

ORIGINAL ARTICLE

Les Scénarios De Transitions Énergétiques De La France À L'horizon 2050, Quelques Éléments De Compréhension

Arnaud Diemer¹, Chafia Bessalem², Delice Musafili Isimbi³

Université Clermont Auvergne (UCA), CERDI, ERASME, Clermont-Ferrand, FRANCE

Corresponding Author: Arnaud Diemer

Abstract:

Résumé : Face à l'urgence climatique, de nombreuses institutions nationales sont amenées à proposer des scénarios de transitions énergétiques. Dans le cas de la France, l'ADEME, RTE, NEGAWATT et THE SHIFT PROJECT ont tour à tour esquissé leur vision à l'horizon 2030 et 2050. Ces scénarios proposent d'engager la France, sur le chemin de la sobriété et de l'efficacité énergétique, du mix énergétique dominé par les énergies renouvelables et/ou le nucléaire, de la mobilité douce ou encore de l'agroécologie et de la rénovation thermique des bâtiments. L'article que nous proposons, entend décrypter et analyser l'ensemble de ces scénarios afin de les comparer pour en faire ressortir les points communs mais également les divergences. Afin de synthétiser ces différentes visions, nous avons mobilisé la dynamique des systèmes et plus particulièrement les diagrammes de boucles causales. Ces outils permettent de comprendre les relations d'interdépendance qui sont générées au sein d'un scénario et de mieux cerner les enjeux des transitions énergétiques à l'échelle de la France.

Mots clés : Efficacité, Énergie renouvelable, Scénarios, Sobriété

Introduction

La décarbonation du système énergétique mondial est au cœur de toutes les politiques publiques et industrielles, dès lors que les émissions de gaz à effet de serre (GES) issues des activités humaines ont pour conséquence un réchauffement climatique global. Le système mondial étant essentiellement consommateur d'énergies fossiles (plus de 80% de la consommation mondiale d'énergie), cette situation est dorénavant incompatible avec les engagements pris par les États en 2015 (Accords de Paris) et visant à limiter le réchauffement climatique à 2°C (GIEC, 2023). Cette pollution est principalement due à la combustion/oxydation du charbon, du gaz naturel (méthane) et d'hydrocarbures divers issus du pétrole (ressources qui restent épuisables et non renouvelables), pour les besoins potentiels du transport, du chauffage des bâtiments, de l'industrie, de l'agriculture (notamment suite à la mécanisation agricole) et donc des secteurs les plus consommateurs en énergie (Diemer, 2015a).

Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à l'énergie ont augmenté de 6 % en 2021, pour atteindre 36,3 milliards de tonnes, niveau le plus élevé jamais atteint. Les experts estiment que 40 gigatonnes de CO₂ s'échappent et s'accumulent annuellement dans l'atmosphère.

Pour pallier à cette situation, les États se sont engagés dans une course visant à (i) réduire la consommation d'énergie en s'appuyant sur la sobriété et l'efficacité énergétiques (cela devrait permettre de prémunir les ménages et les entreprises contre la flambée des prix de l'énergie, de diminuer les émissions de CO₂ et de faire baisser le déficit commercial) et à (ii) décarboner l'énergie en réduisant la part des énergies fossiles (décarboner signifie donc, trouver et développer de nouvelles sources d'énergie, dites bas-carbone parce qu'elles émettent peu de CO₂ par unité d'énergie fournie,

pour remplacer définitivement l'usage des ressources fossiles). La décarbonation est un volet essentiel des projets de transition énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique des différents Etats. Cependant, pour généraliser le développement des sources d'énergies bas-carbone, il est impératif de déterminer avec rigueur leurs véritables potentialités (leur impact sur l'environnement, leur empreinte carbone sur tout le cycle de vie) et les conditions réelles, aussi bien physiques, technologiques, sociales et économiques, autorisant leur déploiement à très grande échelle. Précisons que la stratégie de décarbonation du système énergétique et l'impératif de la réduction des émissions des GES ont amené bon nombre de pays à privilégier la voie du découplage (ce terme est utilisé pour désigner la possibilité d'une hausse du produit intérieur brut - PIB - accompagnée d'une baisse des consommations d'énergie et des impacts environnementaux) dans la modélisation et les scénarios prospectifs du système énergétique (Bessalem, Diemer, Batisse, 2022). Ces outils de décisions sont largement utilisés pour définir les stratégies bas-carbone sur les horizons 2030 et 2050. Dans le cas de la France (comme la Norvège, la Suède ou la Suisse), la consommation finale d'énergie présente une empreinte carbone acceptable. Selon RTE (gestionnaire de réseau de transport français), les émissions de CO₂ du secteur électrique français auraient diminué de près de 9 % en 2020 par rapport à l'année 2019. Cette performance est principalement due à la production d'énergie décarbonée (environ 29% de la consommation finale d'énergie en France est électrique, soit près de 470 TWh en 2019). Cette électricité est produite en majorité par le parc nucléaire (56 réacteurs en activité) et le parc hydroélectrique (même si l'engagement politique présidentiel s'est porté sur une diminution de la part de l'énergie nucléaire dans la consommation électrique totale afin qu'elle ne représente plus que 50% en 2035).

Dans cet article, nous allons nous intéresser aux scénarios énergétiques élaborés pour la France sur l'horizon 2030-2050 notamment ceux publiés par RTE (le gestionnaire du réseau de transport d'électricité), Négawatt (association et institut rassemblant des spécialistes des énergies), l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour la transition

écologique) et le SHIFT-Project afin de comprendre sur quelles bases vont se forger les décisions publiques dans les 4 prochaines années. Dans la première partie, nous décrivons l'ensemble de ces scénarios, principalement leurs hypothèses, leurs caractéristiques et leur méthodologie. Nous présentons les scénarios à l'aide d'un diagramme de boucles causales (CLD) issues de la dynamique des systèmes (logiciels Stella et Vensim) afin de faire ressortir les principaux leviers suggérés par les quatre institutions que sont RTE, l'ADEME, NÉGAWATT et le SHIFT PROJECT. Un diagramme de boucles causales se compose de quatre éléments de base : les variables, les liens entre elles, les signes sur les liens (qui montrent comment les variables sont interconnectées via des polarités positives ou négatives) et le signe de la boucle (qui indique le type de comportement que le système produira). En représentant un problème ou une question d'un point de vue causal, il est possible de visualiser les forces structurelles à l'origine du comportement d'un modèle (Richardson, 1997, Sterman, 2001, Lannon, 2012, Diemer, 2022). Dans une seconde partie, nous effectuons une analyse comparative et critique des différents scénarios, en soulignant les points communs et les points d'achoppement. Nous insistons également sur les limites méthodologiques et conceptuelles.

1. Description des scénarios énergétiques de la France

Dans le cadre des débats politiques sur la Stratégie de la France Energie-Climat et en rapport avec les engagements de l'Accord de Paris pour contenir le réchauffement climatique sous le seuil des + 2 °C, de nombreux scénarios de transition énergétique ont été proposés par des organisations nationales concernant le choix du mix énergétique du pays à l'horizon 2030-2050. Ces scénarios décrivent des trajectoires énergétiques du mix énergétique à l'horizon 2030-2050. Ces trajectoires de réduction des émissions de GES, pleines d'incertitudes et presque inconnues, doivent permettre d'atteindre un objectif de « neutralité carbone » d'ici 2050. Deux premières Stratégies Nationales Bas Carbone (SNBC) ont été proposées et ont permis de fixer les grands objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et les budgets carbonés qu'elles doivent respecter pour les années à venir. Dans le présent article, nous

allons nous intéresser aux scénarios élaborés et publiés à partir de 2021 par quatre organismes en France, à savoir : RTE, NégaWatt, ADEME et The SHIFT Project. Les quatre organismes suggèrent des transformations appropriées pour substituer les énergies fossiles par des énergies propres en 30 ans et accélérer de manière substantielle d'ici 2030. Ces exercices explorateurs chiffrés des futures énergétiques, permettent de traduire quantitativement les différentes visions ou aspirations normatives.

2.1 Les scénarios de l'ADEME

L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), établissement public à caractère industriel, coordonne dans le cadre de ses missions et cela depuis 2012, des réflexions prospectives sur la transition écologique française. Face à l'urgence climatique et afin de permettre à la France de respecter son objectif de neutralité carbone en matière de transition énergétique, l'ADEME a soumis fin 2021 son dernier exercice sur le sujet. Pour cet exercice, l'ADEME a élargi le cercle de la réflexion prospective pour ne pas se positionner sur le simple système énergétique, à savoir l'offre et la demande de l'énergie. Contrairement au premier exercice prospectif qu'a pu réaliser ADEME antérieurement, le champ a été élargi pour embrasser non seulement l'énergie et le climat comme précédemment, mais elle a dépassé ce cercle pour prendre en compte les ressources, l'usage des sols, l'évolution des modes de vie, différents projets de société, etc. Elle a fait plusieurs choix méthodologiques structurants qui sont différents de ses visions prospectives précédentes. Cet exercice inspiré des scénarios d'évolution socio-économique mondiale utilisés par le GIEC (2018), a la particularité de se baser sur : (i) la réalisation de plusieurs scénarios contrastés d'atteinte de la neutralité carbone pour la France en 2050 avec une évaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; (ii) une comparaison multicritère de ces scénarios, notamment technico-économiques, sociaux et environnementaux, des conditions de leur réalisation et de leurs conséquences ; (iii) une rétrospective, un état des lieux et une trajectoire tendancielle jusqu'en 2050. La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de

l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur, électricité). Les paramètres étudiés couvrent notamment : la demande en énergies ; la consommation d'eau d'irrigation ; de matériaux de construction ; d'intrants agricoles et l'usage des sols ; la production et la gestion de déchets ; la production d'énergies et la composition du bouquet énergétique ; les importations et exportations ; le bilan des GES et les puits biologiques et technologiques de CO₂.

2.1.1 Descriptions des quatre scénarios

Les scénarios proposés sont des récits contrastés sur le contexte économique, technologique et territorial, les modes de vie, la gouvernance. Ce sont des récits de société autant que des perspectives techniques. Les scénarios sont classés de 1 à 4 en fonction de la place accordée à la sobriété énergétique. Les scénarios 1 et 2 sont les scénarios qui misent le plus sur la sobriété et la technologie, les scénarios 3 et 4 penchent plutôt vers la technologie.

- **Scénario S1 "Génération frugale"** : Comme son nom l'indique, il mise pleinement sur la sobriété. C'est un scénario dans lequel les « low tech » ont une place prépondérante. Nous qualifierons ce scénario de décroissance (Diemer, 2015b) car le recours aux low tech est un levier important pour les tenants de la décroissance (Kallis & al., 2018). Ce scénario mise sur la rénovation massive des bâtiments plutôt que sur la construction d'habitations neuves. Cela prend les traits d'une optimisation des logements vacants (pour éviter de construire trop de logements), d'une approche localisme avec moins de déplacements, moins de consommations. La proximité constitue le pari de l'avenir (Serge Latouche, l'un des pionniers de la décroissance, insiste sur la nécessité de "*revitaliser le terreau local*", 2004, p. 106). On est vraiment sur un retour à la proximité avec un fort pari sur la sobriété. Ce scénario reste le plus sobre et le plus optimiste en matière environnementale. Dans ce scénario, il est prévu un changement des modes de vie avec des habitudes alimentaires modifiées (consommation de viande divisée par trois, 70% de consommation de nourriture bio). L'achat se fait en grande majorité localement. Dans ce scénario, les grandes villes sont délaissées au

profit des zones rurales, de la réduction de la mobilité et de la rénovation de l'habitat. 70% des

matières de l'industrie sont recyclées.

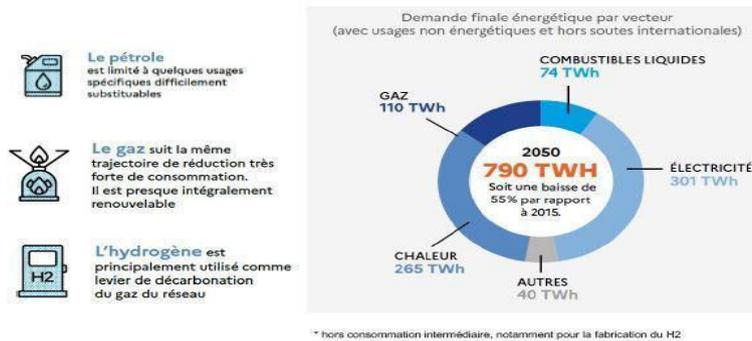


Figure 1 : Demande finale énergétique par vecteur (S1)

Source : ADEME

Avec ces hypothèses, la consommation d'énergie diminuerait de 55% en 2050 par rapport à 2015, soit une émission de 74 millions de tonnes de CO₂, auxquelles il faudrait retirer l'absorption de 116 millions de tonnes par les puits naturels (forêts, océans, ...). Ce qui correspond à une émission nette de - 42 millions de tonnes de CO₂. L'ADEME souligne que ce scénario de sobriété risque d'avoir un impact sur la société française, puisque la rationalisation dans les intrants des modes de vie pourrait engendrer un clivage social.

- **Scénario S2 "coopération territoriale"** : C'est un scénario très proche du scénario 1 mais on est beaucoup plus dans une dynamique de

coopération, de gouvernance ouverte et sur une économie de partage. Ce scénario vise une coopération sur le territoire avec une réindustrialisation ciblée. Ici, on commence à miser sur le captage et le stockage du carbone dans le sol (mais d'une manière faible). Ce deuxième scénario fait aussi appel à la sobriété, mais dans le sens de l'entraide et du partage entre les ménages les plus modestes. Comme le scénario de génération frugale, on assiste à une modification des modes de vie, qui privilégient les liens sociaux. Selon l'ADEME, avec ce scénario de partage nous arrivons à atteindre des émissions négatives nettes de - 28 millions de tonnes de CO₂ émises en 2050.

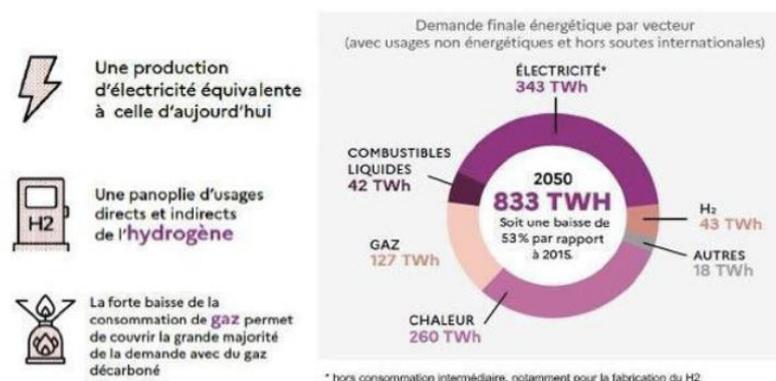


Figure 2 : Demande finale énergétique par vecteur (S2)

Source : ADEM

- **Scénario S3 "technologies vertes"** : Dans le 3^{ème} scénario, nous sommes entrés dans la croissance verte tirée par la technologie. C'est la décarbonation activée par le développement de l'hydrogène, une forte exploitation de la biomasse

(via un usage intensifié des forêts) et une électrification des procédés et des usages. On retient dans ce scénario, un modèle d'aménagement très centré sur les métropoles, cela se traduit par la construction-déconstruction

plutôt que la rénovation. Le potentiel de captage et de stockage de carbone est beaucoup plus fort que dans le scénario 2, ce qui permet d'atteindre la neutralité, malgré une sobriété moins importante mais avec une efficacité plus forte dans les processus. Dans le troisième scénario, la sobriété est observée dans les secteurs alimentation, transport, la mobilité, la rénovation de l'habitat...mais elle reste modérée

comparativement aux deux premiers scénarios. Le recours à la technologie verte est à l'origine des économies d'énergie et de l'intégration de l'éco efficacité énergétique. Par cette trajectoire, la France peut diminuer sa consommation d'énergie de 40% en 2020. Les émissions de gaz à effet de serre seront de - 9 millions de tonnes de CO2 émis en 2050.



Figure 3 : Demande finale énergétique par vecteur (S3)
Source : ADEME

- **Scénario S4 “pari réparateur”** : C’est un scénario « Business As Usual (BAS) » à l’opposé du scénario "Génération frugale", dans lequel il existe une continuité de nos modes de vies actuels,

basés sur la consommation de masse (la nature y est exploitée comme une ressource, mais de manière non rationnelle).

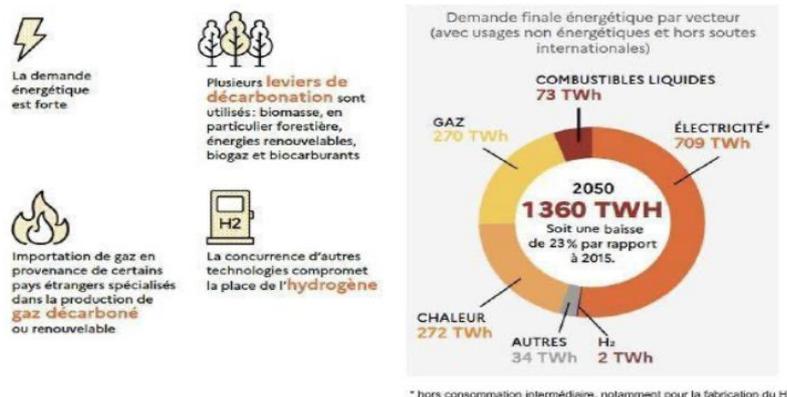


Figure 4 : Demande finale énergétique par vecteur (S4)
Source : ADEME

La forte urbanisation observée depuis quelques décennies, continue de se développer, un exode rural est observé et par conséquent la mobilité s'accroît. La pollution sera engendrée sans l'application de taxe d'incitation, l'agriculture intensive se poursuit avec un impact sur la biodiversité. Pour atteindre la neutralité carbone dans ce scénario, la France doit miser sur des

technologies aux stades de démonstrations non encore éprouvés, d'où l'appellation de pari réparateur. Un pari fort est observé sur l'efficacité et la réduction des consommations d'énergie d'où un retour massif vers le captage et le stockage decarbone et une forte mobilisation des leviers de décarbonation. Selon l'ADEME avec ce scénario, la France peut atteindre la neutralité carbone, avec un million de tonnes de CO2 émises

en 2050.

Bien entendu, des différences notoires existent entre les quatre scénarios avec des conséquences environnementales, sociales et économiques

propres à chaque scénario. Cependant, les scénarios misent sur le chiffre de 90% de voitures électriques et un mix énergétique composé à 70% d'énergies renouvelables d'ici 2050.

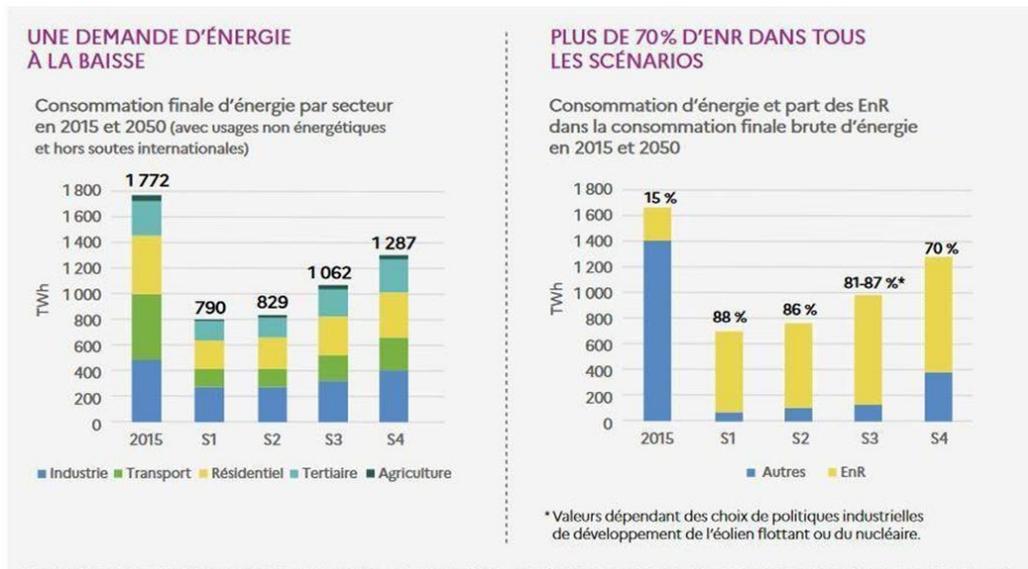


Figure 5 : Demande d'énergie et parts des EnR par scénario.

Source : ADEME

2.1.2 Les enseignements des quatre scénarios de l'ADEME

Sans pour autant conclure de manière hâtive sur les choix à faire en matière de scénarios, il est possible de cerner les principaux enseignements des quatre scénarios

→ ENS 1 : la neutralité carbone est un chemin difficile

Quel que soit le chemin suivi, la neutralité carbone reste un objectif difficile à atteindre. La figure 6 souligne l'importance de réduire de manière drastique nos émissions de GES. Dans les trois premiers scénarios, la réduction est un facteur de 6 à 7. Il va falloir agir vite, car les transformations sociales et techniques sont de grande ampleur.



Figure 6 : Bilan des émissions et des puits CO₂ entre 2015 et 2050.

Source : ADEME

La neutralité carbone repose sur des paris humains et des paris technologiques importants. Les

scénarios S1 et S4 semblent plus risqués que les autres. Le scénario S1 est clivant socialement.

C'est un scénario qui nécessite un vrai accompagnement et un pari sur le changement de comportement pour arriver au niveau de sobriété. Le scénario S4 présente un risque élevé sur la faisabilité technique. La technologie est un vrai pari sur l'avenir et les technologies de captage de CO₂ ne pourront pas être mises en œuvre de façon massive avant 2050. Par conséquent, cela représente un pari fort sur les capacités de la France à stocker massivement le CO₂. Enfin, même si la réduction des émissions de CO₂ est forte dans tous les scénarios, elle varie quand même du simple au double entre les scénarios, ce qui se traduit par une pression plus ou moins forte entre les usages et les modes de vie pour atteindre ces niveaux de réduction. La place des puits technologiques de carbone sur les scénarios S3 et S4 est très importante.

→ *ENS2* : Réduire la demande d'énergie et la maîtrise de la consommation des ressources

Pour réduire la demande d'énergie, facteur de la neutralité carbone, la France doit miser sur la sobriété et l'efficacité énergétique. Cela nécessite une modification radicale des modes de vie et des systèmes productifs. A titre d'illustration, la consommation d'énergie par secteur (exemple du secteur du transport) enregistre la baisse la plus importante dans les scénarios 1 et 2. C'est surtout le résultat de la sobriété des usages et de l'évolution des besoins. On passe à 50% en mode actif par exemple dans le scénario 1 contre 20% en mode actif dans le scénario 4 (mode sobriété). Sur l'aspect efficacité énergétique, c'est le nombre de voitures neuves qui joue le rôle de levier.

