



HAL
open science

Neutralité carbone et stratégie énergétique

Jean-Marc Salotti

► **To cite this version:**

Jean-Marc Salotti. Neutralité carbone et stratégie énergétique. [Rapport de recherche] IMS, UMR 5218, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, France; Inria Bordeaux - Sud Ouest. 2022. hal-03774530

HAL Id: hal-03774530

<https://hal.science/hal-03774530v1>

Submitted on 11 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Neutralité carbone et stratégie énergétique

Rapport de recherche Auctus_2022_07_10_002

Jean-Marc Salotti

Jean-marc.salotti@ensc.fr

Affiliations :

1 : Equipe CIH, laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, UMR CNRS 5218 , Université de Bordeaux, ENSC/Bordeaux INP

2 : Equipe Auctus, Inria

1. Introduction, analyse de la situation actuelle

1.1 Problème multidisciplinaire

La transition énergétique repose sur des choix complexes prenant en compte des éléments techniques du secteur de l'énergie, mais aussi des facteurs organisationnels, socioculturels et humains. Par essence, la question est donc multidisciplinaire, avec une dimension humaine non négligeable. Elle intéresse à ce titre l'équipe de recherche Cognitive et Ingénierie Humaine du laboratoire IMS.

1.2 Objectifs non atteints

Le dernier rapport du GIEC souligne un risque accru d'augmentation des températures causée par les émissions de gaz à effet de serre (GIEC 2022). Suite aux accords de Paris, la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050. L'ADEME donne une définition claire de cet objectif : « La cible de neutralité carbone se traduit par un équilibre entre les gaz à effet de serre émis chaque année et la quantité de CO2 absorbée par les « puits de carbone » sur le territoire national. »

Budgets carbone 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 par secteur

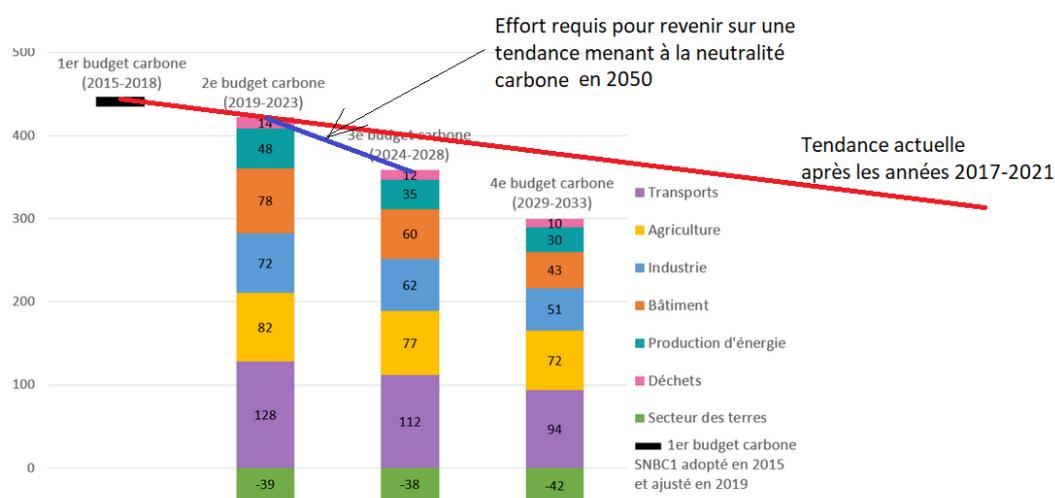


Figure 1 : Le gouvernement a été obligé de replanifier les budgets carbonés prévisionnels suite aux mauvais résultats de la période 2017-2021. Sources : site gouvernemental du Ministère de la Transition Ecologique (Ministère 2022).

Comme cela a été souligné par de nombreuses associations écologistes, la France n'a pas atteint en 2021 ses objectifs de réduction de son empreinte carbone et elle a même été condamnée pour inaction climatique après que des milliers de citoyens se soient portés partie civile (Affaire du Siècle 2021). Cette insuffisance est illustrée figure 1, avec un « budget carbone » 2019-2023 revu à la hausse par le gouvernement et des objectifs extrêmement ambitieux pour 2024-2028, qui seront très difficiles à atteindre. La tendance pourrait même être haussière à partir de 2022, en raison de la fin de la pandémie (fonctionnement de l'économie à plein régime), d'une croissance faible mais pas nulle de la population, et de l'absence de mesures structurantes permettant d'anticiper une baisse des GES. NB : cette analyse ne tient pas compte de l'impact de la guerre en Ukraine et de la relance annoncée, entre autres choses, d'une centrale thermique au charbon.

