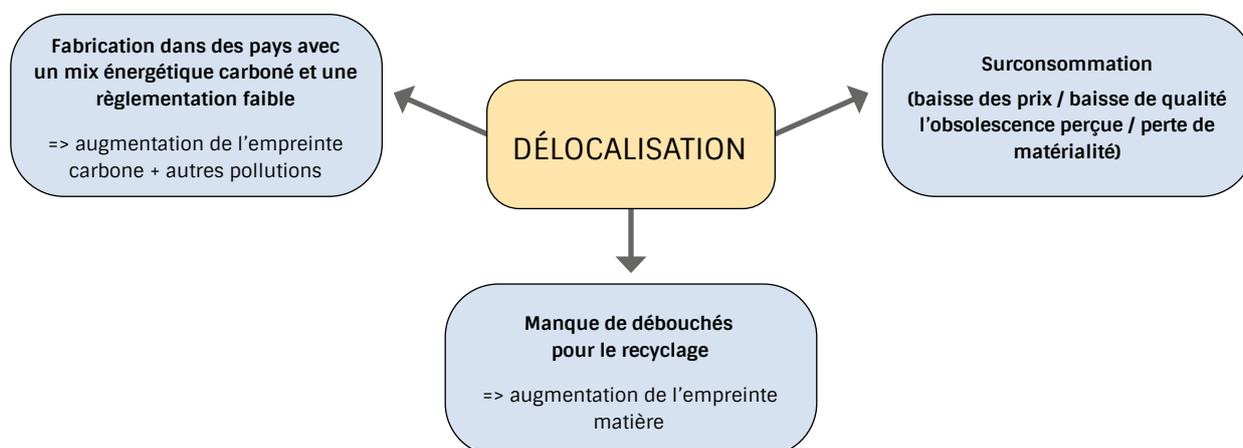


Figure 22 - Schéma de principe des effets négatifs induits par la délocalisation des activités industrielles

Dans le scénario négaWatt, pour certains secteurs en forte baisse et très importateurs, comme le papier-carton, la fabrication d'emballage en plastique, le verre⁴³, le bois, les engrais et produits phytosanitaires, et la fabrication de véhicules particuliers, le rééquilibrage des échanges permet d'amortir l'effet de la baisse de consommation sur la production française.

La relocalisation des secteurs de biens de consommation (textile, meubles, électroménagers, etc.) permet une réduction de l'empreinte carbone de la France en raison d'un mix énergétique moins carboné, et de la réduction des volumes consommés grâce à l'augmentation de la qualité et de la durée de vie des produits.

Les secteurs de l'électronique (semi-conducteurs, électronique professionnelle) et de la mécanique, dont

la fabrication est très électrifiée, bénéficient d'une demande de produits à empreinte carbone faible et de la volonté européenne d'indépendance stratégique.

La chimie fine et la pharmacie voient leur solde commercial déjà positif s'améliorer, en raison de la relocalisation des composants de base pour la pharmacie, et de la demande internationale en hausse de parfums et cosmétiques. Cela ne se fera cependant que si ce secteur se décarbonise plus vite que ses concurrents des pays émergents.

Au total, la demande d'énergie finale supplémentaire pour l'industrie, liée à la réindustrialisation, dépasse 42 TWh.

Secteur	Évolution demande	P/C 2014	P/C 2050	VarEF 2050
Mécanique	↘	0,73	1,00	3,57
EEE hors réseaux	↗	0,31	0,52	3,37
Textile	↗	0,17	0,56	5,14
Mobilier divers	↗	0,41	0,50	2,17
Vélo 2 roues	↗	0,40	1,00	0,34
Voiture + VUL	↘↗	0,83	1,20	5,90
Avion	↘	9,48	20,00	1,76
En. renouvelables + Réseaux	↗	0,44	1,00	10,19
Papier graphique	↘	0,74	1,00	1,31
Papier carton emballages	↗	0,76	1,00	3,80
Emballages plastiques	↘	0,90	1,00	0,59
Emballages verre	↘	1,18	1,70	0,64
Bois tranché scié + embal.	↘	0,84	1,00	0,72
Engrais + phyto	↘	0,45	0,80	0,52
Produits toilette + pharmacie	↗	0,94	1,14	4,73
Acier	↘	1,19	1,00	-4,80
Métallurgie	↘	0,79	0,85	2,11
TOTAL énergie finale (en TWh)				42,07

Tableau 6 - Impacts du scénario négaWatt sur les secteurs industriels

▲ Évolution à la baisse ou à la hausse de la demande, taux Production/Consommation en 2014 et 2050, variation de la consommation d'énergie finale. Pour rappel, si P/C est inférieur à 1, la France est importatrice, et s'il est supérieur à 1, elle est exportatrice.

43. La production d'emballage en verre baissant en raison de la consigne, le taux de couverture devient très supérieur à 1 en raison des exportations de bouteilles de vin.

Beaucoup de ces secteurs industriels ne sont pas couverts par les mécanismes de taxation du CO₂ actuels comme le SEQE (système européen de quotas d'émission) ou ceux proposés dans le cadre du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. Pour réussir leur réindustrialisation, il faut agir sur d'autres leviers tels que :

- l'information du consommateur par l'affichage environnemental, mettant en avant le mix énergétique ;
- les réglementations portant sur l'éco-conception, qui doivent avoir un impact sur la durée de vie et la possibilité de recyclage de façon la plus « circulaire » possible. Le vrai coût du recyclage doit en outre être intégré au prix de vente ;
- l'État, premier acheteur de France, doit mettre en place une politique d'achat exemplaire de produits et services peu ou pas carbonés.

Bien accompagner les secteurs ayant un marché décroissant

La baisse de la demande due au nécessaire choix de la sobriété dans le scénario négaWatt induit une baisse de l'activité industrielle dans certains secteurs comme l'automobile, la construction neuve ou l'aviation civile. La répercussion est directe pour les filières produisant les matériaux nécessaires à ces produits : ciment, béton, acier, chimie. Cette baisse de la demande ne pourra pas toujours être compensée par le rééquilibrage des échanges avec comme conséquence une diminution d'activité et des impacts négatifs en termes d'emploi.

Ces évolutions de l'emploi doivent être accompagnées par la collectivité et les partenaires sociaux de façon responsable et juste.

La première responsabilité est de faire le diagnostic de façon transparente : les évolutions doivent être anticipées grâce à un exercice de planification industrielle à moyen et à long termes. Cet exercice, mené au niveau national et décliné au niveau régional, permet d'identifier précisément les sites dont l'activité est directement impactée par la transition énergétique et les réglementations concomitantes. L'État doit s'assurer de la cohérence globale du dispositif. Il doit jouer un rôle de chef d'orchestre en conduisant la politique industrielle à l'échelle nationale et en veillant à ce que les impacts locaux et concrets soient compris et anticipés par les acteurs.

Parmi les priorités, la reconversion des sites industriels vers de nouvelles activités, en se fondant sur le savoir faire du personnel concerné, est essentiel, tout comme l'évolution des compétences des salariés doit être facilitée par la formation continue.

Lorsque les sites apparaissent trop difficiles à reconvertir, la cession à des fonds prédateurs - dont le seul objectif est de diminuer les coûts de la fermeture au détriment de l'avenir des personnels concernés -, doit à tout prix être évitée. À cet effet, une structure de défaisance - semblable au "best owners group" imaginé pour l'industrie automobile allemande - doit être créée pour racheter les entreprises en question et assurer aux salariés concernés une fin de carrière ou une reconversion dans des conditions équitables.

Le rôle des organismes existants (comités de filières, pôles de compétitivité, opérateurs de compétence) reste fondamental pour élaborer la politique industrielle et la mise en œuvre des formations, et doit être renforcé. Une nouvelle gouvernance doit être mise en place incluant, en sus de ces organismes, toutes les parties prenantes dont les syndicats et les régions. La proposition d'Etats généraux de l'automobile faite par la FNH et la CFDT est un exemple de cette nouvelle gouvernance qui gagne à être organisée à l'échelle de chaque bassin industriel et de chaque région.

Un exemple de mutation industrielle nécessaire : le secteur de l'acier

Avec 18 % des consommations d'énergie et 22 % des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie, la sidérurgie et le travail de l'acier sont un enjeu majeur de la décarbonation. Deux voies principales sont possibles pour y parvenir : accroître la part de la solution arc électrique pour fondre des ferrailles recyclées, et remplacer les hauts fourneaux à charbon par la filière de réduction directe à hydrogène. Cette dernière option est retenue par le Fraunhofer Institute dans son rapport de recommandations commandé par la Commission européenne ⁴⁴.

Aujourd'hui il reste en France deux sites sidérurgiques à Dunkerque et Fos-sur-Mer. Leurs cinq hauts fourneaux produisent 8,5 Mt d'acier dont 85 % proviennent du fer et 15 % de ferrailles introduites dans le convertisseur. 6,5 Mt d'acier sont produites en aciérie électrique à partir de ferrailles, ce qui porte le taux d'incorporation de MPR global à 43 %. Ce taux peut monter à 80 %, ce

44. 2020 Material Economics Industrial Transformation 2050 Pathways to net zero emissions from EU Heavy Industry

qui diminuerait mécaniquement le besoin en acier primaire. En supposant qu'une évolution similaire se produise chez nos voisins européens, la conséquence inévitable est une diminution de la production d'acier primaire en France. Cela implique la fermeture d'un ou plusieurs hauts fourneaux. La décarbonation nécessite le remplacement de toutes les technologies actuelles par la réduction directe à hydrogène, non génératrice de gaz à effet de serre. Les prévisions du scénario négaWatt sont une production d'acier de 4,1 Mt à l'hydrogène, et de 7,2 Mt en aciérie électrique en 2050.

4.3.3. Produire en maîtrisant le recours aux ressources minérales

Soulevée de plus en plus dans le débat public, la question de la durabilité des solutions de transition énergétique au regard de leurs consommations de ressources a été examinée dans le scénario négaWatt. La consommation de métaux et de minerais dans le futur doit être attentivement anticipée pour minimiser les impacts environnementaux et ne pas dépasser ce que la France peut s'octroyer au prorata de sa population.

Les réserves : pour qui et à quel coût environnemental ?

Avant d'évoquer les besoins en matières minérales, il est nécessaire d'aborder la question des réserves ou des ressources, sujet sur lequel il y a toujours une ambiguïté. En effet, tant qu'on n'a pas extrait un minerai, on ne peut qu'estimer avec plus ou moins d'incertitude ce qui sera extractible. De plus, cette estimation peut être technique ou bien économique, voire énergétique. La pratique courante consiste à distinguer réserve prouvée, possible et ressource ultime.

Certes, l'amélioration des techniques d'extraction et l'augmentation du prix des matières premières implique que la réserve prouvée a toujours augmenté au cours du temps et laisse à penser qu'il en sera de même à l'avenir. Mais à quel prix environnemental ? Trop souvent, l'extraction pollue les sols, défigure les paysages, chasse des populations natives et nuit à la biodiversité.

Cette mutation industrielle s'accompagne d'une perte de l'ordre de 3 000 emplois. Elle sera largement compensée dans le secteur de la métallurgie qui occupe aujourd'hui 220 000 emplois. En effet, comme 20% des produits métallurgiques sont importés, une relocalisation totale générerait en théorie 45 000 emplois. Pour conserver les emplois et répondre à la baisse de consommation de l'acier, le scénario négaWatt propose de réduire la part des importations à 15%. Cet objectif modeste suppose le soutien à de nombreuses PME qui constituent le tissu industriel de la métallurgie.

Typologie	Description	Ex. du Cuivre
Réserve prouvée	Technique éprouvée et rentable	770 Mt*
Réserve possible	Géologiquement identifiée, possible techniquement mais peut être non rentable	2 720 Mt
Ressource ultime	Géologiquement identifiée mais incertaine techniquement et économiquement	5 600 Mt

*En 1996, la réserve prouvée était de 310 Mt, en 2011, de 690 Mt

Tableau 7 - Définition des réserves prouvées, possibles et ressources et exemple pour le cuivre

La position de négaWatt est de ne pas aller au-delà du quota de la réserve prouvée sauf exception. Cette position contraignante implique un effort important de sobriété et de recyclage mais elle est la seule possible, si l'on veut préserver les générations futures.

Par ailleurs, en plus de la question environnementale, on doit s'interroger sur la quantité de matière à laquelle on a droit. Combien la France (ou l'Europe) peut-elle prétendre puiser dans le montant global de la réserve de notre planète ? La réponse est corrélée au type de gouvernance mondiale projetée pour le futur et à un enjeu d'équité internationale, à l'image des différents scénarios socio-économiques (dits SSP pour shared socio economic pathways) du GIEC⁴⁵. Ils vont du SSP1 représentant un monde coopératif et durable aux SSP3 et SSP5 où le monde, fragmenté et en compétition, dépasse les 2°C de réchauffement moyen en 2100.

Dans le scénario négaWatt, le monde est supposé évoluer vers une gouvernance de coopération et d'équité. Les pays qui historiquement n'ont pas accédé au niveau de vie des pays riches peuvent se développer et se prévaloir d'une empreinte ressource identique pour tout le monde. Quant aux pays riches, ils sortent définitivement d'une posture coloniale et prédatrice de matières premières. En poussant ce raisonnement, comme la France représente aujourd'hui 1% de la population mondiale, elle a le droit, ni plus ni moins, à une part de gâteau de 1% de la réserve. Par exemple, pour reprendre l'exemple du cuivre, les réserves attribuées à la France sont de 1% de 770 Mt soit 7 700 kt.

Aura-t-on assez de métaux et de minerais ?

Le scénario négaMat permet pour chaque métal ou minéral de tracer l'évolution du tonnage de matériau primaire extrait d'ici 2050 puis 2070, et de comparer cette évolution avec la barre infranchissable de la réserve. Au total, il permet de définir les trajectoires de 15 métaux et minerais (fer, bauxite, cuivre, granulats, sable, sel, etc.). À titre d'exemple, celles de deux matériaux sont présentées : l'acier et le cuivre.

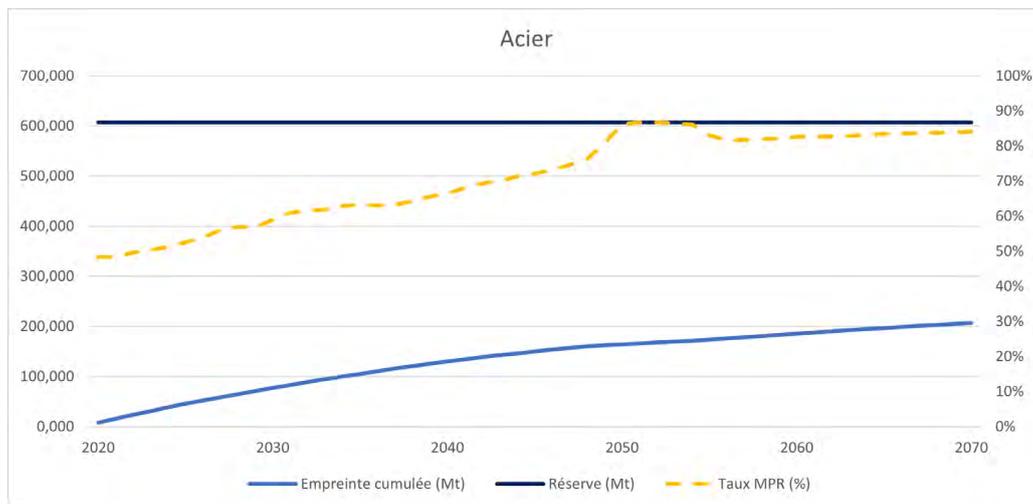


Figure 23 - Évolution des tonnages (en millions de tonnes) de matériaux primaires extraits et montant de la réserve pour le fer (converti en acier). Le pourcentage de MPR (matières premières recyclées) est également indiqué sur l'échelle de droite

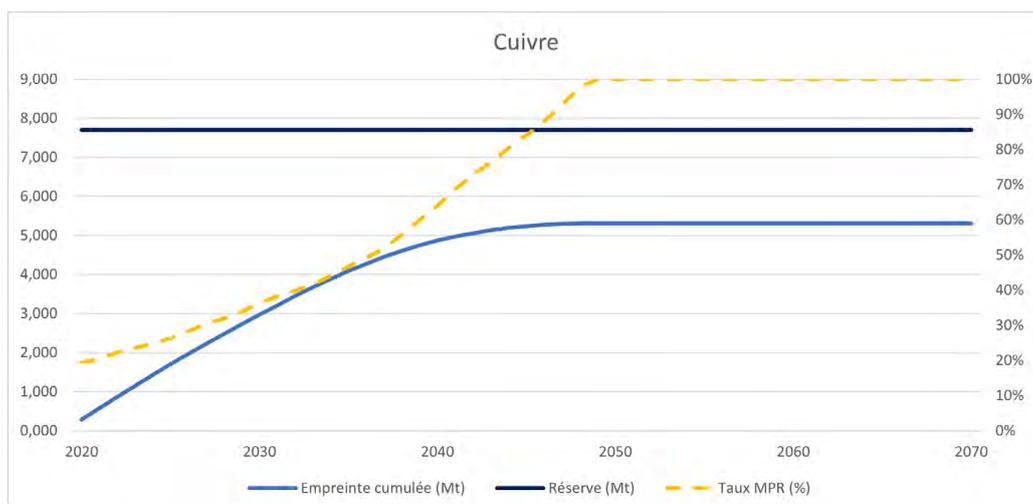


Figure 24 - Évolution des tonnages (en millions de tonnes) de matériaux primaires extraits et montant de la réserve pour le cuivre. Le pourcentage de MPR (matières premières recyclées) est également indiqué sur l'échelle de droite

45. Voir le résumé pour décideur du rapport Climate change 2021, The Physical Science Basis, publié en août 2021 : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

On constate que la consommation d'acier cumulée en 2070 est encore assez loin de la réserve. Même s'il y a une inflexion, la progression au-delà de 2050 reste encore soutenue du fait des transformations pour la mobilité et la production d'énergie.

Pour le cuivre, la situation est plus critique. On part d'un taux de recyclage plutôt faible. Mais l'augmenter ne résout pas tout dans une économie en croissance car il faut disposer du gisement de déchets. Les moteurs électriques et les réseaux consomment beaucoup de cuivre entre 2030 et 2050. Ensuite, la substitution par de l'aluminium dans les conducteurs et un très bon recyclage permettent une évolution quasi asymptotique.

Deux métaux méritent un examen plus approfondi : le cobalt et le lithium. Ils sont particulièrement concernés par le développement des batteries, indissociables du véhicule électrique.

Lithium et cobalt : des ressources tout juste suffisantes

Les réserves mondiales prouvées de lithium et cobalt dans le monde ont été évaluées en 2019 à 17 Mt et 7 Mt (USGS, 2020). Leur production minière à échelle mondiale s'élevait en 2019 à hauteur de 86 kt et de 144 kt respectivement. La consommation de ces métaux va fortement augmenter en raison essentiellement du développement de la mobilité électrique, à un rythme potentiellement insoutenable. Si toutes les voitures vendues dans le monde étaient électriques, équipées de batteries demandant les mêmes contenus de lithium et de cobalt qu'aujourd'hui, et en l'absence de recyclage, les réserves prouvées de lithium seraient épuisées au bout de 22 ans et celles de cobalt au bout de 7 ans.

Les besoins en batterie au lithium se répartissent en trois usages :

- la mobilité électrique (principalement les voitures électriques) qui représente environ 85% des besoins de batteries en 2050 dans le scénario négawatt ;
- les petits équipements mobiles (téléphones, tablettes, ordinateurs, etc.) ;
- le stockage stationnaire pour l'équilibrage du réseau électrique (dont les besoins restent assez marginaux et pouvant utiliser les batteries de 2^e vie issue de la mobilité électrique).

Nous avons étudié dans quelles conditions le développement de la mobilité électrique en France est compatible avec les réserves planétaires de lithium et de cobalt affectables à la France. Dans le scénario négaWatt, trois technologies de batteries au lithium sont envisagées (voir Annexes) dont les évolutions induisent une chute de la teneur moyenne de cobalt et une baisse relative de la teneur moyenne de lithium des batteries d'ici 2050. À l'heure où ces lignes sont écrites, ces réductions font consensus au sein de différents organismes travaillant sur la prospective des batteries électriques (AIE, McKinsey, T&E, BNEF). L'exercice de modélisation de négaWatt s'appuie sur des projections de taux de cobalt et de lithium par kWh de capacité (en kg de matière par kWh de capacité de batterie) semblable aux autres trajectoires présentes dans la littérature.

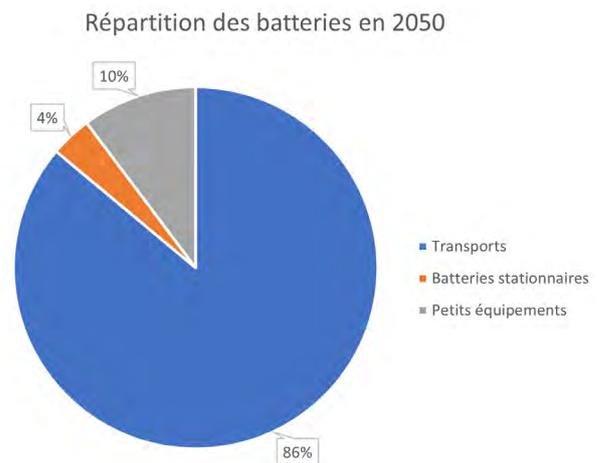


Figure 25 - Répartition des batteries Lithium en 2050 en pourcentage par secteur d'usage, dans le scénario négaWatt

Le progrès technologique rapide sur les batteries lithium-ion est à souligner. Néanmoins, il est insuffisant pour pallier les enjeux de consommation de lithium et de cobalt portés par l'électrification de la mobilité. D'autres leviers doivent donc être activés afin de respecter le volume de réserves attribuables à la France.

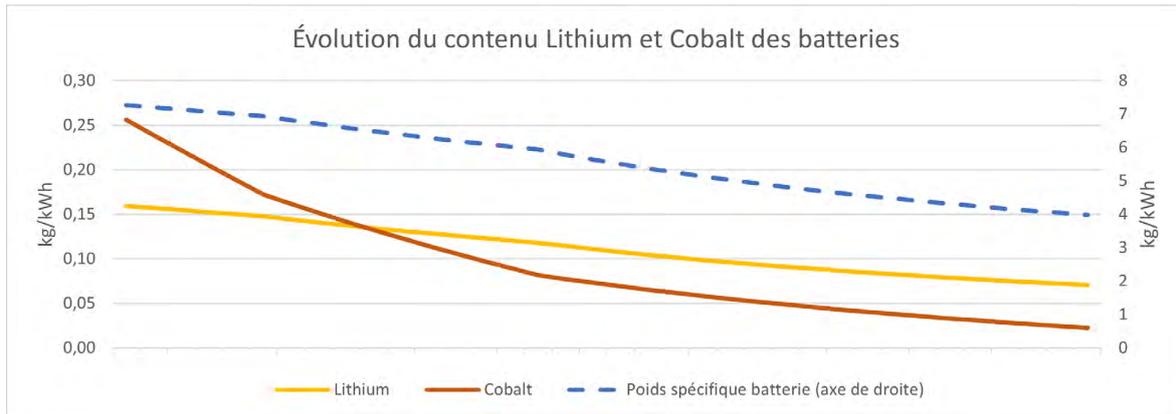


Figure 26 - Évolution jusqu'en 2050 du contenu en lithium et cobalt (en kg/kWh, échelle de gauche) des batteries pour la mobilité électrique, ainsi que du poids des batteries par unité d'énergie (kg.kWh, échelle de droite) dans le scénario négaWatt

Différentes motorisations permettant une décarbonation du secteur des transports coexistent. Le choix de leur répartition est un des leviers majeurs permettant de réduire la pression sur l'extraction de matières premières. Dans le scénario négaWatt, les principaux modes de transport utilisant des batteries au lithium sont les voitures individuelles et les véhicules utilitaires légers (VUL). La part de voitures individuelles totalement électriques est limitée à 60% et celle des VUL électriques

à 30%. Le restant de la mobilité individuelle est constitué de véhicules thermiques hybrides rechargeables dont la batterie est à faible capacité.

Les poids lourds électriques sont quant à eux envisagés de manière plus prudente.

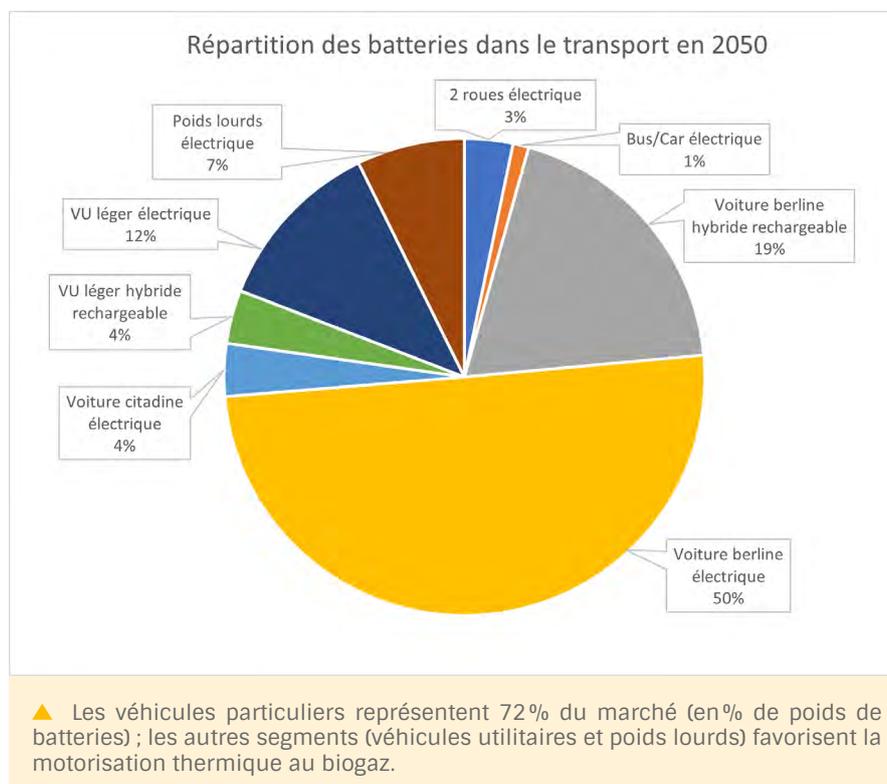


Figure 27 - Répartition des usages des batteries dans le transport en 2050, dans le scénario négaWatt

La sobriété du côté de la demande est aussi un levier majeur pour moins recourir au lithium et au cobalt primaire issus des mines. Le scénario négaWatt envisage tout d'abord des hypothèses importantes en termes de réduction du besoin de déplacement (voir section 4.2.4). De plus, nous considérons que les gains technologiques sur la densité énergétique des

batteries (+100% en 2050) ne se traduiront pas par une hausse similaire des capacités de batterie. Pour réduire là aussi la pression sur les matières premières, les nouveaux véhicules électriques ne doivent pas augmenter démesurément la taille des batteries sous prétexte d'une course à l'autonomie.