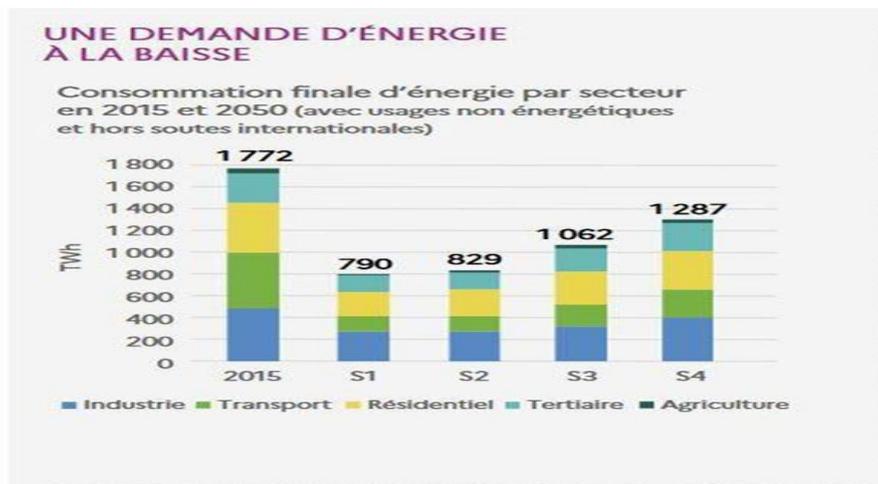


Figure 7 : Consommation d'énergie par secteur entre 2015 et 2050

Source : ADEME

Pour les ressources naturelles, notamment la consommation des ressources hydriques, le scénario 4 prévoit une forte consommation, soit 4,

50 mdM³ en 2050 contre 2, 70 mdM³ dans le scénario 1.



Figure 8 : Besoin en eau d'irrigation en 2020 et 2050

Source : ADEME

→ *ENS 3 : Préserver le vivant*

Préserver le vivant est un atout majeur. Trois leviers sont mobilisés. Le levier le plus important est celui du captage de carbone. Les puits de

carbone naturels dans la biomasse (végétation et forêts) sont très largement utilisés dans les scénarios 1 et 2.

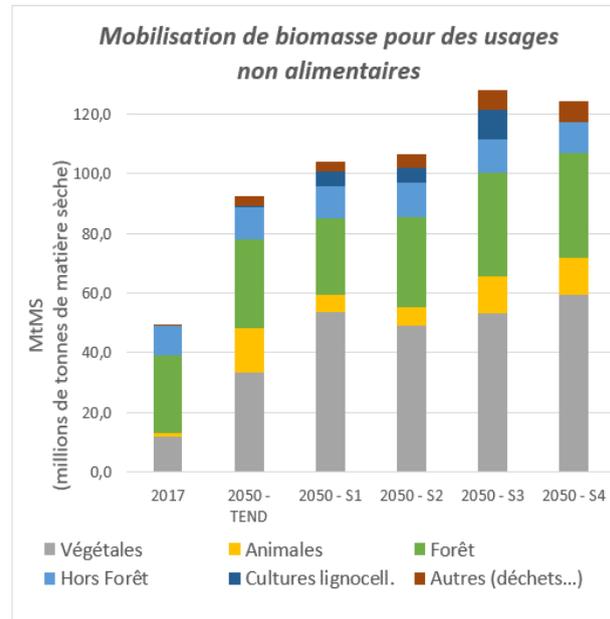


Figure 9 : Mobilisation de biomasse pour des usages non alimentaires

Source : ADEME

Le deuxième levier concerne la production de biomasse. La figure 9 (partie de gauche et centrale) montre un doublement des prélèvements dans tous les scénarios, avec des changements de pratiques agricoles. Les forêts et les prairies jouent leur rôle de stockage de carbone. C'est le volume de biomasse mobilisé qui permet de répondre aux besoins énergétiques et de matériaux. Le dernier levier est celui de la réduction des GES via la modification des pratiques agricoles. On a un potentiel de division par deux des émissions de GES en agriculture dans les scénarios 1 & 2.

→ *ENS 4 : La place des énergies renouvelables dans le mix énergétique*

Les scénarios anticipent un approvisionnement en énergies renouvelables compris entre 70 et 88%, une décarbonation du secteur du gaz, une part croissante de l'électricité dans tous les scénarios et surtout une part des énergies renouvelables hors réseau en nette augmentation (30 à 40% par

rapport à 2015).

Il est possible d'appréhender les différentes dynamiques des scénarios ADEME à l'aide d'un diagramme de boucles causales (CLD) introduisant les variables clés, leurs liens, les sens de polarité et les caractéristiques des boucles (figure 10). Les objectifs – neutralité carbone, sobriété et efficacité énergétique, production de biomasse, diminution de la consommation d'énergie, hausse des énergies renouvelables – reposent sur des leviers d'actions (variables en vert), qui sont souvent à l'origine de la polarité d'une boucle (les boucles de renforcement – *Reinforcing Loops* ont un signe positif, intensifier le reboisement permet d'augmenter la capacité d'absorption du CO₂... alors que les boucles de régulation – *Balancing Loops* – ont un signe négatif, la rénovation thermique des constructions peut freiner la construction de logements neufs et donc l'artificialisation des terres).

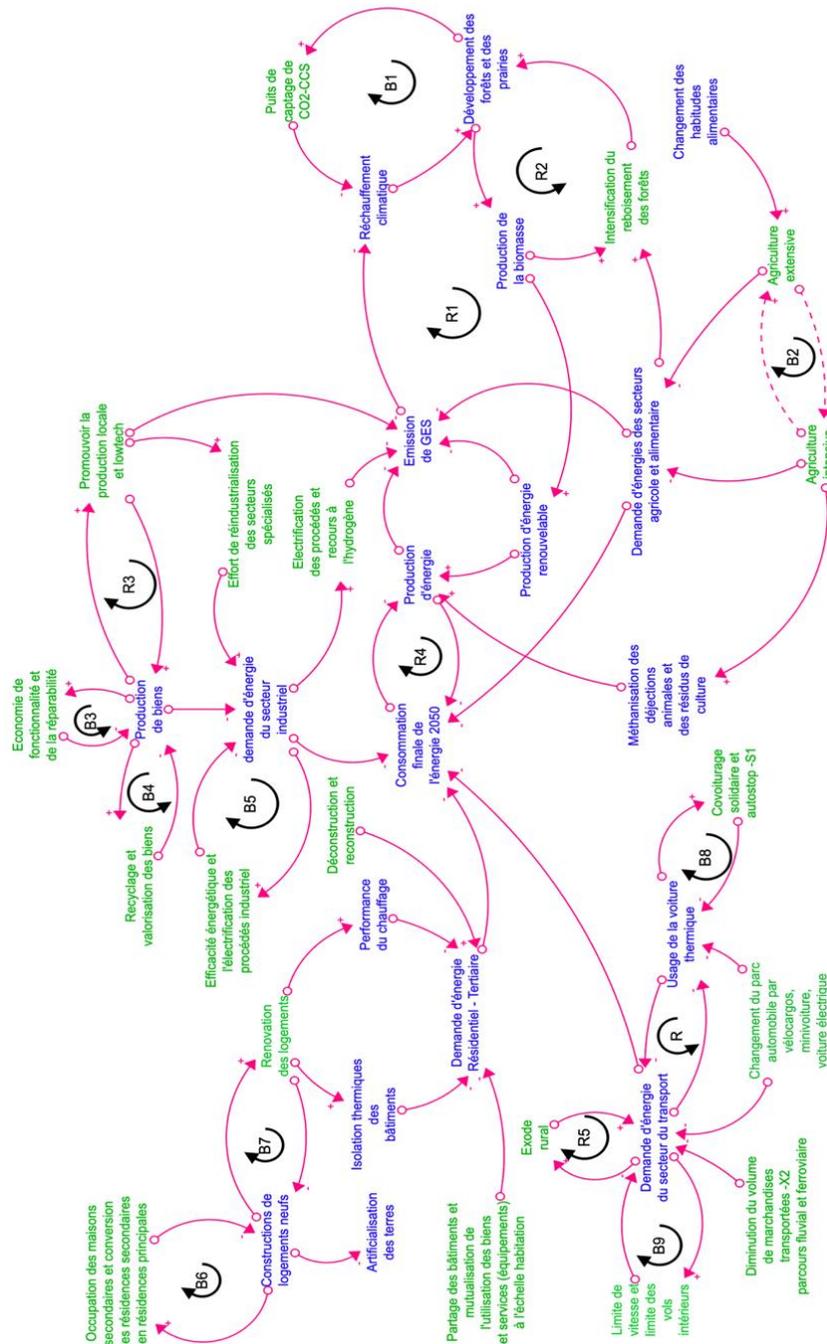


Figure 10 : Diagramme des boucles causales pour les scénarios de l'ADEME

2.2 Les scénarios de RTE

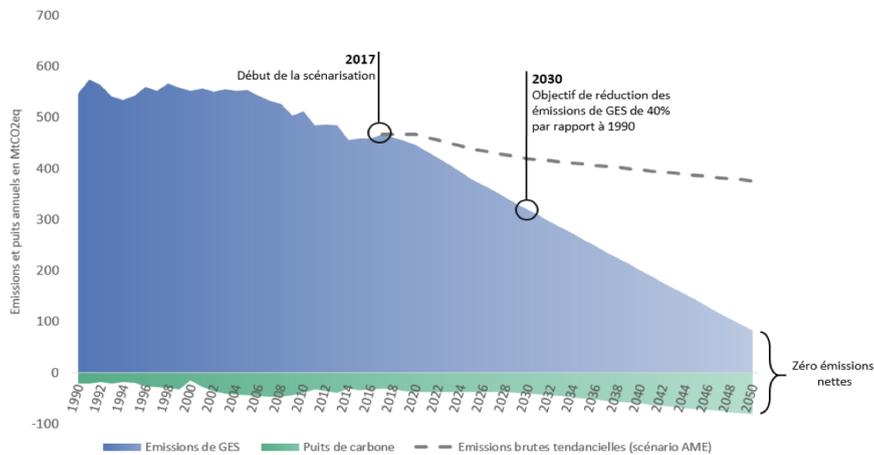
La prospective est une mission légale de RTE (le gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité français). Ce dernier a l'habitude d'élaborer des études prospectives de référence à échéance de 10 à 15 ans. Le 25 octobre 2021, RTE a rendu public un rapport intitulé *Futurs énergétiques 2050*. Ce travail, qui a donné lieu à des coopérations et des partenariats avec des organisations spécialisées, a mobilisé 40 personnes et est venue en réponse à une saisine de Mme Elisabeth Borne qui était alors

Ministre de la transition écologique et solidarité (2019).

Ce rapport est inédit, car la prospective est effectuée sur un horizon de 30 ans, c'est une première pour RTE. Il intègre les scénarios du GIEC et donc la dérive climatique en France et en Europe. Il a donné lieu à un dispositif de concertation qui a duré près de deux ans. Le cadrage de référence du rapport de RTE est la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance (LTECV). Adoptée pour la

première fois en 2015, la SNBC a été révisée en 2018-2019 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (ambition rehaussée par rapport à la première SNBC qui visait le facteur 4, soit une réduction de 75% de ses émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990). Ce projet de

SNBC révisée a fait l'objet d'une consultation publique du 20 janvier au 19 février 2020. La nouvelle version de la SNBC et les budgets carbone pour les périodes 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 ont été adoptés par le décret du 21 avril 2020.



*Les émissions « tendancielles » sont calculées à l'aide d'un scénario dit « Avec Mesures Existantes » qui prend en compte les politiques déjà mises en places ou actées en 2017.

Figure 11 : Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire national 2005 - 2050

Source : SNBC, 2020, rapport de synthèse

Dans la figure 11, la neutralité carbone signifie que l'on émet autant que ce que les puits de carbone sont capables d'absorber. L'objectif est donc de réduire nos émissions d'environ 80 millions de tonnes par an (d'ici 2030, la France s'est engagée vis-à-vis de l'Union Européenne (EU) à réduire de 55% ses émissions par rapport à 1990). Initialement, l'objectif était de réduire de 40% les émissions brutes, il a cependant été rehaussé à 55% sur les émissions nettes. Les émissions nettes étant les émissions positives moins les émissions absorbées.

La question est donc de savoir comment suivre cette trajectoire de réduction des émissions. Le rapport *Futurs énergétiques 2050* de RTE doit permettre d'évaluer les objectifs de la SNBC et d'en mesurer les conséquences, mais également de préparer la révision de la stratégie française pour l'énergie et le climat qui doit avoir lieu en 2023 (depuis mai 2023, sept groupes de travail, réunissant de nombreux élus et acteurs de la transition énergétique étudient la trajectoire bas carbone de la France jusqu'à l'horizon 2050, leurs travaux doivent servir de point d'appui aux projets de programmation pluriannuelle de l'énergie et de stratégie nationale bas carbone).

En janvier 2021, un rapport a été publié conjointement par RTE et l'ADEME sur la faisabilité d'un mix énergétique avec une part importante des ENR. Ce rapport était un prérequis qui a permis à RTE de réaliser l'étude avec un mix 100 % ENR d'ici le milieu du 21e siècle. Ce rapport a été publié pour une consultation publique et a reçu plus de 4000 réponses. Le travail a été repris avec un nouveau cadre et la version finale du rapport a été publiée en 2021.

2.2.1 Caractéristiques de l'étude et modélisation du système énergétique de RTE

Le modèle RTE simule le modèle électrique à l'échelle européenne pour chaque heure de chaque année pendant 30 ans. Il intègre à chaque heure 200 chroniques (météo, vent, soleil, température, hydraulité en de nombreux points du territoire, etc.) pour en tirer les conséquences en termes de production des ENR mais aussi de consommation. Parce qu'il simule le système électrique à chaque heure, le système garantit la sécurité d'approvisionnement du pays. Donc, tous les mix énergétiques garantissent la sécurité d'approvisionnement du pays dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Ce modèle permet d'établir des volumes de production par technologie, des volumes de flexibilité (des

volumes de pilotage qui garantissent l'équilibre du système) et des volumes du réseau. Ses volumes de production, de flexibilité et de besoins de réseaux permettent de déterminer le coût complet du système électrique pour chaque scénario et de déterminer l'empreinte carbone pour chaque scénario. Le cadre de l'étude est celui de la sortie

des énergies fossiles en 2050. Aujourd'hui, l'électricité est omniprésente dans la vie quotidienne des citoyens, mais elle n'est pas dominante dans le mix énergétique français. Elle représente seulement 25% dans la consommation finale contre 62% pour les énergies fossiles (43% pour le pétrole et 19% pour le gaz).

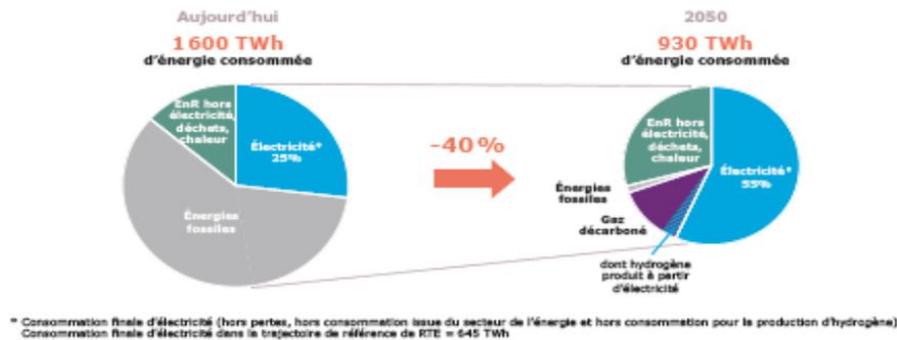


Figure 12 : Consommation finale d'électricité en 2050

Source : RTE (2021)

Deux leviers sont activés : (i) le premier levier est *l'efficacité énergétique* : Par efficacité énergétique, nous entendons l'amélioration des performances énergétiques des équipements électroménagers, informatiques et éclairage, la rénovation thermique des bâtiments, l'amélioration des procédés industriels et enfin l'efficacité gagnée en basculant vers l'électricité. L'étude RTE reprend à son compte l'objectif français de 40% d'efficacité énergétique entre 2020 et 2050. (ii) Le deuxième levier c'est *l'électrification massive de l'usage* dépendant aujourd'hui des énergies fossiles, pétrole et gaz. Il est fait référence particulièrement aux véhicules particuliers, aux procédés industriels (les hauts fourneaux électriques et les moyens de chauffage par chaleur électrique doivent se substituer aux

chaudières à fioul et à gaz). Ces transferts d'usage supposent une restructuration du système électrique, car l'électricité va devenir la principale énergie du pays, en substitution du pétrole et elle représentera dans le futur 55% de la consommation d'énergie finale en 2050. Dans ce contexte, la France fait face à un double défi : *le premier défi*, c'est de produire plus d'électricité, car la consommation va augmenter suite à l'abandon du pétrole et de gaz ; *le second défi*, c'est de remplacer l'appareil de production nucléaire de deuxième génération, qui est entrain de vieillir et qui devra immanquablement fermer d'ici 2060 pour des raisons industrielles. Les choix technologiques sont donc au cœur du problème.

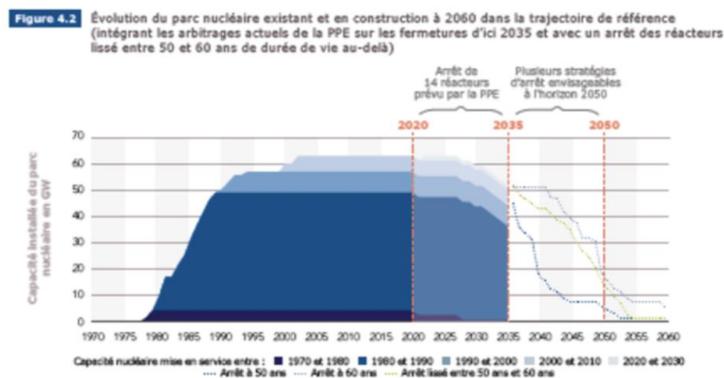


Figure 13 : Evolution du parc nucléaire existant et en construction à 2060

Source : RTE (2021)

L'étude de RTE répond donc au besoin de documenter les options de mix électrique pour 2050, leurs atouts et leurs limites, leurs impacts et leurs conséquences. Pour pouvoir effectuer ce type d'exercice, la première question à se poser est celle du niveau de consommation en 2050. La trajectoire de référence de l'étude reprend le cadrage de la SNBC actualisée. Trois drivers sont ici pris en compte : le PIB (produit intérieur brut), la démographie, et les politiques publiques les plus récentes (notamment la nouvelle stratégie hydrogène de la France). La reconstitution de cette nouvelle trajectoire conduit à retenir une consommation de référence en 2050 de 645 TWh.

Le scénario de référence mise sur une consommation de l'ordre de 650 TWh /an en 2050 contre 470 aujourd'hui (soit une augmentation de près de 30%). Deux autres scénarios ont été étudiés par RTE, ils conduisent à faire varier les consommations d'environ plus ou moins 100 TWh par an, il s'agit d'un *scénario sobriété* à 550 TWh et un *scénario de réindustrialisation* profonde à 755 TWh. Les scénarios ont été conçus et analysés de manière indépendante, mais pour les choix des mix énergétiques futurs, ils ne sont pas exclusifs et peuvent être combinés avec une influence à la hausse ou à la baisse sur le niveau de consommation.

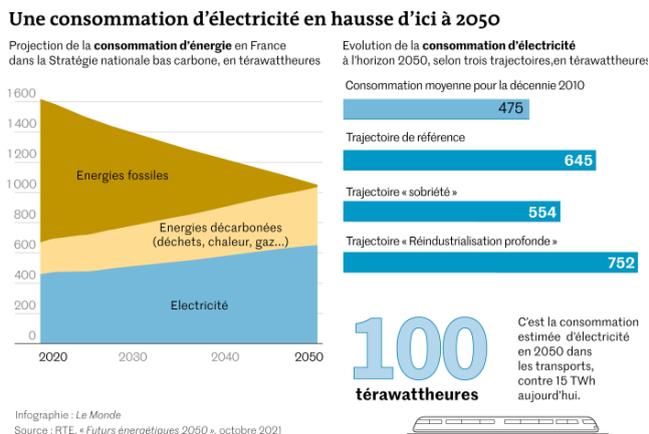


Figure 14 : Evolution de la consommation d'électricité à l'horizon 2050
Source : RTE (2021)

Notons que le scénario central retenu par RTE prolonge les modes de vie actuels des Français. Les modes de changements de mode de vie sont traités dans le *scénario sobriété*.

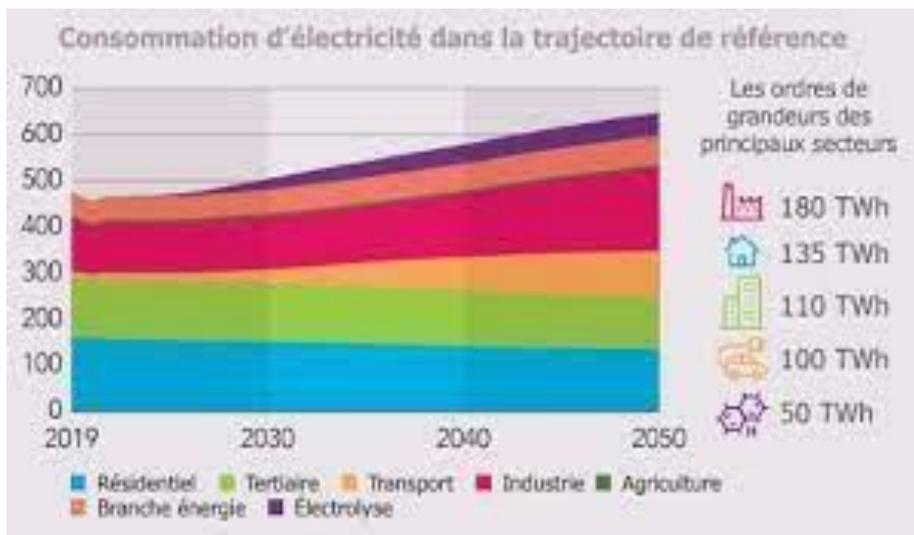


Figure 15 : Consommation d'électricité dans le scénario de référence
Source : RTE (2021)

Le *scénario de sobriété* repose sur un ensemble de leviers tels que le parc résidentiel, le tertiaire, les transports et les industries. Tous ces leviers

supposent des changements plus ou moins profonds de comportement, de consommation ou de l'appareil productif et donc des modes de vie.

Le rapport de RTE se veut être le plus explicite possible sur les gains résultant de la mobilisation des différents leviers, il ne se prononce pas sur leurs opportunités ou sur leur désirabilité. La variante sobriété est très similaire au scénario Négawatt. Ce scénario permet de limiter la consommation à 555 TWh et repose sur des changements de comportements qui ont été

chiffrés comme la part de télétravail (50 % contre 20 % dans la trajectoire de référence), l'augmentation des circuits courts pour les marchandises (conduisant à une baisse de 20 % des km/tonnes transportés contre 9 %), le nombre de personnes par véhicule (2,2 contre 1,7) ou l'allongement des durées de vie des équipements, le réemploi et le recyclage de matière.

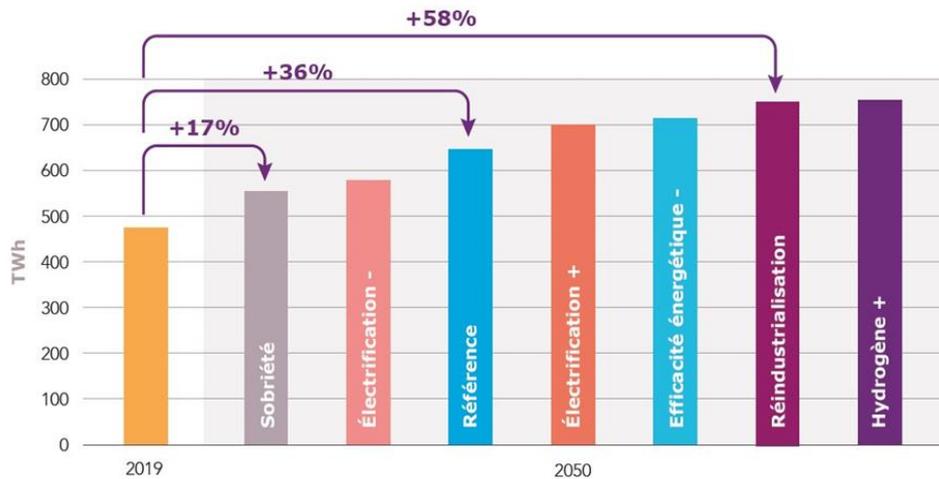


Figure 16 : Comparaison de quelques scénarios à l'horizon 2050

Source : RTE (2021)

RTE a aussi étudié un *scénario de réindustrialisation profonde* de la France. Alors que la trajectoire de référence suppose un maintien de l'industrie manufacturière dans le PIB à 10%, le scénario de réindustrialisation profonde pousse cette industrie manufacturière à 12 % - 13% du PIB. C'est une inflexion majeure, d'une part, parce que ces industries créent des emplois, et d'autre part, parce que la relocalisation de la production en France repose sur une électricité décarbonée (l'empreinte carbone de la France peut ainsi baisser). A ces trois tendances (sobriété, référence, réindustrialisation), RTE ajoute une multitude de variantes pour jauger les effets de certaines variations de l'efficacité énergétique, du niveau d'électrification, du recours à l'hydrogène, etc., le tout dans le cadre de flexibilités plus grandes mais aussi de pointes de consommations plus importantes, y compris l'été à cause de la climatisation.