1.3 Clarifications des objectifs

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de clarifier les objectifs, car il existe plusieurs critères importants associés à l'empreinte carbone. En particulier, l'empreinte carbone du territoire français est sensiblement différente de l'empreinte carbone des Français. Pour calculer l'empreinte carbone des Français, il faut en effet tenir compte du fait que de nombreux objets, tels que les ordinateurs, l'électroménager, ou les vêtements, sont essentiellement produits à l'étranger et que la production de ces objets a nécessité de l'énergie avec production de gaz à effet de serre (GES). Inversement, il y a des objets produits en France qui sont exportés et qui ne contribuent donc pas à l'empreinte carbone des Français. Si on inclut les GES des importations et qu'on exclut les GES des exportations, le bilan est largement en notre défaveur. Selon Wikipédia, sur la période 1990-2016, le niveau moyen des émissions de GES *sur le territoire* français a diminué, mais « *l'empreinte carbone des Français a augmenté de 20 % entre 1995 et 2015 : les émissions nettes importées représentent 60 % des émissions nationales en 2015 (271 MtCO_{2e}) et s'ajoutent à elles pour former l'empreinte carbone (731 MtCO_{2eq}). Ceci s'explique par la désindustrialisation du pays et l'augmentation des importations d'objets manufacturés.* » (Wiki EC 2022). Autrement dit, l'empreinte carbone de la France, diminue un peu, mais l'empreinte carbone des Français augmente toujours. La désindustrialisation de la France a conduit en quelque sorte à exporter notre empreinte carbone.

L'engagement français pour 2050 concerne l'empreinte carbone du territoire, mais, finalement, ne serait-il pas préférable d'avoir comme objectif de réduire l'empreinte carbone des Français ? Il est connu que la Chine est le pays qui émet le plus de GES, à hauteur de 30% des GES du monde. Cependant, une part non négligeable de ces GES provient de la production de biens manufacturés exportés vers les autres pays, dont la France. Aider la Chine à baisser ses émissions de GES, notamment en réindustrialisant la France sans émettre plus de GES en France est ainsi un objectif complémentaire qu'il convient de prendre en considération dans toute politique de lutte contre les GES. En outre, comme cela est rappelé sur le site du Ministère (et critiqué par de nombreuses associations écologistes), « Par convention internationale, les transports internationaux aériens, maritimes et fluviaux sont exclus du total national. Seules sont prises en compte les émissions des déplacements effectués entre deux ports ou aéroport localisés en France ». Cela explique en partie que 60% de notre empreinte carbone provienne des produits importés et qu'il y ait un écart si important entre l'empreinte carbone de la France et l'empreinte carbone des Français.

On peut noter l'existence d'un autre concept intéressant, celui d'empreinte écologique (Wiki EE 2022). Il s'agit de mesurer la tension exercée par les activités humaines sur l'écosystème d'un territoire. Autrement dit, en ce qui concerne la France, en admettant que nous soyons en totale autarcie, obligés de produire sur notre territoire tous les objets dont nous avons besoin, quel serait l'impact sur l'environnement, serait-ce soutenable ? Heureusement, ce n'est pas le cas, mais on comprend bien que si tous les pays avaient des besoins par habitant aussi importants que les nôtres,

il faudrait plusieurs Terres pour subvenir aux besoins de tous. Ces éléments, mis en lumière là encore par de nombreuses associations écologistes, doivent contribuer à guider nos actions.

De manière générale, retenons que l'objectif ne doit pas se résumer à tendre vers la neutralité carbone du territoire à l'horizon 2050, il faut veiller à considérer d'autres critères également très importants pour préserver la planète, notamment l'empreinte carbone des Français, ainsi que leur empreinte écologique. De plus, au-delà de l'empreinte carbone et de l'empreinte écologique, il faut bien entendu considérer la pollution au sens large, par exemple l'émission d'oxydes d'azote, de dioxyde de soufre, ainsi que l'émission de composés organiques volatiles nocifs (COV), qui engendrent toutes sortes de maladies lorsque leurs concentrations dépassent certains seuils. Ces composés chimiques étant souvent associés à la combustion d'énergies fossiles, c'est une raison supplémentaire pour chercher des alternatives (ADEME 2013).