LE RECYCLAGE DES BATTERIES EST POSSIBLE MAIS DÉCALÉ DANS LE TEMPS

Actuellement, le lithium des batteries électriques n'est pas recyclé. Les raisons en sont techniques – le lithium doit être pur à 99,99% pour être utilisé dans les batteries – et économiques – les bas prix du lithium primaire venant de la mine ne permettent pas le développement de filières de recyclage rentables.

Le cas du cobalt est différent. Son recyclage ne présente pas particulièrement de difficulté technique et les cours sont bien plus élevés. Le taux de recyclage du cobalt est de 68% dans le monde (UNEP, 2011) mais seulement de 32% en Europe en 2016 (JRC⁴⁶).

Le scénario négaMat envisage une forte augmentation des taux de recyclage dans les prochaines décennies. Ainsi, le lithium serait recyclé à hauteur de 25% en 2030, puis atteindrait 80% à l'horizon 2050. Le cobalt serait lui recyclé à hauteur de 95% dès 2030 et se rapprocherait d'un taux de 100% dans les années suivantes.

Ces taux peuvent être atteints si les étapes préliminaires au recyclage sont assurées. La collecte des batteries doit être garantie intégralement et la séparation des constituants, dont les constructeurs automobiles sont responsables, doit être supérieure à 95%. Pour cela, l'obligation faite aux vendeurs de véhicules électriques de garantir la collecte et la séparabilité des batteries ainsi que le recyclage des métaux qui les constituent est indispensable.

Malgré ces hypothèses de recyclage très élevés, les besoins en matière première vierge augmentent fortement au cours des décennies 2020-2040 en raison de la croissance rapide du nouveau marché de batteries. Il existe ainsi un décalage temporel entre le moment où les batteries sont fabriquées et le moment où le stock de déchets est disponible à l'entrée des circuits de recyclage. Ainsi, malgré un taux de recyclage du cobalt proche de 100% en 2030, la part de cobalt recyclé incorporé dans les nouvelles batteries ne dépasse pas les 20% (voir figure 29).

46. Joint Research Centre, p10, 32% en EOL-RR mais 22% en EOL-RIR (en 2004 et dans le monde UNEP : 68%) https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/material_system_analyses_battery_21102020_online.pdf

L'exercice de prospective sur les matériaux mené par négaWatt montre que seule la combinaison d'hypothèses fortes permet de ne pas dépasser le « quota français » d'usage des réserves planétaires de cobalt et de lithium : division par 2 et par 10 des parts de lithium et cobalt dans les batteries ; multiplication par 2 de leur performance technique ; augmentation très rapide

des taux de recyclage ; sobriété très poussée sur la demande ; diversification du type de motorisation (recours au biométhane). À l'inverse, un développement rapide et démesuré de la mobilité électrique comme l'envisagent certains acteurs dans le débat public épuiserait rapidement les réserves de cobalt et de lithium et aurait des impacts sociaux et environnementaux dévastateurs sur les régions minières concernées.

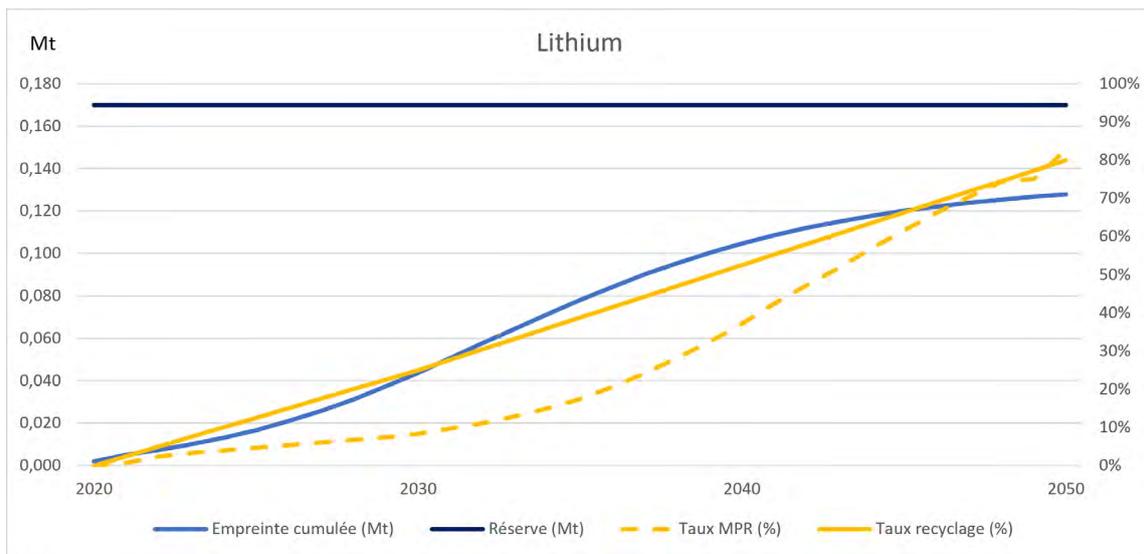


Figure 28 - Évolution des tonnages de matériaux primaires extraits et montant de la réserve pour le lithium entre 2020 et 2050. Le pourcentage de MPR (matières premières recyclées) est également indiqué sur l'échelle de droite (trait jaune pointillé), ainsi que le taux de recyclage (trait jaune plein).

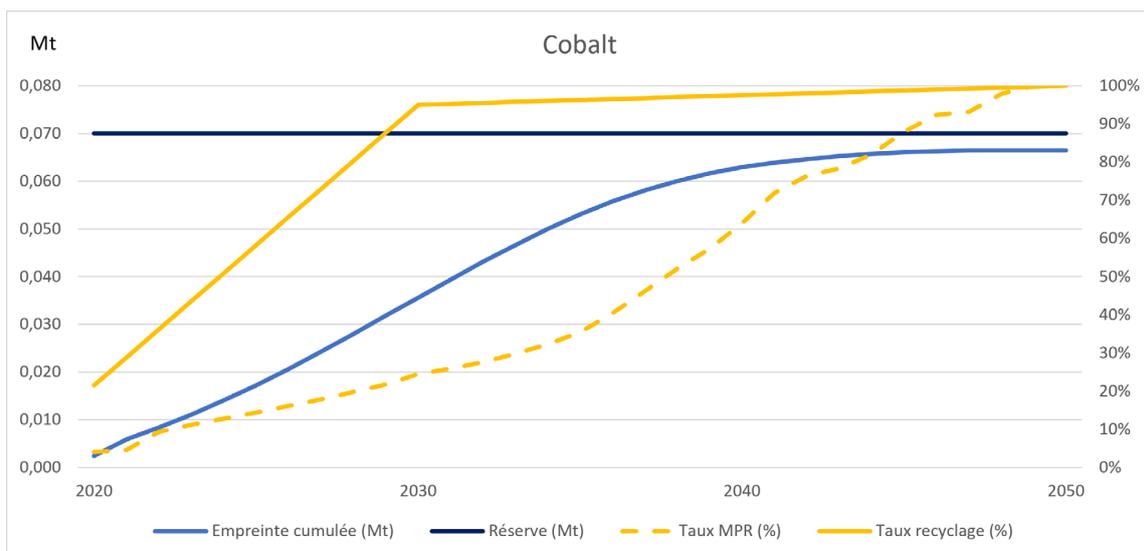


Figure 29 - Évolution des tonnages de matériaux primaires extraits et montant de la réserve pour le cobalt entre 2020 et 2050. Le pourcentage de MPR (matières premières recyclées) est également indiqué sur l'échelle de droite (trait jaune pointillé), ainsi que le taux de recyclage (trait jaune plein).

4.3.4. Des process industriels moins énergivores

Baisser l'intensité énergétique, c'est encore possible

Même si l'industrie a fourni de gros efforts ces dernières décennies, il existe encore un important gisement d'économie d'énergie dont les gains sont estimés à :

- 35 TWh d'électricité en prolongeant l'amélioration de l'efficacité des moteurs impulsée par la directive européenne sur l'efficacité énergétique et des efforts sur l'éclairage, les transformateurs et le froid ;
- 38 TWh de combustibles en récupérant la chaleur fatale perdue par les fumées, les eaux de refroidissement, les corps rayonnants, etc. Ce gisement peut être récupéré directement en interne ou pour des réseaux de chaleur basse température ayant un débouché à proximité.

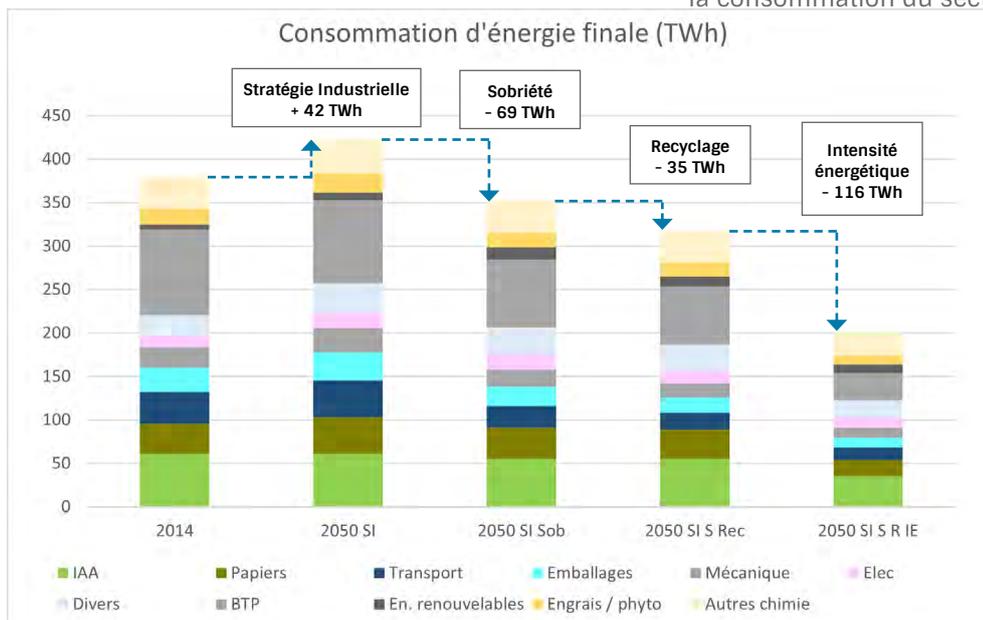
Dans ce domaine, la nouveauté du scénario négaWatt 2022 est un recours accru à l'électrification des chaudières et des process. Pour les besoins en basse température, surtout dans l'agroalimentaire et l'industrie papetière, les pompes à chaleur sont privilégiées. En moyenne température, l'usage de combustible est remplacé par des procédés à induction, résistance ou infrarouge. La technique de la compression mécanique de vapeur est poussée à son maximum. En haute

température, l'arc électrique est généralisé pour la fusion des métaux et pour le reste, l'électrification est réalisée avec prudence en analysant chaque secteur.

Le gain maximum possible est de 140 TWh de combustible pour une surconsommation d'électricité de 80 TWh, soit un gain net de 60 TWh en énergie finale. La proportion d'électrification par rapport à ce gain maximal est un équilibre entre les disponibilités en combustibles renouvelables (biomasse et biogaz) et l'implantation de nouvelles sources électriques renouvelables.

La cogénération est plus utilisée et passe de 7 à 40 % pour les turbines à combustion (part du combustible pour la production de vapeur) et de 20 à 25 % pour les turbines à vapeur. Ceci entraîne un transfert de 25 TWh de combustible vers l'électricité. Cela permet surtout une régulation en puissance de ces deux vecteurs dans une stratégie globale de stockage/déstockage de l'électricité (voir section 4.5.2).

Le graphique suivant présente les résultats globaux hors matières premières entre 2014 et 2050 en déclinant les différents axes de relocalisation, de sobriété, de recyclage, et d'intensité énergétique⁴⁷. La présentation, non pas par secteur de production mais par bien de consommation finale, montre tout le sens de la démarche négaMat qui s'intéresse en premier lieu à nos modes de consommation. Ainsi, la hausse de consommation d'énergie finale induite par la relocalisation de certains secteurs industriels est largement compensée par les autres actions, conduisant à la division par deux de la consommation du secteur industriel d'ici à 2050.



◀ On considère ici l'effet de la stratégie industrielle, de la sobriété, du recyclage et de la baisse de l'intensité énergétique sur les principales productions de biens de consommations et leurs matériaux associés.

Figure 30 - Incidence des différentes actions (effets cumulatifs de gauche à droite) sur les consommations d'énergies finale (en TWh) dans le secteur industriel.

47. La comptabilité de ces différents axes diffère selon l'ordre avec lequel ils apparaissent dans la modélisation. En réalité, toutes ces actions se font en même temps. C'est pourquoi les chiffres donnés sont une moyenne arithmétique de la simulation d'une action réalisée en amont et en aval des autres.

Les combustibles à usage non énergétique ne peuvent pas être tous décarbonés

En 2020, le besoin de ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) est de 1198 TWh comme combustibles pour produire de la chaleur ou de l'électricité et 209 TWh à usage non énergétique, au sein duquel on peut différencier trois grands usages :

- du charbon pour la production d'acier primaire ;
- du gaz naturel pour la production d'hydrogène et d'ammoniac (production d'engrais azoté de synthèse) ;
- du pétrole pour la filière pétrochimique qui produit les molécules de base de la chimie organique (principalement les oléfines) essentiellement à partir de coproduits de raffinage.

Dans le scénario négaWatt, pour les usages énergétiques, la combinaison des économies d'énergies et de la substitution par les différentes énergies renouvelables permet de ne quasiment plus recourir aux énergies fossiles à l'horizon 2050 (voir section 4.4).

Pour les usages matières, des solutions à partir de la voie hydrogène sont mises en œuvre. Elles reposent sur une production flexible d'hydrogène vert à partir d'électricité renouvelable *via* le procédé d'électrolyse de l'eau (power-to-gas).

Dans les aciéries, à partir de 2035, il est considéré que la réduction du minerai de fer à l'hydrogène est mise en œuvre à la place de l'utilisation de coke de charbon.

Pour la production d'ammoniac, essentiellement destiné à la production d'engrais azoté, la consommation est fortement réduite (voir section 4.2.7), mais il reste un besoin de production qui est assuré à partir d'hydrogène vert à la place du vaporeformage du gaz d'origine fossile.

Enfin, pour la production des oléfines, les différentes molécules sont synthétisées à partir de méthanol. Le méthanol est lui-même synthétisé à partir d'hydrogène (électrolyse) et de CO₂ capté ailleurs⁴⁸. La limitation de la disponibilité du CO₂ et de l'électricité renouvelable pour produire l'hydrogène ne permet pas une production d'oléfines à 100 % avec ce procédé. Le scénario négaWatt prévoit une part de marché de 50 % de ce procédé en 2050, ce qui n'élimine pas totalement les ressources fossiles utilisées comme matière à usage non énergétique. Mais cela permet une substantielle économie et un gain énergétique de 6 TWh.

Pour la production d'oléfines, d'autres voies seraient possibles reposant sur la biomasse (agriculture, bois), mais elles ne sont pas mises en œuvre pour éviter d'ajouter une pression supplémentaire sur ces ressources.

48. Le CO₂ provient de l'épuration des gaz renouvelables produits à partir de biomasse (filiale méthanisation et pyrogazéification), mais aussi de captage sur des unités de combustion.

4.4. Une production d'énergie 100% renouvelable

Dans la droite ligne de ses précédents exercices, négaWatt opte pour le choix d'un fort développement des énergies renouvelables. Leur ancrage territorial, leur faible impact sur l'environnement, les emplois qu'elles créent ou encore l'indépendance énergétique qu'elles procurent sont autant de bons arguments pour les adopter sans réserve.

Approcher le 100% renouvelable est possible si et seulement si la demande en énergie est considérablement réduite, en accord avec les objectifs de la loi de transition énergétique de 2015⁴⁹. De plus, il faut être vigilant aux conditions d'installation, d'exploitation et de fin de vie de ces modes de production afin de ne pas créer de nouveaux problèmes. Le scénario négaWatt tient à cet équilibre entre d'un côté les nouvelles possibilités offertes par les technologies des sources renouvelables et de stockage et, de l'autre côté, la recherche de bilans positifs en termes de réduction des gaz à effet de serre, de recours modéré aux matières premières, de réduction de l'artificialisation des sols et de bienfaits sociaux. Ces objectifs sont atteints dans le scénario, tout en se passant progressivement des énergies fossiles et nucléaire. Une France décarbonée est donc possible sans l'atome.

Les progrès réalisés dans les filières éolienne et solaire et la diversité des usages électriques permettent d'envisager une plus grande part de ces deux technologies que dans le scénario négaWatt précédent, diminuant ainsi la pression sur la ressource en biomasse.

4.4.1. La décroissance inéluctable des énergies fossiles

Est-ce besoin de le dire ? Il n'est possible de limiter le bouleversement climatique que si les ressources en énergies fossiles sont en grande majorité laissées dans le sous-sol. Les émissions de CO₂ dues à l'utilisation de ces énergies dans le monde ont dépassé 38 milliards de tonnes en 2019, soit une hausse de 68% par rapport à 1990⁵⁰. L'aveuglement voire le cynisme des pays producteurs et consommateurs de charbon, de pétrole et de gaz fossile a permis cette fuite en avant qui nous met désormais face à un mur. Avec le rythme d'émissions de 2019, limiter le réchauffement planétaire à +2°C nécessite en effet de stopper tout usage des énergies fossiles d'ici 25 ans environ. Le limiter à +1,5°C signifie une réduction encore plus drastique.

Tous les pays doivent donc s'orienter sans hésiter vers la fin des énergies fossiles le plus rapidement possible. La France bénéficie d'une position privilégiée car son industrie de l'énergie n'est quasiment plus dépendante du pétrole et du charbon ; mais elle l'est au gaz fossile. Les secteurs du bâtiment, des autres industries et surtout du transport, eux, utilisent encore largement ces énergies. Conséquence : la France émet

directement encore plus de 300 MtCO₂ par an. Réduire ce chiffre à zéro dans un délai de 15 à 25 ans exige des politiques fortes et constantes pour désaccoutumer toute notre économie des énergies carbonées.

Le scénario négaWatt y arrive en prévoyant une substitution progressive des vecteurs d'origine fossile par des sources renouvelables, au fur et à mesure que la consommation diminue sous l'effet combiné de la sobriété et de l'efficacité. Le rythme de cette décroissance inéluctable des énergies fossiles tient compte des équilibres à trouver entre les différents vecteurs énergétiques et les usages auxquels ils servent (voir section 4.5.1).

4.4.2. La production d'énergie biosourcée au premier plan

Les bioénergies (biomasses solides, biogaz, biocarburants) jouent un rôle important dans la transition énergétique. Elles exercent certes une pression sur les écosystèmes, comme toute activité fondée sur l'utilisation de la biomasse, à commencer par l'alimentation. Mais en contrepartie, elles permettent de

49. Article 1 de la Loi de transition énergétique relative à la croissance verte

50. Source : Fossil CO₂ emissions of all world countries, 2020 report, JRC

réduire la pression sur les ressources géologiques non renouvelables, comme le lithium. Le scénario négaWatt n'augmente pas les prélèvements globaux de biomasse, car la croissance des bioénergies s'accompagne d'une diminution d'autres usages dans le système alimentaire, principalement la réduction de prélèvements pour l'alimentation animale

Soutenir les filières de biomasse-énergie

La très grande majorité des scénarios visant la neutralité climatique en 2050, à toutes les échelles géographiques, s'appuient sur un recours significatif aux bioénergies. Les solutions défendues par négaWatt sont celles qui offrent le meilleur compromis entre les enjeux du changement climatique et ceux de la biodiversité. Le scénario ne mobilise pas de surfaces dédiées aux bioénergies : les ressources mobilisées sont toutes des co-productions issues d'activités destinées à fournir de l'alimentation, des matériaux, ou destinées à entretenir et restaurer les écosystèmes agricoles et forestiers.

Non seulement les bioénergies selon négaWatt ne sont pas concurrentes de ces autres fonctions et productions, mais elles participent au contraire à leur soutenabilité. Aujourd'hui par exemple, c'est la filière bois énergie qui assure le financement des éclaircies nécessaires à la production de bois d'œuvre. Il existe donc des synergies possibles à favoriser, et des risques de concurrence à éviter ou encadrer.

Le bilan carbone des bioénergies fait l'objet de vives controverses. Leur facteur d'émission de gaz à effet de serre peut être supérieur à celui des énergies fossiles dans certains cas - qui sont justement ceux qui ont été exclus du scénario négaWatt. Ils peuvent être comparables à ceux des autres énergies non carbonées : ainsi, le facteur d'émission du biogaz est aujourd'hui en France estimé entre 23 et 44 gCO₂/kWh, ce qui est un peu plus que l'éolien, du même ordre que le photovoltaïque, et beaucoup moins que le gaz fossile ou le pétrole.

La question du changement d'usage des sols est bien prise en compte dans nos travaux, qu'il s'agisse des surfaces importées (notre solde importateur, exprimé en surface, diminue) ou des changements d'usage des terres. De même, la variation de stock de biomasse en forêt est prise en compte. Il n'y a donc pas d'omission de composantes importantes du bilan carbone.

Il existe de nombreux outils de pilotage des filières bioénergies, permettant d'éviter ce qui serait jugé comme des dérives, et au contraire d'accélérer les solutions recherchées. Ces outils vont des normes, systèmes de comptabilité et schémas de certification, comme ceux prévus par les directives européennes sur les renouvelables, aux schémas et plans tels que la Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB). Ces dispositifs se déclinent sur les territoires : les Schémas régionaux biomasse (SRB) ont justement cette vocation, mais restent encore insuffisamment pilotés politiquement. Les niveaux départementaux, avec notamment les syndicats d'énergie, et le niveau intercommunal, jouent aussi un rôle plus opérationnel et proche du terrain. Les acteurs économiques sont organisés en filières, certaines étant dédiées aux bioénergies, et participent à structurer et consolider la production de bioénergies. Enfin, l'État doit assumer son rôle régalien en contrôlant et sanctionnant si nécessaire, mais aussi en fixant un cap et en assurant un pilotage rigoureux qui doit donner les moyens aux objectifs visés.

La biomasse solide retrouve le niveau des années 2000

En 2050 comme aujourd'hui, le bois énergie est une ressource liée essentiellement à la production de bois matériau.

Les coupes sanitaires en forêt (qui relèvent du premier niveau décrit dans l'encadré en page suivante) ont pour objet de réduire la pression en maladies et parasites, de sécuriser les massifs forestiers après les tempêtes, et de prévenir les incendies en extrayant une partie de bois sec s'il est en trop grande quantité. Une partie de ce bois est récupérable pour la production d'énergie. En 2050, les coupes sanitaires seront en forte hausse par rapport à aujourd'hui, comme le laissent penser les tendances actuelles en Europe, dans un contexte de grande insécurité pour la forêt.

Une partie du bois énergie issu de la forêt n'est pas associée à des filières de matériaux, elle provient des taillis traditionnels. Dans le scénario négaWatt, les peuplements de type taillis (et futaie-taillis) sont convertis dans la mesure du possible en futaies irrégulières. Les ressources en bois énergie sur ces types de peuplements devraient donc diminuer dans un premier temps, avec une possibilité à terme de récolte de bois d'œuvre.

LES DIFFÉRENTES POSSIBILITÉS DE MOBILISATION DE LA BIOMASSE SOLIDE

On considère quatre niveaux de mobilisation du bois. Le premier est celui de la sylviculture : la fourniture de bois énergie permet de financer les opérations d'entretien des peuplements comme les éclaircies. Le second est l'utilisation des rémanents forestiers résultant de l'exploitation du bois d'œuvre et du bois d'industrie. Les quantités utilisables sont liées aux volumes de bois d'œuvre et de bois d'industrie, qui restent stables. Ces deux premiers niveaux sont souvent désignés par le terme de « bois lié » au bois matériau.

Le troisième niveau est la valorisation énergétique des co-produits des industries du bois, scieries, pâte à papier, panneaux, menuiserie. Il s'agit ici des connexes de scierie, des liqueurs noires, des boues de papeterie. Les quantités sont aussi stables dans le scénario négaWatt. La diminution de la production de pâte est compensée par les nouveaux besoins, dont la xylochimie.

Enfin le quatrième niveau est l'utilisation de produits bois en fin de vie, de tous types : papiers cartons usagés, bois d'emballage, de construction. Pratiquement tout ce qui n'est pas réemployable ni recyclable peut être valorisé en énergie. Les volumes récupérables sont encore importants, notamment dans le secteur de la construction.

De nouvelles ressources en bois seront issues des nouvelles plantations de haies, de l'agroforesterie, et de cultures énergétiques pérennes qui se récoltent sur des cycles de 5-8 ans comme les taillis à courte rotation (TCR) ou tous les ans comme le miscanthus ou le switchgrass. Cet ensemble – hors taillis traditionnels – passerait de 4 à 9 millions de m³ en équivalent bois rond. Les cultures énergétiques pérennes (TCR, miscanthus) sont implantées sur une partie des 1,8 million d'hectares des aires de captage d'eau potable. 300 000 ha en 2050 peuvent produire 3 millions de m³ de biomasse énergie avec des systèmes à faible rendement et sans intrants (ni engrais ni phytosanitaires). Une autre partie de ces surfaces est destinée à la méthanisation : soit des cultures annuelles, soit des cultures pérennes selon le contexte. Les nouvelles plantations arborées (agroforesterie, haies) ne pourront fournir de la biomasse énergie que lorsque les peuplements seront parvenus à maturité ce qui, compte tenu de leur vitesse de déploiement, ne peut contribuer à l'approvisionnement énergétique de manière significative qu'à partir des années 2040.

En 2050, cet ensemble est estimé à 26 millions de m³ de bois, incluant le bois d'œuvre provenant de l'exploitation des taillis et les coupes sanitaires, soit un niveau un peu plus élevé que celui des années 2000 (23 Mm³). Cette production est sensiblement inférieure à celle de la version précédente du scénario négaWatt : une plus forte électrification de l'ensemble des usages permet de réduire la pression sur la forêt, assurant ainsi une approche plus conservatrice.

L'ensemble des co-produits des industries du bois et des déchets de bois utilisés pour la production d'énergie passerait de 26 à 32 millions de m³ en équivalent bois rond. L'augmentation provient d'une meilleure récupération des déchets de bois et des co-produits, et d'une augmentation de la part de la valorisation énergétique.

Enfin de petites quantités de résidus de cultures sont aussi valorisées en énergie par combustion directe, mais à la même hauteur qu'aujourd'hui, avec moins de paille de céréales mais plus de coques, noyaux, anas de lin, cosses, etc.

Le biogaz diversifie ses ressources pour monter en puissance

La production de biogaz selon le scénario négaWatt n'entre en aucun cas en concurrence avec la production alimentaire. Les solutions envisagées visent à développer une méthanisation « équilibrée, cohérente avec les territoires, respectueuse de l'environnement et utile aux agriculteurs »⁵¹. La méthanisation agricole est conçue comme un outil qui favorise la transition écologique de l'agriculture⁵², permet de diversifier les productions et de consolider le revenu des agriculteurs.