Il est possible ici de tirer trois premiers enseignements de ce rapport : (i) agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre

les objectifs climatiques ; (ii) si la consommation d'énergie peut baisser, en revanche celle d'électricité va augmenter pour se substituer aux énergies fossiles (dans tous les cas, y compris dans le scénario sobriété, l'augmentation de la consommation est estimée à 16%), (iii) accélérer la réindustrialisation du pays, en électrifiant les procédés, augmente la consommation d'électricité mais réduit l'empreinte carbone de la France.

2.2.2 La scénarisation de RTE

RTE a dimensionné six scénarios de mix électrique pour l'horizon 2050 qui sont issus de la concertation (ils reflètent les différentes aspirations recueillies dans le cadre de la consultation publique). Ces scénarios sont organisés en deux familles. La famille M tend vers 100% de renouvelables en 2050 (ou 2060). Dans cette famille, trois scénarios sans nouveaux réacteurs nucléaires sont proposés. La famille N repose sur la construction de nouveaux réacteurs nucléaires (ce qui fait passer la part du nucléaire entre 25% et 50% en 2050). Aucun scénario ne repose sur une seule technologie.

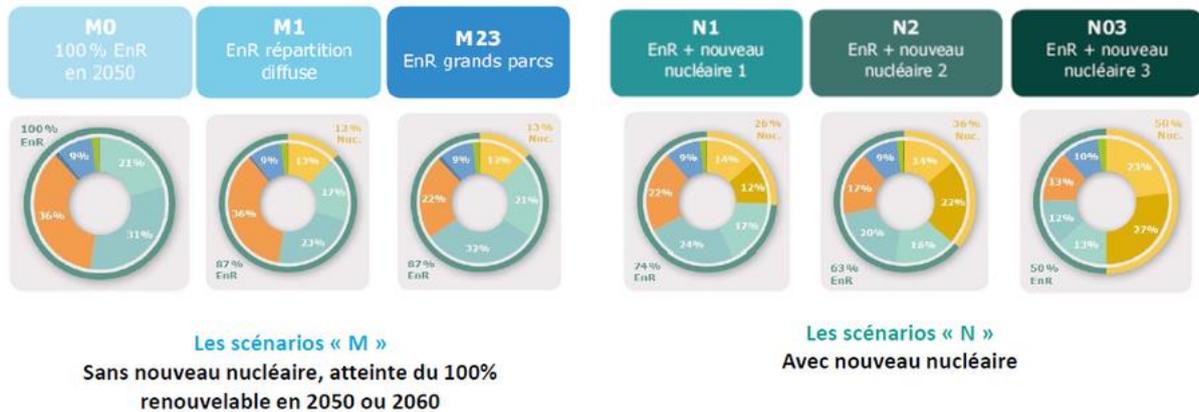


Figure 17 : Les six mix de production d'énergie électrique
Source : RTE (2021)

Les scénarios N sont des scénarios ENR plus le nucléaire. Ces scénarios diffèrent sur le rythme de construction de nouveaux réacteurs nucléaires.

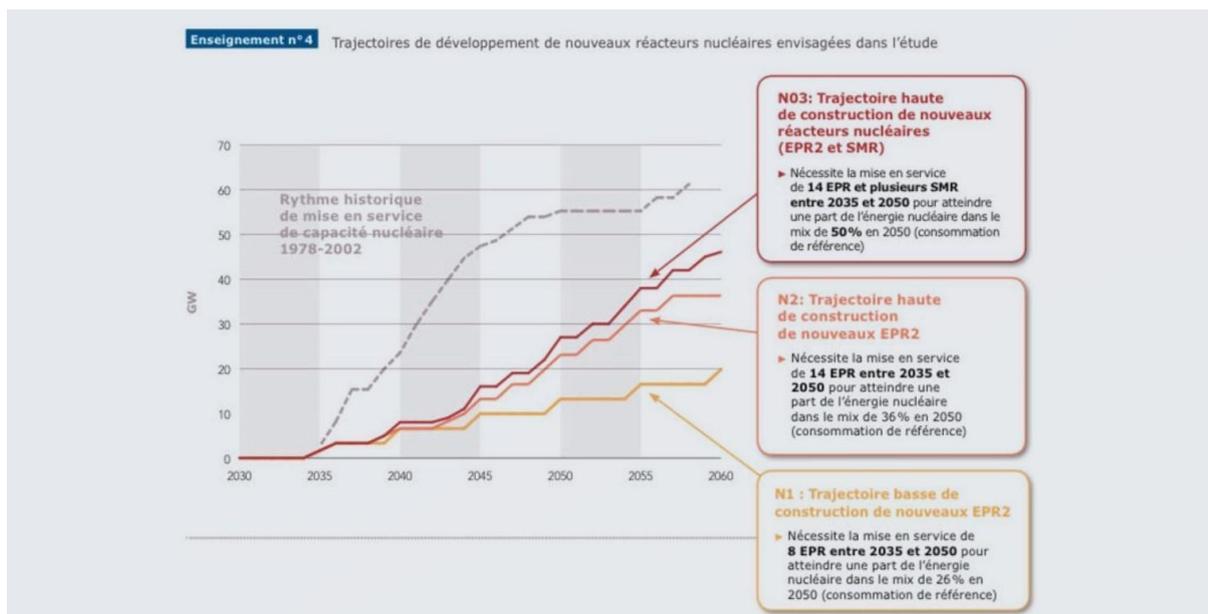


Figure 18 : Trajectoire de développement de nouveaux réacteurs envisageables
Source : RTE (2021)

Le scénario N 1 repose sur la construction de six nouveaux réacteurs entre 2035 et 2045 puis de continuer sur le rythme d'une paire tous les cinq ans. Dans ce scénario, la part du nucléaire en 2050 est de 26% par rapport à la trajectoire de référence et elle diminue encore à l'horizon 2060. D'ici 2050, 8 réacteurs à eau pressurisée (European Pressurized Reactor, EPR) seront construits, pour avoir un quart de nucléaire dans le mix électrique. Le scénario N 2 propose une accélération du rythme de construction des nouveaux réacteurs

nucléaires. Dans ce scénario, la France a 14 EPR, soit 1/3 de nucléaire dans le mix électrique à l'horizon 2050, en prenant en compte le nucléaire historique qui sera présent en 2050. La part de nucléaire est de 36% légèrement inférieure à 40% (et ce, jusque 2060). Le scénario N 3 combine une prolongation des réacteurs existants (presque tous) jusqu'à 60 ans avec l'accord des autorités de sûreté nucléaire. On construit 14 EPR, c'est autant d'énergies nouvelles que dans N 2, mais avec la construction de petits réacteurs nucléaires à sels

fondus (Molten Salt Reactor, MSR) pour 4 GWh, avec la prolongation des réacteurs existants à l'horizon 2060. Le nucléaire atteint dans ce scénario 50% du mix électrique.

Dans l'ensemble de ces scénarios, les énergies renouvelables sont très présentes, c'est également le cas dans le scénario N 3 qui conduit à disposer d'un parc nucléaire de 50 GWh en 2050 avec des réacteurs existants et de nouveaux réacteurs. 50 GWh est la plus haute part de la filière industrielle. 50 GWh cela veut dire 50% pour la production d'électricité dans la trajectoire de la consommation de référence mais ça peut vouloir

dire aussi entre 40% dans le scénario de réindustrialisation profonde et 60% dans le scénario de sobriété. Cette capacité nucléaire est en toute hypothèse insuffisante pour couvrir les besoins de la France. Aussi, le respect de la neutralité carbone impose, dans tous les cas, le développement d'un socle minimum d'ENR. Dans le scénario N 3, ce socle est composé de 70 GWh de capacité solaire, de plus de 40 GWh de capacité éolienne à terre (soit 3 fois plus qu'aujourd'hui) et 22 GWh d'éolien en mer.

Les scénarios M sont des scénarios 100% renouvelables.

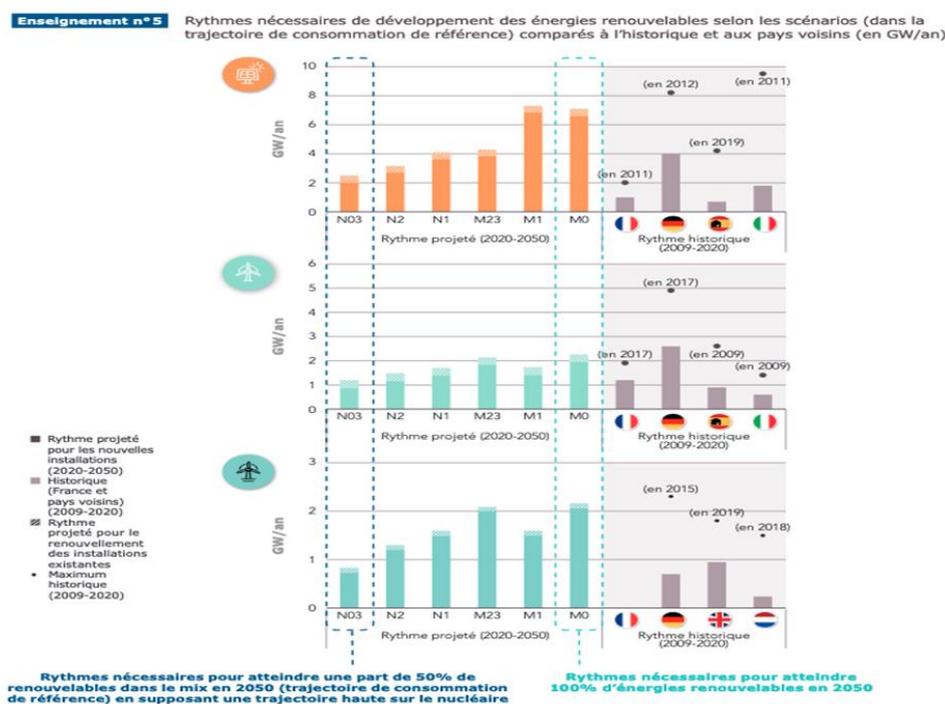


Figure 19 : Rythme de développement des énergies renouvelables selon les scénarios

Le scénario M0 repose sur une sortie accélérée pour arriver à 100% d'ENR en 2050.

Le scénario M1 vise une sortie naturelle du nucléaire sans nouveaux réacteurs nucléaires et donc une sortie du nucléaire en 2060. La spécificité du M1 par rapport à M 23, c'est qu'il repose sur des ENR décentralisées, donc des petits projets (comme le placement de panneaux photovoltaïques (PV) sur les toitures). Sur M1, on cherche une répartition diffuse des installations sur le territoire. Plus de 200 GW de panneaux photovoltaïques d'une puissance de 35 GWh seraient déployés sur des toitures résidentielles (en 2050, il y aura une maison sur deux qui posséderait un PV).

Le scénario M 23, 100% d'ENR en 2060, est centralisé dans des grands parcs éoliens et solaires. C'est un scénario qui recherche des économies d'échelle pour diminuer les coûts. Il est donc plus économique que le scénario M1 qui reste décentralisé. Dans l'ensemble de ces scénarios, la clé est le rythme de développement des ENR.

2.2.3 Les enseignements des scénarios du mix énergétique de RTE

Suite aux différents scénarios proposés par RTE, il est possible d'en tirer deux enseignements : (i) atteindre la neutralité carbone est impossible sans un développement significatif des énergies

renouvelables ; (ii) se passer de nouveaux réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables plus

rapides que ceux des pays européens les plus dynamiques. De ce fait, le coût économique de la transition énergétique devient un enjeu majeur.

Enseignement n°6 Coûts complets (production + acheminement + flexibilités) en France selon les scénarios (dans la trajectoire de consommation de référence) à l'horizon 2060, dans le cas central et selon les variantes

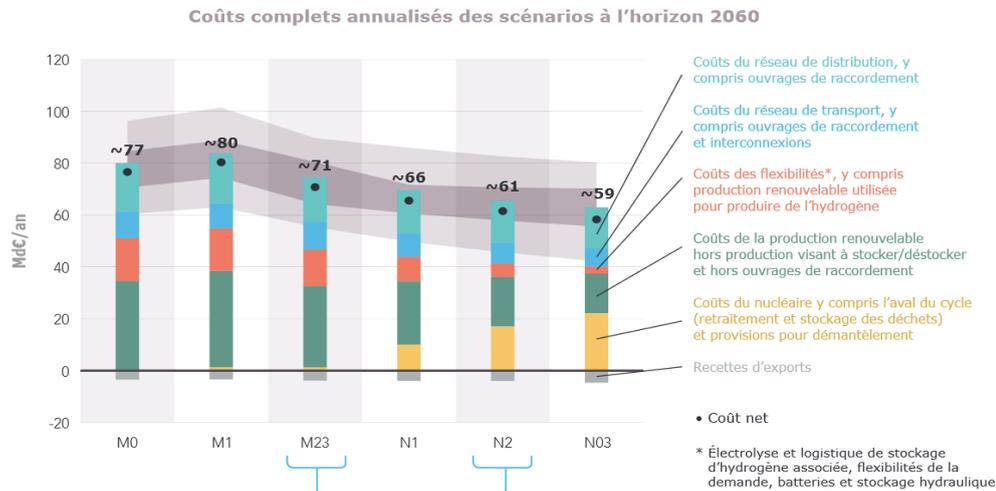


Figure 20 : Dépenses d'investissement dans le système électrique cumulées sur la période 2020-2060
 Source : RTE (2021, p. 492)

Au total, les dépenses d'investissement à consentir pour le développement du système électrique dans les différents scénarios sont d'environ 750 à 1000 milliards d'€ sur la période 2020-2060, décomposés comme suit, 500 milliards pour les centrales de production, 250 à 350 milliards d'€ pour le réseau électrique et le reste 0 à 150 milliards d'€ pour les flexibilités. Un tel déploiement équivaldrait à un investissement de 20 à 25 milliards d'€ par an (à comparer à la moyenne des 13 milliards d'€ par an d'investissements réalisés au cours de la dernière décennie dans le système électrique français). Au vu de la dette publique française (3228 milliards d'euros en 2024), ces investissements sont tout simplement hors-sol.

La comparaison des coûts des différents scénarios de RTE permet de faire les trois constats suivants :

(i) les coûts de production sont approximativement identiques dans les scénarios avec ou sans nouveaux réacteurs nucléaires. En 2060, ceux-ci passeraient de 59 milliards d'€ par an pour le scénario le plus nucléarisé, à près de 80 milliards d'€ pour le scénario tout renouvelable (le plus axé sur le développement du solaire).

(ii) Les besoins de flexibilité sont déterminants sur le coût complet de chaque scénario. Tous les

scénarios supposent de développer des flexibilités. Par flexibilité, il faut entendre les moyens qui permettent de piloter le système et de garantir la sécurité d'approvisionnement (le pilotage de la demande des interconnexions, le stockage d'hydraulique, les batteries, les centrales thermiques qui fonctionnent demain à l'hydrogène). Le besoin supplémentaire de flexibilité est estimé par les travaux des experts entre 30 GWh et 70 GWh à l'horizon 2050 selon les scénarios.

Les mix à forte pénétration de renouvelables et a fortiori à 100 % renouvelables supposent quant à eux des moyens de plus en plus importants. La construction ou le renouvellement de 40 à 60 nouvelles centrales thermiques à hydrogène, ce qui revient à doubler ou à tripler les centrales à gaz par rapport à aujourd'hui, est nécessaire pour les scénarios tendant à 100 % d'énergies renouvelables.

(iii) Plus le territoire comporte d'énergie renouvelable, plus les besoins de réseaux (transport et distribution) deviennent importants. Cela impacte le coût complet des scénarios. C'est l'un des points d'attention de l'étude RTE, les réseaux ne doivent pas être un facteur de ralentissement de la transition.

En résumé, l'évaluation économique des coûts de production, des flexibilités et des besoins en matière de réseaux, conduisent à rendre les scénarios avec un nouveau parc nucléaire moins coûteux à l'échéance 2050 et 2060 (un écart de l'ordre de 10 milliards d'€ entre les scénarios M23 et N2). Bien entendu, cette conclusion est sujette à caution car d'une part, le critère économique n'est pas nécessairement le seul dans la décision publique (on peut également prendre en compte des indicateurs tels que l'empreinte carbone, la technologie utilisée, l'empreinte matières ou

encore la place des déchets) et d'autre part, l'avantage économique du nucléaire dans les évaluations RTE est conditionné à un financement qui ne s'écarte pas de celui des autres technologies bas carbone.

Les différents scénarios de RTE peuvent être visualisés dans un diagramme de boucles causales. Nous pouvons ici introduire les points leviers de Meadows (1999) qui permettent de comprendre les difficultés à impulser une dynamique de changement dans un système.

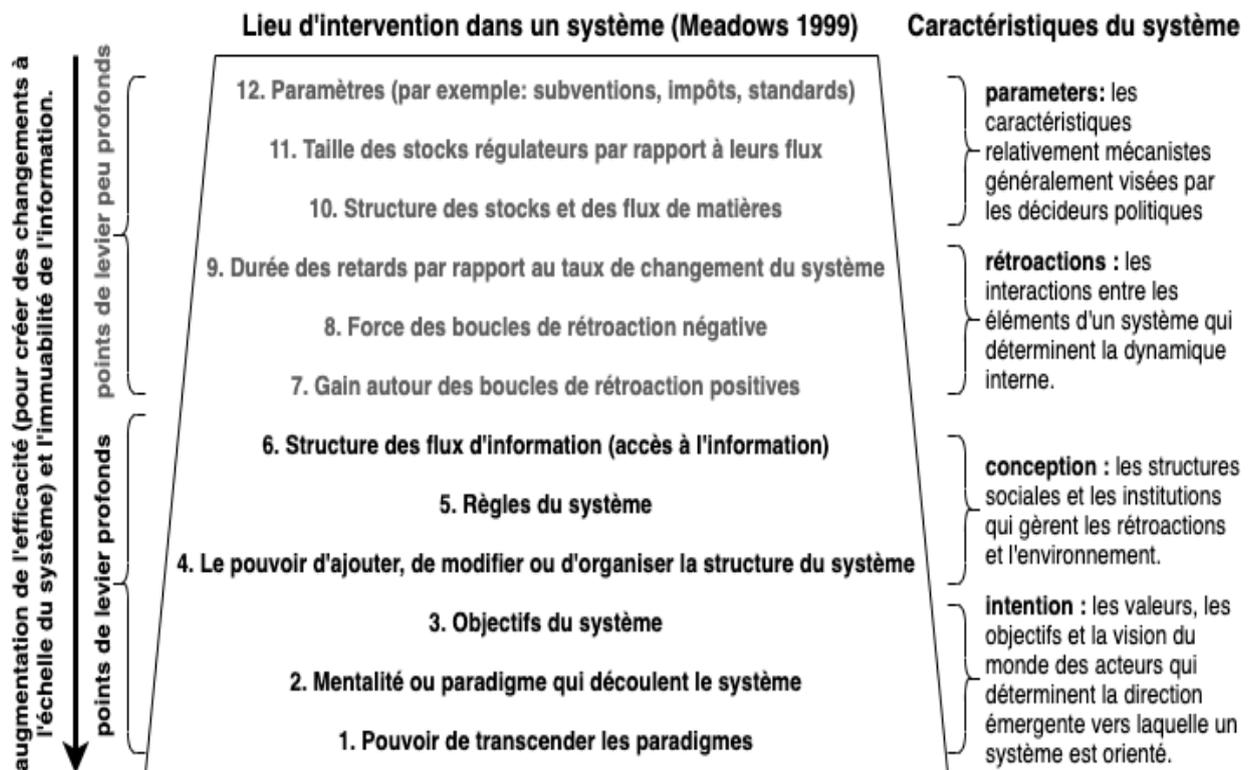


Figure 21 : Les points d'intervention dans un système

A partir d'un scénario de base (figure 22), introduisant les moteurs d'une économie (croissance économique, PIB, demande d'énergie, coût de l'énergie), il est possible de présenter les diagrammes des boucles causales des scénarios M (figure 23), N (figure 24), d'industrialisation profonde (figure 25) et sobriété (figure 26). Ces diagrammes mettent en valeur les leviers d'action

(en vert), c'est-à-dire les moyens de modifier ce que l'on observe sur le territoire français. Dans le cas du scénario M, il existe des leviers de rang 12 (Meadows, 1999), à savoir la baisse des coûts de production, de rang 4 (la sobriété énergétique) et de rang 1 – c'est le changement de paradigme, ici la sortie du nucléaire.