1.4 Energie fossile et mix énergétique

L'usage des énergies fossiles est la principale source d'émission des GES. Un des principaux leviers permettant la baisse de l'empreinte carbone est par conséquent une sortie progressive de cet usage. Cela nous amène à discuter des besoins énergétiques par secteur et des moyens de production à notre disposition. La répartition de la consommation énergétique française finale par source énergétique est présentée figure 2. Il ressort que les produits pétroliers et le gaz naturel, essentiellement importés, représentent près de 64% de cette consommation (44%+20%).

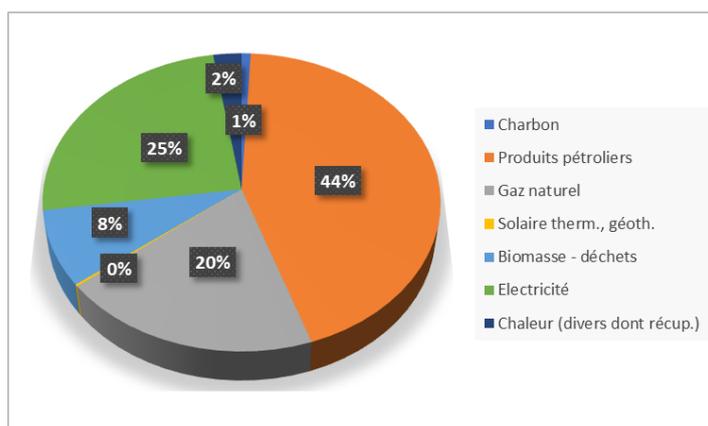


Figure 2 : Les énergies fossiles (produits pétroliers et gaz naturel) représentent en 2019 64% de la consommation énergétique française. Source Agence Internationale de l'Energie (AIE 2021).

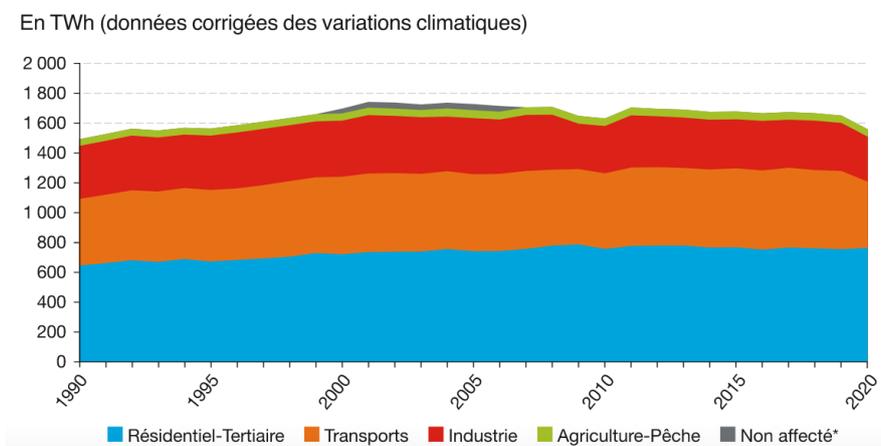


Figure 3 : Consommation d'énergie par secteur. Source : Ministère de la transition écologique (MTE 2021)

Tableau 1 : Le nucléaire représente 69% de la production électrique française

Source de production	Pourcentage total de la production française	TWh
Nucléaire	69 %	360,7 TWh
Hydraulique	12 %	62,5 TWh
Eolien	7 %	36,8 TWh
Thermique	2 %	10 TWh
Solaire	3 %	14,13 TWh
Bioénergies	1,9 %	10 TWh

La répartition par secteur est présentée figure 3. Les transports constituent une part importante des besoins. Dans le domaine résidentiel-tertiaire, le chauffage, souvent au gaz, est également consommateur d'énergies fossiles.