Les ressources pour la méthanisation sont estimées à près de 130 TWh en 2050 et se répartissent en cinq types.

- **Les biodéchets** représentent une contribution minoritaire, 5-10 TWh.

Ce potentiel tient compte des objectifs de réduction des pertes et gaspillage, et des concurrences d'usage des sous-produits des industries agro-alimentaires pour des usages matières et alimentation animale. Cette catégorie inclut l'ensemble des déchets organiques des ménages et des entreprises, des effluents des industries agroalimentaires, des boues issues du traitement des eaux usées municipales et industrielles. Une partie de ces déchets est recyclée en agriculture après méthanisation, lorsque cet usage est compatible avec la qualité des sols et ne présente pas de risque sanitaire. Le reste part dans les systèmes classiques de stockage ou d'élimination. La partie organique des déchets en mélange fait l'objet d'une séparation à la source et de tri, en recherchant la meilleure optimisation entre le taux de récupération et la qualité des produits.

- **Les déjections d'élevage** sont la principale ressource actuellement.

Elle se stabilise dans le scénario négaWatt aux environs de 20-30 TWh, avec comme hypothèse de mobiliser la majorité de ce qui est produit en bâtiment d'élevage, sachant que dans nos scénarios la durée de pâturage augmente et le cheptel diminue, ce qui conduit à diminuer la production de déjections maîtrisables (fumiers et lisiers). La méthanisation devient un outil standard de la pro-

duction animale, partout où il existe des élevages et dans la mesure bien entendu où il est possible de collecter et regrouper les déjections sans que cela soit trop compliqué sur le plan logistique.

- **Les CIVE** (cultures intermédiaires à vocation énergétique) sont estimées à 40-50 TWh. Ce sont par exemple le maïs, le sorgho ou le tournesol l'été, et l'avoine, le triticale ou l'orge, ainsi que des légumineuses l'hiver. Elles seront méthanisées surtout dans les régions de grande culture, dans des schémas de fertilisation sans ou avec peu d'élevage. Elles ont vocation à fournir du « fumier végétal » pour fournir de l'azote et de la matière organique à partir des engrais verts, en jouant un rôle agronomique similaire à celui que joue le fumier dans les systèmes de polyculture élevage.

- Dans ces régions de grande culture, **les résidus de culture** peuvent également jouer un rôle important. Méthaniser des résidus comme les pailles de céréales est plus compliqué techniquement car il s'agit de matières plus ligneuses, cependant elles sont digestibles, et elles présentent un intérêt agronomique en mélange avec les CIVE. Le potentiel est important, mais dans nos scénarios il est limité à 20-30 TWh et les prélèvements sont limités à moins de 20% de la production de résidus de cultures. Au total, les prélèvements de paille augmentent en réalité de façon très modérée par l'effet combiné de la diminution des cheptels, de l'augmentation des temps de pâturage, et de la réduction des systèmes sur lisier au profit de systèmes sur fumier.

- **L'herbe** représente un potentiel qui était estimé à 15 TWh dans les précédents scénarios Afterres/négaWatt : il est réévalué à 25-30 TWh. Cette herbe « excédentaire » car non nécessaire à la production de lait ou de viande peut provenir de deux types de systèmes différents (voir encadré suivant). Il ne s'agit pas de surfaces dédiées à la production de biogaz. Le « biogaz d'herbe » s'inscrit dans des réorientations de stratégie fourragère dans le premier cas, et dans des logiques de reconception des systèmes de culture dans le second cas.

51. Termes de la conclusion du rapport d'information du Sénat sur la méthanisation, 29 Septembre 2021. <http://www.senat.fr/notice-rapport/2020/r20-872-notice.html>

52. Programme CAS DAR Methalae : la méthanisation, levier de l'agroécologie ? <https://solagro.org/travaux-et-productions/references/methalae-comment-la-methanisation-peut-etre-un-levier-pour-lagroecologie>

DEUX MANIÈRES DE RÉCUPÉRER PLUS D'HERBE POUR LA MÉTHANISATION

Des deux systèmes permettant d'augmenter l'apport de l'herbe pour la production de biogaz, le premier est adapté aux régions d'élevage. Il a un double objectif de réduire le cheptel bovin tout en maintenant les prairies permanentes, et aussi une partie des prairies temporaires. On observe déjà des systèmes de ce type, où les éleveurs font le choix de réduire le chargement ⁽¹⁾ et gèrent différemment leur approvisionnement fourrager pour faire face au changement climatique et au besoin grandissant de constituer des stocks de fourrages non seulement pour l'hiver mais aussi pour l'été. En réduisant le chargement, on dispose d'un stock structurellement excédentaire de fourrages qui permet d'assurer l'autonomie de l'exploitation y compris lors des années difficiles.

Le second système est adapté aux régions de grande culture, particulièrement dans les cas d'agriculture biologique sans élevage. L'introduction de cultures fourragères riches en légumineuses dans ces assolements contribue à maîtriser les adventices et réduire le temps de travail, à fixer de l'azote, à créer de la biodiversité, à fournir de la matière organique et à améliorer les sols. Il s'agit de pratiques déjà observées dans le programme RotAB par exemple, mené par l'ITAB ⁽²⁾, qui indique une proportion de 5% de surfaces de jachères de légumineuses dans les systèmes de grande culture en bio dans le Bassin Parisien ⁽³⁾.

(1) Le chargement est le nombre d'animaux par surface, il est souvent mesuré en UGB/ha (Unité Gros Bétail).

(2) <http://itab.asso.fr/programmes/rotation.php>

(3) Pour plus de détail, voir La méthanisation, outil favorable à la transition agroécologique, C. Couturier, C. Laboubée, S. Doublet, Revue AES, Juin 2020, https://agronomie.asso.fr/fileadmin/user_upload/revue_aes/aes_vol10_n1_juin_2020/pdf/aes10-1_09_couturier-et-al-solagro.pdf

Le digestat, l'autre co-produit de la méthanisation, est une matière fertilisante et amendante. Il existe de nombreux travaux sur les propriétés du digestat et sur son utilisation. Dosé dans les règles de l'art, le digestat à vocation, dans nos scénarios, à économiser de l'azote de synthèse, à entrer dans des stratégies de maîtrise de la fertilisation, permettant de réduire

notamment les émissions de protoxyde d'azote. Tous les travaux scientifiques montrent par ailleurs que la méthanisation des matières agricoles n'appauvrit pas le sol. Au contraire, en encourageant la pratique des couverts végétaux, elle contribue à augmenter la teneur de matière organique des sols⁵³.

53. Pour une information sourcée, fiable et accessible au grand public, voir le site : <https://www.infometha.org>

Les biocarburants

La production de biocarburants de première génération reste limitée, à 31 TWh en 2050, contre 39 TWh aujourd'hui. Elle est entièrement d'origine française et ne repose pas sur des importations directes ou indirectes sous forme de graines d'oléagineux ou d'huile. Ces biocarburants sont utilisés dans les secteurs où il n'existe pas de substitut.

La production de biocarburants deuxième génération à base de matières ligno-cellulosiques, représente 14 TWh en 2050, ce qui nécessite 6 millions de tonnes

de matières premières, bois, paille ou autres sources de biomasse solide.

La production d'éthanol et d'huile à partir de cultures d'algues commence à apparaître à la fin des années 2030. Cette filière n'a jusqu'à présent pas tenu ses promesses, néanmoins elle conserve des atouts, notamment sa moindre emprise au sol. Dans le scénario Afterres, la production d'algues est envisagée avant tout comme une production de molécules d'intérêt, pour des usages pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires, en même temps que la production d'énergie.

4.4.3. Les autres sources d'énergie renouvelable thermique

En complément de la biomasse dont une partie est utilisée pour produire de l'énergie thermique, quatre filières apportent également une contribution avec des évolutions différentes, mais dont le total est amené à quasiment quintupler d'ici 2050 en valeur absolue

et à être multipliée par dix quant à sa contribution au bilan final (voir tableau). Cette évolution à la hausse est très majoritairement liée à la récupération de chaleur dans l'environnement (le sol, l'eau ou l'air).

(TWh)	2020	2030	2040	2050
Chaleur environnement*	7,6	23,7	72,2	77,5
Géothermie	4,3	7,4	8,2	8,9
Solaire thermique	1,2	1,4	1,7	2,1
Déchets incinérés**	6,1	4,5	4,2	1,7
Total	19,2	37,1	86,4	90,3
Part de la demande de chaleur finale	1,1 %	2,7 %	8,7 %	11,1 %

◀ Chaleur environnement : calories prélevées par les pompes à chaleur.
 ** Part renouvelable seulement (prise conventionnellement égale à 50 %).

Tableau 8 - Répartition des sources d'énergie thermique entre 2020 et 2050 hors biomasse, dans le scénario négaWatt

En première place : les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont des appareils thermodynamiques qui, à l'inverse d'un réfrigérateur, permettent de prélever de l'énergie à une source froide et de la transférer à un milieu à chauffer en consommant de l'électricité dans un compresseur. Les sources froides

principalement utilisées aujourd'hui sont l'air ambiant (aérothermie) et le sol *via* des échangeurs enterrés (géothermie très basse énergie).

Le scénario négaWatt prévoit un développement très important de cette technologie, avec une contribution quasiment décuplée d'ici 2050 (voir section 4.2.3). Il se

justifie par le fait que les pompes à chaleur présentent d'excellents rendements énergétiques.

La géothermie pour réseaux de chaleur fait plus que doubler

Nous parlons ici de la géothermie basse énergie (entre 30 et 90°C), dans laquelle la chaleur des nappes d'eau chaude du sous-sol profond (de l'ordre du kilomètre) est utilisée directement pour chauffer des habitations, en général des logements collectifs *via* des réseaux de chaleur. Le développement de son utilisation dépend des gisements disponibles (situés en France métropolitaine dans les bassins parisien et aquitain), mais aussi des besoins de chaleur des bâtiments desservis par des réseaux de chaleur. Un doublement de sa contribution est envisagé dans le scénario négaWatt.

Développement modéré du solaire thermique

La filière solaire thermique permet de fournir de l'énergie pour le chauffage de locaux, la production d'eau chaude sanitaire, des usages industriels basse température (<150°C) et des réseaux de chaleur. Malheureusement son développement, remarquable

dans la décennie 2000-2010, a été soudainement stoppé. Parmi les nombreuses raisons qui expliquent ce retournement, on trouve notamment des questions de fiabilité de certaines installations, qui entament la confiance des maîtres d'ouvrage, ainsi que des coûts qui demeurent élevés, contrairement à la baisse très importante d'autres filières renouvelables.

En conséquence, le scénario négaWatt envisage un développement plus modéré de cette technologie par rapport à sa précédente version. Il s'agit néanmoins d'un quasi-doublement de la production, avec une répartition en 2050 de 79% dans le résidentiel, 4% dans le tertiaire et 17% dans l'industrie.

Moins d'énergie d'incinération car moins de déchets à valoriser

L'incinération de déchets ménagers ou industriels banals, et la récupération de leur énergie de combustion pour un usage dans les réseaux de chaleur permet de les valoriser partiellement. L'objectif prioritaire étant d'abord de réduire ces déchets à la source, leur contribution au bilan énergétique est amenée à diminuer fortement, avec une division par plus de quatre.

4.4.4. L'éolien primordial pour la production d'électricité

L'énergie du vent est, dans le scénario négaWatt 2022, la principale source de production d'électricité en 2050. Trois types d'éoliennes sont mises en service : des éoliennes implantées à terre, des éoliennes en mer posées sur des fondations marines (type dit « offshore posé ») et des éoliennes en mer érigées sur des barges flottantes ou semi-immergées (« offshore flottant »).

Le nombre d'éoliennes terrestres est doublé

La production électrique éolienne terrestre est assurée majoritairement par des éoliennes dites de nouvelle génération, plus fortement « toilées » (c'est-à-dire ayant des pales plus grandes pour une même puissance installée, accroissant ainsi la surface balayée), de plus grande hauteur et capables de collecter des vents plus faibles que les éoliennes classiques. Les

puissances moyennes unitaires de ce type d'éolienne augmentent de 2,7 MW en 2020 à 4 MW en 2050.

Le nombre de génératrices terrestres augmente de 8 660 éoliennes en 2020 à 18 600 en 2050 (14 900 en 2030) soit un peu plus qu'un doublement (facteur 2,1) par rapport à la situation actuelle. À titre de comparaison, 30 000 éoliennes terrestres sont déjà installées en Allemagne alors que la France dispose d'un tiers de superficie en plus !

Ces éoliennes représentent 61 GW installés en 2050 (37 GW en 2030), contre moins de 20 GW aujourd'hui.

Les éoliennes posées en mer continuent sur leur lancée

La production terrestre est complétée par l'implantation d'éoliennes « offshore posées », c'est-à-dire implantées sur des fondations sous-marines réalisables lorsque

la profondeur des fonds marins ne dépasse pas 30 à 40 mètres.

Le scénario négaWatt intègre l'implantation de telles éoliennes sur les 7 parcs ayant déjà fait l'objet d'appels d'offres pour une puissance totale de 3,5 GW avec des machines unitaires de 6 à 8 MW.

D'autres parcs - chacun d'une puissance de 1350 MW - sont également mis en service, portant la puissance installée à 8,6 GW en Manche et Mer du Nord et 9,6 GW en Bretagne et Atlantique. Aucun parc « offshore posé » n'est installé en Méditerranée, la profondeur des fonds sur cette partie du littoral français ne s'y prêtant pas.

Les éoliennes en mer flottantes ont un fort potentiel

Les éoliennes offshore flottantes sont des éoliennes de même type que les offshore posées, érigées sur des structures flottantes en acier ou en béton, elles-mêmes stabilisées par des ancrages pouvant aller jusqu'à 400 mètres de profondeur. Des éoliennes de forte puissance (des machines de 13 à 15 MW sont déjà en essai chez plusieurs constructeurs) peuvent être implantées jusqu'à 50 km des côtes, cette limite étant plus économique que technique. Les investissements pour connecter ces éoliennes flottantes au réseau électrique sont en effet importants.

Les avantages d'une telle solution sont déterminants :

- un impact visuel très réduit vu depuis les côtes : la simple rotondité de la Terre fait « disparaître » 175 m de hauteur d'une éolienne si elle est située à 27 miles nautiques, soit 50 km ;
- les technologies offshore de plateformes flottantes et d'ancrage en profondeur ont été très largement éprouvées sur les 15 000 plateformes pétrolières en service dans le monde, certaines ancrées jusqu'à 2000 mètres de profondeur ;
- très peu d'impact environnemental sur la biodiversité sont constatés lors de l'implantation (les machines sont assemblées au port et amenées sur site) et l'exploitation ;
- un facteur de charge très élevé est envisageable, de l'ordre de 45 à 50%, soit le double d'une implantation terrestre grâce à trois facteurs favorables : l'absence totale d'obstacle (à part les autres éoliennes du parc), un vent marin à la fois plus régulier et plus fort, et

enfin la possibilité d'implanter des éoliennes plus hautes, donc plus puissantes et plus productives.

Enfin, comme pour les autres types d'éoliennes, le risque industriel lors de l'exploitation est très faible (aucune émission, aucun déchet), sans commune mesure avec les risques majeurs liés à l'exploitation pétrolière, à la pétrochimie ou au nucléaire.

Les inconvénients restent limités et localisés. Le premier est la mobilisation de l'espace maritime, mais l'écartement entre éoliennes dans les parcs permet de maintenir la plupart des activités de pêche, de transport et de plaisance moyennant des modalités concertées. Le second est un coût complet (LCOE) pour l'instant plus élevé que l'éolien offshore posé (90-130 €/MWh contre 60-75 €/MWh), mais avec des perspectives de convergence dès 2040 vers 50 €/MWh.

Tant en Atlantique qu'en Méditerranée, cette filière présente donc un potentiel très favorable, permettant de développer des projets de reconversion industrielle, notamment pour le secteur pétrolier, le génie civil et les chantiers navals.

L'éolien « offshore flottant » avait été retenu dès le scénario négaWatt 2012 et confirmé dans l'exercice 2017. Le scénario 2022 amplifie de nouveau ce choix avec une puissance installée de 8,8 GW en 2040 s'élevant à 19,6 GW en 2050 puis 22,6 GW en 2070.

Les implantations se feront par tranche de 250 MW à 1000 MW, avec en 2050 :

- en Méditerranée une puissance équipée totale de 4,1 GW occupant 23% des quatre macro-zones potentiellement favorables ;
- sur la façade Atlantique, une puissance équipée totale de 15,5 GW.

Bilan en puissance disponible et équipée

L'éolien terrestre installé croît pour atteindre 36 GW en 2030 et 60,7 GW en 2050.

L'équipement progressif des parcs en offshore posé permet, à partir de... zéro en 2022 d'équiper 7,2 GW en 2030 puis 17,6 GW en 2040, avec un rythme annuel maximal de 1,35 GW par an entre 2032 et 2036. Ce rythme décroît ensuite, la puissance équipée en 2050, soit 18,2 GW, étant quasi-stable.

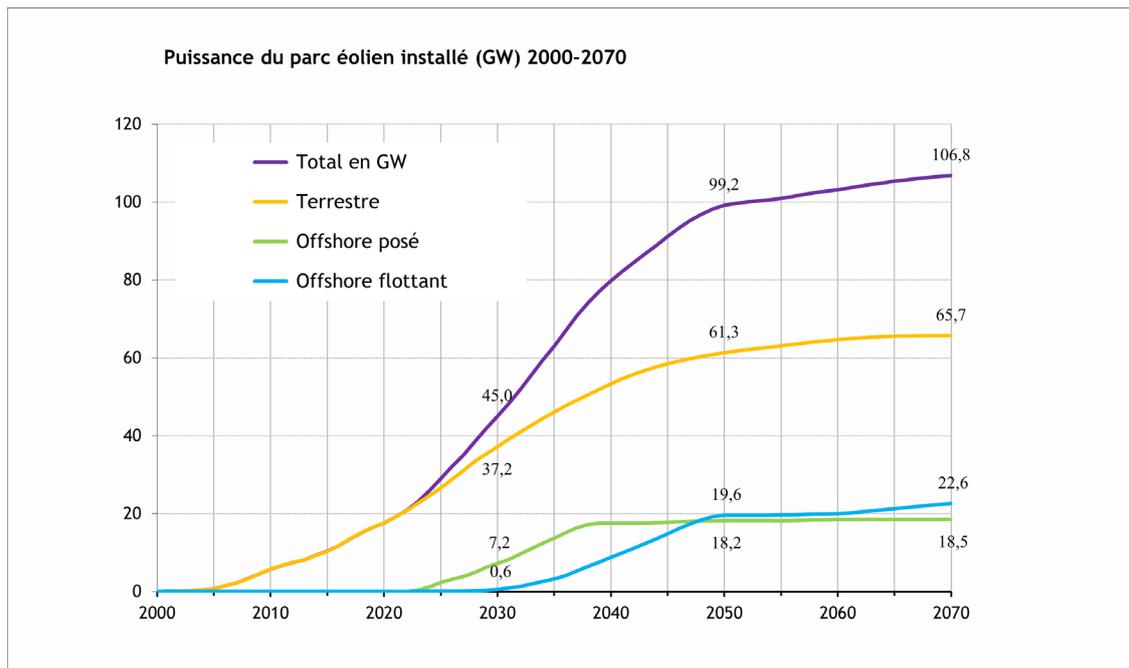


Figure 31 - Puissance du parc éolien installé (en GW) jusqu'en 2070, dans le scénario négaWatt

Les premiers parcs dits « commerciaux » d'éoliennes offshore flottantes prennent leur plein essor avec un décalage de 8 ans sur l'offshore posé. 19,6 GW sont installés en 2050 avec une puissance moyenne annuelle installée de 1,2 à 1,4 GW par an entre 2037 et 2047.

Sur 2020-2030, la puissance éolienne totale disponible croît de 17,6 GW à 45 GW puis atteint 99,2 GW en 2050 et 106,8 GW en 2070. Ainsi, on multiplie la puissance installée d'un facteur 5,6 entre 2020 et 2050.

L'essor du repowering

Le repowering consiste à ne pas remplacer poste pour poste les éoliennes d'un parc au terme de leur durée normale de fonctionnement par un même nombre d'éoliennes de même puissance, mais à profiter de ce changement pour optimiser l'implantation et l'équipement de ce parc.

Le scénario négaWatt intègre le repowering des parcs existants en tenant compte de la durée de fonctionnement (20 à 25 ans) et de la possibilité partielle de remplacement par des éoliennes plus hautes, plus toillées et donc plus efficaces.

Le repowering permet donc, à puissance de parc égale, de diminuer le nombre de mâts d'un parc et de mieux répartir les parcs sur le territoire.

Ainsi, la filière éolienne se structure dans le temps d'abord par des primo-installations et au fur à mesure par le repowering des parcs anciens, permettant de maintenir une activité économique sur le long terme.

La production éolienne décuplée grâce à un fort gain de productivité

La production éolienne totale croît de 40 TWh en 2020 à 114 TWh en 2030, 305 TWh en 2050 et 348 TWh en 2070, soit un facteur 9 entre 2020 et 2050.

La productivité moyenne par gigawatt du parc éolien (terrestre et maritime confondus) s'accroît très nettement, passant de 1877 kWh/(kW.an) à 3092 kWh/(kW.an). Ce gain considérable de productivité (+65%) a plusieurs origines :

- l'augmentation en terrestre de la taille unitaire, donc de la hauteur des mâts et de la surface balayée, permettant de capter à une plus haute altitude des vents plus puissants et plus réguliers ;
- l'arrivée en offshore posé et flottant d'éoliennes de fortes puissances, bénéficiant de vents à flux laminaire plus efficaces car sans obstacles ;
- l'éloignement des côtes en éolien flottant qui permet de bénéficier de vents au large, généralement bien moins perturbés et ralentis par des effets de bords côtiers. De plus, ces éoliennes ne seront pas (ou peu) bridées comme le sont celles sur terre pour limiter certains effets (faune, ombres portées, bruits).

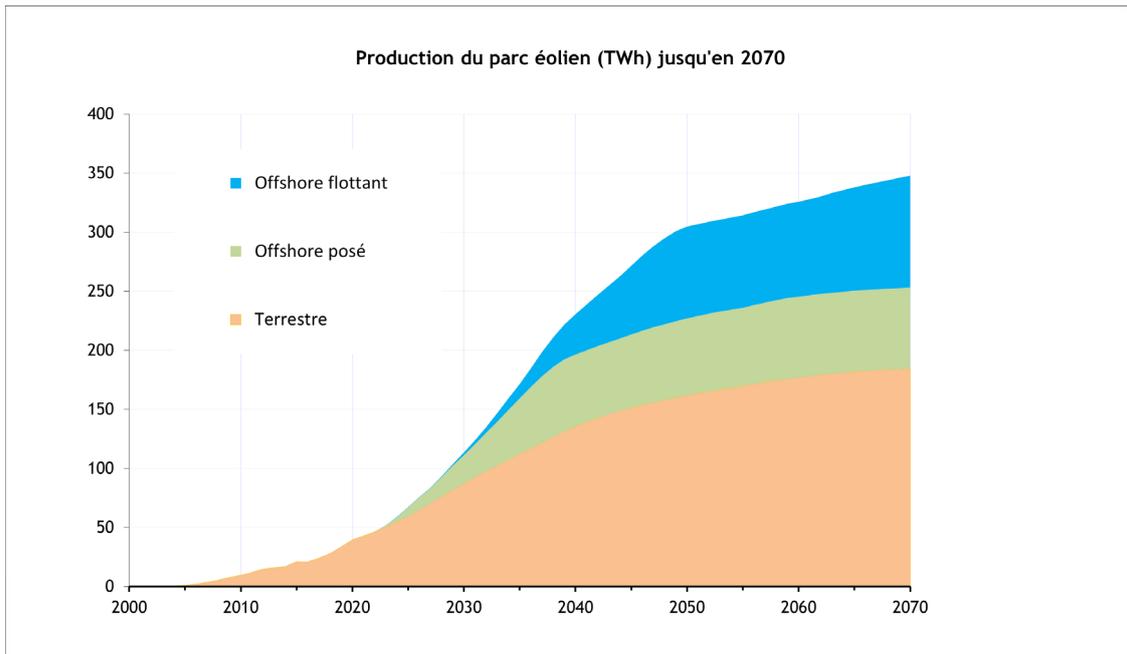


Figure 32 - Production du parc éolien (en TWh) jusqu'en 2070, dans le scénario négaWatt

Pour un partage équitable et raisonné des fruits de l'éolien

Un programme éolien aussi volontariste peut se heurter à de légitimes interrogations, contraintes réglementaires voire oppositions. Celles-ci ne doivent cependant pas aboutir à des blocages systématiques : il est tout à fait anormal qu'il faille près de 8 à 10 ans en France en moyenne pour implanter un parc éolien, contre 2 à 3 ans en moyenne en Allemagne. De même, certaines limitations récentes de l'espace aérien tant en localisation qu'en hauteur par les autorités militaires doivent être levées.

Les réticences locales doivent pouvoir se lever par des modalités favorisant une meilleure appropriation territoriale et citoyenne. À titre non limitatif, les orientations et mesures suivantes doivent être prises :

+ Minimiser autant que possible les impacts visuels en augmentant la hauteur, la puissance unitaire et le nombre d'éoliennes par parc. À puissance égale, cela permet aussi de réduire le nombre de mâts et le nombre de parcs. Ainsi, un seul parc de 8 éoliennes de 3 MW a un impact visuel bien moindre que 2 parcs de 6 éoliennes de 2 MW.

+ Rechercher les co-usages des sols autour des éoliennes et une cohabitation équilibrée avec la biodiversité et les activités humaines : par exemple, on stoppe déjà quasi-systématiquement les éoliennes lors de contraintes particulières comme le passage d'oiseaux ou la sortie de chauves-souris de leur habitat.

+ Favoriser légalement et fiscalement le financement citoyen dans l'éolien. Celui-ci devrait pouvoir constituer un produit d'épargne sûr et attractif, car tout à fait sécurisé. Il y aura du vent durant les 25 ans de la durée de vie d'une éolienne !

+ Gérer les implantations et exploitations d'éoliennes par une gouvernance tripartite entre citoyens-associés, collectivités-régulatrices et opérateurs-industriels. Et partager avec transparence et équité les bénéfices de l'électricité ainsi produite.

+ Affecter tout ou partie des retombées fiscales (10 000 euros par MW et par an en moyenne) à des actions locales de transition énergétique pour créer un cercle vertueux.

4.4.5. Le solaire photovoltaïque investit les territoires

Avec une puissance totale installée de 143 GW en 2050, le scénario négaWatt 2022 exploite un peu moins d'un tiers du gisement photovoltaïque estimé par l'ADEME⁵⁴ à 465 GW (dont 62 pour les parcs au sol et 403 pour les installations en toiture). Le potentiel de la filière est donc très loin d'être saturé.