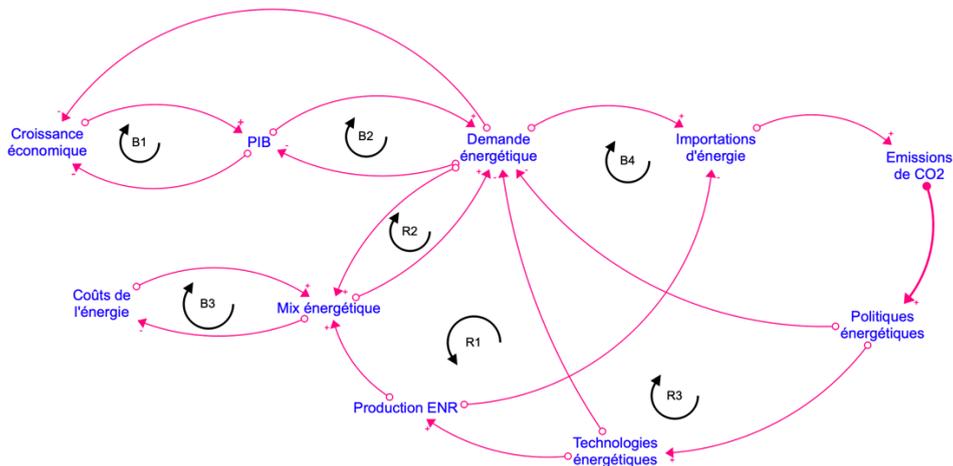


Figure 22 : Le CLD du scénario de base

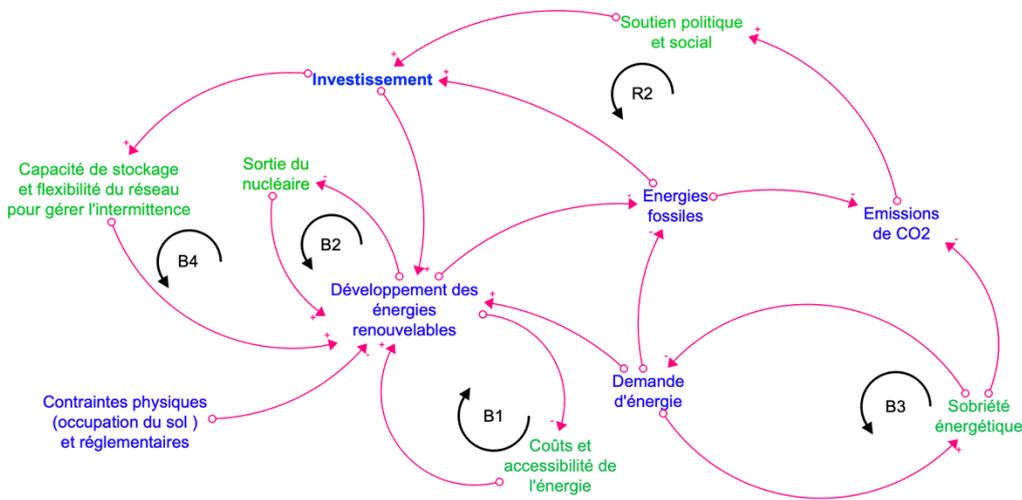


Figure 23 : Le CLD du scénario M

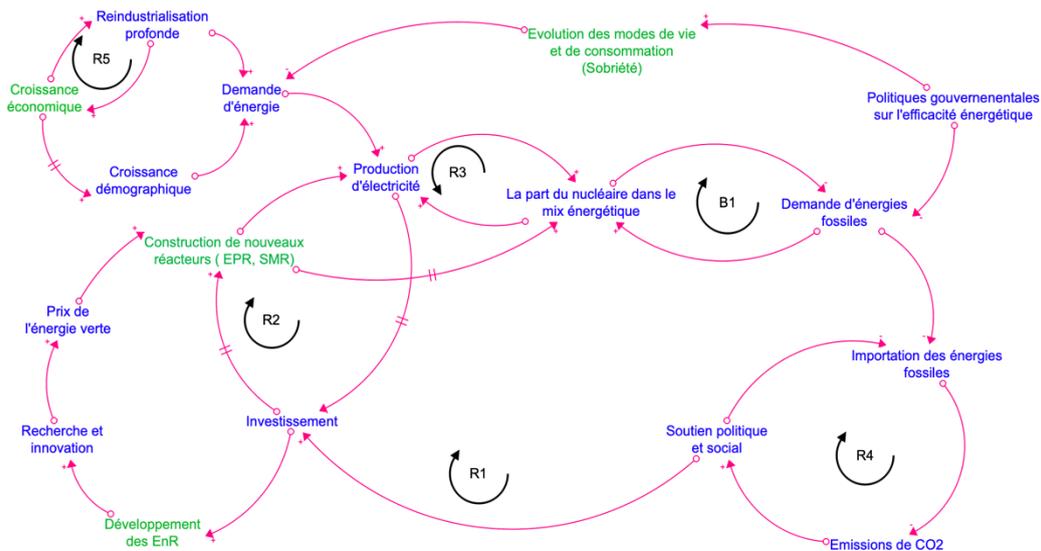


Figure 24 : Le CLD du scénario N

2.3 Les scénarios de NégaWatt

NégaWatt est une association à but non lucratif, créée en 2001 et dirigée par un collectif de membres actifs, la Compagnie des NégaWatt (qui rassemble une vingtaine d'experts impliqués dans des activités professionnelles liées à l'énergie). NégaWatt a publié le 26 octobre 2021, son 5ème scénario de transition énergétique pour la France. Par rapport au scénario précédent, ce scénario introduit quatre grandes nouveautés :

(i) Le scénario NégaWatt est couplé à un scénario NégaMat, qui est destiné aux matériaux et matières premières. Ce qui permet d'identifier assez finement les leviers à disposition pour réduire l'extraction des matières. Le scénario NégaWatt couplé au scénario NégaMat qui est lui-même couplé au scénario Afterres 2050 (scénario existant déjà depuis plusieurs exercices et destiné à la transition agricole, sylvicole et alimentaire), propose une vision assez exhaustive de l'ensemble de la problématique liée au système énergétique et plus globalement aux modes de consommation pour identifier les leviers à mobiliser et répondre aux différents enjeux environnementaux.

(ii) La deuxième évolution importante de NégaWatt, c'est la comptabilisation des émissions importées associées à la production de biens d'équipements et de biens de consommation à l'étranger mais achetés en France. L'objectif étant de pouvoir identifier les leviers à actionner pour la partie empreinte carbone et de réduire ainsi les émissions de GES qui sont imputables au citoyen Français. Sur la partie empreinte carbone, un travail a été effectué sur les options de relocalisation envisageables.

(iii) Un travail beaucoup plus fin sur les stratégies industrielles et les évolutions des filières industrielles qu'on peut atteindre dans une perspective de transition énergétique. Il s'agit principalement des filières qui seront en déclin et des filières qui vont être relocalisées après avoir été délaissées pendant plusieurs décennies. C'est

un scénario qui vise à intégrer de nouvelles filières d'avenir (qui vont s'inscrire pleinement dans cette transition énergétique). C'est une relance industrielle vertueuse dans laquelle, il y a à la fois de la sobriété et de la relocalisation.

(iv) Dans la version 2022, une feuille de route a été ajoutée à la trajectoire chiffrée pour le quinquennat présidentiel afin de rendre cette trajectoire plus opérationnelle sur le terrain.

2.3.1 La démarche NégaWatt

L'approche de NégaWatt est une approche systémique reposant sur le triptyque (sobriété, efficacité et renouvelable). C'est une démarche bottom up, en allant des usages et en remontant vers les ressources. *La sobriété* consiste à agir collectivement et individuellement sur le niveau d'usage en priorisant et en redimensionnant les services rendus (logique proche de l'économie de la fonctionnalité). *L'efficacité* repose sur une réduction du ratio usage/ressources, il s'agit d'améliorer les performances à toutes les étapes de la supply chain (c'est avant tout une performance technique). Les énergies renouvelables (ENr) traduisent le remplacement de ressources reposant sur des stocks finis et émettant des GES par des ressources identifiées par des flux soutenables et n'émettant pas ou peu de GES. Le point de départ de la démarche NégaWatt est une reconstitution du paysage énergétique français, à partir d'une démarche bottom-up. C'est l'agrégation des données de l'ensemble des usages de l'énergie, qui permet d'obtenir la consommation totale d'énergie finale puis primaire. Sous la forme d'un diagramme SANKEY, cet état des lieux a fait ressortir que la France consommait 88% d'énergie primaire (et donc de ressources énergétiques non renouvelables) avec une efficacité énergétique de 67% entre l'offre d'énergie primaire et la demande d'énergie finale fournie aux différents secteurs.



Figure 28 : Les Objectifs de développement durable de l'ONU

Source : UN (2015)

Au-delà de l'urgence climatique, le scénario Négawatt (et sa démarche systémique) s'est attaché à atteindre rapidement les ODD. Cela implique de trouver les solutions qui, tout en allant dans le sens de l'accomplissement d'un objectif particulier, n'en détériorent pas d'autres. Le scénario Négawatt recherche cet équilibre. Par exemple, il est nécessaire que des choix de technologies décarbonées soient aussi synonymes d'emplois et d'activités économiques, qu'une vie plus sobre n'empêche pas le confort et l'accès à tous les services publics minimums, ou encore que le développement de certaines filières renouvelables ne se fasse pas au détriment de l'environnement et de la biodiversité. Il s'agit de travailler sur des solutions qui entrent en synergie avec des enjeux non environnementaux, à savoir la réduction des inégalités, la lutte contre la pauvreté ou la paix. A titre d'exemple, nous citerons un objectif parmi les objectifs ODD qui sont inclus directement dans la modélisation, à savoir l'objectif 13 du réchauffement climatique qui représente l'objectif de neutralité carbone pour le scénario Négawatt qui prévoit que les émissions des GES deviennent nulles en 2050, le système énergétique sera alimenté à 96% par des sources renouvelables. Le principe de la modélisation du scénario Négawatt repose sur un modèle physique et non macroéconomique ; les modèles purement économiques sont, par construction, incapables de prendre en compte les

limites physiques non-négociables à l'échelle planétaire en termes de ressources et d'impacts.

La modélisation réalisée pour 2050, se complète d'un module d'équilibre électrique en puissance pour vérifier que la trajectoire est conforme à la sécurité du réseau électrique et que la modélisation physique de la production et de la consommation d'énergie est compatible avec le module de GES. Une fois la trajectoire dessinée, ce modèle permet, à travers différents modules, de déterminer d'une manière globale ou ciblée, les impacts économiques en termes de coûts, d'investissements, d'emplois ou d'autres externalités tels que la pollution de l'air. Quatre remarques peuvent être mentionnées ici :

- Dans le cadre de la réduction globale de l'empreinte environnementale, on trouve aussi des objectifs qui ne sont pas directement quantifiés dans le scénario mais sur lesquels la quantification menée peut donner lieu à une réflexion qualitative poussée c'est le cas des objectifs liés à la biodiversité (ODD 14 et ODD 15) ou l'accès à l'eau (ODD 6).

- Au-delà de la question environnementale, il y a la recherche de nouvelles dynamiques économiques. Dans les ODD, il y a des éléments structurants qui ont été exploités dans le scénario comme l'ODD 8 (Promouvoir une croissance économique soutenue).

- Une approche dite "raisonnable" concernant l'innovation, il s'agit de ne pas prendre de paris inconsidérés sur des technologies qui présentent beaucoup d'incertitude sur leurs maturités. Cette

approche prudentielle vise à discerner les solutions innovantes afin de faire le tri en fonction de leurs potentiels.

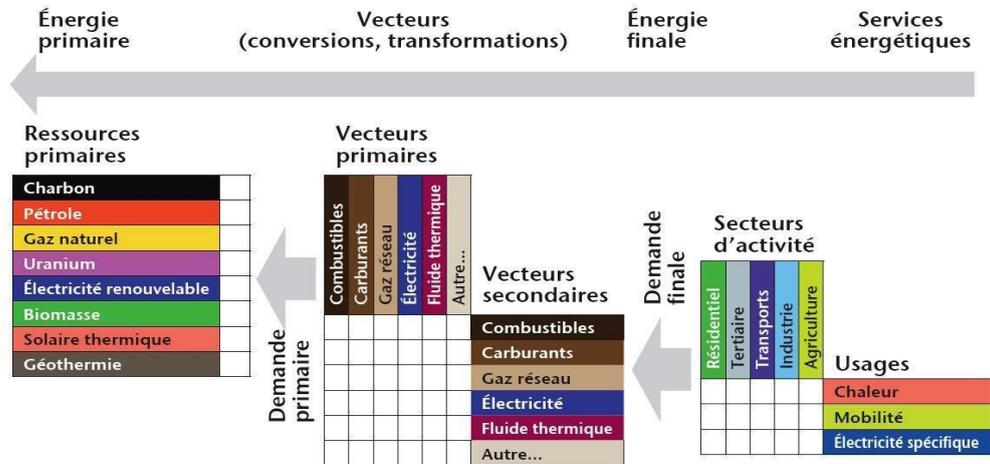


Figure 29 : Modèle physique

- Enfin, des perspectives en matière de progrès social, des principes directeurs pour la réduction des inégalités, la fin de la pauvreté et la réduction de la vulnérabilité liée aux consommations d'énergie, font partie des scénarios de Négawatt (comme la lutte contre la faim et le scénario de sécurité alimentaire). Le spectre des inégalités est alors appréhendé via deux limites : (i) les minimums sociaux au-dessous desquels la vie de

la société est dégradée (shortfall), (ii) les « plafonds écologiques » au-delà desquels la survie de la terre est menacée (overshoot). Les travaux sur les *Planet Boundaries* (Rockstrom, 2009) et l'économie du Donut (Raworth, 2017) peuvent être introduits ici à travers l'ODD 3 (Santé et bien-être) et l'amélioration des conditions de vie.

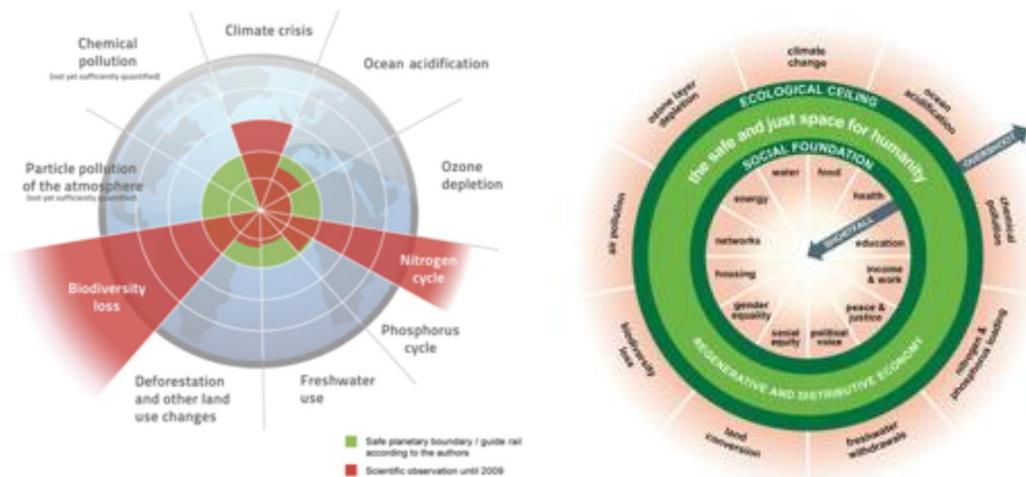


Figure 30: Planetary Boundaries and Doughnuts

Source : Rockstrom (2009), Raworth (2017)

2.3.2 Les résultats du scénario Négawatt

Les résultats vont s'articuler sur les notions de demande et d'offre. Selon Négawatt, la transition énergétique doit commencer par la réduction des

besoins, et donc de la demande d'énergie et de matières premières grâce à la sobriété et l'efficacité. Les scénaristes ont décrit les changements concernant la demande en énergie

dans quatre domaines d'activités, le bâtiment (un des plus grands consommateurs d'énergie), le transport, l'industrie et l'agriculture.

2.3.2.1 Le secteur du bâtiment

En France, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le plus gros consommateur d'énergie. Le bâtiment consomme plus de 41% de la consommation d'énergie finale et 15% des 40% des consommations d'énergie primaire.

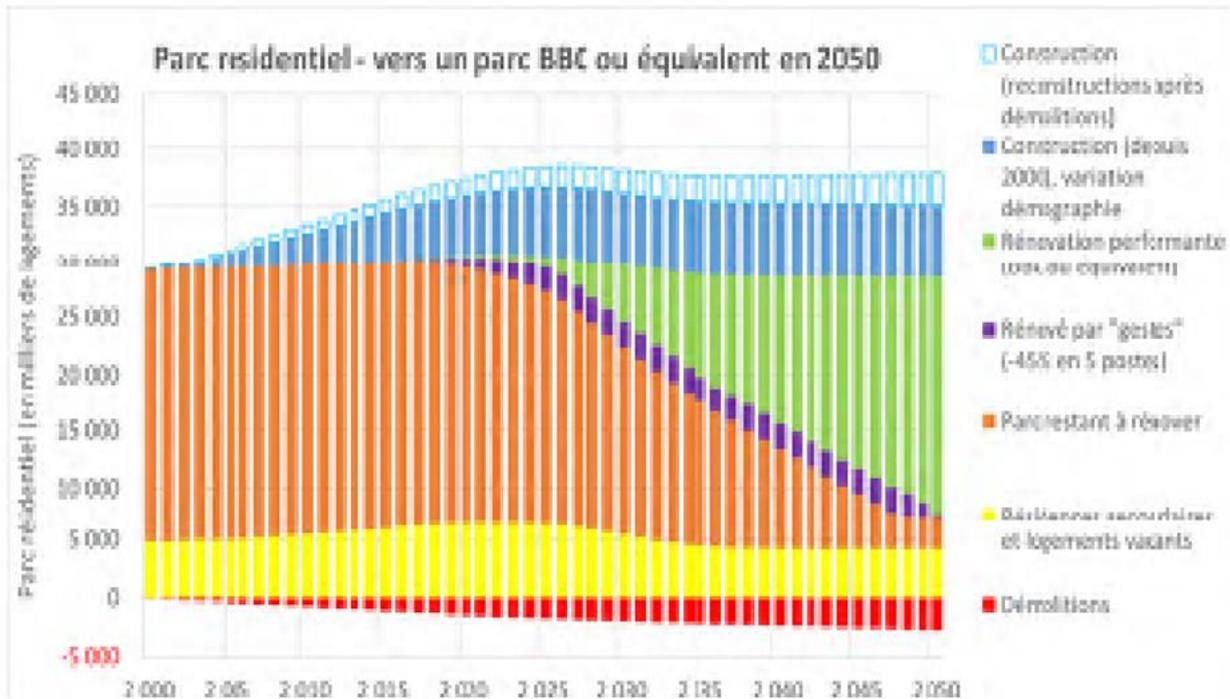


Figure 31 : Historique de rénovation du parc de logements de 2000 à 2020 et évolution dans le scénario Négawatt jusqu'en 2050

Source : Négawatt, p. 17

Les usages énergétiques les plus significatifs de ce secteur sont le chauffage des locaux, suivi par l'électricité spécifique (appareils ménagers, lumières, ordinateurs, etc.) et l'eau chaude. Les consommations associées à l'informatique (et plus largement au numérique) et à la climatisation vont augmenter significativement, suite aux changements climatiques et à la numérisation croissante de la société. Afin de diminuer la consommation d'énergie de ce secteur, plusieurs mesures sont proposées par Négawatt. La généralisation et la massification des rénovations énergétiques au niveau bâtiment basse consommation (BBC) ou équivalent est nécessaire pour réduire les besoins d'énergie dans le parc bâti

existant.

Selon ce scénario (2050), la démolition et la rénovation du parc résidentiel ne peuvent pas suffire à transformer la consommation énergétique du parc bâti. Le rythme actuel de rénovation est insuffisant. D'ici à 2050, le scénario Négawatt retient 10 millions de bâtiments à construire et 25 millions à rénover selon une méthode permettant de garantir une réduction suffisante de leur consommation d'énergie : un tel volume à traiter nécessite une forte accélération du rythme annuel de rénovation, qui doit passer de 33 000 logements à rénover par an au niveau BBC en 2020 pour atteindre près de 800 000 opérations par an avant 2030, puis se maintenir jusqu'à 2050.

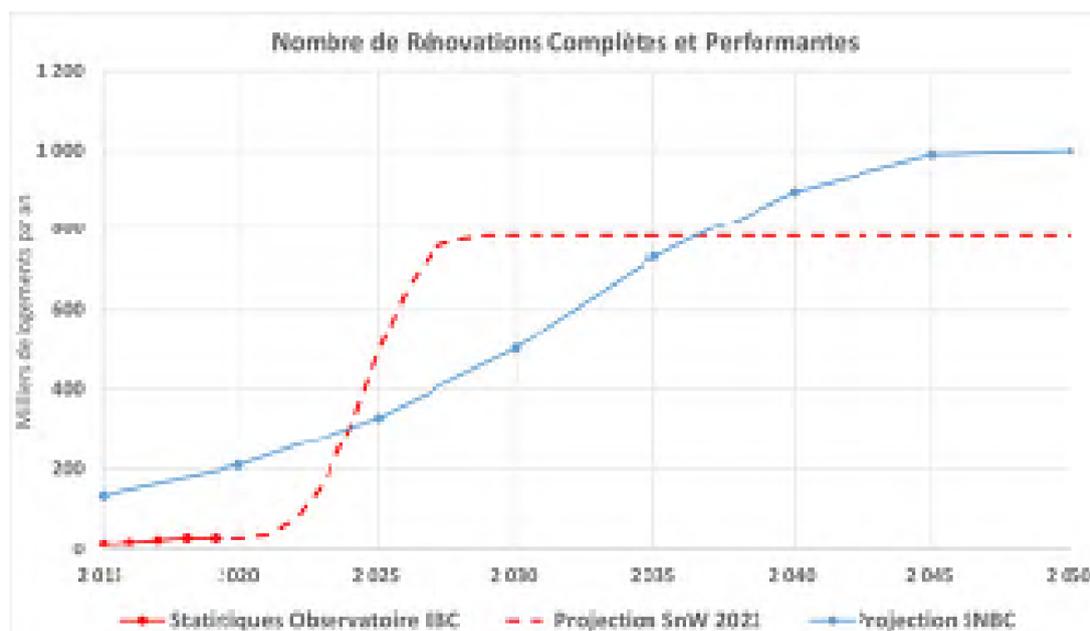


Figure 32 : Évolution du nombre de rénovations complètes et performantes par an entre 2015 et 2050
Source : Rapport complet Négawatt (partie 4, p. 17)

Les rénovations ne peuvent conduire à la performance BBC. Les rénovation BBC ou équivalent doivent remplacer complètement les rénovations « par geste », peu efficaces et plus coûteuses in fine, par des rénovations complètes et performantes. Négawatt propose de réorienter l'ensemble des financements dédiés à la rénovation au niveau BBC ou équivalent, et d'instaurer l'obligation progressive et conditionnelle de rénovation performante lors des changements de propriétaires en maisons individuelles et lors des ravalements de façade dans le collectif, lorsque les offres techniques et commerciales sont adaptées.

Pour les constructions neuves, il est préconisé d'utiliser des matériaux à faible énergie fossile (bois, terre, paille, matériaux biosourcés, chanvre) afin de réduire l'empreinte carbone du secteur et de renforcer la formation de l'ensemble des acteurs du bâtiment à la rénovation globale et performante (Diemer & al., 2024).

Pour le tertiaire et malgré la complexité de ce secteur, il est proposé de garder la même trajectoire et les mêmes objectifs du parc de logement à l'horizon 2050 et d'assurer la mise à jour du décret du tertiaire, pour favoriser les rénovations BBC et éviter le saupoudrage

d'actions non coordonnées.

Un certain nombre d'autres actions et hypothèses de sobriété et d'efficacité du Parc Bâti est aussi évoqué : la stabilisation du nombre de personnes par logement, puisque le passage de 2 à 2,2 personnes par logement induit une diminution de plus de 3 millions de logements nécessaires et cela grâce à la cohabitation, la réduction de la part de constructions neuves, le dimensionnement raisonnable des équipements électroménagers et bureautiques ou encore la généralisation des systèmes de chauffage performants (pompes à chaleur à haut rendement, poêles à bois, etc.)

2.3.2.2 Le secteur du transport

Le secteur des transports de personnes et de marchandises représente en France le premier secteur d'émissions de gaz à effet de serre. En prenant comme mesure, le kilométrage parcouru par habitant et par an, les déplacements en voitures représentent près de 60% du total des km parcourus, vient ensuite l'aérien (Négawatt prend en compte l'aérien international, le transport en commun routier, le transport en commun ferroviaire et les modes actifs de vélo et marche à pied). Les grands déplacements sont fortement dépendants du pétrole, d'où l'émission importante de GES.