La production électrique française est indiquée dans le tableau 1, par système de production. Le nucléaire représente 69% du total, mais ramené aux besoins énergétiques, cela ne représente finalement que 17% des besoins énergétiques français. Si on devait abandonner les énergies fossiles et passer au tout électrique, il faudrait multiplier par 2,5 la production électrique française. Cela représente une multiplication par 25 des capacités actuelles du solaire et de l'éolien ou une multiplication par 3,5 du parc nucléaire français. Le défi est par conséquent colossal.

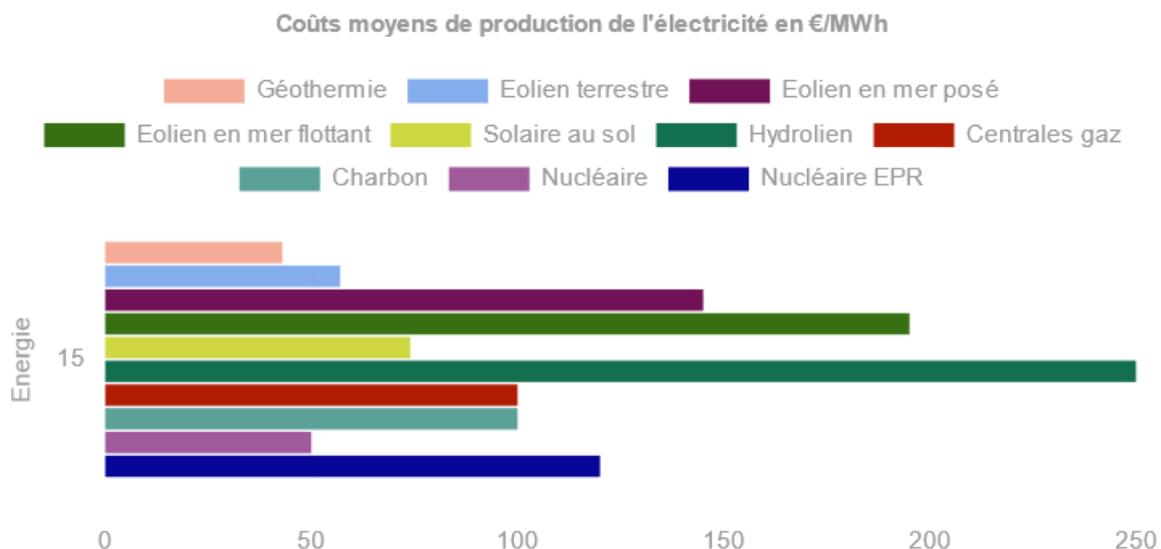


Figure 4 : Prix moyen de production de l'électricité, source (Prix-Elec 2022).

Un autre élément important du problème est le coût associé au système de production électrique. Typiquement, si on a le choix, pour une production équivalente d'énergie, vaut-il mieux construire une éolienne, des panneaux photovoltaïques, une centrale nucléaire, ou un autre système ? Des éléments de réponse sont apportés figure 4. Les centrales au fuel ou au charbon ont été volontairement exclues du tableau, car l'objectif est précisément de s'en passer. Pour la géothermie, il est important de noter qu'il est nécessaire de bénéficier d'un contexte de production favorable (source d'eau abondante et très chaude à faible profondeur), sinon ce système n'est pas compétitif, ce qui restreint le potentiel de développement de cette filière. On constate que le nucléaire est très bon marché. Il convient de préciser qu'il existe une polémique à ce sujet, car il est difficile de considérer tous les coûts, notamment ceux du démantèlement et du stockage longue durée des

produits dangereux. Pour éviter un biais systématique, un audit pourrait être réalisé, et sans doute reconduit d'année en année, afin de préciser ces coûts et éventuellement d'adapter la stratégie énergétique de façon éclairée.

Concernant le photovoltaïque, il est important de noter que le chiffre indiqué est un coût moyen qui inclut les petites installations. Pour les parcs les plus importants, ce coût est inférieur à 50 Euros/MWh, soit du même ordre, voire moins cher que le coût du nucléaire. Surtout, on constate que le solaire photovoltaïque est grosso modo deux fois moins cher que l'éolien. Ces éléments doivent guider notre stratégie d'investissement.