Par rapport à la situation actuelle, le parc de 2050 connaît une forte évolution non seulement quantitative (multiplication par 13 de la puissance installée) mais aussi qualitative à travers une répartition très différente de celle d'aujourd'hui à la fois sous l'angle de la typologie et sous celui de la localisation des installations.

Une répartition par type d'installation plus diversifiée qu'aujourd'hui

Les 143 GW de solaire photovoltaïque installés en 2050 dans le scénario négaWatt sont répartis entre six grandes familles représentatives de la réalité de la filière. Pour chacune d'entre elles, une trajectoire spécifique est définie, tenant compte de l'historique récent et de la dynamique propre à la famille considérée (voir tableau ci-dessous).

Famille	Situation actuelle et perspectives	Trajectoire 2020 - 2050	Capacité 2050
Parcs au sol	<ul style="list-style-type: none"> - 500 MW/an entre 2017 et 2020 - 1,7 GW de projets en attente (AO CRE - Appel d'offres de la Commission de Régulation de l'Énergie) 	Augmentation progressive jusqu'à 2 GW/an entre 2024 et 2040, puis 1 GW/an entre 2041 et 2050 dont 500 MW de repowering	54 GW
Ombrières de parking	<ul style="list-style-type: none"> - Flux de 200 à 250 MW/an (AO CRE) en augmentation sensible - Étude ADEME : potentiel 4 GW largement sous-estimé (base de données imprécise) 	Légère augmentation pour atteindre un rythme constant de 0,3 GW/an entre 2022 et 2040	12 GW
Grandes toitures plates	<ul style="list-style-type: none"> - 150 MW/an en augmentation sensible (AO CRE bâtiments) - Obligation d'équipement des bâtiments tertiaires > 1000 m², >300 m² à partir de 2024 	Rythme régulier de 0,6 GW/an	19 GW
Hangars agricoles	<ul style="list-style-type: none"> - 100 MW/an sur 2010-2019, en augmentation sensible depuis cette période - Hausse du plafond des tarifs d'achat à 500 kW - Volontarisme de la profession 	Augmentation rapide jusqu'à 0,5 GW/an entre 2024 et 2040, puis rythme de 0,4 GW/an entre 2041 et 2050	16 GW
Toitures Est-Ouest	<ul style="list-style-type: none"> - Possible si inclinaison des pans <10° => aplatissement de la courbe de production - Propice à l'autoconsommation dans le tertiaire 	Augmentation progressive jusqu'à 0,6 GW/an en 2030 puis rythme constant jusqu'en 2050	16 GW
Petits systèmes diffus	<ul style="list-style-type: none"> - 30% de la puissance installée mais plus de 90% des points de raccordement - 100 MW/an entre 2017 et 2019 - Fort regain d'intérêt depuis le début de la crise sanitaire (+50%) - Atteinte de la parité réseau d'ici 2025 	Augmentation progressive jusqu'à 1,1 GW/an en 2030 Rythme constant jusqu'en 2050	27 GW

Tableau 9 - Tendances actuelles et trajectoires prévues par le scénario négaWatt pour chaque famille de solaire photovoltaïque

54. « Un mix électrique 100% renouvelable ? », ADEME, 2015 <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/2881-mix-electrique-100-renouvelable-analyses-et-optimisations.html>

La figure suivante retrace l'ensemble de ces évolutions.

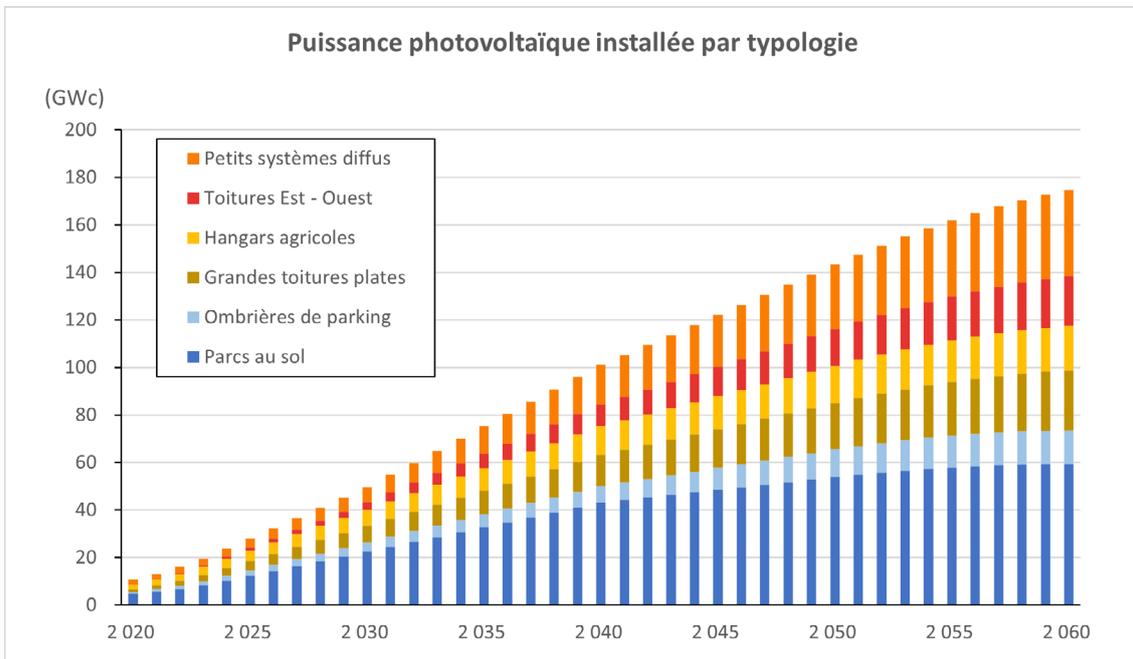


Figure 33 - Cumul des puissances installées en solaire photovoltaïque jusqu'en 2060, dans le scénario négaWatt

Ainsi, en 2050 et au-delà, les parcs au sol représentent 38 % de la puissance totale installée et les petits systèmes diffus 19 %, tandis que les quatre autres catégories se situent entre 8 et 14 % du total. Une partie des parcs au sol sera constituée de systèmes avec trackers qui suivent la course du soleil, permettant de lisser la courbe de production. Les installations au sol incluent également des centrales flottantes sur lac, étangs, gravières, etc.

Une répartition géographique plus homogène

Le parc photovoltaïque actuel se caractérise par un fort déséquilibre vers le Sud puisque les quatre régions les plus méridionales (Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Auvergne-Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur) totalisent à elles seules 74 % de la puissance installée alors qu'elles représentent moins de 50 % du PIB et de la superficie et même moins de 40 % de la population du pays.

À travers des mesures simples et rapides à prendre comme la régionalisation (ou la départementalisation) des tarifs d'achat et des appels d'offre, le scénario

négaWatt opère un rééquilibrage géographique vers le Nord qui s'inscrit dans une logique d'optimisation globale tenant compte de paramètres sensibles (disponibilité du foncier, capacités d'accueil du réseau, équité territoriale, etc.). Il conduit aux résultats suivants :

- parcs au sol et ombrières : les régions méridionales restent attractives, mais le potentiel important lié à la présence de nombreuses friches dans des régions comme le Grand Est et les Hauts-de-France est mieux valorisé ;
- grandes toitures plates : les puissances installées dans chaque région dépendent de leur taille et de l'importance de leur patrimoine bâti industriel et commercial ;
- hangars agricoles : la répartition est homogène sur l'ensemble du territoire national en fonction de la superficie de chaque région ;
- toitures Est/Ouest et petits systèmes diffus : la répartition dépend directement du poids démographique de chaque région.

Le choix d'une optimisation globale

Avec plus de 60% des systèmes installés en toiture de bâtiments réputés plus coûteux, dont une partie orientée Est-Ouest, et un rééquilibrage Nord-Sud autour de 40%-60%, la production maximale de la France n'est pas favorisée. En fait, ce choix d'une répartition aussi équilibrée que possible répond à un objectif d'optimisation globale :

- sur le plan technique : moindres impacts sur le réseau électrique, moindre concentration des besoins de stockage ;
- sur le plan économique : réduction du coût d'accès au foncier, meilleure valorisation des capacités d'accueil du réseau, meilleure répartition des revenus directs (travaux, vente d'électricité, maintenance) et indirects (taxes et impôts locaux) ;
- sur le plan social : participation des acteurs locaux (collectivités, PME, agriculteurs, citoyens).

Ce choix favorise également l'acceptabilité par la société tout entière d'un développement massif d'une filière qui est de loin la plus populaire au sein de la population française.

Elle s'avère finalement bien plus efficace à tous points de vue que la politique actuelle fondée sur le seul critère du coût complet actualisé de production du kWh qui conduit mécaniquement à favoriser les très grandes installations opérées dans le Sud de la France par des grandes entreprises parfois déconnectées des enjeux de terrain et vis-à-vis desquelles on voit apparaître des phénomènes de rejet.

La production d'électricité photovoltaïque multipliée par treize par rapport à 2020

La simulation heure par heure de la production d'électricité solaire jusqu'en 2060 (les hypothèses sont détaillées en annexe 4) montre qu'avec 168 TWh/an en 2050, la contribution attendue de l'ensemble du parc situe le photovoltaïque en deuxième position des sources primaires d'énergie, entre l'éolien (305 TWh) et le biogaz (139 TWh).

Alors qu'elles représentent 54% de la puissance totale installée en 2050, les installations sur bâtiments, dont l'orientation et l'inclinaison sont plus contraintes, fournissent 48% de la production totale. À l'inverse, les parcs au sol et ombrières de parking fournissent 52% de la production alors qu'ils représentent 46% de la puissance installée.

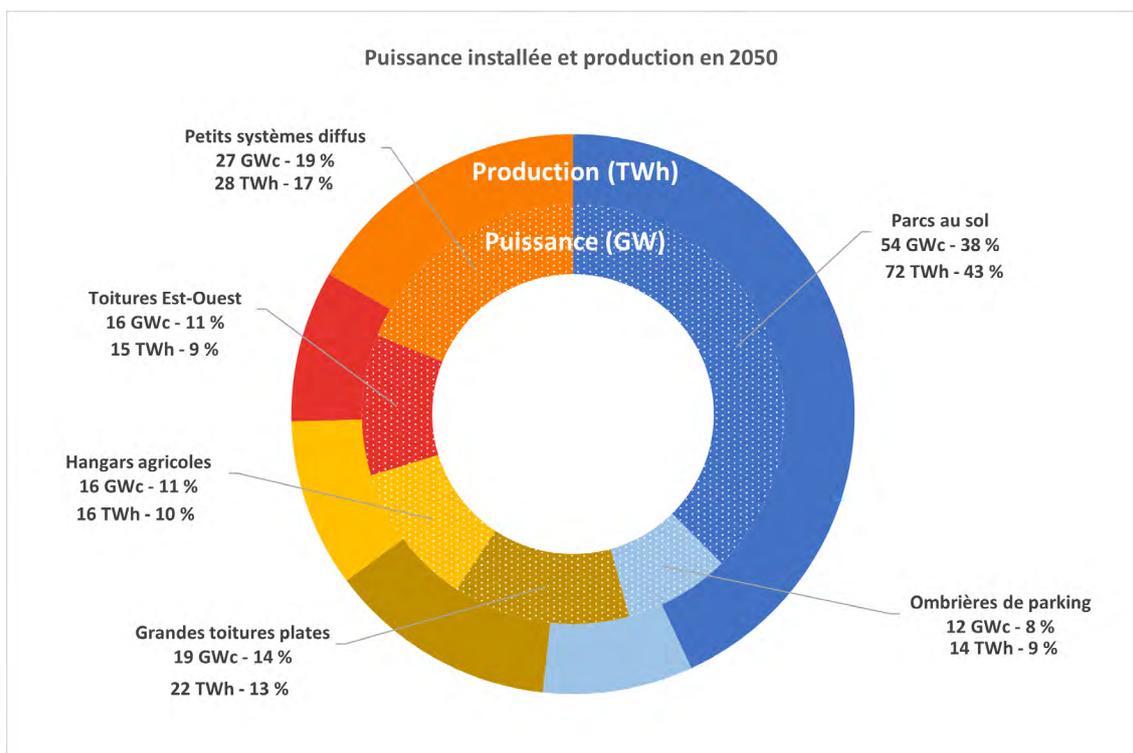


Figure 34 - Puissance installée et production d'électricité photovoltaïque en 2050 par type d'installations, dans le scénario négaWatt

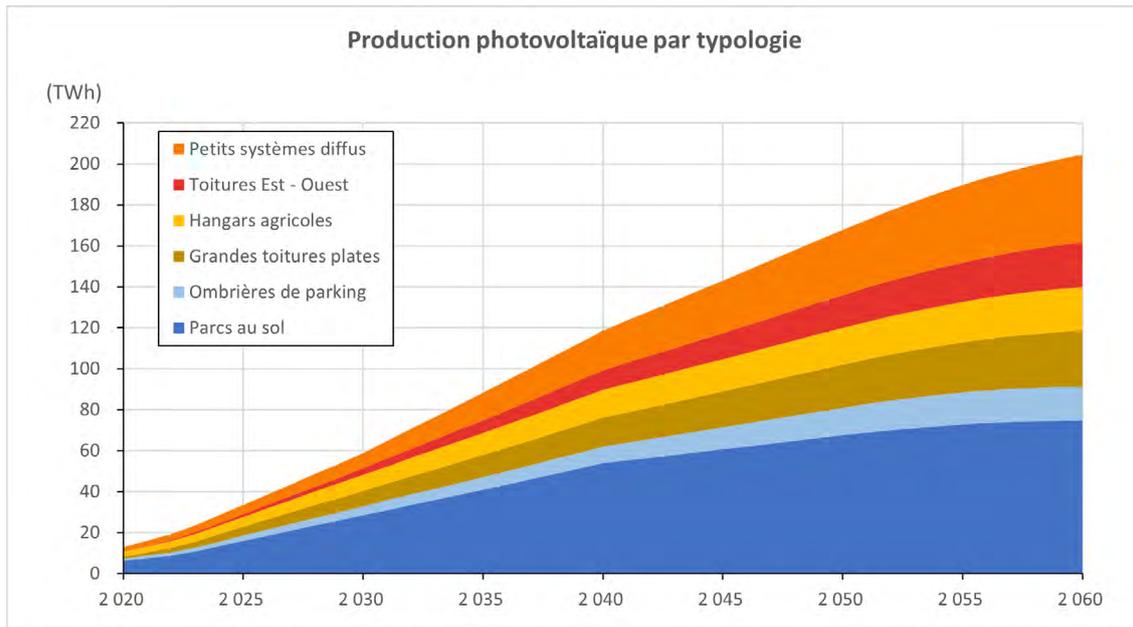


Figure 35 - Évolution de la production solaire photovoltaïque jusqu'en 2060, dans le scénario négaWatt

Le productible annuel varie selon les installations de 1030 à 1250 kWh par kW installé (ou de 1030 à 1250 heures équivalent-pleine-puissance), soit un facteur de charge allant de 11,8% à 14,3%, la moyenne globale du parc se situant respectivement à 1 170 h et 13,4%.

Ces chiffres peuvent paraître relativement faibles à cet horizon temporel compte tenu des progrès attendus du rendement de conversion des panneaux et des onduleurs mais il est cohérent avec le choix de diversité des typologies et d'équilibre géographique qui conduit logiquement à une moindre performance énergétique, donc économique.

Toutefois, cette dernière est plus que compensée par la baisse des coûts de fabrication, d'installation, d'intégration au réseau et d'exploitation des systèmes photovoltaïques qui se poursuivra dans les années et les décennies à venir bien au-delà de la compétitivité déjà acquise du coût LCOE⁵⁵ du kWh photovoltaïque. L'apparition, encore timide en France mais qui va en s'accroissant, de contrats de vente de long terme de gré à gré sans subventions (PPA pour « Power Purchase Agreements ») entre producteurs et consommateurs ou fournisseurs témoigne de ce mouvement inéluctable.

Ainsi, entre un coût d'investissement qui sera à la

baisse encore longtemps et des coûts de fonctionnement quasiment nuls caractéristiques de la filière, le photovoltaïque contribue au maintien dans la durée d'un prix abordable de l'électricité pour les consommateurs finaux.

Saisir les enjeux industriels pour créer de l'emploi

L'augmentation de la puissance totale installée annuellement permet dans un premier temps à la France de rattraper le retard accumulé sur ses propres objectifs et de se mettre en ligne avec ceux de l'hypothèse haute de la PPE actuelle (44 GW installés en 2028), puis de représenter un marché de 5 à 6 GW/an à partir de 2031, soit environ 10% du marché européen anticipé par les observateurs à cet horizon.

Un marché de cette taille est susceptible d'attirer des investissements dans des usines de très grande capacité (plusieurs GW/an) utilisant des technologies de rupture en termes de coût et de rendement telles que l'hétérojonction qui est notamment maîtrisée par le CEA-INES et devrait commencer prochainement à être exploitée à l'échelle industrielle.

Plusieurs projets de ce type sont actuellement en cours de discussion en Europe et singulièrement en

55. LCOE est l'acronyme de Levelized Cost Of Energy, soit en français le coût actualisé de l'énergie.

France. Leur concrétisation, qui pourrait s'accélérer suite par exemple à un engagement politique fort se traduisant par quelques mesures concrètes telles que la modulation tarifaire ou la reconnaissance d'intérêt général des énergies renouvelables, serait tout bénéfique pour la filière à travers une chute drastique des coûts et du contenu carbone des panneaux, et pour notre pays avec à la clé la création de plusieurs milliers d'emplois qualifiés et durables.

Avec l'apparition des premiers gros chantiers de renouvellement à partir de 2040, le marché annuel du photovoltaïque augmente progressivement jusqu'à plus de 8 GW/an entre 2045 et 2055 avant de se stabiliser ensuite durablement aux environs de 7 GW/an, ce qui correspond à un rythme de renouvellement moyen entre 20 et 25 ans de l'ensemble du parc.

4.4.6. Les autres sources renouvelables d'électricité

En complément des sources éolienne et solaire photovoltaïque amenées à se développer fortement, d'autres filières apportent un complément intéressant. Certaines permettent notamment un pilotage de la production

(hydraulique éclusée et lac, incinération de déchets), contrairement aux deux précédentes, et représentent environ la moitié des apports de ces filières. Les autres font partie de la catégorie des énergies dites fatales

(TWh)		2020	2030	2040	2050
Hydraulique	Fil de l'eau	19,1	18,7	18,3	17,8
	Petit hydraulique	7,7	7,7	7,7	7,6
	Éclusé	16,8	16,3	15,8	15,2
	Lac	15,1	14,6	14,0	13,5
Énergies marines	Marémotrice	0,5	0,5	0,5	0,5
	Hydrolien	0,0	0,8	3,4	4,4
Géothermie haute température		0,1	0,3	0,6	0,9
Déchets*		2,3	1,9	1,0	0,4
Total		61,6	60,9	61,3	60,3
Part de la demande d'électricité finale		14,9%	14,6%	15,4%	16,4%

* Part renouvelable seulement (prise conventionnellement égale à 50 %)

Tableau 10 - Répartition des sources renouvelables de production électrique, hors éolien, photovoltaïque et productions thermiques (cycles combinés gaz, cogénérations, etc...)

Certaines filières régressent et sont compensées par celles qui se développent (voir tableau ci-dessus), ce qui se traduit par une grande stabilité de la production totale d'électricité par les technologies hors éolien et solaire photovoltaïque.

L'hydroélectricité réduite par l'impact climatique

Pour ces filières, l'augmentation des puissances installées de certains ouvrages ne permet pas de

compenser totalement la diminution de l'hydraulicité. Il est difficile de prévoir quel impact le bouleversement climatique aura sur celle-ci, mais la plupart des modèles indiquent que, si la pluviométrie annuelle pourrait rester stable, voire augmenter, sa variabilité au cours de l'année pourrait faire baisser la quantité d'énergie récupérable par la filière hydroélectrique. Par précaution, une diminution de 15% de l'hydraulicité entre 2015 et 2050 a été retenue.

Énergies marines : seul l'hydrolien est en course

À côté de la centrale électrique de la Rance, construite en 1966, qui constitue la seule possibilité de production marémotrice en France métropolitaine, il existe deux filières de production directe d'électricité à partir de la mer : les hydroliennes et les centrales houlo-motrices. Ces dernières, utilisant le mouvement de la houle, ont un coût élevé et paraissent encore loin d'un déploiement à grande échelle : elles ne sont pas retenues dans le scénario négaWatt. Par contre, un développement modéré de l'hydrolien est envisagé, avec 1 GW installé en 2050.

Géothermie haute température avec prudence

Si la température du sol est suffisamment élevée, une production directe d'électricité peut être envisagée, comme à Larderello en Toscane. En France, si quelques

sites existent comme à Bouillante en Guadeloupe, le potentiel semble beaucoup plus limité en métropole. Un site expérimental existe en Alsace à Soultz-sous-Forêts, qui utilise une technique de stimulation du sous-sol à grande profondeur, avec quelques difficultés puisque des secousses sismiques ont conduit les autorités locales à stopper le projet. Par prudence, un déploiement très modéré est retenu dans le scénario négaWatt.

Déchets incinérés : une fin prévisible

L'incinération de déchets ménagers ou industriels banals peut se faire également en cogénération. De la même manière que pour la récupération de chaleur à partir de déchets, comme ces derniers vont être drastiquement réduits, la production d'électricité par incinération est amenée à quasiment disparaître.

4.4.7. L'empreinte matière des énergies renouvelables est limitée

Les énergies renouvelables sont aujourd'hui sous le feu de critiques dans le débat public. On leur reproche notamment de consommer deux à cinq fois plus de matériaux que d'autres sources de production d'électricité (thermique et nucléaire), et leur développement mettrait à mal la pérennité des ressources minières concernées. La décentralisation des moyens de production avec des technologies utilisant des « carburants » (le vent et le soleil en particulier) moins concentrés que le pétrole et l'uranium mobilise effectivement plus de matériaux par kilowattheure produit. Mais ce constat n'a aucun sens si on n'examine pas la question de la consommation globale de matériaux en France.

L'outil négaMat permet justement de décrypter les conséquences du développement de ces technologies ne produisant ni gaz à effet de serre, ni déchets radioactifs. L'analyse est menée par source (éolien, photovoltaïque, méthanisation, électrolyseurs, extension des réseaux, etc.) et par matériau (acier, béton, cuivre, terres rares, etc.). L'outil permet de comparer les usages liés aux énergies renouvelables avec d'autres

usages qui n'ont rien ou peu à voir (développement du numérique ou mobilité électrique par exemple). Cette méthode rigoureuse nous affranchit des amalgames et généralisations abusives que l'on rencontre malheureusement trop souvent aujourd'hui.

	% usage EnR		% usage EnR
Acier	9%	Béton	5%
Aluminium	22%	Verre	12%
Cuivre	11%	Plastique	1%

Tableau 11 - Pourcentage de matériaux utilisés pour la mise en place d'un programme 100% énergies renouvelables comparativement au total de tous les usages pour la période 2020-2070

Avec cette analyse (voir les résultats du tableau) on peut ainsi dire que la mise en place d'une production d'énergies 100% renouvelables mobilise 9% de l'acier utilisé de 2020 à 2070, tous usages compris. Dit autrement, sans énergies renouvelables, on consommerait en théorie 9% d'acier en moins sur

la période 2020-2070 ; mais dans ces 5 prochaines décennies il sera de toute façon nécessaire de renouveler le système de production d'électricité, quel qu'il soit : si à la place des énergies renouvelables on construisait de nouveaux réacteurs nucléaires, la consommation d'acier serait environ deux fois plus faible qu'avec les énergies renouvelables, mais ne serait pas nulle pour autant. Ainsi la différence entre les deux programmes est finalement très faible, de l'ordre de 5% au global (de plus, dans le cas de la filière électro-nucléaire, les matières utilisées ne seront pas toutes recyclables ou ré-utilisables compte tenu de leur caractère radioactif). Ce même raisonnement peut également être tenu pour d'autres matériaux impactés par les filières de production d'électricité. Seul l'aluminium est véritablement impacté par la constitution d'un mix 100% renouvelable mais il s'agit là d'un matériau non critique et très facilement recyclable.

En dehors de ces matériaux classiques, il faut étudier le cas des métaux rares (tungstène, indium, etc.) et des terres rares. Ces terres ne sont d'ailleurs pas si rares que ça mais produites à 85% par la Chine ce qui pose des problèmes géopolitiques. On ne dispose

4.4.8. La filière nucléaire s'arrête en 2045, selon une trajectoire maîtrisée⁵⁷

Par sa taille, sa place dans l'histoire et la situation énergétique de notre pays, et la nature spécifique des risques qui lui sont attachés, l'évolution du parc nucléaire fait l'objet d'une attention particulière. Pour construire sa vision prospective de la trajectoire nucléaire, le scénario négaWatt s'appuie d'abord sur une analyse des facteurs constitutifs de la dépendance actuelle de la France au nucléaire pour identifier les marges de manœuvre à construire pour maîtriser son évolution. Cette vision, qui s'inscrit résolument dans une perspective de production à 100% renouvelable, prend non seulement en compte les contraintes de fermeture des réacteurs existants en fonction de l'évolution de la demande et des autres moyens de production, mais aussi les enjeux liés à la sûreté et à la maîtrise du devenir de l'ensemble du complexe nucléaire, qu'il s'agisse des usines nécessaires au fonctionnement du parc ou des entreposages et stockages et des inventaires associés.

pas de statistiques fiables sur les usages des terres rares en France et on doit envisager la question au niveau mondial.

Il est juste de rappeler que l'industrie photovoltaïque ne consomme aucune terre rare⁵⁶.

Le néodyme qui n'est pas critique, et le dysprosium qui l'est, entrent dans la composition des aimants permanents. Ces derniers ont envahi les moteurs dans de multiples applications comme l'électroménager ou le numérique. Les génératrices des éoliennes ne sont quant à elles pas nécessairement équipées d'aimants permanents. D'ailleurs, 90% du parc français actuel n'utilise pas cette technologie. Au niveau mondial, l'usage des aimants permanents en 2017 est de 40% pour les moteurs usuels, 35% pour le numérique et seulement 1% pour les éoliennes !

Le développement de l'éolien offshore peut de son côté nécessiter un recours accru aux aimants permanents mais de nouvelles technologies prometteuses à base de ferrite voient le jour et laissent augurer un abandon du néodyme et du dysprosium.

Comprendre la place structurante du nucléaire

Le nucléaire occupe inévitablement une place à part dans toute réflexion prospective sur l'avenir énergétique de la France. C'est bien sûr en partie dû à la place que cette filière occupe dans le mix énergétique : suite au lancement en 1973 du programme de construction de 58 réacteurs à eau pressurisée (REP), dont 56 restent en fonctionnement après la fermeture en 2020 de la centrale de Fessenheim, le nucléaire a fourni sans discontinuer plus de 70% de la production française d'électricité depuis 1986, ne repassant pour la première fois sous cette barre qu'en 2020, avec 67%. Même si cela représente, une fois rapporté à l'ensemble de l'énergie finale consommée en France, moins d'un cinquième des besoins, cette dépendance sans équivalent dans le monde n'en demeure pas moins très structurante.