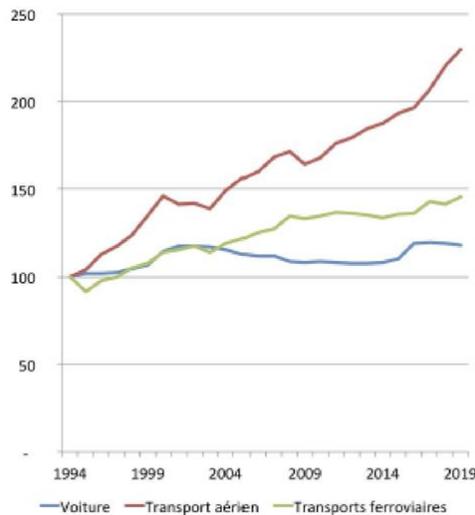


Figure 33 : Évolution du trafic transport

Source : Rapport RTE

Depuis 4 ans, la France a fortement investi dans l'aménagement du territoire favorisant le trafic routier (selon les chiffres du ministère du développement durable, la circulation sur le réseau routier de France métropolitaine atteint les 623 milliards de véhicules-kilomètres, soit plus de 2000 fois l'aller-retour entre la Terre et le Soleil¹). De plus, le trafic aérien français a connu une réelle explosion depuis 2016 (mise à part l'épisode de la COVID) avec plus de 60 millions de passagers². C'est le moyen de transport le plus émetteur de GES (à mettre en parallèle avec l'effondrement du fret ferroviaire sur le volet de transport de marchandises). Les leviers prioritaires dans ce secteur sont : (1) la baisse du trafic routier motorisé, (2) la réduction du trafic aérien (avec plus de trafic ferroviaire) et (3) le développement de la voiture électrique.

1er levier : Baisse du trafic routier motorisé

Les voitures représentent 60% des kilométrages parcourus, si on s'intéresse juste au déplacement à l'intérieur de la France. Pour la partie marchandise, cela représente près de 88 tonnes par

km parcouru. Les enjeux pour la mobilité ne sont pas seulement en termes d'émissions de GES, il est également question de la pollution de l'air aux particules fines (qui tue presque 50 000 personnes chaque année en France) et de la concentration des polluants atmosphériques dans les centres urbains. Pour réduire les impacts du trafic routier, l'électrification est largement préconisée sans pour autant répondre à tous les problèmes. En effet, il y a la pollution à l'abrasion des freins et des pneus. L'électrification doit donc être couplée à la diminution du trafic routier.

Quatre leviers pour réduire le trafic routier : (i) une diminution des distances parcourues (déplacement télétravail, réduction des déplacements de très longue distance); (ii) une réduction des tonnages transportés; (iii) un report modal vers d'autres types de transport (de la voiture vers le transport en commun, le vélo, la marche à pied), coté marchandises il y a aussi le passage de la route vers le rail, voire le fluvial; (iv) une augmentation du taux d'occupation / de remplissage (covoiturage pour les petites distances assez peu développé en France) et remplissage des poids lourds à la hausse.

Ces évolutions et changements doivent être accompagnés par la mise en place de politiques et de mesures adaptées. Il s'agit notamment d'investir massivement dans les alternatives au trafic routier motorisé (développement des infrastructures du transport commun, des pistes cyclables et des espaces stationnement de vélos) et d'instaurer une redevance kilométrique sur le fret

¹[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/stabilite-de-la-circulation-routiere-en-france-en-2019#:~:text=En%202019%2C%20la%20circulation%20sur,%2C4%20%25%20en%202018\).](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/stabilite-de-la-circulation-routiere-en-france-en-2019#:~:text=En%202019%2C%20la%20circulation%20sur,%2C4%20%25%20en%202018).)

²<https://www.ecologie.gouv.fr/analyses-du-transport-aerien#:~:text=Les%20TBC%20continuent%20leur%20conqu%C3%AAtte,millions%20de%20passagers%20depuis%202016.&text=La%20progression%20globale%20de%2Fvers,millions%20de%20si%C3%A8ges%20au%20d%C3%A9part.>

roucier, pour donner un signal prix au consommateur final d'une part et d'autre part pour générer des recettes fiscales qui vont financer les infrastructures ferroviaires.

2ème levier : moins de trafic aérien, plus de trains

Sur le graphique précédent faisant état de l'évolution du trafic routier, aérien et ferroviaire depuis plus de 25 ans, on voit que le trafic aérien a presque doublé, que le trafic ferroviaire a augmenté d'à peu près 50% et que le trafic routier a augmenté d'à peu près 20%. L'aérien est le transport le plus émetteur de GES, la mobilité aérienne n'est donc pas soutenable. Par ailleurs,

c'est le mode de transport qui est le plus inégalitaire, puisqu'une tranche importante de la société n'emprunte pas ce moyen de transport, et ce, malgré le développement des vols « low cost. » qui ont permis de rendre l'avion plus accessible. Dans le scénario Négawatt, le trafic aérien (représenté dans le graphique n°34 par la rupture du tracé de la courbe trafic aérien lié à la crise de Covid 2019, puis une reprise en 2020 et 2021) entame une décroissance à partir de 2024 sur les vols intérieurs mais aussi sur les vols internationaux grâce au développement du trafic ferroviaire et routier à l'échelle mondiale.

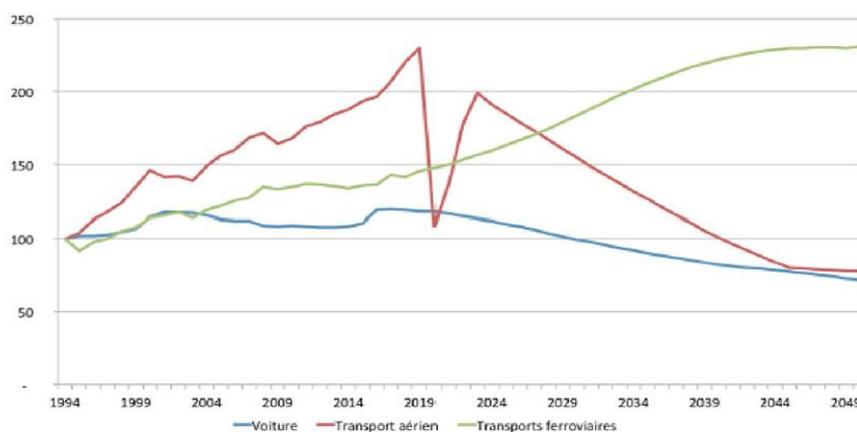


Figure 34 : La baisse du trafic aérien

Quatre leviers sont évoqués pour accompagner cette évolution majeure : (i) Investir dans le ferroviaire ; (ii) Augmenter le prix des vols en avion (fiscalité sur le kérosène, éco-contribution sur les billets d'avion) et interdire progressivement l'ensemble des vols intérieurs lorsqu'une alternative ferroviaire existe; (iii) Mettre progressivement fin aux vols intérieurs, quand une alternative ferroviaire existe (moins de 5 heures), et interdire à l'horizon 2030-2035, ce type de vols; (iv) Bannir la publicité pour l'aérien.

3ème levier : les voitures électrique, outil massif de décarbonation

Le véhicule électrique devient incontournable dans la stratégie nationale de neutralité carbone. Le scénario Négawatt prévoit pour la France, le développement massif des véhicules électriques, toutefois la substitution des voitures électriques aux voitures thermiques (qui représentent encore 97% du parc automobile français en 2024) prendra un certain temps (même si la croissance du marché est exponentielle). Par ailleurs, se posera

très vite la question de l'accès aux ressources naturelles et notamment le lithium qui est l'un des matériaux essentiels des batteries. La découverte de la mine de lithium de l'Allier laisse présager la production de 700 000 véhicules dès 2028. Toutefois, tout reste à faire. Dans le scénario Négawatt, l'équivalent de 2/3 de voitures 100% électriques et de 1/3 de voitures hybrides est projeté pour 2050. Côté marchandise, 74 % de véhicules circuleraient au gaz et 14% à l'hydrogène pour les grands trajets. Les deux mesures prioritaires sont la fin des ventes de véhicules thermiques (en 2035 en Europe) et la mise en place de dispositifs nationaux et européens (bonus/malus) pour limiter la consommation de matières premières (Diemer, Buscaglia 2024).

2.3.2.3 Le secteur Industrie et biens de consommation

Les secteurs industrie et agricole doivent relever le défi de l'accès aux matières premières, qui va de pair avec la reconfiguration de la stratégie

industrielle et agricole de la France pour une transition énergétique et écologique réussie. La nouveauté apportée réside dans la création d'un scénario, NégaMat, destiné à accompagner le scénario NégaWatt. Le scénario NégaMat est composé de trois volets. Le premier volet s'intéresse aux flux de matériaux (en tonnes) mais aussi le flux de biens de consommation et d'équipement (en tonnes également), combinés à un module d'économie circulaire, qui permet de mieux diagnostiquer la demande et son évolution, à un module stratégie industrielle pour suivre les

importations et les exportations de la France, à un module de déchets pour mieux évaluer la capacité de recyclage et enfin à un dernier module sur l'empreinte matière. Le deuxième volet concerne l'intensité énergétique qui représente l'efficacité énergétique dans le processus industriel. Le troisième et dernier volet est la consommation d'énergie en TWh, dans lequel on peut estimer les externalités comme les émissions des GES, le transport de marchandises, les émissions de particules fines, et plus généralement le bilan carbone.

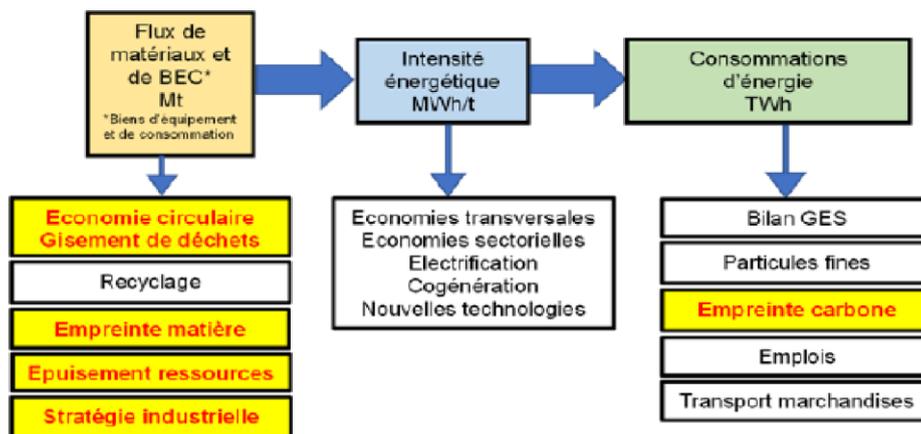


Figure 35 : Scénario NégaMat

Entre la demande et l'offre, plusieurs leviers peuvent être actionnés : (i) la juste mobilisation des surfaces agricoles et des ressources minérales dont les disponibilités ne sont pas infinies ; (ii) la substitution de matériaux par d'autres ayant un meilleur bilan environnemental ; (iii) le recyclage des matières pour minimiser l'extraction de sources premières ; (iv) l'efficacité énergétique des processus industriels ; (v) le commerce international (en réduisant les importations ayant des effets négatifs et en relocalisant certaines productions). Maîtriser la consommation des biens dans le scénario NégaMat repose - comme le scénario NégaWatt - sur la sobriété, l'efficacité et

l'utilisation de matériaux renouvelables, mais aussi sur l'économie circulaire qui introduit la réutilisation, la réparabilité et l'augmentation de la durée de vie des biens de consommation et d'équipements.

Au final, les consommations de matériaux diminuent considérablement dans les secteurs du bâtiment, des transports, des emballages et du papier et ne croissent que dans celui des énergies renouvelables avec, au global, une baisse du tonnage consommé annuellement. Le tableau ci-après montre quelques chiffres de décroissance de la consommation de ces biens en tonnes entre 2019 et 2050.

Quelques chiffres 2019 et 2050 en Tonnes	
BTP	- 36%
Transport	- 44%
Emballage	- 20%
Papier	- 38 %
Énergies renouvelables	+ 500 %

Source : NégaWatt (2021)

La nouvelle stratégie industrielle de la France repose également sur le principe de produire ce

que l'on consomme et non l'inverse. Pour ce faire, le scénario NégaWatt envisage de relocaliser en France une partie des activités industrielles qui

étaient en perte de vitesse telles que la papèterie, la mécanique et la métallurgie et de développer de nouveaux secteurs industriels comme les batteries électrochimiques et les énergies renouvelables (éolien flottant et panneaux photovoltaïques notamment), qui restent des secteurs d'avenir. Une partie de la sobriété en matériaux s'appuie sur la baisse de la demande de différents secteurs, notamment bâtiment et transport (c'est le cas du béton et de l'acier) ou des produits tels que les engrais ou les emballages. De plus, un levier d'action tel que l'augmentation des taux de recyclage des métaux (95% en 2050), des plastiques (85%) et du verre (85%), engendre une diminution de la demande en ressources primaires. La durabilité et la réparabilité des produits augmentent dans le scénario, de même que les taux de recyclage (95% pour les métaux, 85% pour les plastiques et le verre).

Sur la question de l'empreinte de cette nouvelle stratégie sur les ressources et particulièrement des matériaux que la France est en train d'extraire de l'étranger. Deux constats existent et sont contraignants : (i) la France doit se limiter aux réserves existantes, car elle ne peut pas compter indéfiniment sur une ressource qui n'est pas sûre et qui de plus a un impact significatif sur la biodiversité ; (ii) l'exercice fait le choix d'une contrainte de consommation égalitaire, le quota mondial attribué à chaque pays est proportionnel à sa population actuelle, ainsi, la France représentant environ 1% de la population mondiale, n'a le droit de consommer que 1% des quantités extraites chaque année de chaque matériau. Les ressources mondiales en lithium étant de 17 millions de tonnes, la France n'aurait

donc droit qu'à 170 000 tonnes de lithium.

Le lithium et l'acier ont fait l'objet de focus particuliers, eu égard à la place qu'ils occupent dans la transition énergétique :

(i) Un enjeu pointé par l'association Négawatt réside dans la consommation de lithium pour la production de batteries. Le lithium a une empreinte de 674 t/an avec une consommation française comprise entre 6 000 et 7000 tonnes. C'est l'une des ressources pour lesquelles il est le plus difficile de respecter la contrainte de consommation égalitaire par habitant à l'échelle mondiale. Négawatt y parvient en réduisant le poids moyen des véhicules, en partageant la mobilité entre véhicules électriques et roulant à l'hydrogène (réservé à la mobilité lourde - TER, poids lourds sur certains trajets longs, bateaux-bus, etc.) et au bio-GNV, en augmentant le taux de recyclage du lithium (qui exige une très grande pureté et est donc peu pratiqué à l'heure actuelle).

(ii) Pour la France, 9 millions de tonnes d'acier sont fabriqués dans les hauts fourneaux à charbon sur deux sites industriels d'Arcelor Mittal (Dunkerque, Fos sur mer). Cela représente près de 22% des émissions de GES de la sidérurgie. Cette industrie emploie actuellement 25 000 emplois. En 2050, et grâce à la sobriété énergétique, cette production devrait atteindre les 11 millions de tonnes d'acier (80% de recyclage avec l'acier électrique). D'où le besoin de reconvertir cette production d'acier primaire à l'hydrogène sur au moins un des deux sites industriels, avec une perte de 6000 emplois. 15000 emplois peuvent être récupérés dans le cadre de la relocalisation de la métallurgie et de l'industrie mécanique.

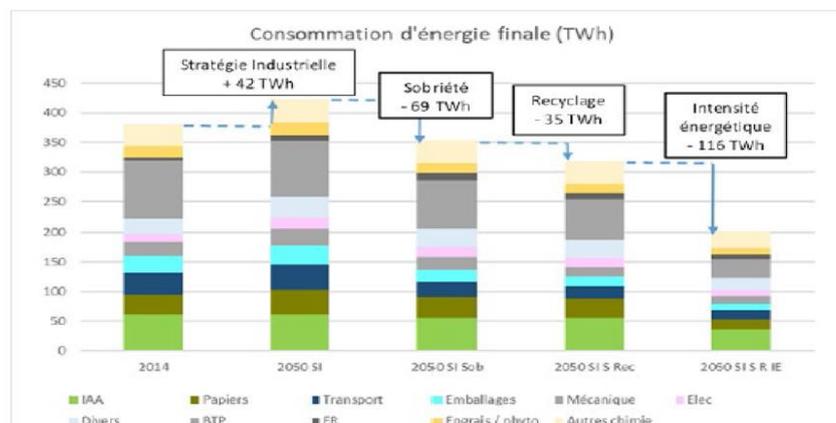


Figure 36 : Consommation d'énergie finale

Source : Rapport Négawatt

L'efficacité énergétique provient en grande partie de l'électrification des procédés industriels qui conduit à une amélioration des rendements. Par ailleurs, les technologies développées et sélectionnées sont celles présentant les moindres consommations et les moindres impacts environnementaux, comme les matériaux biosourcés, bois et isolants végétaux dans le secteur du bâtiment (95% des maisons et 50% des immeubles construits avec du bois en 2050) ou le bioéthanol dans la Chimie. L'hydrogène vert, produit à partir d'électricité issue de sources renouvelables, remplace également l'hydrogène produit par vaporeformage d'hydrocarbures et permet de décarboner les secteurs de la sidérurgie et de la chimie minérale. Dans ce scénario, la consommation d'énergie de l'industrie passe de 231 à 200 Twh en 2050. Avec la relocalisation, une demande de 42 Twh supplémentaire sera nécessaire, ce qui représente un taux de 10%.

2.3.2.4 Le secteur de terres, agriculture, sylviculture et alimentation

Dans les travaux du GIEC, le secteur de terres désigne l'agriculture, l'alimentation, la forêt, l'usage des terres et l'usage de la biomasse. Ce secteur doit assurer la neutralité carbone à l'horizon 2035. Les puits de carbone doivent compenser les émissions résiduelles du secteur

agricole qui sont essentiellement du méthane et du protoxyde d'azote. Dans le scénario Négawatt, la transition énergétique consiste à augmenter le nombre de puits de carbone à hauteur des émissions résiduelles de l'agriculture. La problématique du secteur des terres est celui de la répartition des usages comme la production de la biomasse et sa position entre l'alimentation humaine et l'alimentation animale, la production de matières, le maintien de la fertilité des sols et les besoins du maintien des écosystèmes

Le scénario Négawatt s'appuie sur le scénario Afterres 2050 réalisé par l'association Solagro depuis 2011 (mis à jour en 2016 et 2022), qui repose sur une réflexion systémique (révision du système de production et redimensionnement de l'agriculture). Ce scénario propose l'utilisation de la biomasse, des terres ainsi qu'un équilibre entre le changement climatique et la protection de la biodiversité. Les mesures se résument en quatre volets : adaptation, atténuation, séquestration et substitution. Les leviers doivent combiner à la fois des actions sur la production et des actions sur la consommation.

L'empreinte carbone de l'alimentation française est en moyenne de 1,5 $\text{teqCO}_2/\text{personne/an}$. L'enjeu est de diviser cette empreinte par 2,5 (production et consommation).

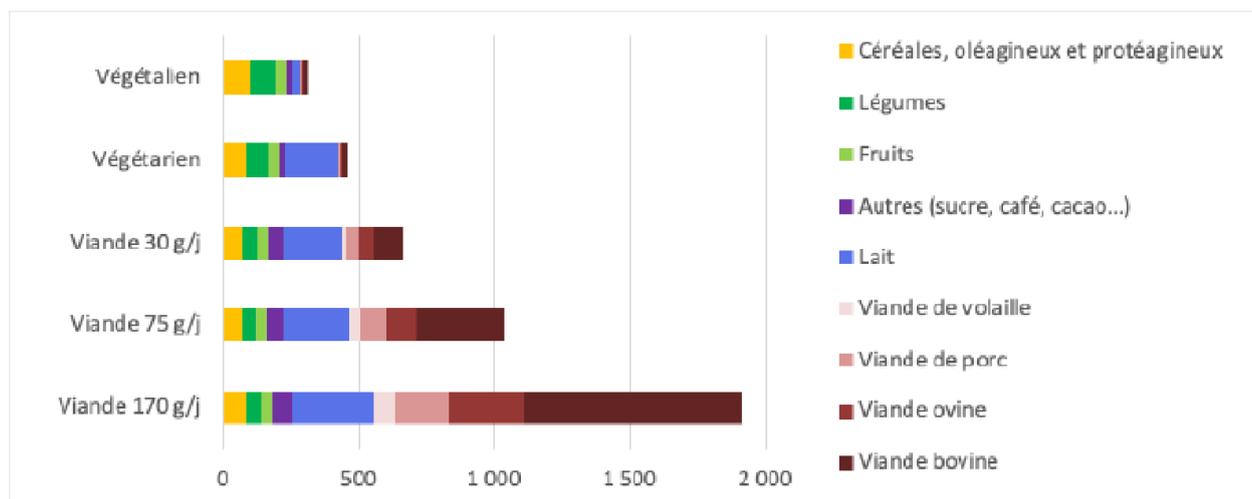


Figure 37 : Empreinte climatique de différents régimes alimentaires

Pour le volet consommation, ce sont les produits animaux qui représentent la plus grande part de l'empreinte carbone. Dans ce scénario, les gaspillages sont divisés par 2 en 2050 et le régime alimentaire est moins carné (division par 2 des protéines animales consommées). Côté

production, il est possible de diviser par 2,5 les émissions de GES. La clé des mesures d'adaptation dans ce secteur renvoie à ce que l'on appelle « design agroécologique » de la parcelle jusqu'au territoire agricole.

Les émissions de GES de l'agriculture française passeraient de 73 millions de teqCO₂ en 2019 à 64 teqCO₂ en 2030, ce qui positionne la France directement sur la trajectoire « fit for 55 » (35 millions de teqCO₂ sont attendus pour 2050). Ce scénario est rendu possible grâce : (i) à la

réduction de l'élevage (notamment bovin) due à l'évolution des régimes alimentaires, (ii) à la diminution des émissions de protoxyde d'azote suite à une meilleure maîtrise de la fertilisation azotée, (iii) à la méthanisation des déjections d'élevage

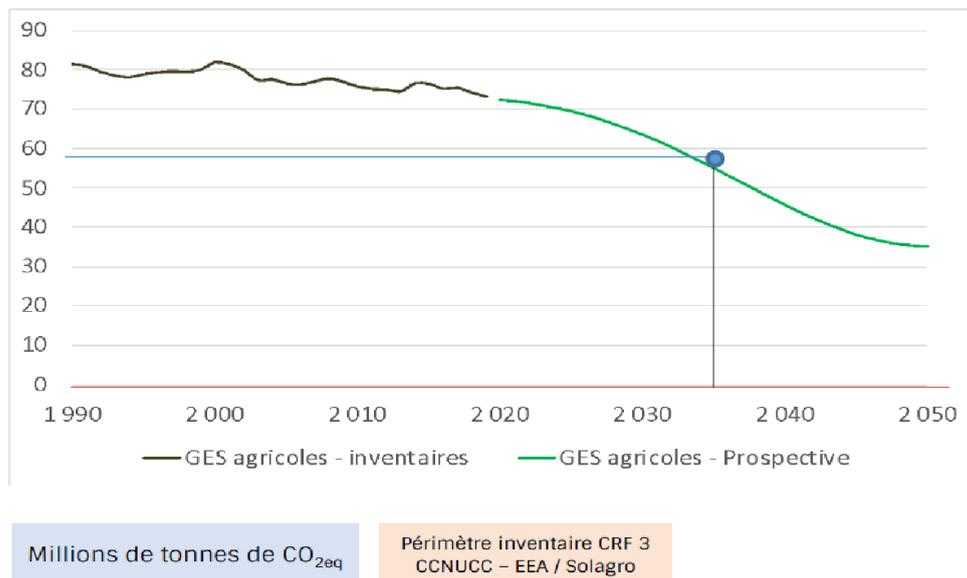


Figure 38 : Diviser par deux les émissions de GES de l'agriculture

Source : Conférence de la présentation du Scénario NégaWatt

Un gain est attendu dans le changement d'usage des terres, via deux leviers : les changements dans les pratiques agricoles d'une part, et l'application d'un principe de non-débit de carbone dans le changement d'usage des terres. Pour l'usage des terres, le changement d'usage des terres et la forêt (UTCATF), le scénario retient la division par deux de la consommation des terres agricoles et forestières d'ici 2030 avec *Zéro Artificialisation Nette* (ZAN) avant 2050. UTCATF présenterait un puits de carbone biologique qui atteindrait 60 millions de tonnes de CO₂ dans les années 2040. Fondées sur les principes de l'agroécologie, la production végétale bascule vers l'agriculture biologique ou intégrée. Le scénario propose une division par 2 de l'artificialisation des terres agricoles et prévoit une augmentation importante des surfaces forestières et des haies. Par ailleurs, la forêt est mieux gérée pour fournir plus de bois d'œuvre (papier et construction), les résidus forestiers et les produits connexes de la transformation sont valorisés pour produire de l'énergie. La méthanisation à partir de déjections animales, de résidus de culture, de couverts végétaux et d'herbe, se développe et fournit une

part conséquente des besoins en gaz renouvelables. Enfin, les importations de soja sont complètement arrêtées. Ces mesures permettent de diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole mais également de diviser par 3 les traitements phytosanitaires, par 2,5 l'utilisation d'engrais chimiques, par 2 les consommations d'eau pour l'irrigation des cultures et par 2 les consommations d'énergie.

2.3.2.5 Le secteur énergétique

Selon le scénario NégaWatt, les bioénergies représenteront 390 Twh en 2050 (soit l'équivalent de 37% de l'approvisionnement de la France en énergie primaire, le double de la production actuelle). C'est un facteur multiplicateur de deux par rapport aux scénarios qui visent la neutralité climatique. A l'échelle mondiale, la valeur médiane de ce facteur multiplicateur dans les scénarios GIEC est un facteur 3, il est de 2 pour l'AIE, il est de 1,7 pour le CE. La France devait faire nettement mieux que la moyenne mondiale, voire de la moyenne européenne. La demande de bioénergie mobilisée dans le scénario NégaWatt ne nécessite pas de cultures dédiées. Elle utilise

des coproduits ou des sous-produits issus d'autres activités (doublement de la consommation d'ici 2050). La biomasse solide passe de 140 à 200 Twh en 2050, le biogaz de 15 à 130 Twh dont 90% sont injectés dans le réseau de gaz naturel existant avec un coût très modéré pour les

infrastructures de raccordement. Concernant les biocarburants, seuls ceux de 2ème génération sont utilisés dans le scénario et sont réservés au secteur de l'aviation et aux usages matière (plastiques par exemple) en substitution aux produits pétroliers.

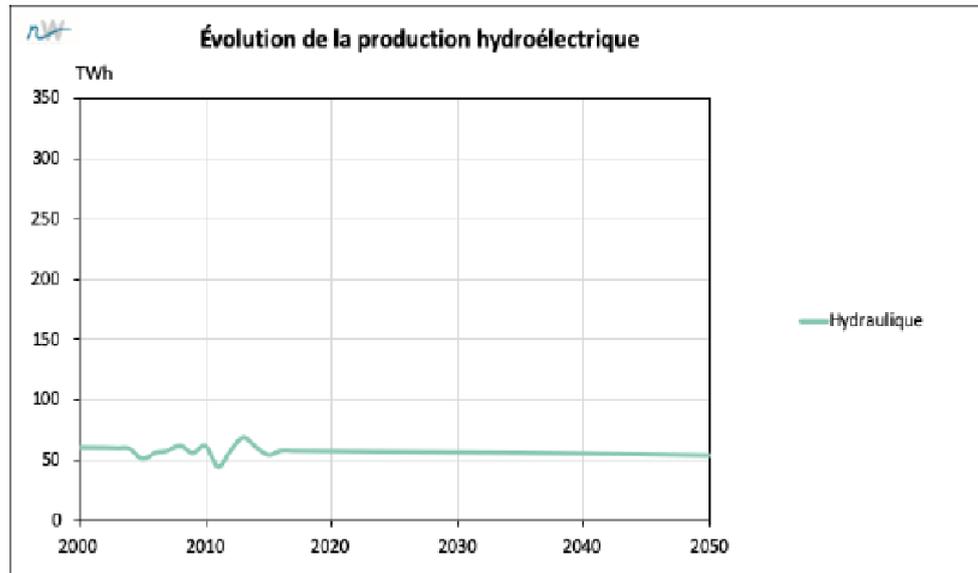


Figure 39 : Evolution de la production hydroélectrique
Source : NegaWatt

Concernant le développement des énergies renouvelables, le scénario maintient le niveau de production hydraulique en intégrant des possibles baisses de production liée au réchauffement climatique et à la modernisation des ouvrages existants (en 2023, les précipitations ont permis de reconstituer les stocks d'eau et d'augmenter la production hydraulique).

développement soutenu et régulier portant la capacité totale installée à 99 GW en 2050 (dont 61,3 GW en terrestre, 18,2 GW en offshore posé et 9,6 GW en offshore flottant). Cette capacité fournit une production totale de 305 Twh en 2050 (soit 60% de la production électrique totale, répartie en 162 Twh terrestre et 143 Twh offshore).

La capacité éolienne installée atteint un

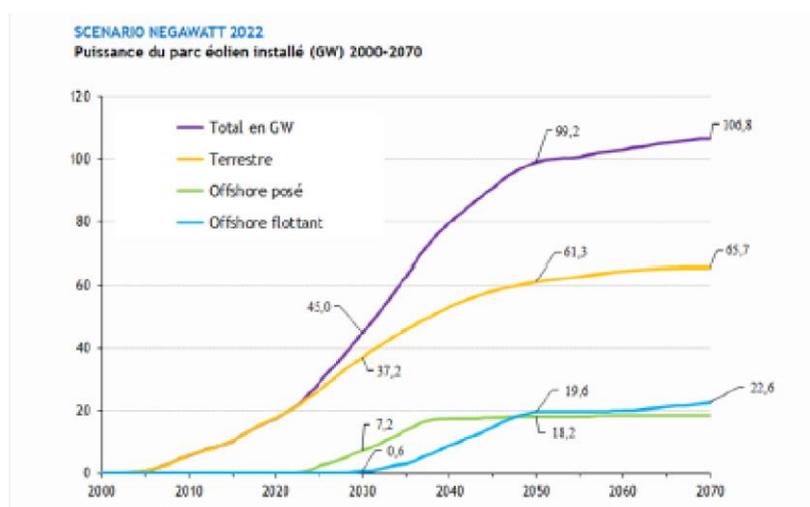


Figure 40 : Puissance éolienne installée

Le photovoltaïque connaît lui aussi un essor important. Le rythme moyen d'installation photovoltaïque est de 4,5 GW/an (2 GW en 2021). Cette capacité photovoltaïque atteint 144 GW en 2050 répartis entre petites toitures (27 GW),

grandes toitures (51 GW), ombrières de parking (12 GW) et centrales au sol sur des friches industrielles ou des terrains délaissés (44 GW). Le photovoltaïque représente environ un tiers de la production totale d'électricité en 2050.

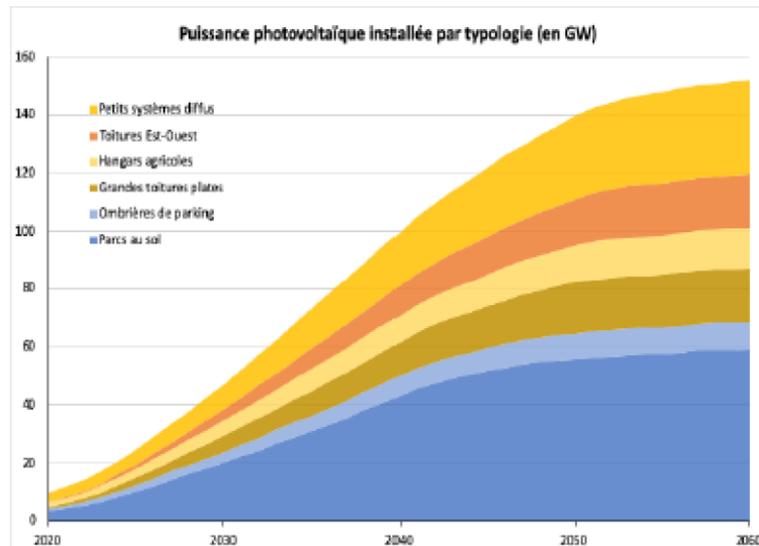


Figure 41 : Puissance photovoltaïque installé par typologie (en GW)

Le scénario Négawatt prévoit la fin du recours aux fossiles, avec une sortie progressive des énergies fossiles jusqu'en 2050. Un effort de substitution du gaz fossile par du gaz vert sera proposé. Dans le scénario Négawatt, il n'est pas envisagé la prolongation de réacteurs nucléaires déjà existants au-delà d'une durée de fonctionnement de 50 années. On envisage la

fermeture de certains déjà à 40 ans et l'abandon de tout projet de construction de nouveaux réacteurs. Un rythme de fermeture progressif des réacteurs nucléaires est proposé entre les 4e et 5e visites décennales, le dernier réacteur étant fermé en 2045. Ce rythme tient en compte des enjeux énergétiques, de sûreté nucléaire et des enjeux économiques et sociaux.

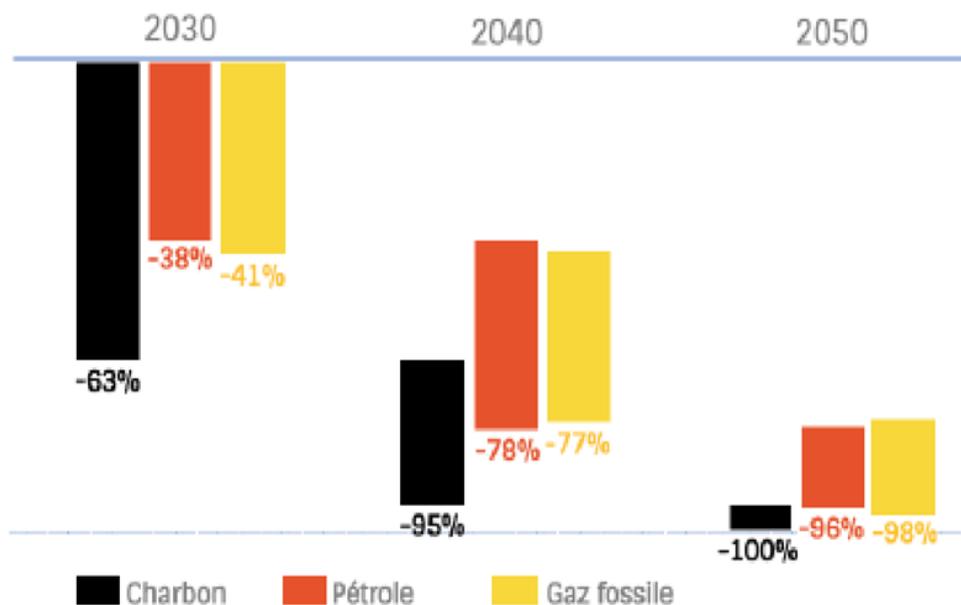


Figure 42 : Réduction de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2020

2.3.2 Bilan et impacts du scénario Négawatt

Il est possible de présenter trois types de bilans du scénario Négawatt : bilan énergie, bilan matières et bilan GES.

(i) *Dans le bilan énergie*, la consommation d'énergie est fortement réduite et un mix

énergétique à 100% renouvelable est proposé (avec quelques quantités résiduelles de fossiles pour les aspects matières). Ainsi, la baisse de la consommation d'énergie enregistrée depuis 2010 s'inscrit dans un cycle long de sobriété et d'efficacité énergétique.

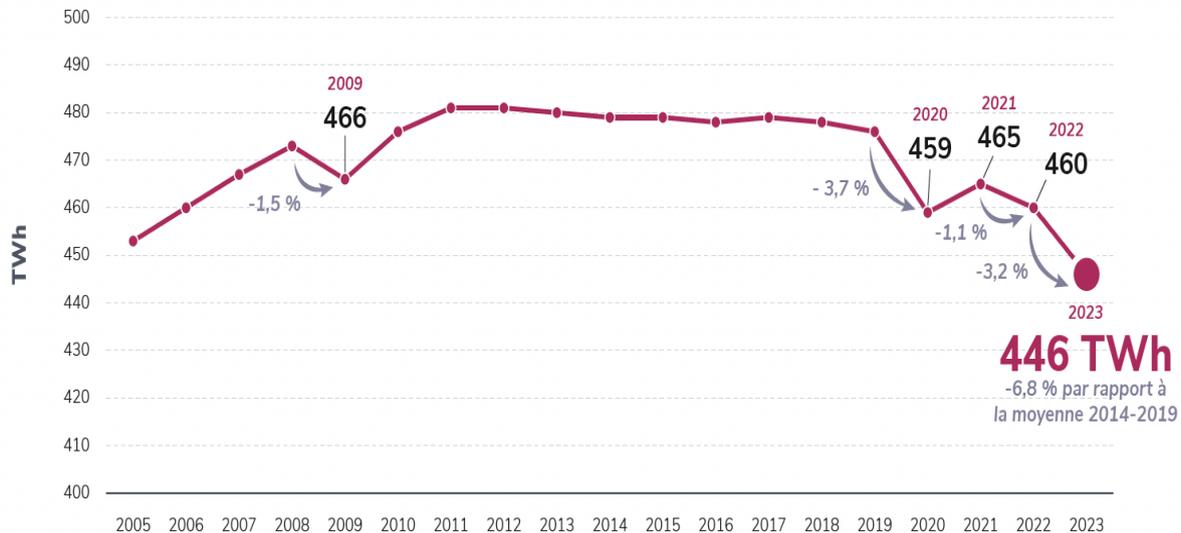


Figure 43 : Evolution de la consommation d'énergie de 2005 à 2023 corrigée des effets météorologiques

En 2050, pétrole, gaz fossile et charbon, mais également nucléaire, ont quasiment disparu du paysage énergétique français pour céder la place aux ENR (biogaz, éolien, photovoltaïque). Ce scénario s'inscrit dans l'ODD 7 Energie propre. Le mix énergétique sera de 1067 TWh en 2050 et le mix électrique de 55 TWh. Le scénario Négawatt est un scénario d'électrification important du système énergétique.

(ii) *Dans le bilan matière*, il s'agit de cerner les conséquences de nos modes de vie et de consommation sur l'environnement (empreinte environnementale). Les actions de sobriété et d'efficacité menées dans tous les secteurs permettent d'envisager une baisse globale de la consommation de matériaux. En parallèle, la substitution de matériaux non renouvelables par des matériaux biosourcés combinée à l'augmentation des taux de recyclage permet de réduire encore plus fortement la consommation des matières premières extraites de la croûte terrestre (activité des mines). Comme pour les

émissions de gaz à effet de serre, les calculs ont été faits en approche territoriale (consommations sur le territoire national) et en empreinte (consommations de matériaux liées à la consommation de biens sur le territoire). Les résultats proviennent des calculs en empreinte, qui reflètent davantage l'impact de nos modes de vie et de consommation. Ils supposent des taux de recyclage équivalents en France et dans le reste du monde.

(iii) *Dans le bilan GES*, les actions de sobriété et d'efficacité menées dans tous les secteurs d'activités conduisent à une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'une des nouveautés du scénario Négawatt 2022, c'est que l'évaluation des émissions GES se fait via une approche en termes d'empreinte environnementale, c'est-à-dire en incluant les émissions liées aux biens importés. Les résultats diffèrent en fonction du scénario retenu pour le reste du monde.

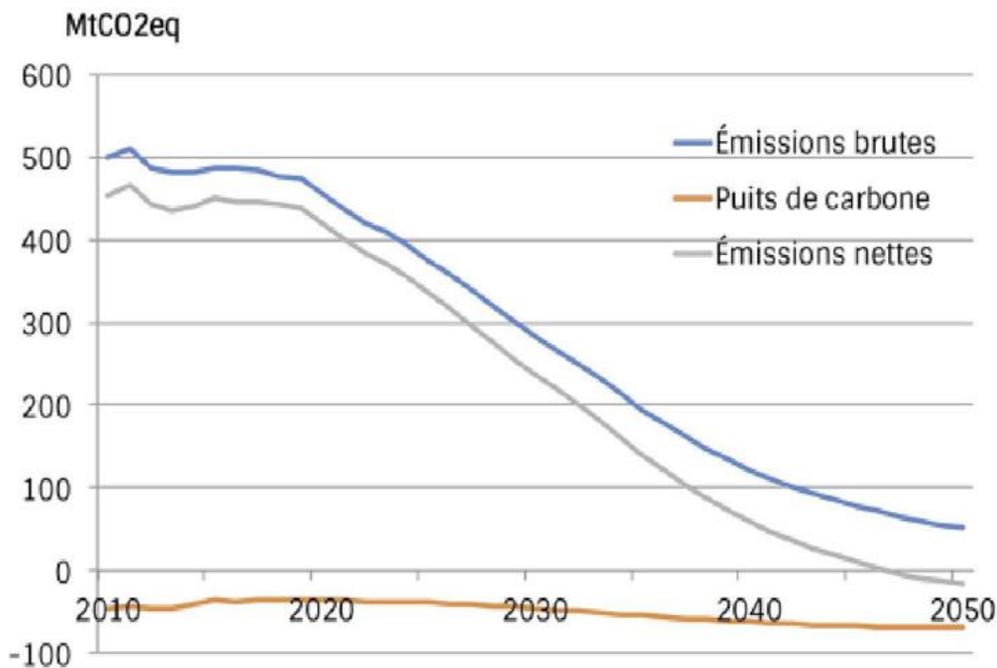


Figure 44 : Evolution des émissions des CO2 scénario NègaWatt

Source : NègaWatt

En 2015, les GES étaient constitués en majorité par le méthane en provenance du secteur agricole notamment liés à l'élevage. En plus de ces émissions brutes, il y a les puits carbonés. En additionnant les émissions brutes avec les puits carbonés, on obtient les émissions nettes. Ces émissions nettes deviennent nulles en 2047. L'empreinte carbone cumule les émissions nationales et le solde importateur, en tenant compte des produits agricoles et industriels importés et exportés ; de l'énergie carbonée importée ; du transport de marchandises dans les pays d'origine. Le mode de calcul est basé sur des

flux physiques qui diffèrent de l'approche économique et du contenu carbone de production des pays qui exportent vers la France. La neutralité carbone est atteinte en 2047 pour les émissions territoriales (+ les sources internationales) ; les puits absorbent davantage que ce qui est émis. Si le monde suit une trajectoire similaire au scénario NègaWatt, l'absorption des puits est égale à l'empreinte carbone en 2050. Le cumul des émissions en empreinte est compatible avec le scénario RCP 1.9 du GIEC qui permet de limiter l'élévation de température à 1,5 °C.

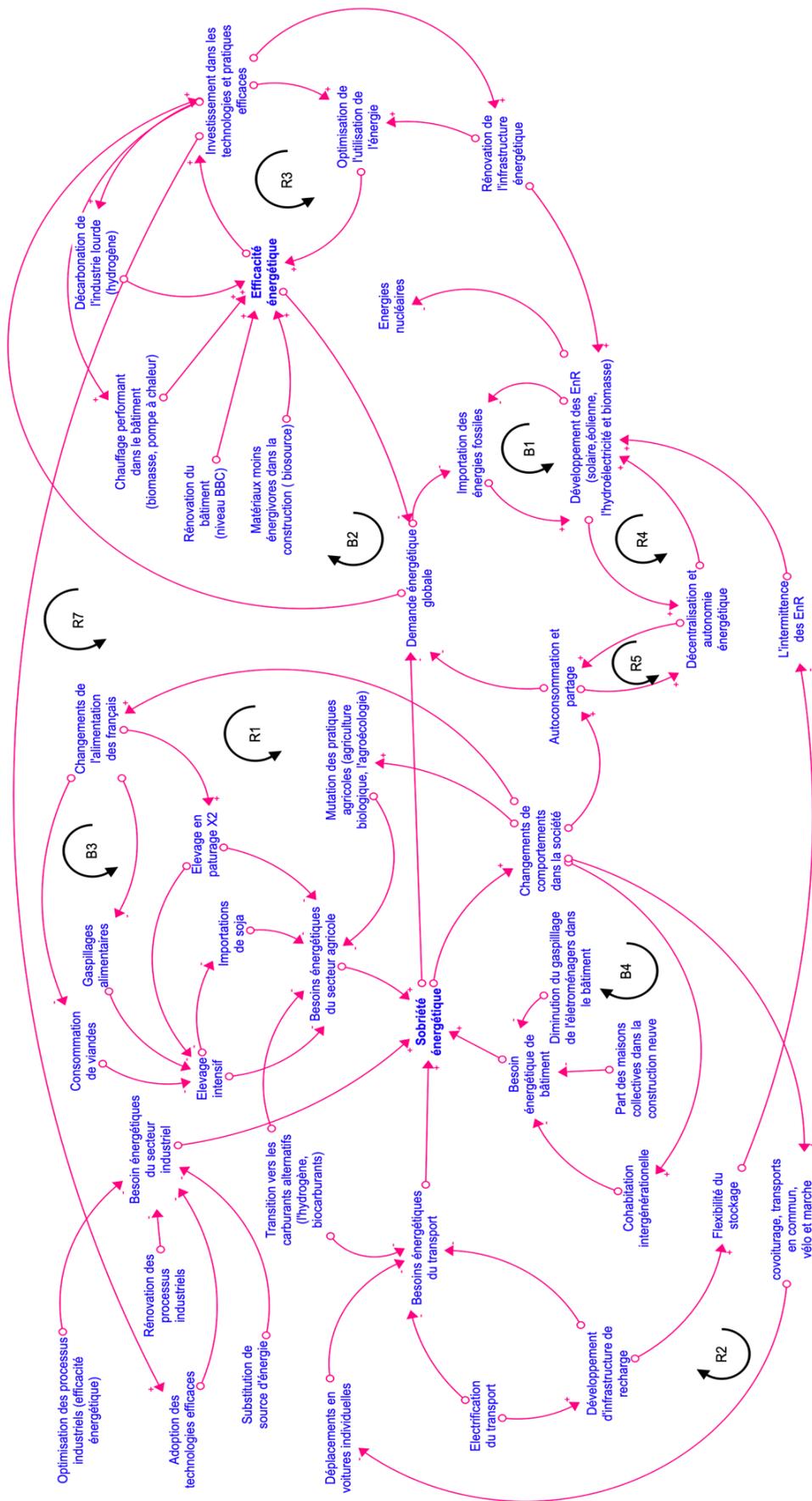


Figure 45 : Le CLD du scénario NegaWatt

2.4 Les scénarios du Shift Project

Le Shift Project, Think Tank dédié à une économie décarbonée fondée en 2010, produit des analyses rigoureuses et propose des solutions innovantes pour la transition énergétique en Europe. Il influence le débat public et les politiques énergétiques et climatiques par des événements et campagnes d'influence. Le Shift Project a initié un Plan de Transformation de l'Économie Française (PTEF) en 2020, visant à décarboner l'économie secteur par secteur. Ce plan repose sur quatre piliers : une approche globale et systémique, respectant les lois physiques et économiques ; une focalisation sur les ressources peu abondantes, en accordant une attention particulière à l'emploi ; des propositions pragmatiques et réalisables pour une décarbonation cohérente, visant une réduction des émissions de GES de 5 % par an ; ne pas compter sur la croissance économique ni sur les évolutions technologiques non prouvées. Le PTEF est organisé en quatre rubriques : les secteurs usages ; les secteurs serviciels ; les secteurs amont et les secteurs transversaux. En réponse à la précarité énergétique touchant entre 2,6 et 5,1 millions de foyers en France (The Shift Project, 2021), le Shift

Project a proposé d'appliquer son plan de transformation de l'économie française (PTEF) au secteur résidentiel afin de faciliter la transition des ménages (The Shift Project, 2022).