Mais ce caractère structurant repose sur d'autres dimensions, qu'il est indispensable de relever en préalable à toute analyse. On peut en souligner trois particulièrement importantes.

56. Voir : <https://decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables>.

57. Ce texte a été écrit avant le déclenchement de la guerre en Ukraine en 2022. Ce conflit fait émerger d'autres problématiques relevées sur <https://negawatt.org/Energie-climat-paix-et-securite>

- La plus fondamentale est la dimension géopolitique, qui a été et reste déterminante pour l'évolution de cette filière à l'échelle internationale, en lien avec le caractère intrinsèquement dual – civil et militaire – de ses principales technologies et matières : réacteurs consacrés à la production d'électricité ou à la propulsion nucléaire, enrichissement de l'uranium, séparation du plutonium par retraitement... Il ne s'agit pas ici de discuter des frontières qu'établit la communauté internationale entre ces deux usages au titre de la non-prolifération, ni de leur plus ou moins grande porosité, mais simplement de souligner à quel point cette caractéristique va de pair avec des enjeux internationaux de puissance et de dépendance autour de la possession de ces technologies et de ces matières.

Dans le contexte français, depuis le lendemain de la Seconde Guerre mondiale, cette dimension s'incarne d'abord par l'importance du programme nucléaire militaire et de son lien avec le nucléaire civil : « l'un ne va pas sans l'autre », a rappelé en décembre 2020 le Président de la République⁵⁸. Mais elle s'exprime aussi dans le rôle particulier que joue l'industrie nucléaire civile, à travers les accords de coopération et les activités d'exportation, dans les relations stratégiques que noue la France, et du soutien dont elle bénéficie bien au-delà d'une logique strictement économique.

- La deuxième dimension à prendre en compte porte sur la manière dont le choix nucléaire français, en s'agrégeant historiquement aux principes de service public à travers un monopole exercé par l'entreprise nationale EDF, a doté techniquement, économiquement et politiquement le secteur de l'électricité de structures dont le poids reste majeur. Malgré les développements intervenus en termes d'ouverture des marchés et de diversification, l'organisation du secteur reste dominée par le caractère central de la production nucléaire.

Qu'il s'agisse par exemple de la forme du réseau, de la structure de la consommation, des mécanismes de régulation, ou de la situation financière d'EDF, nombreux sont les facteurs qui font techniquement, économiquement ou politiquement obstacle à une perspective de transformation du système électrique, alors même que le cycle industriel construit autour du parc nucléaire actuel s'achève.

Cet effet de verrouillage est notamment manifeste dans la faiblesse des politiques de maîtrise de la consommation d'électricité ou dans le retard accumulé par la France en matière de développement des énergies renouvelables.

- Le troisième facteur structurant réside dans la nature de la filière nucléaire, qui constitue elle-même un système à part entière. Le bon fonctionnement des réacteurs repose non seulement sur des activités de fourniture et de maintenance d'équipements particulièrement spécifiques, comme les cuves, les générateurs de vapeur et d'autres systèmes, mais il repose aussi et surtout sur la mise à disposition du combustible nucléaire, avec toutes les étapes nécessaires à sa fabrication, puis la responsabilité de gérer le combustible une fois usé, ainsi que l'ensemble des déchets radioactifs issus de l'exploitation des réacteurs et des usines nucléaires, et pour finir le démantèlement de l'ensemble de ces installations.

Cette dimension est particulièrement marquée dans notre pays, qui a choisi de maîtriser l'ensemble de la filière. Elle se traduit par l'existence d'un cadre réglementaire et institutionnel spécifique, avec un Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et une Autorité de sûreté nucléaire (ASN) respectivement chargés de l'évaluation et du contrôle. La filière nucléaire est elle-même caractérisée par une très grande concentration industrielle : l'activité de fabrication des réacteurs (Framatome, filiale d'EDF), leur exploitation (EDF), la gestion des usines (Orano) font l'objet de monopoles, tandis que la recherche et développement publique est pour l'essentiel assurée par le CEA et la gestion des déchets radioactifs par une agence publique dédiée, l'Andra.

Outre les effets de verrouillage que cette spécialisation industrielle et institutionnelle vient ajouter aux précédents, la dimension systémique du nucléaire se traduit surtout par la gestion, dans une temporalité qui lui est propre, de flux importants et de stocks croissants de matières, de déchets et d'installations à démanteler. Cette gestion doit être projetée bien au-delà de l'exploitation des réacteurs : la fin du démantèlement des réacteurs de première génération, arrêtés depuis 30 à 40 ans, n'est pas envisagée avant le siècle prochain par EDF⁵⁹, tandis que la descente des déchets du parc actuel dans le stockage géologique Cigéo, si ce projet se

58. <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2020/12/08/deplacement-du-president-emmanuel-macron-sur-le-site-industriel-de-framatome>

59. <https://www.asn.fr/Media/Files/00-Publications/Courrier-ASN-a-EDF-strategie-de-demantelement-UNGG-Juillet-2016>

réalise, n'est pas prévue d'être terminée avant 2150⁶⁰. Ce phénomène est encore plus aigu en France, du fait du choix structurant d'une gestion par retraitement du combustible utilisé. Celui-ci s'accompagne aujourd'hui de l'utilisation dans une partie des réacteurs (24 unités du palier 900 MW) de combustible utilisant du plutonium, dit MOX⁶¹, complexifiant la gestion du combustible et des réacteurs. Ce choix est surtout source de l'accumulation d'un inventaire plus complexe de déchets et de matières nucléaires dites valorisables mais sans emploi, dont certaines ne pourront être éventuellement réutilisées qu'en construisant de nouvelles usines et réacteurs dédiés. La filière nucléaire crée ainsi mécaniquement les conditions d'une forme d'obligation de poursuite de son activité.

La trajectoire de production nucléaire ne peut ainsi en aucun cas être pensée du seul point de vue technique de l'équilibre du système électrique. La difficulté consiste, tout en prenant pleinement en compte l'ensemble de ces dimensions structurantes, à défaire les liens par lesquels elles contraignent aujourd'hui cette trajectoire.

Reconnaître la moindre soutenabilité du nucléaire

L'accumulation de matières et de déchets dont la charge ne peut qu'être transmise aux générations futures, l'extrême concentration industrielle et institutionnelle, le lien géopolitique avec le nucléaire militaire sont autant de caractéristiques qui différencient fortement le nucléaire d'autres options mobilisables en matière d'approvisionnement électrique.



Figure 36 - Cartographie des principales installations nucléaires en France (Institut négaWatt, 2022)

60. <https://www.andra.fr/sites/default/files/2020-04/Projet%20Cig%20C3%A9o%20-%20568%20F.pdf>

61. Le combustible MOX (pour mixed oxides) est un combustible fabriqué à partir du plutonium extrait du retraitement du combustible à l'uranium usé et d'uranium appauvri, qui peut sous certaines conditions se substituer au combustible à l'oxyde d'uranium enrichi (combustible UOX).

D'une part, les installations nucléaires et les matières qu'elles mettent en jeu constituent un potentiel de danger spécifique, même si les différentes options mises en œuvre en matière de sûreté et de sécurité peuvent réduire le risque que ce danger se concrétise. Les réacteurs, les usines et les transports peuvent toujours être la source d'accidents graves ou la cible d'agressions, entraînant une exposition plus ou moins importante du public et une contamination radioactive durable de parties plus ou moins importantes du territoire. Leur exploitation accumule des matières nucléaires et des déchets radioactifs à vie longue dont la gestion ne peut être réglée par la génération qui les produit. D'autre part, les caractéristiques de ces technologies nucléaires rendent leur diffusion limitée, à tel point que cette énergie, près de soixante-dix ans après sa première production industrielle, n'a jamais fourni plus de 3% environ de l'énergie finale consommée par la population mondiale, et que seuls 33 pays exploitent actuellement des réacteurs (plus deux autres qui l'ont fait). Pour des raisons de capacité et de stabilité des pays et de risques, sa généralisation reste inimaginable.

La question de la soutenabilité du nucléaire ne saurait ainsi se réduire à son caractère décarboné – au sens de l'absence d'émissions directes à la combustion –, si volontiers mis en avant par les promoteurs de cette énergie. Dans une approche plus globale des enjeux de développement durable, qui prend pleinement en compte l'enjeu du changement climatique mais ne ramène pas tout à lui, les caractéristiques propres du nucléaire le distinguent au contraire négativement, y compris vis-à-vis des énergies renouvelables électriques.

Comme le rappelle le GIEC, les actions menées pour réduire le risque climatique peuvent interagir sur les autres objectifs de développement durable de façon positive, en synergie, ou de façon négative, soulevant alors la question de bénéfices et détriments croisés (trade offs).

Dans sa revue de littérature sur les impacts de différentes options de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur les 16 autres objectifs de développement durable (ODD), où il affecte à chaque type d'action un score de -2 à +3 par ODD selon son impact plus ou moins négatif ou positif, le GIEC établit une différence très nette⁶². Parmi les 23 options principales auxquelles il applique cette grille figurent le remplacement du charbon par du nucléaire (de technologie actuelle ou plus avancée), et son remplacement par des énergies renouvelables électriques. Le nucléaire obtient le moins bon score cumulé parmi toutes les options considérées, avec un impact global négatif ou au mieux neutre (-3 à 0) sur les objectifs de développement durable. Par comparaison, les renouvelables électriques obtiennent un score clairement positif (+11 à +21) ; ce score est globalement plus positif pour le photovoltaïque par rapport à l'éolien et pour ces deux filières par rapport à l'hydroélectricité, dans la mesure où elles n'ont pas les mêmes impacts potentiellement négatifs, par exemple sur la biodiversité ou sur l'accès à l'eau. Les options d'efficacité et de sobriété énergétique, qui ne sont toutefois pas analysées sous l'angle spécifique de l'électricité, obtiennent des scores cumulés similaires ou supérieurs.

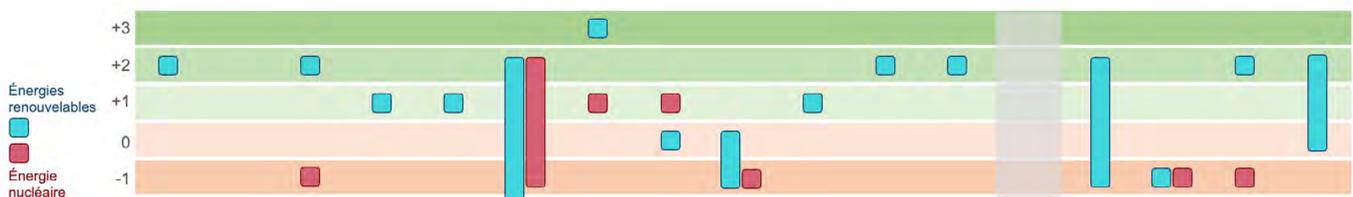


Figure 37 - Soutenabilité du nucléaire et des énergies renouvelables

▲ Analyse du GIEC (2018) : impacts respectifs du remplacement du charbon par les énergies renouvelables hors biomasse et par le nucléaire ou le nucléaire avancé sur l'ensemble des objectifs de développement durable. Source : négaWatt d'après GIEC (2018) - rapport spécial 1,5°C.

62. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, octobre 2018, chapitre 5 (à partir de la p. 481). Une synthèse de ce comparatif a été proposée par l'Association négaWatt : Quelle place pour le nucléaire et les énergies renouvelables dans les trajectoires mondiales de neutralité carbone ?, septembre 2020 (à partir de la p. 5).

Outre des aspects positifs spécifiquement associés aux énergies renouvelables et pas à l'électronucléaire, par exemple pour la lutte contre la pauvreté (ODD 1), la santé et le bien-être (ODD 3), la lutte contre les inégalités (ODD 10), la soutenabilité des villes et des communautés (ODD 11), ou la consommation et la production responsables (ODD 12), cet écart provient aussi d'impacts négatifs spécifiquement associés au nucléaire. L'analyse du GIEC souligne par exemple un impact négatif sur l'objectif d'industrialisation durable et de construction d'infrastructures résilientes (ODD 15), du fait de la charge liée à l'héritage laissé par le nucléaire en termes de déchets et de démantèlement, et sur l'objectif de paix et de justice (ODD 16), au motif que le recours au nucléaire entraîne un risque constant de prolifération. Enfin, le GIEC identifie la contribution potentiellement positive des renouvelables, contrairement au nucléaire, à l'objectif de développement de partenariats vertueux (ODD 17), en lien notamment avec le caractère partageable des ressources et des savoir-faire associés.

Ces obstacles profonds à la soutenabilité du nucléaire, tant dans sa dimension technique qu'économique ou géopolitique, sont au cœur de la réflexion conduite par l'Association négaWatt sur ce volet du scénario. L'orientation générale est clairement, en cohérence avec la recherche d'une optimisation de la soutenabilité de l'ensemble du système énergétique, de réduire autant que possible la dépendance au nucléaire, au profit d'autres options intrinsèquement plus soutenables.

Déconnecter les choix en matière de nucléaire civil et militaire

La construction maîtrisée d'une trajectoire pour le parc nucléaire civil suppose, quelle qu'elle soit, de commencer par défaire les effets de verrouillage qui, par le caractère profondément structurant du nucléaire, contraignent aujourd'hui les choix dans ce domaine. Le premier d'entre eux, bien qu'il ne soit jamais posé comme tel dans le débat, porte sur le lien entre la poursuite du nucléaire civil et les intérêts de la France en matière de nucléaire militaire. Ce lien se joue pour l'essentiel autour de deux enjeux : tout d'abord la maîtrise des technologies, l'existence d'installations et le maintien d'inventaires relatifs aux matières mobilisées pour les armes nucléaires (uranium hautement enrichi, plutonium, tritium...), et ensuite la capacité de conception, de fabrication et d'exploitation de réacteurs pour la propulsion marine (porte-avions et sous-marins).

Si le programme nucléaire civil français s'est de manière évidente développé sur les bases d'une infrastructure initialement dédiée à l'accession de notre pays au rang de puissance nucléaire militaire, il en est de manière tout aussi évidente devenu largement indépendant. Néanmoins, des liens techniques, économiques et financiers subsistent, bien qu'ils ne soient que très rarement publiquement explicités. Rappelant par exemple lors d'une visite dans l'usine Creusot Forge que celle-ci est stratégique pour la fabrication des gros composants de réacteurs pour la production d'électricité comme pour la propulsion marine, le Président de la République a brossé le tableau d'une dépendance croisée et d'un destin inévitablement commun entre ces deux volets du programme nucléaire français. Les déterminants des choix, entre politique de sécurité et de défense d'une part, et politique énergétique et climatique d'autre part, sont pourtant suffisamment différents pour que les décisions sur l'avenir de ces deux programmes, sans les isoler l'une de l'autre, puissent être démocratiquement prises de manière dissociée.

Sur le plan international, il est évident que la dimension géopolitique du nucléaire est déterminante pour son évolution. D'une part, la possession de l'arme nucléaire, comme les efforts menés secrètement ou non par différents pays pour y parvenir, sont aussi clairement un facteur de premier plan dans l'ordre international établi que dans les tensions les plus vives auxquelles il est confronté. D'autre part, l'accès sélectif aux technologies et matières soumises au régime de non-prolifération reste un enjeu de puissance et de relations de dépendance entre pays détenteurs et accesseurs, au point d'être sans doute historiquement le principal moteur du développement du nucléaire civil, mais aussi son principal frein.

Sous cet angle, il nous apparaît que le nucléaire participe d'un équilibre international fondé sur une culture de contrôle et de domination, incompatible avec le type de relation plus équitable et de coopération nécessaire au développement soutenable. Dans une vision de long terme, la France, qui devrait pour commencer remplir davantage ses obligations d'agir en faveur du désarmement au titre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) de 1968, pourrait envisager de signer le Traité d'interdiction des armes nucléaires (TIAN), adopté par la Conférence des Nations Unies en juillet 2017, signé par près de quatre-vingt-dix États et entré en vigueur en janvier 2021. Cette orientation n'a toutefois pas vocation à être tranchée dans le cadre de

la trajectoire énergétique. Elle doit au contraire pouvoir faire l'objet d'un débat démocratique, nécessairement long, qui doit être détaché des préoccupations intérieures en matière énergétique.

Il semble donc indispensable aujourd'hui d'être capable de dissocier les deux trajectoires du nucléaire civil et du nucléaire militaire. Il est sur le fond absurde de considérer, comme l'a soutenu en 2018 le rapport d'un ancien administrateur général du CEA et d'un ancien délégué général pour l'armement, que le maintien de la capacité nationale de construction de réacteurs de propulsion requiert le lancement d'un programme d'au moins six réacteurs de type EPR⁶³. Il convient au contraire de lancer une démarche systématique d'identification des liens croisés subsistant entre nucléaire civil et militaire, afin d'organiser techniquement, économiquement et institutionnellement leur séparation la plus complète possible.

Se projeter vers le 100% renouvelable

Si toute pression sur le nucléaire civil associée à l'agenda nucléaire militaire pourrait ainsi être évacuée, la question reste néanmoins posée de la perspective de construction de nouveaux réacteurs nucléaires. Celle-ci peut être envisagée sous deux angles : les éventuels besoins du point de vue de la sécurité d'approvisionnement électrique d'une part, et l'éventuelle opportunité du point de vue industriel d'autre part. Différentes options technologiques sur le type de nouveaux réacteurs peuvent être étudiées selon ces deux critères, ainsi qu'en fonction de leurs performances attendues du point de vue de la sûreté, de la gestion des matières et des déchets, et des coûts. Dans le contexte français, on peut principalement examiner les suivantes :

- l'EPR, réacteur à eau pressurisée⁶⁴ qualifié d'évolutionnaire (puissance record de 1650 MWe), dont le développement a commencé à la fin des années 1980 et dont un exemplaire est en construction depuis 2005 à Flamanville. La motivation industrielle était au cœur de la décision d'engager ce chantier, EDF reconnaissant à l'époque qu'il n'était pas nécessaire du point de vue énergétique : il s'agissait à la fois de maintenir les compétences de la filière, en mal

de nouvelles constructions, et de créer une vitrine nationale en vue de l'exportation de ce nouveau réacteur. Le chantier accuse aujourd'hui 12 ans de retard, et un surcoût de plus de 500 % portant son coût complet de construction à plus de 19 milliards d'euros selon la Cour des Comptes⁶⁵, alors même que des écarts de conformité suspensifs de son autorisation restent en cours d'instruction ;

- au vu de ce fiasco industriel, EDF s'est engagé dans la conception d'un nouveau modèle d'EPR, désormais désigné comme l'EPR2, avec l'objectif affiché d'en simplifier le design, parfois aux dépens de la redondance, de la profondeur et de la robustesse des dispositions de sûreté prévues sur l'EPR, pour en réduire le coût⁶⁶ - avec l'objectif d'une baisse de 30%. Hormis cette préoccupation, l'EPR2 s'inscrit dans la continuité industrielle et n'apporte aucune évolution en termes de puissance ou de performance vues du système électrique, comme en termes de gestion du combustible et des déchets ;

- la filière nucléaire française et les pouvoirs publics ont longtemps mis en avant la perspective, au-delà des réacteurs évolutionnaires comme l'EPR, de réacteurs d'autres types, fondant notamment les projections d'utilisation à moyen et long terme des stocks accumulés de matières dites valorisables sur le futur déploiement de réacteurs à neutrons rapides. La France a renoncé une première fois à développer ce type de filière après l'arrêt des réacteurs Phénix et Superphénix, mais projetait de la relancer avec un prototype modernisé, Astrid, dont le démarrage en 2020 était prévu par la loi de 2006. L'abandon de ce projet en 2019 signe, sans renoncer à un programme de recherche dans ce domaine, l'arrêt de toute perspective industrielle de déploiement de ces réacteurs, au moins à l'horizon de temps de ce scénario négaWatt 2022 ;

- la mode est aujourd'hui aux petits réacteurs modulaires, dits SMR (pour small modular reactors). Il s'agit moins de chercher des ruptures sur la sûreté ou les matières en jeu, même si certains concepts peuvent le proposer, que d'adapter les différentes technologies de réacteurs aux déterminants actuels

63. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/exclusif-nucleaire-le-rapport-qui-genait-nicolas-hulot-137634>. Le contenu de ce rapport est resté confidentiel au titre du secret-défense.

64. Les réacteurs à eau pressurisée utilisent un combustible à l'uranium enrichi, l'eau sous pression circulant dans le cœur servant à la fois de modérateur de la réaction nucléaire et de caloporteur évacuant la chaleur. Les 56 réacteurs en exploitation en France appartiennent à cette filière, qui constitue sous des formes variées environ deux tiers du parc nucléaire mondial.

65. <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/la-filiere-epr>

66. Ces modifications incluent notamment le recours à trois trains de secours au lieu de quatre, l'abandon de la double enceinte au profit d'une simple enceinte renforcée, ou encore la réduction de la taille du récupérateur de cœur fondu.

des marchés. L'idée, pour rendre le nucléaire plus modulable, flexible et appropriable à différentes échelles, tout en gagnant en compétitivité par un effet de fabrication standardisée en série, est d'aller vers des modèles de plus petite taille, pouvant être rassemblés par modules et être livrés de façon aussi directe que possible depuis l'usine. La France a pris du retard par rapport à d'autres initiatives dans le monde, mais EDF pilote aujourd'hui le développement du concept Nuward, une unité intégrée de 340 MW composée de deux réacteurs de 170 MW à eau pressurisée.

Du point de vue de la trajectoire électrique, ces options ne sont évidemment pas toutes identiques en termes d'horizon, de faisabilité ou de niveau envisageable de déploiement. Si la Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028 (PPE) et la Stratégie nationale bas carbone à 2050 (SNBC) restent muettes sur ce point, le gouvernement et EDF travaillent activement à la préparation d'un programme de six réacteurs EPR2 au moins, et jusqu'à 14 en tout, qui pourraient selon eux être mis en service à partir de 2035-2037, et projettent de développer un prototype Nuward pour un éventuel déploiement complémentaire des SMR au même horizon⁶⁷.

Il n'existe pourtant aucune indication que ces projets soient nécessaires. Au contraire, comme les précédents scénarios développés par l'Association négaWatt ont été parmi les premiers à l'envisager en France, la faisabilité technique et la rationalité économique d'un système électrique fondé sur une production intégralement renouvelable sont de plus en plus affirmées. Les énergies renouvelables électriques ont représenté en 2020 plus de 600 fois plus de nouvelle capacité ajoutée au niveau mondial que le nucléaire (plus de 250 GW contre moins de 0,4 GW), et cette tendance s'est renforcée en 2021⁶⁸. Elles représentent en valeur médiane 77 % de l'électricité mondiale en 2050 dans les scénarios compatibles avec une limitation du réchauffement à 1,5°C identifiés par le GIEC dans la littérature scientifique, contre 9 % en valeur médiane pour le nucléaire⁶⁹. Et la feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie sur la neutralité carbone de l'énergie en 2050⁷⁰ prévoit un mix électrique à

90% renouvelables et 10% nucléaire, ce qui implique que de larges parties du monde fonctionnent avec un système électrique à 100% renouvelable, comme l'AIE et RTE en ont confirmé la possibilité⁷¹, moyennant des conditions que la maturité des solutions disponibles doit permettre de lever.

La projection construite pour le scénario négaWatt 2022 s'inscrit donc pleinement dans une perspective où le déploiement des énergies renouvelables électriques, la mise en œuvre des efforts de sobriété et d'efficacité sur les usages de l'électricité – sans s'interdire pour autant l'extension du périmètre de ces usages – et le développement de solutions de flexibilité, y compris de stockage inter-saisonnier, permettent à l'horizon 2050, à moindre coût, d'envisager cet objectif. La trajectoire est donc construite sans nouvelle capacité nucléaire, renforçant *in fine* la démonstration qu'il n'y a pas besoin de nouveaux réacteurs pour garantir à cet horizon la sécurité d'approvisionnement électrique et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre.

A contrario, la perspective de reconstruire des réacteurs pour maintenir du nucléaire dans le mix électrique présenterait trois inconvénients majeurs. Celui d'un différentiel de coût de production croissant, d'abord, par rapport à une trajectoire basée sur les renouvelables, au vu des évolutions croisées des coûts des filières : le coût complet de production de l'EPR de Flamanville pourrait atteindre 110 €/MWh ou plus là où certaines énergies renouvelables s'approchent de 50 €/MWh, avec la perspective de gagner encore en compétitivité. Même en donnant crédit à EDF d'une baisse de 30 % sur l'EPR2, hypothèse très optimiste en regard de la courbe d'apprentissage négative systématiquement observée dans le déploiement du parc nucléaire français, l'écart en faveur d'un système de production tout renouvelable reste important. Avec un objectif affiché aujourd'hui par EDF de 1 milliard d'euros pour 170 MW, sans doute très optimiste lui aussi, le projet Nuward ne semble pas de nature à inverser cette tendance. Il faut bien sûr intégrer dans cette comparaison l'ensemble des coûts du système électrique, du réseau aux solutions de flexibilité ou de stockage, eux-mêmes appelés à baisser à mesure qu'ils sont déployés. Mais le différentiel est tel que les projections à long terme sur les coûts ne

67. <https://www.elysee.fr/front/pdf/elysee-module-19285-fr.pdf>

68. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20220213msc-wnistr2021-resume-fr.pdf>

69. Source : Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, octobre 2018. Pour retrouver plus facilement ces chiffres, voir Quelle place pour le nucléaire et les énergies renouvelables dans les trajectoires mondiales de neutralité carbone ?, Association négaWatt, septembre 2020 (p. 27).

70. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

71. <https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>

montrent pas d'écart décisif et suggèrent même, sous réserve de maîtriser le volume de réinvestissements dans le système en agissant sur la consommation, une évolution en faveur d'un mix 100% renouvelables⁷².

Ceci est d'autant plus vrai que la reconduction de réacteurs dans un système dominé par la production renouvelable est source de complexité et de désoptimisation. L'idée selon laquelle les réacteurs, par leur caractère pilotable, fourniraient un complément décarboné naturel à la variabilité des renouvelables repose sur l'hypothèse que leur puissance peut s'adapter en permanence pour assurer le différentiel entre la production renouvelable et la demande. Si les réacteurs peuvent fonctionner en suivi de charge, comme EDF le démontre déjà plus que tout autre exploitant nucléaire, le nombre de ces variations et leur fréquence sont néanmoins limités par des considérations relatives au comportement du combustible nucléaire et à la sûreté : il n'est pas question d'engager massivement le parc nucléaire dans des variations quotidiennes. Du reste, ce type de fonctionnement réduirait considérablement le facteur de charge du nucléaire, augmentant presque d'autant son coût (puisque les coûts de fonctionnement des réacteurs sont pour l'essentiel des coûts fixes). Par ailleurs, l'ajustement n'étant pas suffisant, le maintien d'une composante nucléaire n'empêcherait pas le nécessaire recours à des solutions de flexibilité et de stockage⁷³. D'un point de vue systémique, le maintien du nucléaire n'apporte pas nécessairement la garantie d'une meilleure optimisation que la complémentarité plus naturelle que trouvent renouvelables variables, flexibilité de la demande et solutions de stockage. Les difficultés que soulève la coexistence d'un nucléaire centralisé devant fonctionner en base avec ces options, tant au niveau de la forme du réseau que des modes techniques et économiques de maintien de son équilibre, restent aujourd'hui peu explorées.