2.4.1 Description des scénarios

Les propositions formulées par The Shift Project, pour faire face à la crise énergétique dans le secteur résidentiel sont structurées autour de quatre axes.

Axe 1: Faire preuve de sobriété dans les constructions neuves

Cet axe propose une décarbonation des logements neufs grâce aux seuils d'émissions de la réglementation RE2020, qui modernise l'industrie du bâtiment vers un avenir bas carbone. Cependant, la quantité de constructions neuves, source majeure d'artificialisation des sols et d'émissions de GES, doit être reconsidérée. Le PTEF recommande une diminution progressive des nouvelles constructions, en accord avec la démographie, et la conversion des logements vacants en résidences principales, nécessitant des mises à niveau et une évolution de la répartition de l'emploi.

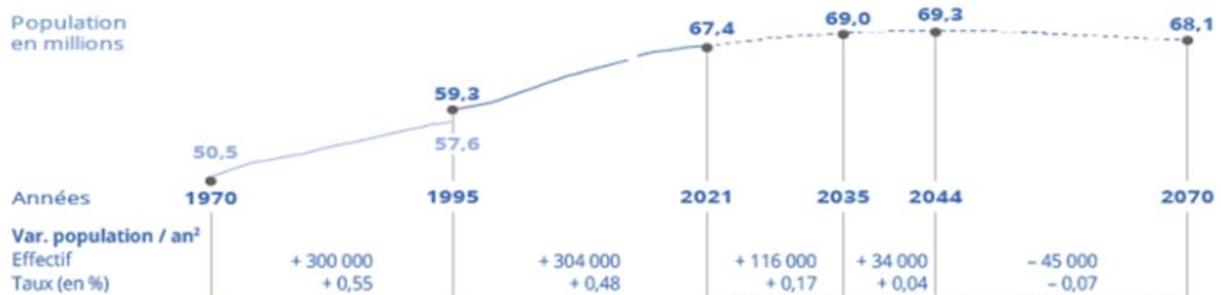


Figure 46 : Evolution de la population de 1970 à 2070

Source : INSEE (2021)

Pour parvenir à son objectif de zéro artificialisation nette (ZAN), le PTEF propose de diminuer la construction de maisons individuelles d'un tiers par rapport à la production actuelle, principalement les maisons secondaires mais en conservant la production actuelle de logements collectifs. Dans cet axe, trois scénarios sont proposés pour analyser l'évolution de la construction neuve :

Le scénario bas est basé sur la version initiale du PTEF, prévoit une réduction volontaire de la construction neuve en changeant les dynamiques

géographiques de l'emploi. Le rythme de construction de logements collectifs est maintenu, ensuite, il diminue parallèlement à celui des maisons individuelles, suivant la courbe de croissance des ménages, laquelle devrait ralentir en raison de la baisse démographique.

Le scénario médian envisage une réduction modérée et progressive de la construction neuve, maintenant le rythme actuel jusqu'en 2030. Ensuite, la production de logements commence à diminuer en ligne avec la baisse démographique prévue. En 2050, on construit environ 250 000

nouveaux logements par an, dont seulement un quart sont des maisons individuelles. Cette trajectoire est plus conservatrice que le scénario

de la SNBC, qui prévoit 210 000 logements neufs par an en 2050.

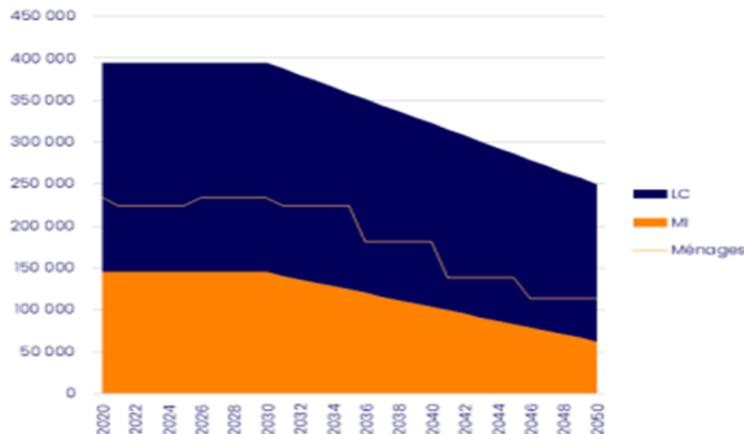


Figure 47 : Scénario Médian utilisé dans le PTEF pour estimer le parc de logements en 2050 basé sur la production actuelle

Source : *The Shift Project*

Le scénario haut maintient le rythme actuel de construction neuve afin de préserver les emplois liés au secteur résidentiel. Bien qu'il entraîne des impacts environnementaux supplémentaires, Jusqu'en 2030, la production de logements reste supérieure à la création de nouveaux ménages, ce qui facilite la migration vers les zones plus attractives, entraînant des logements vacants.

Toutefois, à partir de 2030, le plan prévoit une réindustrialisation et un renforcement du secteur agricole pour revitaliser les zones rurales en déclin démographique. Cette stratégie pourrait potentiellement inverser la tendance, en réduisant à long terme le besoin annuel de nouveaux logements pour les résidences principales par rapport au nombre de nouveaux ménages.

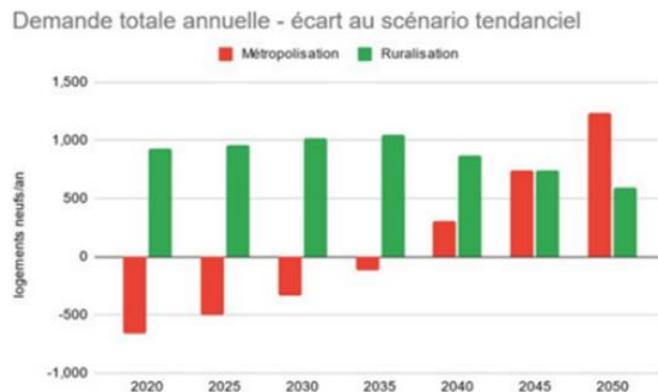


Figure 48 : Besoins en logements neufs supplémentaires par rapport à un scénario tendanciel pour différents scénarii

Source ; *The Shift Project*

Axe 2 : Massifier la rénovation énergétique globale et performante

La rénovation des logements est essentielle pour décarboner l'économie. Le PTEF propose de rénover rapidement les habitations en utilisant des enveloppes performantes et des énergies renouvelables. L'objectif est de rénover un million

de logements par an en dix ans, ciblant en priorité les plus énergivores. Pour les maisons individuelles, il est nécessaire d'imposer des rénovations obligatoires en cas de mauvais résultats au Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), sous condition d'une offre locale satisfaisante. Pour les logements collectifs,

le décret "Travaux embarqués" pourrait être durci pour limiter les dérogations et améliorer les contrôles. La réduction de la consommation d'eau chaude domestique peut également être obtenue en redimensionnant les ballons et en utilisant des systèmes locaux d'énergie renouvelable, tels que

des chauffe-eaux thermodynamiques. La rénovation doit transformer les étiquettes énergétiques DPE supérieures à C en A, B ou C. Ce processus nécessite des compétences actuellement insuffisantes et demande une action organisée pour être réaliste d'ici 2050.

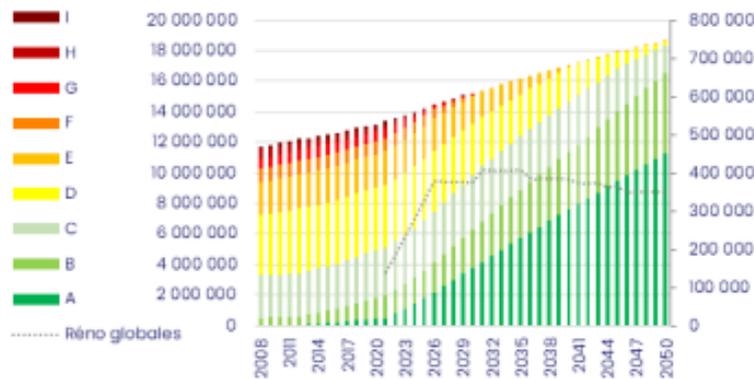


Figure 49 : Évolution du parc de logements collectifs français par étiquette de performance énergétique

Source : *The Shift Project*

Axe 3 : Décarboner la chaleur

Cet axe souligne l'urgence de promouvoir la substitution des énergies fossiles dans les logements existants. Afin de faciliter une transition rapide vers les énergies décarbonées pour le chauffage. Le PTEF prévoit de remplacer

tous les chauffages fossiles par des sources bas carbone, en raccordant 5 millions de logements collectifs à des réseaux de chaleur et en installant des pompes à chaleur pour plus de 10 millions de logements. La sobriété énergétique reste un levier secondaire mais important.

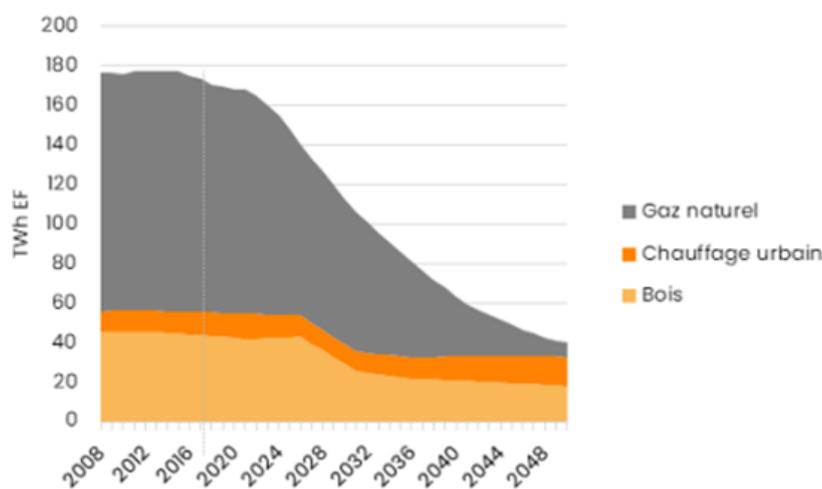


Figure 50: Consommation de chauffage par système

Source: *The Shift Project*

À l'horizon 2050, on observe une réduction de l'utilisation du bois comme source d'énergie pour le chauffage, ainsi qu'une diminution générale de la consommation énergétique liée au chauffage

grâce à des efforts d'isolation substantiels. Les énergies fossiles ne seront plus utilisées pour chauffer les logements, à l'exception de quelques habitations collectives alimentées au gaz et d'une

part résiduelle de fossile dans les réseaux de chaleur. Le biogaz pourrait combler cette demande.

Axe 4 : Mobiliser le bâtiment comme puits de carbone

Cet axe propose de suivre une trajectoire de décarbonation de la construction, similaire à la RE 2020, jusqu'en 2050. Il préconise de réduire l'utilisation de matériaux à forte empreinte carbone par unité de surface et d'augmenter

l'usage de matériaux à faible empreinte carbone, tels que les matériaux biosourcés. L'intégration des isolants biosourcés dans la construction permettrait aux bâtiments de stocker du carbone de manière durable, en raison de leur longue durée de vie. À moyen terme, il propose de mettre en place des mesures réglementaires pour contrôler les produits mis sur le marché, favorisant ainsi la rénovation des bâtiments pour renforcer les puits de carbone, tout en respectant le rythme nécessaire des rénovations.

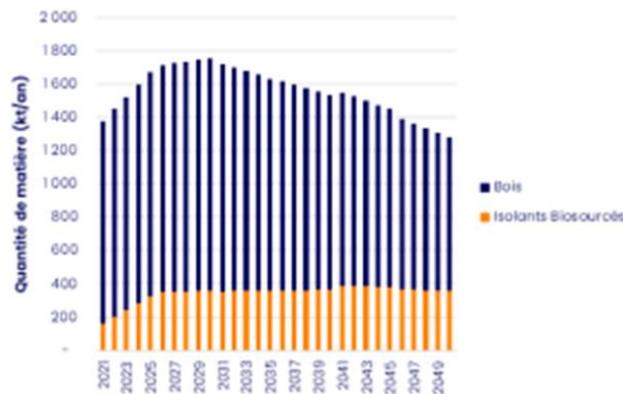


Figure 51 : Consommation de matière biosourcée des logements neufs et rénovés

Source : The Shift Project

2.4.2 Les enseignements des scénarios du Shift Project

ENS 1 : Réduction de la construction neuve

A l'horizon 2050, on devrait observer une baisse de 75% d'impacts énergie – climat grâce à une réduction des surfaces neuves, la décarbonation des processus industriels, et le remplacement partiel de matériaux à fortes émissions.

ENS 2 : Sensibilisation et accompagnement - rôles des ménages et de l'État

Rôle des ménages : La décarbonation des logements nécessite une prise de conscience accrue des ménages concernant l'impact énergétique de leurs habitations. Une compréhension approfondie du concept de sobriété énergétique, accompagnée de pratiques économes en énergie, contribuera efficacement à limiter l'effet rebond.

Rôle de l'État : Pour réussir cette transition, l'État doit intensifier ses efforts d'accompagnement et de communication sur la rénovation énergétique. Cela inclut l'augmentation des aides financières, la simplification des processus d'aide, et l'accès à des

crédits adaptés, surtout pour les ménages modestes, afin de financer les rénovations nécessaires.

ENS 3 : La complexité de l'encadrement de la construction neuve

La gestion de la construction neuve est particulièrement complexe en raison du caractère essentiel du logement, reconnu comme un droit fondamental. La décohabitation et l'augmentation des surfaces moyennes des logements ont amplifié la demande en logement, ce qui, bien que bénéfique pour la qualité de vie, augmente les volumes à chauffer, en particulier dans les logements anciens.

La production de logements reste problématique en raison de déficits en logements collectifs en zones tendues. Le gouvernement tente de relancer la production, notamment via des mécanismes comme la loi Pinel et le dispositif Denormandie, mais des difficultés persistent, telles que l'augmentation du nombre de personnes sans domicile et les logements indécents. La réflexion sur l'artificialisation des sols, exacerbée par la construction de maisons individuelles, devient

centrale pour atteindre les objectifs de résilience

territoriale.

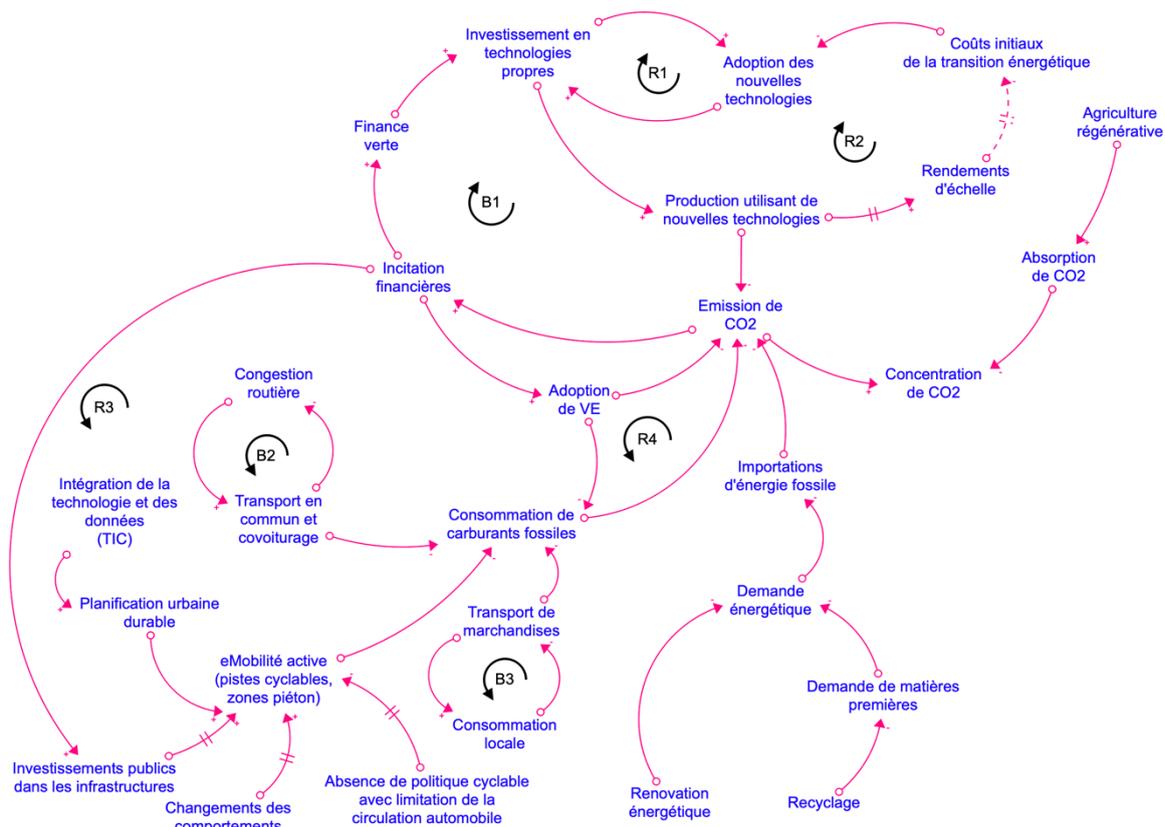


Figure 52 : Le CLD du Shift Project

3. Analyse comparative des scénarios énergétiques pour la France

Au regard de de la description des scénarii énergétiques pour 2050 de l'association Négawatt, du gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité (RTE), de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et l'association Shift Project, il est possible d'identifier les différents enjeux et leviers d'action. L'analyse portera principalement sur les aspects de convergence et de divergence entre les scénarios des différentes institutions ainsi qu'une comparaison quantitative de la consommation d'énergie, des émissions des GES, des taux d'énergies renouvelables dans le mix énergétique 2050 et des estimations des investissements de la transition énergétique. Les nombreux scénarios impliquent des disparités entre les approches méthodologiques, les hypothèses et les éléments d'entrée de ces études prospectives ainsi que les résultats du bilan du mix énergétique.

3.1 Les points communs des différents scénarios

Bien que contrastés et portés par des acteurs différents, les scénarios énergétiques proposés par RTE, l'ADEME, Négawatt et The Shift Project ont plusieurs points communs :

- (i) L'ensemble des quatre scénarios énergétiques sont des études prospectives qui cadrent avec les objectifs nationaux de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Cette stratégie définit la trajectoire française pour l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 et la diminution de l'empreinte carbone de la consommation des Français, en respectant à moyen terme les budgets carbonés. Dans sa version révisée 2020, cet objectif de réduction a été rehaussé par rapport à la version 2014, soit une réduction de presque 80% de ces émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990.
- (ii) Au regard des dates de publication des rapports des scénarios des quatre entités, nous retenons que ces études ont coïncidé, en totalité, avec le contexte d'élection présidentielle de 2022, pour nourrir le débat et éclairer les décideurs politiques sur les éléments de réflexion nécessaires à la mise en œuvre d'une stratégie de

transition compatible avec les objectifs de décarbonation.

(iii) Les périmètres temporels de la projection des modèles énergétiques, concernent des trajectoires à long terme, au-delà de 30 ans, allant à l'horizon 2050 et plus (le scénario NÉgaWATT est allé pour certains sujets critiques comme la rareté des ressources métaux jusqu'à l'horizon 2100). Les périmètres spatiaux s'appuient sur l'échelle nationale et non régionale, à l'exception du scénario RTE qui a simulé le système électrique à l'échelle européenne.

(iv) Les quatre rapports des études prospectives de la transition énergétique ont fait l'objet de communication et de vulgarisation, par des conférences en plénières, en vue d'apporter des éclaircissements sur les études réalisées (il s'agit de systèmes énergétiques très complexes).

(v) Tous ont une approche globale basée sur le triptyque (sobriété, efficacité et renouvelables). Aussi les bilans à l'horizon 2050 ont abordé les retombées économiques en termes de coûts, d'investissements, d'emploi ou d'autres externalités.

(vi) Les différentes études ont cherché à rendre compte des impacts environnementaux dans le cadre de la réduction globale de l'empreinte carbone et des impacts sociétaux en termes de réduction des inégalités, de la fin de la pauvreté et de la réduction de la vulnérabilité liée aux consommations d'énergie.

(vii) Toutes les études ont inscrit leur démarche prospective en s'appuyant sur le suivi de la consommation d'énergie globale et en détail selon les différents secteurs (bâtiment, industrie, agriculture, transport...).

(viii) Le mix énergétique retenu dans le bilan des études prospectives s'appuie sur combinaison entre les filières EnR, nucléaire, électrification des usages, vecteur hydrogène, capture et stockage de carbone (CCS), etc.

(ix) La construction de logements (résidentiel ou tertiaire) et la rénovation des bâtiments sont omniprésentes dans tous les scénarios. Il est mis l'accent sur la nécessité d'une rénovation thermique de la quasi-totalité du parc de logements existant en 2020. Cette rénovation doit se faire à un rythme accéléré et soutenue, portée à un niveau BBC (la consommation annuelle

d'énergie primaire du logement ne doit pas dépasser 80 kWhEP/m²/an) ou plus performant. Le parc de 2050 doit être complètement rénové est différent de celui de 2020. Il est prévu d'atteindre entre 600 000 et 1 million de rénovations performantes par an d'ici à 2030.

(x) Dans tous les scénarios, c'est au secteur des transports qu'est demandé de faire les plus gros efforts en matière de sobriété et d'efficacité ; viennent ensuite, et à parts égales, la réindustrialisation et le bâtiment.

(xi) Enfin, tous les scénarios sont d'accord sur le fait de sortir rapidement des énergies fossiles et d'agir concrètement en proposant de véritables transformations du système énergétique.

3.2 Les points de divergence des différents scénarios

Si les quatre études prospectives ont bien pour objectif d'enrichir le débat politique et d'aider les décideurs politiques à s'engager sur la voie du mix énergétique, les ambitions et les enjeux diffèrent d'une institution à l'autre :

(i) RTE s'est intéressé à mesurer l'impact de la transition énergétique sur le réseau électrique, l'ADEME avait pour tâche de définir la stratégie nationale de la transition énergétique, NÉgaWatt aspirait à sensibiliser l'opinion publique (sobriété énergétique) et les décideurs dans un contexte d'élection présidentielle, The Shift Project souhaitait proposer un guide ou un référentiel méthodologique pour toute partie intéressée souhaitant connaître la trajectoire à suivre pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et contenir le réchauffement climatique à moins de 2°C.

(ii) Les scénarios se sont focalisés sur l'étude de la demande en énergie et non sur l'offre, intégrant tous les secteurs et l'ensemble du mix énergétique, seule RTE s'est concentré sur le système électrique.

(iii) Un contraste existe en ce qui concerne la part du nucléaire dans le mix énergétique : pour NÉgaWatt, les recommandations restent favorables pour l'abandon du nucléaire. La fermeture des centrales est envisagée pour 2045, que ce soient de petites ou de grosses centrales. Les SMR et EPR sont catégoriquement repoussées.

(iv) Contrairement aux scénarios ADEME, les scénarios NégaWatt, The Shift Project et de RTE retiennent des niveaux de consommations d'électricité très supérieurs à ceux de l'année 2015 (année de référence) : 630 TWh en 2050 contre 470 TWh en 2015.

(v) La comptabilisation des émissions importées associées à la production de biens d'équipements et de biens de consommation à l'étranger, est l'une des contributions majeures des scénarios NégaWatt, notamment en ce qui concerne la partie empreinte carbone et les leviers des options de relocalisation de l'industrie. L'objectif final est de réduire les émissions de GES, imputables au citoyen Français.