Enfin, le troisième problème vient du risque intrinsèque qu'introduit dans la mise en œuvre de la trajectoire toute hypothèse allant dans le sens de plus de recours au nucléaire. Qu'il s'agisse de prolongation de fonctionnement du parc existant, avec le risque d'indisponibilité lié tant à l'apparition d'un problème de sûreté générique que de mauvaise maîtrise des

travaux nécessaires, ou de nouveaux réacteurs, du fait des incertitudes sur leur échéance de mise en service, d'importants aléas doivent être pris en compte. Le risque de retard n'est pas spécifique aux projets nucléaires, mais il présente deux caractéristiques particulières. D'une part, comme l'expérience de l'EPR de Flamanville le montre, le retard peut être glissant et atteindre un niveau considérable ; d'autre part, le risque généré par un seul projet en termes de capacités manquantes est très élevé par rapport à des options par nature plus décentralisées voire diffuses. Si l'EPR avait été nécessaire à l'équilibre du système électrique, nous serions depuis plus de dix ans exposés, année après année, à un déficit de 1,6 GW de capacité. Si des nouveaux réacteurs tels que les 6 EPR2 envisagés devaient figurer dans la trajectoire retenue, des mesures conséquentes devraient donc être prises pour couvrir le risque significatif de disponibilité retardée de leur production par rapport aux prévisions. Les énergies renouvelables introduisent un risque par leur variabilité, donc la disponibilité des capacités en service pour produire à un instant donné mais elles présentent, par leur caractère diffus, une plus grande garantie de service des capacités prévues. Le nucléaire présente à l'inverse l'avantage de constituer une capacité de production pilotable, mais expose le système au risque de défaillance de cette capacité pilotable attendue.

Acter la réorientation industrielle

Du point de vue du système électrique, dès lors qu'une préférence est donnée à la production basée sur les énergies renouvelables et que l'analyse montre la possibilité de fonctionner à 100 % sur cette base à l'horizon 2050, l'introduction de nouveaux réacteurs dans la trajectoire paraît non seulement inutile, mais porteuse de surcoûts, de complexité accrue et de risques spécifiques. Il est plus cohérent et moins hasardeux d'opter dès aujourd'hui pour ce changement de système et de le mener à son terme que de reproduire, avec de nouveaux réacteurs, une situation hybride.

La mise en construction de nouveaux réacteurs ne fait pas davantage sens du point de vue de la stratégie industrielle. Cette question doit s'envisager sous deux angles. Le premier est celui des perspectives

72. Les scénarios publiés par RTE, notamment, montrent des écarts sur le coût global du système électrique de l'ordre de $\pm 15\%$ en 2050-2060. Ils concluent à un surcoût de l'ordre de 10 milliards d'euros par an pour un mix renouvelable par rapport à un maintien du nucléaire, mais reposent sur des hypothèses plutôt pessimistes pour les renouvelables et optimistes pour le nucléaire ; ce surcoût est en particulier effacé si des conditions équitables de financement sont prises en compte. De plus, l'application d'une trajectoire de sobriété, proche du niveau de demande du scénario négaWatt, génère elle-même une économie de l'ordre de 10 milliards par an au même horizon. <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

73. Les scénarios de RTE confirment que, si leur volume et leur délai de mise en œuvre dépendent de l'évolution de la demande et des orientations sur le mix de production, d'importants moyens de flexibilité, y compris faisant appel à de nouveaux outils, peuvent être nécessaires dans toutes les trajectoires.

d'exportation, et du rôle de constructions en France comme vitrine à l'international. Même si elle a contribué à davantage de chantiers, la France n'a historiquement exporté qu'une quinzaine de réacteurs sur environ 600 construits ailleurs dans le monde. Parmi ceux-ci, seuls trois EPR sont en service : deux à Taishan en Chine dont un a été arrêté au bout d'un an et demi ; un en Finlande à Olkiluoto, démarré avec 13 ans de retard et ayant coûté plusieurs milliards d'euros de pertes à la France. Deux EPR sont encore en construction à Hinkley Point C-1 et 2 au Royaume-Uni, avec déjà plus de 7 années de retard : leur coût projeté atteint 110 €/MWh environ, si bien qu'ils ne seront rentables que si le gouvernement britannique maintient pendant 35 années le mécanisme promis de rémunération de la différence avec le prix de marché.

Les perspectives d'exportation supplémentaire de l'EPR, dans sa conception actuelle, sont extrêmement limitées. Ce réacteur est trop puissant pour de nombreux marchés, trop cher pour être financé sans subventions massives, et plombé par les retards et surcoûts du chantier de l'EPR de Flamanville. Le nouveau modèle de réacteur EPR2 à la conception duquel EDF travaille n'est pas de nature à modifier radicalement ces perspectives. Son exportation n'est envisageable que dans des pays dont le système électrique est capable d'absorber sa puissance unitaire et dont le système économique est capable de subvenir à son financement, ce qui n'offre que des opportunités limitées. C'est d'autant plus vrai que les pays concernés ont de moins en moins intérêt à faire le choix de nouveaux réacteurs ; et lorsqu'ils le font, la concurrence est au moins autant géopolitique qu'économique, et se joue notamment sur la capacité des pays fournisseurs à couvrir financièrement par des mécanismes de soutien de l'État le risque des projets de réacteurs à l'exportation. Les SMR, qui visent à s'exporter dans des pays moins avancés, se heurteront inévitablement à des difficultés du même type.

La France a peu à gagner à soutenir une activité d'exportation non rentable dont le bénéfice géopolitique apparaît de plus en plus limité. En encourageant, par sa participation à cette course, un déploiement du nucléaire dans lequel la Russie et la Chine sont industriellement et financièrement bien mieux placées, elle renforcerait au contraire les tensions géopolitiques résultant de cette influence. Elle gagnerait au contraire à sortir de ce modèle issu du siècle dernier, et à s'inscrire beaucoup plus résolument dans le développement sur son territoire de filières industrielles dans les énergies renouvelables, en se positionnant tant sur la fabrication

dans le photovoltaïque avec l'implantation sur son sol de d'usines de production de panneaux solaires qu'en s'engageant plus fortement sur de nouvelles filières comme l'éolien flottant. Dans un contexte mondial où les investissements dans les énergies renouvelables ont représenté dix à quinze fois plus que les investissements dans le nucléaire ces vingt dernières années et où cette tendance s'accélère, et compte tenu de ses propres besoins, rester focalisé sur l'espoir d'une relance du nucléaire prive de plus en plus la France des ressorts bien plus puissants de création de valeur et de potentiel à l'export qu'offrent les énergies renouvelables.

Cette réorientation est d'autant plus nécessaire que la question se pose dans le contexte d'une fin de cycle industriel. Ce ne sont pas seulement les réacteurs en service, dont l'industrie se mobilise aujourd'hui pour prolonger leur fonctionnement, qui ont été construits dans les années 1970 et 1980, mais aussi l'ensemble des installations de transformation des matières, fabrication du combustible, retraitement, conditionnement et entreposage nécessaires à leur fonctionnement. Un certain nombre d'entre elles ont été rénovées voire remplacées par des installations plus modernes, comme l'usine d'enrichissement de l'uranium Georges Besse-II à Tricastin, mais d'autres approchent au contraire pour une large part de leur fin de vie, comme les usines de retraitement de La Hague.

Bien que la stratégie de prolongation de durée de vie, de renouvellement ou de fermeture de ces installations soit intrinsèquement liée à celle qui se discute pour les réacteurs, ce volet n'est pratiquement jamais abordé. Le principe à l'œuvre semble être que l'intendance suivra... et d'ailleurs, les décisions prises dans ce domaine sont laissées pour l'essentiel à l'initiative des opérateurs de la filière, qui profitent largement de cette situation pour piloter, par leurs choix sur le dimensionnement et l'évolution de ces installations support, l'ensemble de la trajectoire industrielle. C'est ainsi, par exemple, que la PPE prévoit de « moxer » les réacteurs 1300 MW pour trouver un débouché au combustible MOX, au plutonium, après la fermeture des réacteurs 900 MW qui l'utilisent actuellement. Pourtant, cela se heurte à d'importants obstacles d'adaptation des équipements et de démonstration de sûreté. Ce choix permettrait surtout de continuer à faire fonctionner les usines de retraitement et de fabrication du combustible MOX et éviter une saturation de certaines capacités d'entreposage.

La perspective de nouveaux réacteurs doit s'envisager différemment, car il ne s'agit pas simplement de les faire profiter des installations existantes pendant leur coexistence avec les réacteurs actuels, mais de se projeter dans un fonctionnement à plus long terme. S'agissant de réacteurs EPR2 dont la durée de vie projetée atteint 60 ans et qui seraient mis en service à partir de 2035, c'est une trajectoire pour l'ensemble des installations support jusqu'à la fin du siècle et au-delà qui doit être envisagée.

Les questions qui se posent sont multiples. Il faut non seulement faire des choix sur la nature des usines et des capacités d'entreposage associées à reconstruire – poursuite ou non du retraitement, lignes de fabrication de combustible pour différents types de réacteurs ou non, etc. –, anticiper les échéances de transfert entre les usines actuelles et ces éventuelles nouvelles installations, et décider surtout de leur dimensionnement. Historiquement, les capacités des usines de conversion de l'uranium, d'enrichissement, de fabrication du combustible ou de retraitement ont été dimensionnées jusqu'au double des besoins de l'ensemble du parc de 58 réacteurs français, comptant sur un volume d'activité à peu près équivalent pour des services aux réacteurs étrangers (principalement en Europe), qui ne s'est souvent que partiellement matérialisé. Dans la perspective de nouveaux réacteurs bien moins nombreux en France et du déclin du nucléaire observé en Europe, les nouvelles usines devraient être beaucoup plus petites ; le fonctionnement à un volume bien moindre qu'aujourd'hui des usines les plus récentes, si elles devaient être prolongées, poserait également question.

En revanche, ce dimensionnement large n'a souvent pas été fait pour les capacités d'entreposage, dont beaucoup arrivent à saturation, ni pour le stockage. Le projet de stockage géologique Cigéo n'est par exemple dimensionné que pour les déchets à haute et moyenne activité à vie longue issus du parc actuel ; ainsi, la mise en service de nouveaux réacteurs implique mécaniquement d'envisager un nouveau site, même si sa mise en service, qui pourrait ne pas intervenir avant 2100 environ, sera laissée à la charge des générations futures.

Outre les difficultés de mise en œuvre cohérente de l'ensemble de ces actions industrielles, la nécessité de les expliciter vient de ce qu'elles ont un coût. Les

besoins de réinvestissement associés, la perte d'effets d'échelle sur la taille des installations, les aléas de réalisation sont autant de facteurs qui ne viennent que renforcer l'analyse précédente sur les incertitudes et les surcoûts associés à une trajectoire de reconduction de réacteurs, par rapport à une trajectoire fondée sur les énergies renouvelables.

Ne pas démarrer l'EPR de Flamanville

Dans ce cadre de questionnement, on peut également replacer la question difficile du devenir de l'EPR de Flamanville. Ce réacteur a connu de nombreux problèmes tout au long de sa construction. Certains ont été soldés par des procédures dérogatoires, comme la ségrégation de carbone dans le fond de la cuve du réacteur, d'autres font l'objet de réparations dont la validation reste en suspens, comme les soudures du circuit secondaire, d'autres sont encore en cours d'instruction comme la tenue de piquages sur le circuit primaire. Compte tenu de la nature des causes organisationnelles des problèmes constatés et de l'impossibilité d'un contrôle systématique, le risque de non conformités non détectées est très élevé. Par ailleurs, un très important programme d'essais de qualification reste encore à mener. Il n'est dans ces conditions par certain que le réacteur finisse par obtenir l'autorisation de démarrer, mais il est assez certain qu'il démarrerait alors dans des conditions réelles de sûreté non conformes aux exigences initiales.

Au-delà de cette préoccupation, la question de ce démarrage doit aussi s'analyser sur un plan technico-économique, en prenant toutes les dimensions de cette décision en compte. L'investissement énorme que représente l'EPR est d'ores et déjà consenti à perte du point de vue de la collectivité, dans la mesure où son coût de production ne se rémunérera pas sur des prix alignés sur les coûts actuels et à venir d'un système basé sur les énergies renouvelables. Son exploitation peut dégager des recettes susceptibles de limiter ces pertes ; elle implique cependant de payer un jour le démantèlement du réacteur au lieu d'en faire l'économie en ne le démarrant pas. Grossièrement, trois options se présentent :

- celle qui est privilégiée par l'industrie consiste évidemment à démarrer l'EPR de Flamanville dans la perspective de le faire fonctionner au moins 60 ans, puisque c'est sa durée de vie nominale. Si elle

peut faire sens dans l'hypothèse d'une relance du nucléaire, elle devient au contraire absurde dans la perspective d'une réorientation de la trajectoire électrique et des priorités industrielles. Au-delà de la fermeture inéluctable des réacteurs actuels, l'ensemble du système industriel nécessaire au fonctionnement, à la gestion des déchets, au contrôle des réacteurs devrait être renouvelé et maintenu pour plusieurs dizaines d'années, pour les besoins d'un seul réacteur. Le coût et la complexité engendrés effacent tout avantage tiré de cette poursuite d'exploitation ;

- dès lors, on pourrait envisager de le démarrer pour ne le faire fonctionner qu'aussi longtemps que des réacteurs existants et l'ensemble des usines, entreposages et fonctions support associés restent eux-mêmes en service. Outre qu'elle expose la France au risque supplémentaire d'un accident sur ce réacteur, la durée de production pourrait alors s'avérer insuffisante pour présenter un bilan significativement meilleur sur le plan économique, compte tenu également du coût du démantèlement, par rapport à un non démarrage ;
- la solution la plus réaliste consiste alors, malgré la perte sèche d'investissement qu'elle induit, à s'épargner le risque associé à son fonctionnement et faire l'économie du coût de son futur démantèlement en renonçant à son démarrage. Au fond, il s'agit ici d'assumer pleinement que ce projet, décidé en un autre temps et dont la construction a été poursuivie à tout prix malgré les déboires accumulés, est encore plus coûteux, risqué et inutile que l'Association négaWatt et d'autres organisations l'avaient envisagé dès l'origine.

Déverrouiller les conditions de fermeture des réacteurs

Le scénario négaWatt assume donc de se projeter à un horizon 2050 où aucun nouveau cycle d'activité nucléaire n'est engagé, et où les seules installations nucléaires en exploitation sont des sites d'entreposage, de stockage et de recherche. La construction de nouvelles unités nucléaires, qu'il s'agisse de réacteurs ou d'usines, ne constitue pas une simple continuité mais un choix structurant à l'échelle d'un siècle, entre un chemin de reproduction du système actuel et celui, plus résilient et plus soutenable, dans lequel nous nous projetons.

Ce scénario ne constitue pas pour autant une trajectoire de sortie du nucléaire, au sens où cet objectif serait posé comme une fin en soi, l'emportant sur d'autres enjeux. Il recherche au contraire, en cohérence avec le principe directeur d'un équilibre d'action vis-à-vis de l'ensemble des enjeux de soutenabilité et des contraintes identifiées, une trajectoire maîtrisée de fermeture des réacteurs – notamment du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, de la sécurité d'approvisionnement électrique, et des conséquences sociales, mais aussi de la sûreté.

La difficulté à considérer la durée de vie des réacteurs comme variable d'ajustement réside en effet d'abord dans la préoccupation que soulève leur vieillissement. L'« amélioration continue de la sûreté » revendiquée par l'exploitant⁷⁴ et recherchée au fil des réexamens périodiques de sûreté porte sur les exigences applicables. Elle s'accompagne de travaux importants, mais elle n'empêche pas la diminution de marges de sûreté associées à la fatigue des matériaux, à l'usure, à l'obsolescence et au risque croissant avec le temps de non conformités accumulées. Alors qu'un réacteur atteint inévitablement un point où sa sûreté n'est plus suffisante, aucune durée limite a priori de fonctionnement ni aucun critère prédéfini d'arrêt ne sont fixés par la réglementation. Le prolongement de réacteurs au-delà de leur 4^e visite décennale (VD4) revient à dépasser la durée initialement considérée dans la démonstration de sûreté de 40 ans de fonctionnement. Même s'il donne lieu à d'importants renforcements, cet allongement de la durée de vie est une prise de risque contestable. D'autant plus que l'ASN a accepté le principe, pour s'ajuster aux limites de capacité industrielle d'EDF, d'un report de cinq ans d'une partie des travaux jugés nécessaires à cette prolongation.

Force est pourtant de constater que la PPE, en ne prévoyant que la fermeture de 10 à 12 réacteurs entre 2025 et 2035, acte la prolongation de fonctionnement au-delà de la VD4 de l'ensemble des 56 réacteurs encore en fonctionnement, et anticipe la prolongation au-delà de la 5^e visite décennale (VD5) d'un important nombre d'entre eux, puisque les 44 ou 46 réacteurs encore en service atteindront au moins 49,5 ans de fonctionnement à l'échéance de 2035. Le principe de cette prolongation au-delà de la VD5, alors même qu'aucune instruction technique ne permet de statuer sur sa faisabilité, n'est pas acceptable.

74. https://www.edf.fr/sites/groupe/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/20181002_dor.pdf

L'idée qui s'est imposée selon laquelle l'allongement de la durée de fonctionnement des réacteurs constitue la variable d'ajustement la plus naturelle – assortie de calculs tronqués en « coût restant à charge » pour prétendre que ceci constituerait l'option la plus rentable – enferme en fait depuis plus de dix ans les processus de décision dans un cercle vicieux d'attentisme, voire d'organisation méthodique de l'inaction. Le report de l'objectif de réduction de la part du nucléaire dans la production électrique à 50 %, repoussé en 2019 de dix ans (à 2035 au lieu de 2025) moins de cinq ans après son introduction dans la loi et avant même d'avoir fermé le moindre réacteur, en est l'illustration.

Pour sortir de cette spirale, il faut comprendre et surmonter deux difficultés majeures. La première tient à la structure très particulière de notre système électrique, la seconde à la distribution d'âge des réacteurs nucléaires et au mode de décision relatif à leur fermeture ou leur prolongation.

- La fermeture des réacteurs doit en effet s'envisager dans le contexte, unique au monde, d'un recours massif au nucléaire non seulement comme production en base, ce qui correspondrait environ à 50 % de la consommation, mais aussi en semi-base, et donc en suivi pilotable de la demande, alors même que celle-ci est soumise à un phénomène très marqué de pointe lié à l'importance du chauffage électrique par convecteurs. Le retrait de réacteurs, qui ne peut s'envisager que par paliers de l'ordre de 900 MW ou davantage, doit donc en première approche être compensé dès l'hiver qui suit par une nouvelle capacité de production assurant la même garantie de fourniture de la pointe extrême, ce qui est très difficile : s'il s'agit de nouveaux réacteurs, l'incertitude porte sur leur démarrage en temps voulu, et s'il s'agit comme dans le scénario négaWatt d'énergies renouvelables essentiellement variables, l'incertitude vient évidemment de cette variabilité.

Si la solution logique semble consister à laisser fonctionner les réacteurs assez longtemps pour que les nouveaux moyens de production soient en place avant de les arrêter, elle instaure en réalité un cercle vicieux. Outre qu'elle suppose que la sûreté ne vient jamais s'y opposer, elle repose sur un mécanisme d'auto-verrouillage : la prolongation des réacteurs, pour être rentable, ne peut s'accommoder ni d'efforts accrus sur la maîtrise de la demande, ni d'un développement accéléré de nouveaux moyens

de production, sauf à augmenter massivement les subventions de l'ensemble du système.

- Cette difficulté se combine avec un processus de décision en matière de poursuite ou d'arrêt de fonctionnement des réacteurs totalement inadapté à la situation. Faute de mécanisme dotant les autorités chargées de la politique énergétique d'un pouvoir de décision dans ce domaine, seuls l'exploitant EDF, pour des raisons industrielles ou financières qui lui appartiennent et ne doivent pas être confondues avec l'intérêt général, et l'ASN, pour des raisons de sûreté, sont compétents pour arbitrer ce choix. Ils le font autour d'un processus qui procède une fois de plus de l'effet de verrouillage : les réacteurs sont soumis, par palier puis individuellement, à un réexamen périodique de sûreté intervenant tous les dix ans, matérialisé par les visites décennales. Il consiste à définir en amont les conditions de poursuite d'exploitation, à réaliser si EDF le souhaite les travaux et renforcements correspondants, puis à n'interdire cette poursuite que si les conditions s'avèrent alors non remplies (aucune décision d'arrêt pour cette raison n'étant à ce jour intervenue, ni sur les réacteurs ni sur les usines).

Ainsi, chaque réacteur fait l'objet tous les dix ans d'efforts et de réinvestissements dont EDF programme l'amortissement sur la base de dix années supplémentaires. Celui-ci est même anticipé, comme cela a été le cas avec un passage comptable de 40 à 50 ans d'amortissement pour les 32 réacteurs de 900 MW dès 2016, alors même que l'avis favorable de l'ASN sur cette prolongation – qui ne vaut pas encore validation réacteur par réacteur – n'est intervenu que début 2021 ; de même, EDF a procédé au 1^{er} janvier 2021 à l'allongement à 50 ans de l'amortissement de l'ensemble des réacteurs de 1300 MW, alors même que l'ASN ne se prononcera pas sur son principe avant plusieurs années. Le fonctionnement d'un réacteur est donc techniquement et économiquement réputé acquis pour 10 années supplémentaires non pas seulement à la fin des travaux mais dès qu'EDF a consenti les dépenses pour le prolonger, voire bien en amont de ces dépenses par anticipation de l'amortissement comptable.

Ce problème vient se combiner avec un « effet falaise » sur la chronique de ces réexamens périodiques, dû en grande partie à une pyramide des âges très resserrée, avec plus de 80 % des réacteurs mis en

service en une dizaine d'années seulement, entre 1977 et 1987. Concrètement, le calendrier des échéances de réexamens décennaux par réacteur, donc des dates où leur arrêt ou leur prolongation programmés peut intervenir dans le schéma actuel, concentre les éventuelles fermetures sur quelques

années, avec des pics qui concernent par exemple pour le 4^e réexamen six ou sept réacteurs en 2022, 2024 ou 2027, et jusqu'à dix réacteurs en 2030, mais aucun en 2028 !

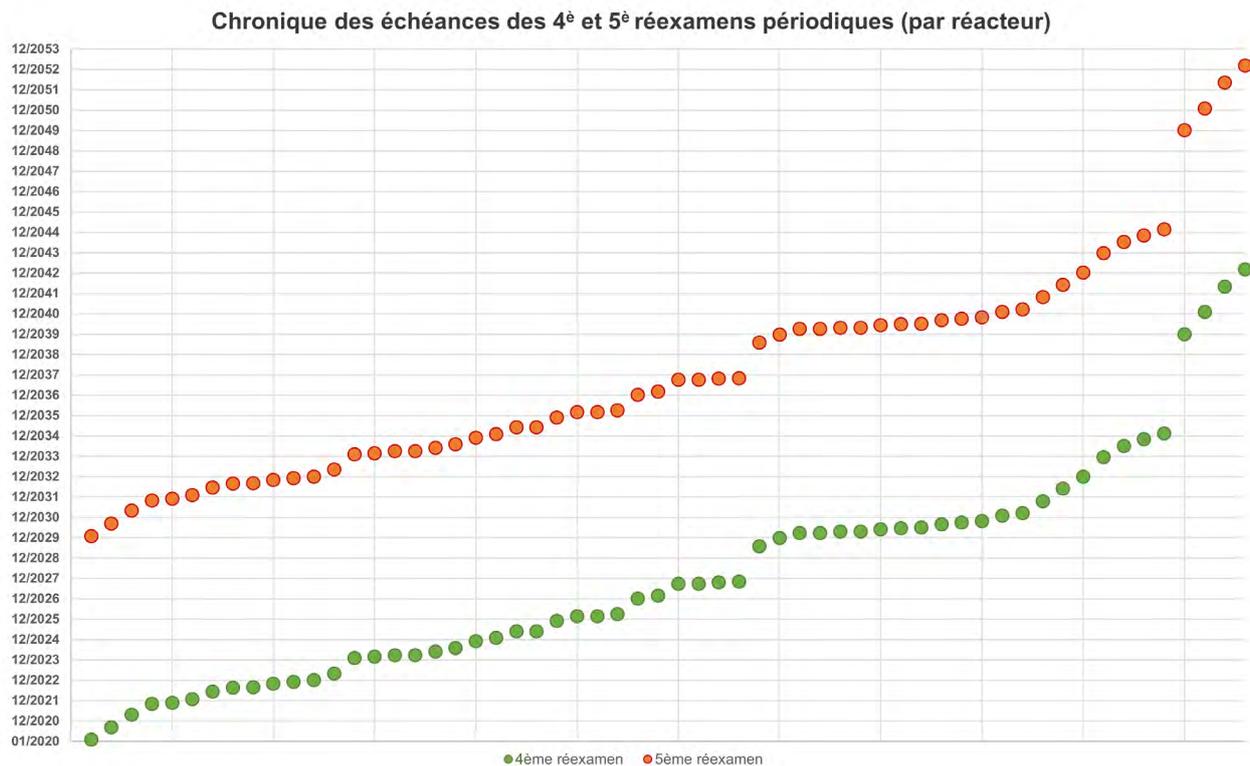


Figure 38 - Étalement de 2020 à 2053 des échéances de la VD4 et de la VD5 des réacteurs en service

Construire une trajectoire lissée et pilotable

Les simulations montrent en fait qu'il est impossible de maîtriser la trajectoire, du point de vue de son rythme global comme de son ajustement détaillé, sur la seule base des échéances des 4^e ou des 5^e réexamens périodiques. On ne peut pas aligner finement les dates de fermeture des réacteurs en ne travaillant que sur un pas de temps de dix ans pour chaque réacteur. Il est donc indispensable, pour sortir de la fuite en avant qu'engendre cette difficulté, d'envisager un mécanisme plus approprié.

Pour construire cette trajectoire, le scénario négaWatt s'appuie sur un principe de séparation du parc nucléaire en trois lots gérés selon des logiques complémentaires :

- un lot "VD5" : il semble désormais trop difficile voire impossible, sans remettre en cause la continuité de fourniture électrique ou recourir temporairement à un surcroît de production thermique, de ne prolonger le fonctionnement d'aucun réacteur au-delà de son 4^e réexamen – ce d'autant plus qu'EDF a engagé ce programme et que les premiers concernés par cette échéance ont déjà fait l'objet d'une partie des travaux

prévus. Dès lors qu'une partie du parc doit donc pouvoir fonctionner significativement au-delà de 40 ans, cela doit être dans les meilleures conditions de sûreté possibles, après avoir fait l'objet de tous les travaux nécessaires à cette exigence. Limiter le nombre de réacteurs concernés par ces travaux devrait par ailleurs permettre de les mettre en œuvre dans les meilleurs délais, alors que le plan de grand carénage actuel, censé s'appliquer à la très grande majorité d'entre eux, a au contraire conduit l'ASN à accepter le report d'une partie significative des renforcements quatre à cinq ans après le réexamen pour tenir réalistement compte des capacités d'EDF à traiter ce volume de travaux ;

- un lot "VD4" : si une partie des réacteurs doit être menée à l'échéance de la 5^e visite décennale, une partie peut au contraire être arrêtée dès l'échéance de la 4^e visite décennale, sans engager les travaux nécessaires à une prolongation de fonctionnement. Cette programmation, tout en dégagant des marges d'action et d'investissement dans la gestion des autres réacteurs et dans d'autres options pour EDF, fournit le socle nécessaire à une trajectoire lissée donc maîtrisée de fermeture, en évitant le report massif de l'effet falaise ;
- un lot "VD4+" : dans la mesure où notre constat est qu'une partie des réacteurs ne pourra pas - dans une trajectoire de fermeture maîtrisée sur le plan de la sécurité électrique notamment -, être fermée à l'une des deux échéances précédentes, il nous semble essentiel d'anticiper cette situation. Il s'agit d'éviter toute situation contrainte où des réacteurs devraient fonctionner plus longtemps que leur niveau de renforcement ne l'autorise ou ne pourraient fonctionner aussi longtemps que les réinvestissements dont ils ont fait l'objet ne le nécessitent pour être amortis. Pour cela, nous proposons au contraire de prévoir à l'avance qu'un certain nombre de réacteurs pourront, dans des conditions moins lourdes que celles d'une prolongation de fonctionnement jusqu'à l'échéance du 5^e réexamen, être autorisés à fonctionner quelques années au-delà du 4^e réexamen pour apporter au système électrique la réserve de capacité pilotable nécessaire.

En pratique, il est nécessaire - pour disposer de cette réserve d'ajustement -, de donner à ces réacteurs un statut particulier, sur la base d'un encadrement clair des conditions associées, tant du point de vue des

garanties apportées sur le plan de la sûreté que de la rémunération du service attendu. On propose ici que les réacteurs concernés soient autorisés à fonctionner pendant un maximum de trois ans après la VD4, sous réserve de renforcements adaptés à ce besoin du point de vue du maintien des exigences de sûreté : les critères correspondants, allégés par rapport à ceux d'une prolongation pour dix ans, doivent être définis sous l'égide de l'ASN. Pendant ces années de fonctionnement supplémentaire, les réacteurs concernés sont appelés à fournir au parc nucléaire la capacité additionnelle nécessaire pour s'ajuster aux aléas. Si le système électrique a besoin dans cette phase de transition d'une garantie de disponibilité de cette capacité de réserve, il ne peut garantir en retour le niveau de production auquel elle sera appelée : il est donc nécessaire qu'un mécanisme de rémunération complémentaire, indexé sur le différentiel entre la production réellement appelée et le niveau de production assurant la rentabilité, soit introduit sous la responsabilité de la CRE.

La création d'un tel mécanisme est clé pour réconcilier les enjeux de maintien de la sûreté, de garantie de la continuité d'approvisionnement et de rémunération de l'outil industriel. Mais si la trajectoire ne saurait être maîtrisée sans l'introduction d'une flexibilité de ce type, sa mise en place n'est pas triviale pour autant. En premier lieu, celle-ci nécessite sans doute un aménagement législatif tant pour définir les conditions de prolongation des réacteurs du lot "VD4+" du point de vue de la sûreté que pour les conditions de leur rémunération du point de vue du marché. Ce chantier législatif devrait être engagé dans les meilleurs délais, afin d'apporter au système la visibilité nécessaire pour que l'élaboration de la trajectoire s'organise.

Cette trajectoire reste complexe à construire. En effet, le nombre exact de réacteurs affectés à chacun des trois lots et leur typologie dépendent de très nombreux critères. Par exemple, la répartition entre paliers dans la pyramide des âges du parc ne permet pas d'aboutir à une trajectoire lissée en traitant de façon homogène chacun d'entre eux. Une partie des réacteurs 900 MW comme une partie des réacteurs 1300 MW peut être arrêtée en VD4 mais une partie doit être prolongée en VD5, et le bon fonctionnement du mécanisme VD4+ nécessite sans doute de piocher dans les deux.

Pour la trajectoire retenue pour le scénario négaWatt, l'objectif est de limiter le nombre de réacteurs prolongés en VD5 sans faire gonfler outre mesure le nombre de réacteurs affectés à la fonction de réserve. La trajectoire

est construite selon un rythme global de fermeture correspondant en moyenne à trois réacteurs 900 MW ou deux réacteurs 1300 MW par an, ce rythme étant toutefois un peu plus élevé au milieu de la période et moindre en début et en fin de trajectoire. Cette projection, ajustée en fonction de l'évolution de la demande électrique, avec un besoin en production

de 550 TWh à l'horizon 2050 tous usages confondus mais une consommation finale d'électricité ramenée à 350 TWh (voir la partie Bilans du scénario négaWatt 2022 pour plus de détails) et une pointe électrique ramenée à 60 GW environ, conduit à une fermeture des derniers réacteurs en 2045.

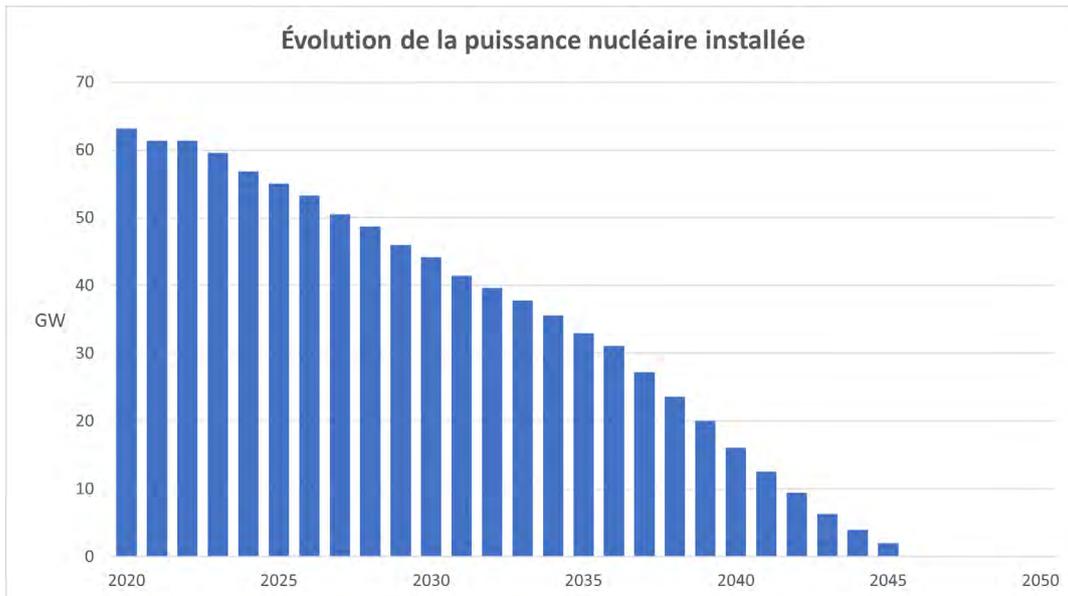


Figure 39 - Évolution de la puissance nucléaire installée en France dans le scénario négaWatt

Cette projection doit être considérée comme enveloppe, au sens où elle doit permettre de couvrir les besoins de sécurité électrique, avec une certaine réserve, tout au long de la trajectoire sur la base des moyens mobilisés pour cela dans le scénario. L'accélération possible des transformations en matière de solutions de flexibilité pourrait permettre d'ajuster l'affectation des réacteurs aux différentes catégories au fil du temps. Dans cette logique prudentielle, le scénario négaWatt cherche à préserver tout au long de la trajectoire une réserve d'environ trois à quatre GW de capacité nucléaire par rapport à la trajectoire lissée. Au total, une dizaine à une quinzaine de réacteurs sont arrêtés à l'échéance du 4^e réexamen, une quinzaine à une vingtaine de réacteurs prolongés un maximum de trois années au-delà de ce réexamen dans le cadre du mécanisme VD4+, et une vingtaine ou davantage sont prolongés jusqu'à l'échéance du 5^e réexamen.

Maîtriser la trajectoire dans toutes ses dimensions

Ce nombre peut varier à la marge en fonction de l'affectation précise de chaque réacteur dans chaque catégorie. Celle-ci est d'autant plus délicate qu'elle

doit tenir compte de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci, la sûreté relative de chacun d'eux peut constituer un élément important de priorisation, mais d'autres enjeux doivent également être maîtrisés. Ainsi, la tenue du réseau électrique peut être sensible à l'impact des fermetures des nœuds de tension que constituent les centrales nucléaires en fonction de leur localisation. De même, la robustesse du fonctionnement des réacteurs aux aléas climatiques en fonction de leur zone d'implantation et de leur source de refroidissement entre en jeu : dans une perspective de stress hydrique croissant, les réacteurs en bord de fleuve ou de rivière sont particulièrement exposés. Enfin, la maîtrise des flux et inventaires relatifs au combustible nucléaire et aux matières et déchets associés en fonction du type de réacteurs fermés doit être recherchée, comme celle des impacts sur l'économie et l'emploi dans les territoires touchés par les fermetures, en fonction notamment du rythme de repli des réacteurs dans chacune des centrales.

Le scénario négaWatt n'intègre pas d'analyses relatives aux deux premiers de ces enjeux. Il considère simplement que sa méthode pour encadrer la trajectoire de fermeture

des réacteurs nucléaires permet de dégager des marges pour prendre en compte, autant que de besoin, ces considérations. Il traite en revanche plus en détail la question du phasage des arrêts de réacteurs avec celle de l'arrêt des usines, de la gestion des entreposages et stockages et des inventaires finaux de matière.

Le parc nucléaire s'appuie en effet sur un ensemble d'usines et d'installations d'entreposage et de stockage, assurant l'approvisionnement des réacteurs en combustible nucléaire et la gestion des matières et déchets résultant de son utilisation. Ces installations, nombreuses, présentent du fait de leur dimensionnement ou de leur vieillissement des contraintes qui doivent être prises en compte dans la gestion de la trajectoire de fermeture des réacteurs. De même, leur renouvellement en bon ordre et dans des conditions maîtrisées de calendrier et de coût, devrait être pris en compte dans toute trajectoire reposant sur l'extension de la durée de vie du parc actuel et la construction de nouveaux réacteurs.

Les usines sont pour la plupart dimensionnées à un niveau correspondant au double des besoins du parc nucléaire français actuel : 14 000 à 15 000 tonnes pour les étapes de conversion chimique de l'uranium naturel avant enrichissement, à Malvési et au Tricastin, pour un besoin de 7 000 à 8 000 tonnes ; une capacité presque double pour l'enrichissement au Tricastin ; 40 % supérieure aux besoins français pour la fabrication de combustible à Romans ; et presque deux fois supérieure encore pour les usines de retraitement UP2-800 et UP3 de La Hague. Ces usines, compte tenu de la diversification d'approvisionnement des réacteurs français d'une part, et du déclin des volumes traités pour des clients étrangers d'autre part, ne fonctionnent souvent qu'à la moitié, voire moins de leur capacité.

Maintenir leur fonctionnement jusqu'à la fin d'exploitation des réacteurs actuels, en 2045, implique d'en maintenir l'équilibre économique, et surtout la sûreté, dans des conditions de sous-emploi croissantes, ce qui aggrave les problèmes. De plus, si certaines de ces usines sont récentes, comme la nouvelle usine Comurhex-II de Malvési mise en service en 2018, d'autres sont au contraire anciennes. Leur mise en service remonte aux années 1980 et surtout la décennie suivante, comme celles de La Hague (1990 et 1996), ou l'usine de production de combustible MOX au plutonium, Mélox, à Marcoule (1995), voire 1979 pour l'usine de

fabrication du combustible à l'uranium FBFC à Romans. Même si elles ont fait l'objet de différentes extensions et modernisations, leur fonctionnement sûr pour environ trente années de plus ne peut être garanti.

Le scénario ne prévoit aucune construction de nouvelle usine et cherche au contraire à ajuster le fonctionnement des usines existantes pour réduire les risques associés à un fonctionnement trop prolongé ou à trop faible charge de ces installations en anticipant les implications de leur fermeture. Les activités de conversion, d'enrichissement et de fabrication de combustible peuvent ainsi être maintenues, tout en étant graduellement réduites, à un niveau progressivement plus élevé que les besoins annuels du parc restant, permettant de constituer des stocks nécessaires pour les dernières années tout en se dotant d'une marge par rapport au seuil de fermeture impérative de ces installations. Ainsi, l'arrêt de l'ensemble des installations amont de la chaîne d'approvisionnement en combustible pourrait intervenir au plus tard vers 2040.

La question se pose de façon différente pour les usines dites de l'aval de la chaîne combustible, consacrées au retraitement du combustible usé et à la réutilisation du plutonium issu de ce retraitement sous forme de combustible MOX. Celui-ci ne peut être actuellement utilisé, dans une limite de 30 %, que dans 24 réacteurs 900 MW possédant les caractéristiques et autorisations nécessaires. Cette stratégie conduit aujourd'hui à l'accumulation de matières dites valorisables sans emploi direct et immédiat, ni même parfois sérieusement envisageable : fin 2020, cet inventaire comprenait 324 000 tonnes d'uranium appauvri, 34 100 tonnes d'uranium issu du retraitement, plus de 79 tonnes de plutonium, dont plus de 55 tonnes sous forme séparée et une petite vingtaine de tonnes dans des rebuts de fabrication de combustible MOX, et plus de 14 000 tonnes de combustible usé, dont près d'un cinquième ne peuvent même pas être retraités dans les installations actuelles de La Hague⁷⁵.

L'absence de maîtrise des flux conduit aujourd'hui à une saturation des capacités d'entreposage de combustible usé dans les piscines, par ailleurs vétustes, des usines de La Hague. Cette situation donne lieu à un projet de densification du combustible dans ces piscines en attendant la construction, projetée également, d'une nouvelle piscine d'entreposage sur le site. Dans le même temps, les difficultés de

75. https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/pdf/Andra-MAJ_Essentiels_2022-22_01_25-BDweb_0.pdf

fonctionnement de l'usine Mélox ont conduit à une augmentation de près de 20% du stock de plutonium issu du retraitement ces dernières années, débouchant là aussi sur une saturation des capacités d'entreposage et sur une demande d'extension. La moindre difficulté de fonctionnement supplémentaire à l'une des étapes de cette chaîne menace aujourd'hui de bloquer partiellement le système.

Le scénario négaWatt cherche sur ce plan aussi à rétablir des marges tout en réduisant autant que possible l'inventaire de matières et de déchets résultant de la trajectoire. Deux évolutions sont particulièrement importantes à cet égard. La première consiste à mettre en place dans les meilleurs délais un entreposage à sec, en châteaux de plomb, du combustible usé afin de sécuriser cet entreposage (à terme, cette solution devra être mise en œuvre pour l'ensemble du combustible en attendant son stockage définitif) et de permettre un arrêt du retraitement sans saturation rapide des piscines. La mise en œuvre de cette solution, dans la deuxième moitié des années 2020, permet à son tour d'anticiper l'arrêt progressif du retraitement pour cesser la production de plutonium, et permettre de résorber autant que possible le stock de plutonium séparé dans les réacteurs disponibles pour cela avant leur fermeture, sans s'engager dans une extension coûteuse et risquée de l'utilisation de combustible MOX dans de nouveaux réacteurs. Parallèlement, le scénario négaWatt prévoit une sécurisation de l'ensemble des entreposages actuels de matières et de déchets sans filière opérationnelle de stockage, afin de rendre ces entreposages suffisamment robustes sur les durées de plusieurs décennies voire du siècle nécessaires pour étudier, finaliser et mettre en œuvre leur stockage définitif. Dans cette perspective, un programme de recherche et d'études beaucoup plus poussé doit être engagé pour identifier les solutions les plus sûres de conditionnement et de stockage des matières valorisables, en particulier du plutonium séparé et des rebuts de fabrication du MOX.

Dans un autre registre, la trajectoire de fermeture des réacteurs et des usines doit également être ajustée pour prendre en compte les enjeux économiques et sociaux. Si le déclin de la filière nucléaire dans son ensemble peut s'inscrire au niveau national dans une trajectoire vertueuse de réindustrialisation autour des nouvelles orientations de la transition écologique, avec un bilan positif en emplois, les implications des fermetures au niveau local ne doivent pas être minimisées. L'activité très concentrée que représentent

les installations nucléaires, et leur implantation dans des zones généralement moins denses en population et en activités crée une situation de dépendance importante des territoires concernés, tout en réduisant les possibilités de reconversion locale des personnels concernés.

Les activités de démantèlement et de gestion des déchets n'offrent pas une perspective suffisante : elles représentent d'une manière générale moins d'emplois que les activités d'exploitation des installations, et mobilisent pour l'essentiel des emplois moins qualifiés. Des politiques actives de reconversion doivent donc être mises en place dans chaque territoire impacté. Cela pourrait s'avérer plus ou moins facile selon les sites, en fonction du tissu économique existant et de l'attractivité des territoires pour l'implantation de nouvelles activités industrielles correspondant aux besoins de reconversion. Cette différence doit être prise en compte dans l'élaboration de la trajectoire de fermeture, comme doit l'être la possibilité d'amortir les impacts, et de faciliter la mise en œuvre de reconversion en lissant les impacts : il s'agit, à l'inverse de ce qui a été fait à Fessenheim en fermant à des dates très rapprochées les deux réacteurs de la centrale, d'étaler dans la mesure du possible les fermetures des réacteurs sur un site donné.

Le nombre et la complexité des paramètres à prendre en compte ne permettent pas d'établir une liste précise des réacteurs à fermer, avec un calendrier déterminé pour leur fermeture, qui répondrait par avance à l'optimisation recherchée. C'est d'autant plus vrai que les incertitudes, tant du côté de la transformation maîtrisée du système électrique que du maintien de conditions conformes aux exigences de sûreté du point de vue du fonctionnement des réacteurs ou de l'accumulation de matières nucléaires, sont nombreuses. La trajectoire, tout en veillant à la maîtrise des différents enjeux, doit précisément s'ajuster au fil du temps, en conservant les marges voulues. Aussi, même si cette trajectoire est très contrainte par les multiples facteurs envisagés ici, leur pondération et leur appréciation restent l'objet de possibles ajustements qui doivent pouvoir faire l'objet d'une appropriation collective et démocratique. Il ne s'agit donc pas pour négaWatt d'établir avec son scénario une trajectoire imposée mais de créer par cette analyse le cadre de visibilité, de robustesse et de flexibilité que donne l'ensemble de l'approche décrite ici pour intégrer pleinement ces multiples facteurs dans un processus concerté d'élaboration plus fine de la trajectoire.

4.5. Faire se rencontrer intelligemment l'offre et la demande d'énergie

Les analyses précédentes doivent être complétées par une autre analyse sur les vecteurs énergétiques qui font le lien entre la consommation et la production d'énergie. Il en existe plusieurs qui se relaient parfois entre eux (par exemple le vecteur primaire gaz peut se transformer en vecteur secondaire électricité par l'intermédiaire d'une cogénération) avec des facilités d'utilisation différentes selon les usages et des capacités variables à être stockés. La bonne adéquation entre les vecteurs, leur production et leur consommation permet également d'anticiper la sécurité d'approvisionnement en énergie *via* le recours à des moyens de stockage à différentes échelles de temps et de puissance, notamment le power-to-gas (production de gaz - H₂ ou CH₄ - à partir d'électricité), fortement développé dans le scénario négaWatt. Le passage à des modes de production et à des vecteurs / moyens de stockages plus décentralisés implique de réorienter la gouvernance des systèmes énergétiques vers les territoires afin d'agencer au mieux les possibilités locales.

4.5.1. Lien entre consommation et production : quels vecteurs pour quels usages ?

La transformation du système énergétique induite par la mise en œuvre de la démarche négaWatt ne se limite pas à remplacer les énergies primaires fossiles et fissiles par les énergies renouvelables pour satisfaire les besoins résiduels après que les actions de sobriété et d'efficacité aient produit leurs effets : elle implique aussi de réinterroger dans une logique systémique la manière dont l'énergie est mise à disposition des

consommateurs finaux *via* les différents vecteurs qui font le lien entre l'offre et la demande.

Une première étape consiste à analyser de manière qualitative le niveau d'adéquation de ces derniers avec les trois usages de l'énergie (chaleur, mobilité, électricité spécifique). On distingue les vecteurs acheminés *via* des réseaux de distribution (comme l'électricité, le méthane ou la chaleur) et ceux utilisant d'autres moyens (hydrogène⁷⁶, carburants et combustibles liquides, combustibles solides et chaleur puisée dans l'environnement).

	Vecteurs finaux	Usages		
		Chaleur	Mobilité	Électricité spécifique
Vecteurs de réseaux de distribution	Électricité	+	++	++
	Méthane	++	++	+
	Eau chaude / vapeur	++	-	-
Autres vecteurs	Hydrogène	+	+	+
	Carburants & combustibles liquides	++	++	+
	Combustibles solides	++	-	-
	Chaleur de l'environnement (pompes à chaleur et solaire thermique)	++	-	-

Tableau 12 - Analyse qualitative des vecteurs finaux d'énergie, par usage.

▲ Cette analyse permet de déterminer les priorités d'allocation entre usages et vecteurs.

76. L'hydrogène peut également transiter *via* des réseaux ; néanmoins, si des infrastructures de transport dédiées à l'H₂ peuvent être imaginées, la distribution de cette molécule se fera vraisemblablement aussi par d'autres moyens notamment par l'injection directe partielle dans le réseau méthane existant, pour des raisons économiques.

Un simple coup d'œil au précédent tableau permet de constater, en toute cohérence avec les lois de la thermodynamique, que c'est l'usage chaleur qui peut être satisfait par le plus grand nombre de vecteurs finaux, auxquels de nombreuses sources primaires renouvelables peuvent être associées (biomasse sous toutes ses formes, air ambiant, rayonnement solaire, chaleur du sous-sol, électricité directe).

Ceci rend plus facile le choix d'une solution optimale tenant compte du contexte et doit inciter à privilégier, notamment dans le bâtiment où les besoins sont essentiellement de la basse température, les vecteurs les moins flexibles que sont la chaleur de l'environnement (pompes à chaleur, géothermie, solaire thermique), les combustibles solides (bois) et les réseaux de chaleur biomasse. Néanmoins, les pompes à chaleur prenant une place importante dans le scénario négaWatt, leur

alimentation électrique fait que le vecteur électricité est (indirectement) le premier pour les usages chaleur dans le bâtiment.

De manière générale, la simplicité d'utilisation de l'électricité et le fait qu'elle dispose de réseaux de transport et de distribution très bien maillés sur l'ensemble du territoire invite à diversifier ses usages dans le bâtiment et dans l'industrie, mais aussi à y recourir pour la mobilité, tout en veillant à la question cruciale des ressources disponibles pour la fabrication des batteries électrochimiques (voir section 4.3.3). En effet, la mobilité se confronte à l'équation la plus délicate à résoudre : celle du remplacement du pétrole dont elle dépend encore à plus de 90% et qui représente actuellement plus du tiers de notre consommation totale d'énergie finale.

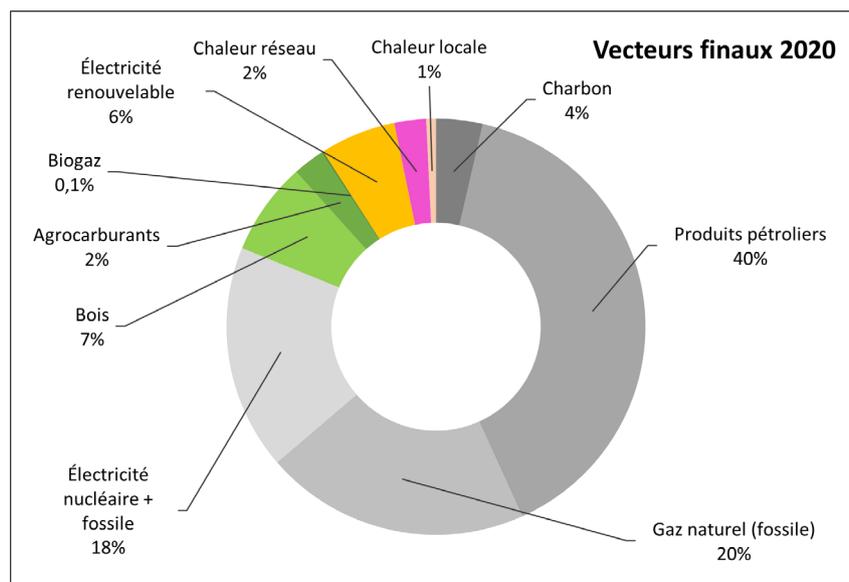


Figure 40 - Répartition des vecteurs finaux d'énergie en 2020

La domination des produits pétroliers ne doit rien au hasard : elle repose sur une forme liquide et sur une remarquable densité énergétique de ces produits qui les rendent faciles à stocker (déplacement dans le temps) et à transporter (déplacement dans l'espace). Ils sont donc particulièrement adaptés à la mobilité, tout en pouvant répondre à toutes sortes de besoins dans d'autres secteurs (flexibilité d'usage) : chauffage de bâtiments, production de matériaux, process industriels, etc.

L'aptitude des différents vecteurs à remplacer le pétrole pour tous les usages doit donc être appréciée, à

nouveau de manière qualitative, à l'aune de ces trois critères déterminants.

Compte tenu du rôle central du stockage dans la perspective d'un système énergétique 100% renouvelable intégrant une part significative de sources variables peu pilotables mais prévisibles, il est en outre pertinent de détailler ce poste en trois sous-critères cruciaux au regard des technologies effectivement disponibles : la densité énergétique, la durée du stockage et l'existence d'infrastructures (voir tableau).

		Critères générateurs de valeur d'usage					
		Vecteurs finaux	Stockage			Transportabilité	Flexibilité
			Densité	Durée	Infrastructures existantes		
Vecteurs de réseaux	Électricité	-	+ / ++	+	+++	+++	
	Méthane	++	++	++	++	++	
	Eau chaude / vapeur	+ / ++	+	+	-	-	
Autres vecteurs	Hydrogène	+	++	-	+	+	
	Carburants & combustibles liquides	++	++	++	++	++	
	Combustibles solides	++	++	++	-	-	
	Chaleur de l'environnement*	+	+	+	-	-	

Tableau 13 - Analyse qualitative de vecteurs finaux en fonction de critères sur leur valeur d'usage

▲ * Chaleur prélevée par les pompes à chaleur et solaire thermique

Les substituts renouvelables aux produits pétroliers sous forme liquide comme les biocarburants de première génération ne peuvent être mobilisés qu'avec prudence car leurs limites sont désormais bien connues, notamment un bilan énergie-climat souvent médiocre et une concurrence d'usage des sols avec la production d'aliments (voir section 4.2.6). En revanche, on constate sans surprise que le méthane est le plus proche des carburants et combustibles liquides, avec pour avantage considérable l'existence d'infrastructures de stockage et d'acheminement dimensionnées à la hauteur des besoins et accessibles à faible coût marginal.