(vi) Excepté NégaWatt, les scénarios ADEME, RTE et du Shift Project n'ont pas ou peu abordé la question critique liée à la rareté des ressources en matières premières dans les programmes de transition énergétique. Nous citerons à titre d'exemple celui du lithium utilisé pour les batteries des voitures électriques. Un scénario NégaMat a été associé au scénario NégaWatt. Destiné aux matériaux et matières premières, il permet d'identifier assez finement les leviers d'action pour réduire l'extraction de ces matières (notamment l'économie circulaire).

(vii) Le scénario NégaWatt a évalué et quantifié à long terme certaines évolutions et tendances allant au-delà de 2050, soit à l'horizon 2070 (certaines à l'horizon 2100) et ce, pour élucider les fortes incertitudes sur l'évolution des écosystèmes naturels sous la contrainte d'un réchauffement climatique et de raréfaction des ressources naturelles (exemple du lithium).

(viii) Seul The Shift Project aborde dans son étude prospective les deux éléments critiques qui influencent significativement la transition énergétique, nous citerons la demande de pointe en matière d'énergie (équilibre instantané entre l'offre et la demande d'électricité sur le réseau) et l'impact de l'ensemble des transformations sur l'emploi pour les différents secteurs (industrie, bâtiment, agriculture...)

(ix) L'ensemble des institutions ont parié sur les nouvelles technologies pour forger leurs scénarios prospectifs, or ces dernières présentent beaucoup d'incertitude sur leurs maturités, seul The Shift

Project a opté pour une approche prudente, cherchant à faire le tri entre les différentes solutions innovantes et leurs potentiels (notamment l'enjeu du numérique).

(x) Enfin, un focus a été effectué par NégaWatt sur les stratégies industrielles et les évolutions des filières qui étaient en décroissance en France telles que la papèterie, la mécanique et la métallurgie pour les redéployer dans une perspective de transition énergétique.

(xi) Les trajectoires de réduction de la consommation (- 40%) à l'horizon 2050 ont été retenues par les quatre institutions (à l'exception du scénario Pari réparateur de l'ADEME). La consommation d'énergie passe de 1600 TWh à 930 TWh en 2050. En termes de capacité de production du mix énergétique installé à l'horizon 2050, cette dernière sera à dominante énergies renouvelables avec au moins 40% d'ENR en 2050 pour le Shift Project, 50 % pour RTE, 70 % pour l'ADEME et 100 % pour NégaWatt.

(xii) L'hypothèse de l'augmentation de la consommation électrique a été retenue par l'ensemble des institutions. Cette consommation va compenser la sortie de la consommation de l'énergie primaire fossile. Néanmoins, les scénarios ne prennent pas en compte les mesures d'accompagnement visant à redimensionner les réseaux électriques et à augmenter la capacité de stockage de ladite énergie.

(xiii) Pour la mobilité, la substitution des véhicules thermiques fonctionnant avec l'énergie fossile, par les véhicules 100 % électriques, occupe une place de choix, avec 67 % des voitures en 2050, ce qui représente une réduction de 60 % de la consommation moyenne des voitures d'ici 2050, avec un peu moins de véhicules utilisant le biogaz et l'hydrogène. Cependant et à l'exception du scénario NégaWatt, les autres institutions ne reviennent pas sur les leviers à engager pour faire face à la pression sur les ressources, notamment les métaux rares nécessaires à l'électrification du parc automobile français à l'horizon 2050. Le tableau ci-dessous reprend la réduction des émissions de GES et les conséquences du mix énergétique à l'horizon 2050 pour les quatre institutions.

Tableau 1 : Comparaison des scénarios ADEME, RTE, NégaWatt et Shift Project

Scénarios de transitions	ADEME	RTE	NégaWatt	shift Project
			 NégaWatt	
Présentation	L'Agence De la maîtrise de l'énergie est un EPIC	Gestionnaire du réseau public de transport d'électricité haute tension, entreprise de EDF	Association des professionnels de l'énergie et des citoyens	Association avec le soutien des entités économiques et des partenaires publiques
Date de 21 publications	30 novembre 2021	25 octobre 2021	26 octobre 2021	26 janvier 2021
Intitulé du rapport	« Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat »	« Futurs énergétiques 2050 »	« La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale. »	Le Plan de Transformation Économique de la France (PTEF)
Objectifs	Dessiner la trajectoire pour conduire la France vers la neutralité carbone en 2050			
Documents de référence	Basé sur le rapport du GIEC de 2018 + SNBC	SNBC	Basé sur le rapport du GIEC de 2018 + SNBC	SNBC
Nombre de collaborateurs mobilisés pour l'étude	100	40	12	60
Temps alloués pour l'étude prospective	Deux (02) ans	02 ans	18 mois	18 mois
Nombres de scénarios prospectifs	Quatre (04) Scénarios <ul style="list-style-type: none"> ● Scénario tendanciel ● Scénario S1 « Génération frugale » ● Scénario S2 « Coopération territoriale » ● Scénario S3 « Technologies vertes » ● Scénario S4 « Pari réparateur » 	Six (06) scénarios 06 <ul style="list-style-type: none"> ● 3 scénarios avec mix 100 % ENR Scénario M0 : 100 % ENR Scénario M1 : « répartition diffuse » Scénario M23 : « ENR grands parcs » 3 scénarios avec mix « EnR + nucléaire » Scénario N 1 : 26 % d'électricité dans le mix électrique de 2050 avec 8 EPR (1 EPR chaque 05 ans)	Un (01) seul scénario avec vision systémique. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Le scénario NégaWatt a été accouplé au scénario NégaMat (épuiement des ressources naturelles, et notamment des matériaux) ✓ ainsi que le scénario Afterres 2050 (transition agricole, sylvicole et alimentaire) 	Un (01) seul scénario avec vision systémique.

		<p>Scénario N2 : Nucléaire atteint 36 % du mix en 2050 avec 14 EPR (1 EPR chaque 03 ans)</p> <p>Scénario N03 : 50 % de nucléaire dans le mix en 2050, avec maintien des réacteurs après 60 ans d'exploitation avec 14 EPR2 et de quelques petits réacteurs modulaires (SMR).</p>		
<p><u>Méthodologie de l'étude prospective</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Évaluation de l'empreinte carbone n'est pas prise en compte dans ces scénarii, mais planifiée dans la deuxième phase de l'étude • Traite la triptyque sobriété, efficacité énergétique et ENR • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Evaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; • Modélise en détail que la partie concernée par les changements liés à l'électricité de notre système économique, • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité l'agriculture, des forêts, de l'industrie, ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Evaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; • Traite la triptyque sobriété, efficacité énergétique et ENR • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur et électricité). 	<ul style="list-style-type: none"> • C'est une démarche qui prend en compte les interactions des individus avec les flux physiques en tant qu'utilisateurs final de biens et de services en détaillant les modes de vie d'une part et comme producteurs de biens de services et donc de l'emploi d'autre part. • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, ...

	énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur et électricité)			
<u>L'étendue de l'étude</u>	La France métropolitaine			
<u>Émissions de GES</u>	Réduction d'un facteur six ou sept, par rapport à aujourd'hui, dans les trois premiers scénarios, d'un facteur quatre, dans le quatrième	Horizon 2030 : 25 Mt CO ₂ eq /an d'empreinte carbone évitées grâce à la réindustrialisation 900 Mt CO ₂ eq évitées sur la trajectoire 2020-2050 Division par 6 des émissions de CO ₂ produites sur le sol français	Réduire suffisamment les émissions de gaz à effet de serre, de 450 Mt CO ₂ eq Actuellement à environ 50 Mt CO ₂ eq à partir de 2047 Les émissions (CO ₂) liées à la consommation d'énergie sont divisées par 28. Les émissions de (CH ₄), provenant Essentiellement du secteur Agricole, sont divisées par 3. L'ensemble de nos émissions de gaz à effet de serre est divisé par près de 9.	Réduction d'un facteur de six rapports à aujourd'hui, impose un rythme de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'environ 5 % par an en moyenne
<u>Consommation d'énergies</u>	- 60 % de consommation d'énergie finale par rapport à 2015 dans le scénario le plus sobre, - 25 % dans le scénario le moins contraignant.	La consommation d'énergie doit baisser de 40 % en 2050 pour atteindre 930 TWh	La consommation d'énergie primaire est divisée par trois d'ici 2050 et la production d'énergies renouvelables est multipliée par 3.	- 60 % de consommation d'énergie finale par rapport à 2019
<u>Production d'électricité à l'horizon 2050</u>	?	<i>La production d'électricité décarbonée doit croître de 35 % à l'horizon 2050.</i>	IL y aura un équilibre entre La production et la consommation d'électricité.	x5 production d'électricité d'ici 2050 soit 610 TWh
<u>Taux % d'énergies</u>	70 à 88 % 5,5 à 8,9 GW	100%	96% le parc terrestre est	Hydraulique 22 GW pour 63 twh.

<u>renouvelables dans le mix énergétique 2050</u>	De plus par an en moyenne. C'est l'augmentation des capacités renouvelables électriques pour la période 2020-2050.		multiplié par 2,1 par rapport à 2020, pour atteindre un total d'environ 19 000 éoliennes En mer, un peu plus de 3 000 éoliennes	180 TWh EN 1/3 d'éolien en mer, 1/3 d'éolien terrestre et 1/3 de PVR avec
<u>Estimation des investissements de la transition énergétique</u>	Pour l'atteinte des objectifs nationaux de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) un investissement annuel supplémentaire devrait se situer entre 43 et 62 milliards € (soit un coût total compris entre 63 et 82 milliards €/an) –ADEME 2015	RTE a chiffré à 10 milliards d'euros par an la différence de coût entre les scénarios M23 et N2. Les scénarios 100 % renouvelables impliquent aussi des « paris technologiques lourds » — mais ce qui serait aussi le cas pour la prolongation du fonctionnement des centrales nucléaires existantes au-delà de soixante ans et la construction de SMR.	En se référant aux travaux du HLEG (High Level European Group) qui a estimé coût de la transition énergétique à l'échelle de l'Europe entre 2021 et 2030 à 200 milliard d'euros soit 11 200 milliards €/an, Les investissements (publics et privés) actuellement tournés vers la transition énergétique étant évalués à 20 milliards € par an à l'horizon 2030 en se basant sur son PIB.	ND

Conclusion

Face au réchauffement climatique, la transition énergétique est devenue le fer de lance des grandes institutions telles que l'ADEME, RTE, NégaWatt ou encore the Shift Project. Leurs scénarios entendent bien insister sur les deux points suivants : 1° l'urgence à agir pour contenir le réchauffement climatique entre 1, 5 et 2°C (accord de Paris), 2° la nécessité de sortir des énergies fossiles³ (en France, environ 60 % de l'énergie utilisée est d'origine fossile, il s'agit principalement des produits pétroliers (de l'ordre de 40 %), du gaz naturel (de l'ordre de 20 %) et du charbon (moins de 1 %)). La France n'a pas

³ Le conflit entre la Russie et l'Ukraine a renforcé cette volonté et amené les autorités françaises à accélérer leur sortie des énergies fossiles.

positionné sa stratégie bas carbone sur le captage et la séquestration du carbone CCS (dont la maturité technologique n'est pas encore prouvée) ainsi que sur les importations massives de combustible dit vert (Gaz naturels ou GNL). Pour les quatre institutions, il est question de changements plus ou moins drastiques des modes de vies et de choix de société en misant *sur la sobriété des usages et des consommations énergétiques* dans des domaines très variés (de l'alimentation à la mobilité douce, de l'économie du partage en passant par la rénovation des habitats); *l'efficacité énergétique* (scénarios ADEME) *et la réindustrialisation; un investissement dans des secteurs technologiques de pointe* et stratégiques, ainsi que la *relocalisations de productions émettrices de GES*

à l'étranger (Scénario Négawatt). La mobilisation des puits de carbone naturels et /ou artificiels est également évoquée pour compenser les émissions des GES. Certaines voies proposées méritent que l'on s'y attarde :

(i) Ouverture du débat sur les scénarios à l'horizon 2050 à forte participation des énergies renouvelables (de 70 à 100 %) dans le mix énergétique. Ces scénarios s'accompagnent de paris technologiques importants concernant la maîtrise de la technologie de l'intégration de l'hydrogène pour les besoins de stockage et palier ainsi au problème de l'intermittence de ce type d'énergie.

(ii) Un scénario conservant une capacité de production nucléaire associée au développement conséquent des renouvelables à 2050, est proposé au débat comme trajectoire de neutralité par RTE. Pour la production de l'électricité bas carbone en France, ce type de scénario ne soutient pas la prolongation de l'exploitation des réacteurs au-delà de 60 ans et sa trajectoire est compatible avec une fermeture progressive des réacteurs actuels et de la relance de la construction de 14 réacteurs EPR 2 en 30 ans.

(iii) La mobilisation de l'ensemble des acteurs concernés par le sujet est indispensable. En effet, la transition énergétique doit sortir du simple débat entre experts scientifiques pour devenir un débat politique, car les choix technologiques, industriels, de gouvernance ou encore financiers arrêtés par les scénarios relèvent de la sphère politique et de la société civile.

(iv) La nécessité de mener une transition énergétique juste et solidaire. Pour cela, des outils sont proposés pour une inclusion juste et solidaire afin combattre la précarité énergétique et défendre le droit à l'accès à l'énergie aux ménages les plus défavorisés en France,

(v) La transition du secteur agricole, sylvicole et alimentaire est indispensable pour mener à bien toute transition énergétique par : (1) l'utilisation des terres et de la biomasse visant un nouvel équilibre entre alimentation humaine, alimentation animale, production de matériaux et d'énergie, et préservation des écosystèmes, de la biodiversité et du sylvicole et alimentaire couplés ; (2) la mutation des pratiques agricoles, avec un basculement de l'agriculture dite conventionnelle

vers l'agriculture biologique, l'agroécologie et la production intégrée ; (3) l'utilisation de la biomasse issue de l'agriculture, constitue un des principaux foyers à partir de laquelle des énergies dites renouvelables pour la production de chaleur et d'électricité peuvent émerger.

Pour conclure, nous retiendrons trois écueils présents dans les quatre études et sur lesquels il conviendrait d'apporter à la fois de la transparence et de la concertation. Le premier concerne les modèles utilisés. Proposer des scénarios pour mieux visualiser le futur reste avant tout un exercice de communication qui tourne autour de mots clés (énergie renouvelable, sobriété, efficacité...). Il est cependant très difficile de faire la part des choses sur les hypothèses et les relations fonctionnelles introduites dans les scénarios. Les quatre institutions ne communiquent pas sur les modèles utilisés. Or, ce sont ces modèles qui permettent de faire des simulations et de la prospective⁴. Le recours aux diagrammes de boucles causales (CLD) et plus précisément à la dynamique des systèmes permet de visualiser les drivers et les interactions entre variables présents dans les différents scénarios. Cependant, il s'agit d'une représentation ex-post, et non du modèle structurel utilisé dans les travaux de l'ADEME, de RTE, de Négawatt ou du Shift Project. Le deuxième écueil concerne la notion même de scénarios. Il est curieux que ces quatre institutions ne se soient pas appuyées sur la littérature des *Narratives for Shared Socioeconomics Pathways* (O'Neill & al., 2017) et des expériences des conventions citoyennes afin de proposer des visions partagées des transitions énergétiques. D'un côté, les narratives permettent de comprendre la nécessité d'agir (sorte de carte mentale pour analyser les causes et les conséquences d'un problème, mais également anticiper les conséquences des réponses que l'on va apporter au problème) tout en formalisant clairement la voie à suivre. Le rôle des citoyens mais également celui des entreprises (notamment les compagnies pétrolières et énergétiques) est ici crucial (ces dernières inscrivent leurs stratégies dans une logique de Scenario Planning). De l'autre, les scénarios doivent intégrer quatre

⁴ Nous ajouterons ici que la dimension prospective n'est pas présente, un scénario ne saurait justifier à lui seul, une véritable démarche prospective. Les outils et les méthodes de la prospective devraient être mobilisés.

formes de déterminisme : 1° Le cheminement du Green tech et de la possibilité du découplage (techno-centrisme), 2° La pression des contraintes et des limites planétaires qui induisent la fin d'une croissance illimitée, 3° La possibilité d'un Crunch énergétique et d'un basculement vers une sorte d'effondrement (relatif ou absolu), 4° l'héritage (en termes d'infrastructures, d'industries, de services...) que nos sociétés vont devoir apprendre à gérer dans un monde de plus en plus complexe. Le troisième écueil est plutôt une critique de l'analyse en silos proposée par les quatre institutions. Si ces dernières font de l'énergie et de la neutralité carbone, le cheval de bataille des trente prochaines années, rien n'est dit sur l'empreinte matières (l'emblématique passage des 10 à 5 tonnes) et la nécessité d'introduire la circularité dans les scénarios (à l'exception du scénario NégaMat). Si la durabilité était bien le principal driver des modèles dans les années 80 et 90, si la résilience a fait son entrée dans les années 90 – 2000, nous sommes désormais dans l'ère de la circularité et la nécessité de fermer les boucles (importance des cycles de vie). Ce chantier doit désormais occuper une place centrale dans les scénarios 2050. Une manière de rappeler que l'économie circulaire ne se réduit pas au recyclage ou à la valorisation des déchets. Elle se pose désormais comme un nouveau paradigme qui appelle à la conception d'indicateurs économiques, sociaux et environnementaux plus réalistes.

Bibliographie

1. ADEME (2021), *transitions 2050-rapport-compressé*.
2. ADEME (2021), *transitions 2050-rapport-synthèse*.
3. ADEME (2021), *Futurs Énergétiques-2050-principaux-resultats*, résumé exécutif, octobre.
4. BESSALEM C., DIEMER A., BATISSE C., BENAMARA M. (2022), Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°19, Mars, p. 1 – 67.
5. BRAULT P., DOLLET A. (2013), *Introduction aux Mix Énergétique*, CNRS Edition.
6. DIEMER A., BUSCAGLIA A. (2024), Le dilemme des découvertes de mines de lithium à l'échelle de l'écosystème territorial, le cas de la mine de Beauvoir dans l'Allier, *Revue Francophone du Développement Durable* (en cours de révision).
7. DIEMER A., LEGRAND A., SANTOS J., MORTADA R., BOUAKKAZ S., GIRIN M. (2023), Matériaux biosourcés et rénovation énergétique, le rôle du chanvre dans les PCAET des intercommunalités, le cas de Riom Limagne et Volcans, *Revue Francophone du Développement Durable*, n° 23, Mars, p. 1 – 21.
8. DIEMER A. (2022), Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (Systems Dynamics), *Revue Francophone du Développement Durable*, vol 20, p. 11 – 30.
9. DIEMER A. (2015a), La loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, p. 23 – 46.
10. DIEMER A. (2015b), une théorie décroissance de l'énergie, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, p. 192 – 226.
11. FONTECAVE M., GRAND D. (2021), Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage, *Compte rendus. Chimie*, vol 24, n°2, p. 331 -350
12. FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT (2021), *France Nature Environnement, Des scénarios énergétiques pour éclairer les choix à venir*, 30 novembre.
13. KALLIS G. & al. (2018), Research on Degrowth, *Annual Review of Environment and Resources*, vol 43, 291 – 316. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025941>
14. LANNON C.P (2012), Causal Loop Construction : The Basics, *The Systems Thinkers*, vol 23, n°8, p. 7-8.
15. LATOUCHE S. (2014), *Survivre au Développement*, Mille et Une Nuits.
16. MEADOWS D. (1999), *Leverage Points, places to intervene in a System*. The System Institute.
17. MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2021), Rapport environnemental de la stratégie nationale bas carbone, 227 p. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-01->

- 20_MTES_EES-SNBC2_rapport. pdf
18. MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHESION DES TERRITOIRES (2023), Travaux de préparation de la stratégie française énergie - climat, restitution des groupes de travail, 12 septembre 2023, <https://www.ecologie.Gouv.fr/dossier-presse-travaux-preparation-strategie-francaise-energie-climat-restitution-des-groupes>
 19. NEGAWATT (2022), *scénario-négawatt-2022-rapport-complet-partie 4*
 20. NEGAWATT (2022), *scénario-négawatt-2022-rapport-synthèse*
 21. NEGAWATT (2022), *Présentation powerpoint diaporama*-Conférence de présentation du scénario NégaWatt
 22. OFATE-DFBEW (2022), *Baromètre de la transition électrique allemande* - Edition Printemps.
 23. POUGET CONSULTANTS (2022), *Pouget Consultants, Communiqué-commun-scénarios-bâtiment-FINAL* « Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios, ADEME, NégaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone 4, 25 mars.
 24. O'NEILL B.C & Al. (2017), The Roads Ahead : Narratives for Shared Socioeconomics Pathways describing world Futures in the 21st Century, *Global Environmental Change*, Vol 42, January, 169 – 180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
 25. RAILLARDS N. (2022), *The Shift Project, Elaboration d'une méthodologie de scénarisation des systèmes énergétiques.*
 26. RAWORTH K. (2017), *Meet the doughnut : the new economic model that could help end inequalities*, World Economic Forum, Avril 28th.
 27. RICHARDSON G. (1997), "Problems in Causal Loop Diagrams Revisited," *System Dynamics Review* 13(3), 247-252.
 28. RICHARDSON G., LANNON C. (1997), Problems with Causal-Loop Diagrams, *The Systems Thinker*, vol 7 (10),
 29. ROCKSTRÖM J. & al. (2009), A Safe Operating Space for Humanity, *Nature*, vol 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
 30. ROJEY A. (2021), Techniques de l'ingénieur, les contraintes de la transition énergétique, *Transition énergétique-Enjeux et perspectives*, 10 septembre.
 31. RTE (2022), https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale, le 18/05/2022
 32. RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050 – rapport complet*, février.
 33. RTE (2022), *Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats.*
 34. RTE (2021), *Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats* - Résumé Exécutif, octobre.
 35. RTE (2021), *2050 Rapport-complet-Détails des compléments apportés à la version de l'étude futurs énergétiques 2050*, 25 octobre.
 36. RTE (2022), *BP 2050 rapport-complet chapitre production-électricité réacteur.*
 37. RTE (2022), *Compte-rendu atelier-Scénario-Bas-Carbone 2022-04-08*, analyse critique des scénarios, 05 mai.
 38. SIGNORET S. (2022), Technique de l'ingénieur, « La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale », Rapport de synthèse, <https://négawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-négawatt-2022.pdf>
 39. SNBC (2020), *Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, mars 2020, 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf
 40. SNBC (2020), *Décret n°2020-457 du 21 avril 2020 relatifs aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone*, <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=y6caEB3Z2Xl2VgQFFEhik8z07XbCaxyWqP6yb6mJnWc=>
 41. SNBC (2020), *Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solitaire vers la neutralité carbone, synthèse*, mars, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>
 42. STEINERT-BERLIN T. (2022), *Long term Price Scenarios in European power and flexibility markets*, OFATE, May.
 43. STERMAN J. (2001), System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California Management Review*, 43(4), 8-25. <https://doi.org/10.2307/41166098>
 44. THE SHIFT PROJECT (2020), *Rapport de synthèse-Vision-globale v1-PTEF*, octobre.
 45. THE SHIFT PROJECT (2020), *PTEF-Décarboner-la-chimie*, Rapport Final, janvier.
 46. THE SHIFT PROJECT (2021), *TSP RF-Emploi Synthèse*, Décembre.

47. THE SHIFT PROJECT (2021), *Habiter dans une société bas carbone.*
48. THE SHIFT PROJECT (2022), *PTEF-Decarboner-l'industrie_-Ciment_-Rapport-final*, janvier.
49. THE SHIFT PROJECT (2022), *PTEF-Decarboner-l'industrie-SYNTHESE*, janvier.
50. THE SHIFT PROJECT (2022), *Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios ADEME, NégaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone.*
51. THE SHIFT PROJECT (2022), *Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française*, Odile Jacob.