Par ailleurs, son utilisation pour la mobilité dans des moteurs thermiques classiques - le cas échéant légèrement adaptés - ne fait pas appel à des matériaux critiques, contrairement aux batteries des véhicules électriques (lithium, manganèse, cobalt, nickel) et aux piles à combustibles nécessaires à la mobilité hydrogène (platine).

Pour autant, la plus grande flexibilité associée à l'électricité, et sa capacité à être produite massivement de manière décarbonée, conduit le scénario négaWatt à lui donner la priorité dans de nombreux usages, que ce soit dans le bâtiment, les transports ou l'industrie.

Une moindre disponibilité de la biomasse destinée à la gazéification, compensée par une augmentation sensible de la production d'électricité renouvelable (principalement éolien et photovoltaïque), conduit en particulier ce nouveau scénario à faire une large place aux véhicules électriques pour le transport de personnes, tandis que le méthane conserve une place prépondérante dans le transport de marchandises. L'hydrogène est utilisé principalement dans l'industrie (85 % du total) avec une répartition 82 % / 18 % entre matière première et combustible). Le reste contribue à la mobilité des personnes pour certaines niches telles que les lignes ferroviaires difficiles à électrifier, les bateaux-bus et les ferries de capacité modeste. Il assure par contre une part plus significative du transport de marchandises, sur des trajets longue / très longue distance.

La combinaison de tous ces éléments conduit le vecteur électricité à être le premier à l'horizon 2050 dans le nouveau scénario négaWatt, avec une part de 44 % de la consommation finale, suivi par le méthane renouvelable (25 %) et le bois (12 %).

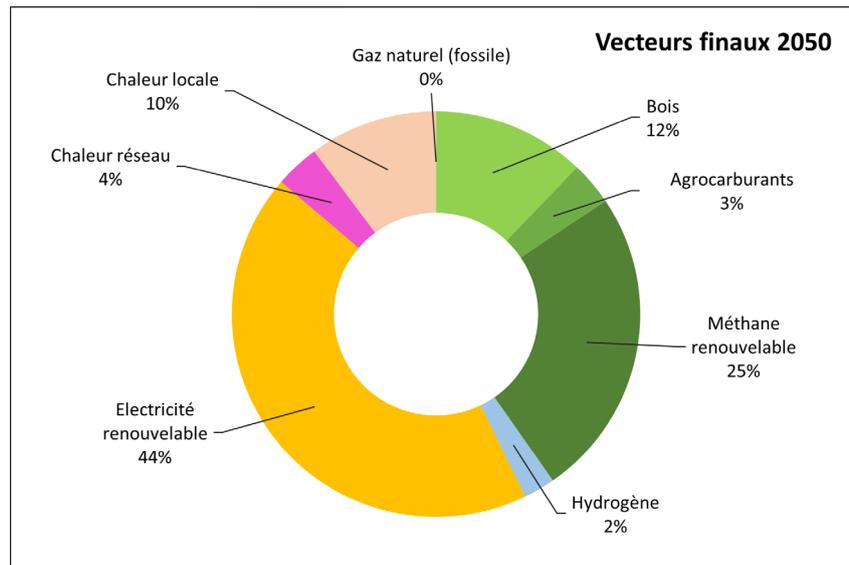


Figure 41 - Répartition des vecteurs finaux d'énergie (hors matières premières) en 2050 selon le scénario négaWatt

Cette évolution significative par rapport à la version 2017 du scénario négaWatt, dans lequel le méthane renouvelable et l'électricité faisaient presque jeu égal, tient compte de l'ensemble des paramètres, depuis la disponibilité des ressources primaires énergétiques et minérales jusqu'à la recherche de la meilleure adéquation usage/vecteur, en passant par un moindre impact environnemental des différentes options.

Elle découle avant tout d'une vision rationnelle et objective de la complémentarité entre vecteurs. Le scénario négaWatt s'oppose en effet à la compétition exacerbée actuelle qui ne peut que conduire, en refusant toute approche systémique, à une moindre optimisation globale et à une fragilisation inéluctable d'un système énergétique où tous les œufs seraient mis dans le même panier.

4.5.2. La sécurité d'approvisionnement : enjeux et solutions⁷⁷

Dans un système énergétique basé quasi-exclusivement sur les énergies renouvelables dont une partie significative est tributaire des conditions météorologiques (éolien et photovoltaïque), l'équilibre annuel offre-demande en énergie est une condition nécessaire mais loin d'être suffisante. Il faut notamment que cet équilibre soit vérifié « à tout instant » pour le système électrique ; une exigence d'autant plus sensible avec l'électrification de certains usages, notamment dans la mobilité et dans l'industrie.

Une partie de la réponse à cette problématique réside dans le stockage mais ce n'est qu'au-delà d'un seuil estimé à 70-80% de sources variables dans le mix électrique qu'il sera nécessaire de développer de nouveaux moyens dans ce domaine. Avec un taux de renouvelables électriques variables à peine supérieur à 12% en 2020, la France est très loin d'être confrontée à des difficultés et son premier objectif doit être d'accélérer le développement des énergies renouvelables (voir chapitre suivant).

D'ici là, il existe de nombreux leviers « sans regrets » qui permettent de limiter ou retarder l'apparition puis l'augmentation des besoins de stockage : actions

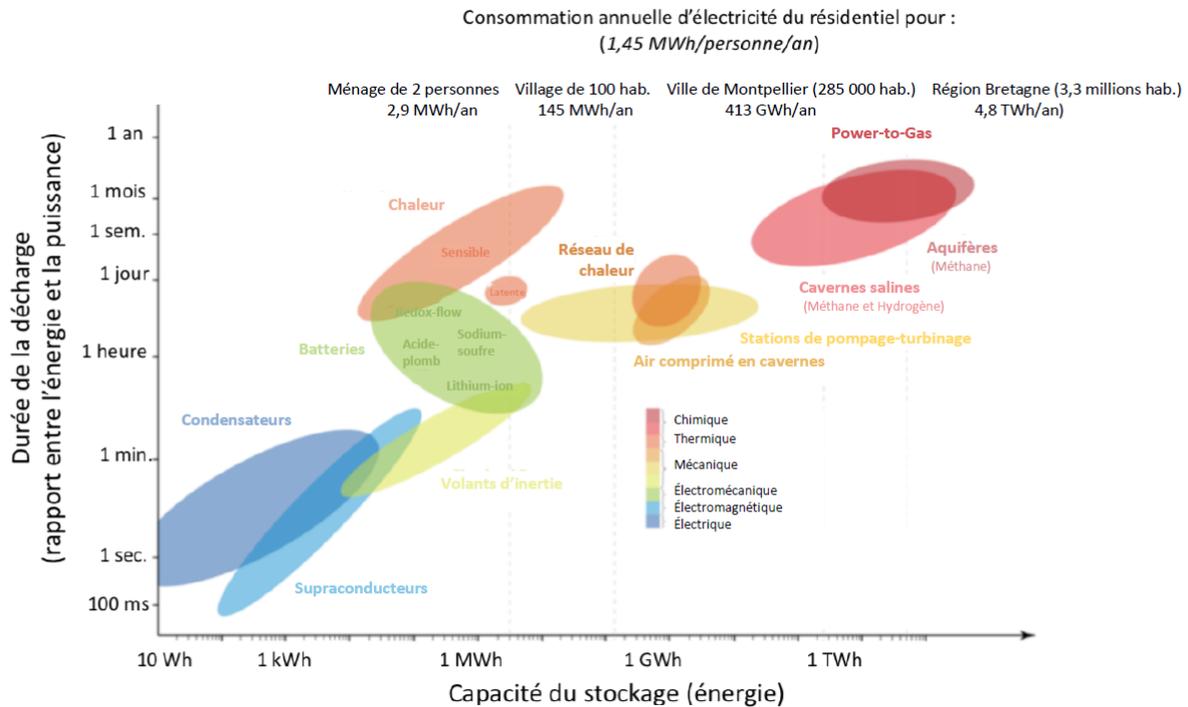
77. L'ensemble des éléments de cette partie peut utilement être complétée par cet article :
Un système électrique alimenté à 100% par les énergies renouvelables est-il techniquement possible en France ?

de sobriété ou d'efficacité permettant de réduire les besoins en énergie et/ou en puissance, pilotage de la demande dans le bâtiment (résidentiel et tertiaire), la mobilité (recharge des véhicules électriques) ou l'industrie (effacements contractuels), etc⁷⁸.

Les expérimentations de systèmes de gestion intelligente de l'équilibre offre/demande d'électricité, de type « smart-grid », vont permettre ces avancées, tout en aidant à en définir les conditions économiques, notamment les solutions tarifaires associés aux nouveaux services.

Le stockage : combien, comment ?

La notion générale de stockage peut renvoyer à des besoins très différents à la fois en termes de quantités à stocker (de quelques kWh à des dizaines de TWh), et de durée de charge/décharge (de quelques minutes à plusieurs mois). Des solutions elles-mêmes très différentes peuvent répondre à ces besoins (voir figure ci-dessous).



▲ La figure montre la grande diversité des technologies aujourd'hui disponibles et leurs plages respectives de pertinence en fonction des deux paramètres (l'échelle est logarithmique donc les aires colorées en haut à droite sont un milliard de fois plus grandes que celles en bas à gauche).

Figure 42 - Technologies de stockage d'énergie en fonction de la capacité et de la durée

78. Certaines de ces actions sont détaillées et quantifiées dans l'étude La maîtrise de la consommation d'électricité, levier pour fermer les dernières centrales à charbon ?, Association négaWatt, juin 2019

Pour garantir à tout moment l’approvisionnement en électricité, les besoins de stockage à l’horizon 2050 tels qu’ils ressortent du modèle d’équilibre offre-demande au pas horaire du scénario négaWatt

2022 sont assurés par des batteries, des Stations de transfert d’énergie par pompage (STEP) et du power-to-gas (voir tableau).

Type de stockage	Moyens	Puissance installée	Durée annuelle moyenne de fonctionnement	Énergie électrique stockée ou convertie annuellement (avant pertes de stockage/ conversion)
Infra-journalier (quelques heures)	Batteries	2 GW	2 000 h	4 TWh
Infra-hebdomadaire (quelques jours)	Pompage- turbinage (STEP)	6,2 GW	2 000 h	13 TWh
Saisonnier / inter-saisonnier (quelques semaines à quelques mois)	Power-to-gas (électrolyse)	36 GW	3 400 h	122 TWh

Tableau 14 - Besoins de stockage en 2050 dans le scénario négaWatt

Les batteries (sous forme stationnaire) permettent notamment de déplacer la production photovoltaïque de quelques heures lorsque c’est nécessaire. Leur place relativement modeste s’explique en grande partie par la réduction très importante des pointes d’appel de puissance en début de soirées hivernales qui sont aujourd’hui dues pour l’essentiel au chauffage électrique par effet Joule dans des logements mal isolés. Cette réduction est rendue possible notamment par la mise en œuvre effective d’un programme de rénovation énergétique quantitativement et qualitativement à la hauteur des enjeux (voir section 4.2.2). L’ensemble des actions de sobriété et d’efficacité permettent d’envisager une diminution de la pointe maximale appelée qui passe de 100 GW aujourd’hui à 63 GW en 2050.

La puissance installée des STEP (6,2 GW) est légèrement supérieure à la puissance actuelle (5,8 GW) par effet de modernisation des équipements mais leur contribution en énergie représente un doublement (6 TWh/an actuellement) du fait de leur sollicitation plus fréquente.

La part très importante du power-to-gas s’explique par le fait que cette technologie est mise en œuvre

pour l’équilibrage du système électrique mais aussi pour la production d’hydrogène (97 TWh) utilisé de différentes manières : 57 TWh dans l’industrie, pour des usages directs sous forme de combustible (10 TWh) ou de matière première pour de la chimie (47 TWh), 10 TWh dans le secteur des transports dont 4 TWh pour la mobilité des personnes et 6 TWh pour le fret. Une autre partie est injectée en mélange sur le réseau de gaz (3 à 4 TWh). Le solde (26 TWh) est transformé en méthane *via* le procédé de la méthanation pour être injecté également sur le réseau gaz. Les 23 TWh injectés dans le réseau gaz, sous forme d’hydrogène ou de méthane, ne représentent que moins d’un cinquième des capacités de stockage de ce réseau⁷⁹.

Les productions mensuelles totales d’hydrogène fluctuent entre 4 et 11 TWh, alors que les consommations directes d’hydrogène dans l’industrie et le transport sont assez constantes à l’échelle mensuelle (5,7 TWh/mois). Quelques simulations sur le stockage d’hydrogène nécessaire pour assurer l’équilibre entre les courbes production et usages directs conduisent à une capacité de stockage d’hydrogène en cavités salines (encore à créer) atteignant 6 TWh, chiffre en phase avec d’autres estimations⁸⁰.

79. <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/gaz/stockage>

80. <https://innovation.engie.com/fr/news/actus/le-saviez-vous-/hydrogene-souterrain-stockage-sel-cavites-mines/25906>

La valorisation physique et économique d'excédents de production d'électricité renouvelable, rendue possible par le power-to-gas, permet d'envisager une surdimensionnement du parc de production éolien et photovoltaïque, réduisant ainsi le nombre d'heures dans l'année où soleil et vent sont en déficit. Au final, seule une très faible part de l'H₂ et du CH₄ produits par le power-to-gas doit *in fine* être mobilisée pour la production d'électricité, en cas de déficit de vent et de soleil. En 2050, cela représente seulement 2 TWh d'électricité produite.

Les trois finalités du power-to-gas (contribution à l'équilibre électrique, production d'H₂ pour l'industrie, production de CH₄ pour la mobilité) justifient par ailleurs le nombre élevé d'heures de fonctionnement des électrolyseurs conduisant à un facteur de charge de près de 40 %, avec en retour une consolidation du modèle économique de cette technologie qui pourrait autrement se trouver fragilisé.

L'équilibre offre-demande du système électrique est assuré heure par heure jusqu'en 2050

Grâce aux différents leviers activés (réduction globale de la puissance appelée rendue possible par les différentes actions de sobriété et d'efficacité, flexibilité de la demande, stockage, dimensionnement adapté du parc de production, etc.), l'équilibre horaire entre production et consommation est assuré heure par heure jusqu'en 2050. Ce résultat est montré par deux études menées distinctement.

La première est l'utilisation du modèle d'équilibre offre-demande de négaWatt, utilisé depuis déjà 10 ans. Il permet d'intégrer d'un côté l'ensemble des filières de production et de stockage, de l'autre l'ensemble des usages de l'électricité, associés à des courbes de charge (qui représentent l'évolution de la puissance appelée pour chaque usage). Ce modèle montre, comme pour les scénarios négaWatt précédents, que cet exercice de prospective permet bel et bien de garantir la sécurité d'approvisionnement électrique.

Néanmoins, une des limites de ce modèle reste le peu d'années météorologiques testées. Pour y remédier, un second outil a été utilisé : EOLES, développé et utilisé par le CIRED. Trois chercheurs de cet organisme ont

analysé les hypothèses du scénario négaWatt dans ce modèle⁸¹, et ont confirmé l'équilibre offre-demande avec un nombre d'années météorologiques plus important (une vingtaine au total). Ces résultats propres au scénario négaWatt sont cohérents avec ceux de plusieurs dizaines d'autres travaux menés en France, en Europe et dans le monde, qui concluent à la faisabilité technique d'un mix électrique 100 % renouvelable. En France on pourra notamment citer les travaux de RTE et de l'ADEME.

L'électronique de puissance au secours de l'inertie

Une question importante dans un monde 100 % renouvelable est celle de l'exigence de stabilité du système électrique qui se traduit par des variations aussi faibles que possibles autour d'une valeur cible en fréquence (Hertz) et en tension (Volts) de l'onde électrique. La stabilité repose aujourd'hui principalement sur l'inertie fournie par les machines tournantes (turbines / alternateurs) des grands sites de production. Dans le scénario négaWatt, la fermeture des centrales nucléaires et fossiles prive le système électrique de l'inertie qu'elles apportent. Mais les grandes centrales hydroélectriques et leurs alternateurs synchrones sont toujours là, et les centrales à gaz renouvelable nécessaires à la sécurité d'approvisionnement peuvent aussi, au moins à certaines périodes, apporter leur inertie.

De leur côté, toutes les installations photovoltaïques et la grande majorité des éoliennes sont raccordées au réseau électrique *via* des convertisseurs électroniques de puissance (les onduleurs). Leur mode de fonctionnement actuel (« grid following ») les asservit au réseau : les onduleurs s'adaptent en permanence aux signaux venant de ce dernier afin de le perturber le moins possible mais ils ne sont pas proactifs pour répondre aux besoins de stabilité.

Comme l'a démontré le programme européen Migrate⁸² auquel RTE a participé très activement aux côtés de ses homologues européens, il est tout à fait possible, en programmant différemment le fonctionnement des onduleurs, de reproduire de manière artificielle les fonctions remplies par l'inertie des alternateurs. Ce nouveau mode de fonctionnement en « grid forming » permet ainsi de créer une inertie synthétique.

81. Une électricité 100 % renouvelable est-elle possible en France d'ici à 2050 et, si oui, à quel coût ?

82. <https://www.h2020-migrate.eu/>

Les études menées dans le cadre de Migrate, prolongées par des tests en grandeur réelle sur le réseau par un autre programme européen (Osmose), concluent qu'une proportion de 30 à 50% d'onduleurs en grid forming et l'installation à certains endroits stratégiques

de compensateurs synchrones couramment utilisés aujourd'hui dans l'industrie et sur certains réseaux fragiles (îles, zones reculées, etc.) suffiraient à assurer la stabilité du système électrique⁸³.

4.5.3. Une urgence : accélérer le rythme de développement des énergies renouvelables

La France se distingue en Europe par son retard chronique de développement de toutes les filières de production d'énergie renouvelable (électricité, chaleur et biogaz) par rapport à ses propres objectifs.

Parmi les principales causes de ce retard, un cadre administratif et réglementaire particulièrement et parfois inutilement contraignant. Loin de faciliter le montage des projets, cet état de fait augmente notablement la durée des procédures et génère un risque financier non négligeable, ce qui se traduit *in fine* par des coûts supérieurs à ceux constatés chez nos voisins.

Déclarer les énergies renouvelables d'intérêt général

Compte tenu de leur caractère incontournable dans la transition énergétique, il serait justifié de déclarer les énergies renouvelables d'intérêt général pour s'assurer que les systèmes d'aides fonctionnent et que les règles légitimes pour la protection de l'environnement et le bien-être des riverains ne sont pas détournées au détriment de la capacité de la collectivité nationale à atteindre les objectifs qu'elle s'est fixés à elle-même.

Par ailleurs, si la compétitivité des différentes filières est et doit rester l'objectif principal des mécanismes de soutien mis en place depuis une vingtaine d'années, cela ne signifie pas qu'il est possible de s'en passer à court terme, du moins tant que les filières non-renouvelables ne paieront pas leurs externalités négatives, ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui.

Après des années de pilotage approximatif par l'État des systèmes d'aides qui a été en grande partie à l'origine du retard français dans le déploiement de

certaines filières comme le photovoltaïque ou le biogaz, il faut revenir, conformément au droit européen, au principe de base d'une rémunération « suffisante mais non excessive ».

Ceci exige de l'État un arbitrage éclairé par une connaissance fine et actualisée en permanence de l'évolution des technologies et une posture résolument bienveillante notamment envers les projets portés par des acteurs locaux qui disposent plus que d'autres de légitimité dès lors qu'il s'agit de mettre en valeur des richesses liées par nature aux territoires.

Privilégier une approche par territoire

La déclinaison des objectifs nationaux à une échelle plus proche du terrain, que ce soit par les intercommunalités dans le cadre des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) instaurés par la loi de 2015 ou par les Régions à travers les Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'équilibre des territoires (SRADDET) et la régionalisation de la PPE prévue par la loi Climat et résilience, va dans le bon sens en rendant plus tangibles pour les habitants-citoyens les bénéfices locaux de la production d'énergie renouvelable.

Encore faut-il s'assurer que les décideurs politiques qui sont censés mettre en place une stratégie pour les atteindre les prennent au sérieux et disposent des moyens correspondant à leurs ambitions : dans cette optique, la territorialisation des instruments de soutien (modulation des tarifs d'achat en fonction du productible, appels d'offres à l'échelle départementale, bonification de la participation locale, etc.) permet à la fois une répartition géographique plus harmonieuse des moyens de production, une meilleure maîtrise des coûts pour la collectivité et *in fine* une optimisation globale de la dépense publique au service de l'intérêt général.

83. Pour plus de précisions, voir les diapositives 30 et suivantes de la présentation accessible sur le lien : https://www.concerte.fr/system/files/document_travail/2020-04-29-Presentation-GT8-Fonctionnement-du-systeme-electrique.pdf. Sur ces sujets, une vidéo pédagogique de 3 minutes a également été réalisée par RTE : https://www.youtube.com/watch?v=i_QhVNMZljl

Les bénéfices immédiats sont encore plus évidents lorsque les projets sont portés par des acteurs locaux eux-mêmes (collectivités, syndicats d'énergie, sociétés d'économie mixte, PME, agriculteurs, groupes de citoyens, etc.) et/ou financés par l'épargne locale ou salariale à travers des instruments *ad hoc* de mobilisation, et lorsque les gains qui en sont tirés permettent de financer des actions locales de sobriété ou d'efficacité à vocation sociale (lutte contre la précarité, rénovations thermiques, accès pour tous à une mobilité durable, etc.) ou plus générales.

4.5.4. Une gouvernance faisant confiance aux territoires

Structurer et articuler les différents niveaux de planification

Les documents nationaux de planification et de programmation (SNBC et PPE) et les instruments régaliens (réglementation, fiscalité) sont des outils incontournables de la transition énergétique. Mais ils ne servent à rien sans une mise en œuvre opérationnelle pensée et réalisée aux différentes échelles territoriales (bloc communal, départements et régions) et sans une appropriation par l'ensemble des acteurs de la société. Condition *sine qua non* de l'atteinte des objectifs, cette mobilisation générale impose que les différents niveaux de planification soient structurés de manière cohérente et articulés entre eux dans une logique de coopération et de répartition intelligente des rôles de chaque niveau de collectivité.

À la lumière des exercices passés de planification aux différentes échelles (SNBC, PPE, SRCAE, SRADDET, S3REnR, conférences départementales issues de la Loi NOME, PCAET), force est de constater qu'une telle articulation reste à construire⁸⁴. Pourtant, face à l'urgence, nous n'avons pas le temps de chercher les processus parfaits : une approche pragmatique doit donc l'emporter.

Le caractère fortement capitalistique d'un modèle économique qui concentre une très large majorité des coûts complets sur l'investissement initial et l'hypothèse d'une remontée des taux d'intérêt renforcent la pertinence de créer un lien direct entre épargne classique ou salariale et production d'énergies renouvelables. Il est par exemple possible d'imaginer une incitation de type crédit d'impôt qui contribuerait à la popularité des énergies renouvelables et à l'acceptabilité bien comprise des projets tout en renforçant la sécurité économique.

À cet égard, la déclinaison régionale de la PPE prévue par la loi Climat-Résilience impose opportunément la définition et la mise en place du cadre harmonisé de suivi de la réalisation des objectifs des SRADDET, sans négliger l'intérêt d'une normalisation des outils de pilotage pour la production des rapports périodiques que la Commission européenne sera en droit d'exiger dans le cadre du Green Deal. Ce cadre a fait défaut depuis l'instauration des SRCAE (schémas régionaux climat air énergie) par le Grenelle de l'environnement en 2010. L'Association négaWatt a déjà eu l'occasion de proposer des améliorations en la matière⁸⁵.

Harmoniser les indicateurs et organiser la concertation à l'échelle des territoires

Le suivi de réalisation des objectifs des SRADDET pourrait dans un premier temps prendre la forme d'un nombre limité de fiches-types reprenant les principaux objectifs sectoriels de chaque SRADDET et ayant vocation à être alimentées conjointement par les services des Conseil régionaux, de l'ADEME et de l'État déconcentré (DREAL, DDT, etc.) sous le contrôle du préfet de région.

Les nécessaires efforts de formation pour répondre aux enjeux de reconversion des secteurs en déclin et de développement de nouvelles activités devraient faire l'objet d'un volet spécifique. Il pourrait être associé aux objectifs sectoriels à l'échelle des bassins économiques dans une logique de gestion prévisionnelle des emplois et des compétences adossée

84. Voir par exemple cette étude menée par négaWatt : Analyse et concaténation du volet énergie des SRADDET, Association négaWatt, novembre 2020

85. Cadre harmonisé pour le volet énergie des SRADDET, Association négaWatt, juillet 2019

à une étroite collaboration entre partenaires sociaux et acteurs locaux de la formation.

Ces fiches-types peuvent constituer une première étape vers une véritable harmonisation des indicateurs en vue de la prochaine génération de documents de planification. Elles pourraient aussi servir de référence pour la modulation des dispositifs de soutien et d'accompagnement qui gagneraient en efficacité à s'adapter aux particularités locales, qu'elles soient physiques ou humaines.

Il serait en effet judicieux d'engager des exercices de territorialisation concertée des objectifs de sobriété, d'efficacité et d'énergies renouvelables, encourageant la solidarité entre territoires, de manière à ce que ceux qui sont mieux dotés en énergies renouvelables puissent alimenter leurs voisins moins bien lotis. En veillant à respecter une échelle infrarégionale, cela

permettrait de garantir leur intégration de manière transverse dans l'ensemble des politiques locales et de veiller à leur bonne articulation avec les outils de planification des réseaux de distribution, notamment dans la perspective de l'élaboration des « Plans de développements des réseaux de distribution à 5-10 ans » rendus obligatoire par la Directive européenne de 2019 sur le marché intérieur de l'électricité.

À cet effet, les Conférences consultatives de la transition énergétique (CCTE) et les Conférences de la distribution d'énergie, toutes deux créées à l'échelle départementale respectivement par la LTECV en 2015 et la loi NOME en 2010, pourraient offrir un cadre approprié à une concertation entre parties prenantes autour de l'interaction entre la mise en œuvre des stratégies énergétiques territoriales et la planification des réseaux énergétiques locaux.

Après cette partie qui a longuement détaillé les leviers de réduction de la demande en énergie et en matières, ainsi que les modes de production dans le scénario négaWatt 2022, retrouvez la description des bilans énergie/matière dans la partie 5, ainsi que les Annexes sur <https://www.negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>



Retrouvez toutes les ressources du scénario négaWatt 2022 sur www.negawatt.org