Le bilan de cette analyse est que les besoins énergétiques sont gigantesques et que la trajectoire pour parvenir à l'abandon des énergies fossiles paraît difficile à déterminer, notamment dans le domaine des transports. Aucune source d'énergie prise isolément ne paraît en mesure de répondre à ces besoins. Rappelons que certains écologistes avancent l'idée d'une réduction drastique de nos besoins. C'est indiscutablement un élément du problème. Toutefois, comme on a pu le voir avec les mouvements de protestation à l'encontre de l'installation de certaines éoliennes, ou avec le mouvement des Gilets Jaunes, il faut prendre garde à l'acceptabilité de mesures qui contribueraient à la dégradation des conditions de vie ou du bien-être de certains Français. Réduire la mobilité, le pouvoir d'achat ou le bien-être des Français doit être évité à tout prix, c'est un principe fondamental qui doit guider notre action, nous aurons l'occasion d'y revenir.

2. Scénarios de l'ADEME

Il existe en France une Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie, l'ADEME. Cette agence regroupant des experts des problématiques énergétiques, il convient de considérer avec la plus grande attention leurs travaux et recommandations. L'ADEME travaille depuis plusieurs années sur la transition énergétique (ADEME 2013) et a récemment envisagé quatre scénarios pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (ADEME 2021). En voici une analyse synthétique.

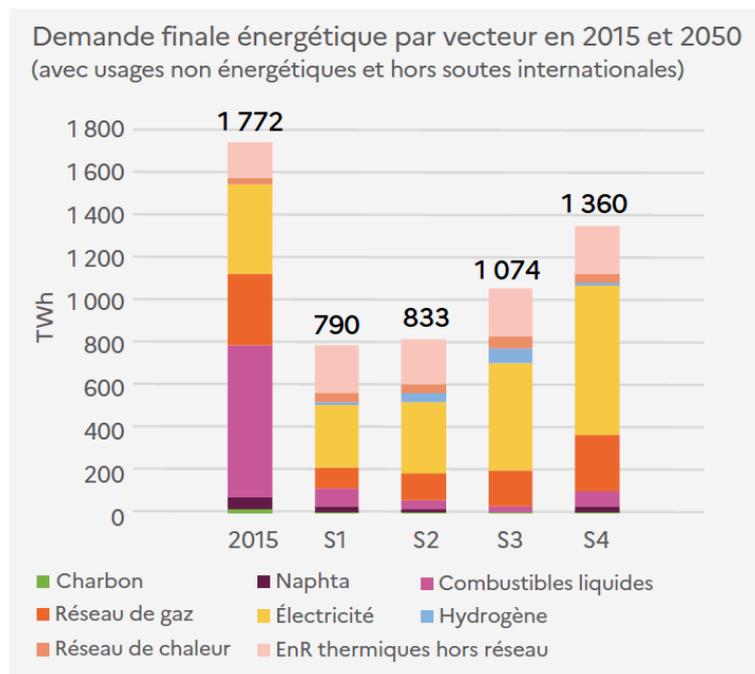


Figure 5 : Les 4 scénarios énergétiques proposés par l'ADEME. Sources : (ADEME 2021).

Il est frappant de constater que sur les 4 scénarios envisagés, il est prévu une baisse importante, voire très importante, de la consommation énergétique totale. Comme nous l'avons vu section 1.3, les besoins énergétiques actuels sont colossaux. L'ADEME l'explique clairement et suggère que même en augmentant de manière significative la biomasse et les autres énergies renouvelables, on ne parviendrait pas à trouver des substituts à toutes les énergies fossiles consommées actuellement, en particulier celles qui sont nécessaires dans le domaine des transports par camions, et surtout dans les domaines aérien et maritime. Pour parvenir à la neutralité carbone en 2050 sans abandonner totalement les énergies fossiles, l'ADEME a donc fait le pari d'une forte réduction des besoins. De plus, dans les 4 scénarios, il est prévu l'abandon des moteurs thermiques pour les voitures et le passage à la voiture électrique. Ce choix est motivé par la loi française votée en 2019 d'interdiction de la vente des voitures utilisant des énergies fossiles carbonées. Voyons dans le détail les éléments de ces scénarios.

- S1 : Le premier scénario repose sur une « préférence pour le local », des « circuits courts », des « mesures protectionnistes », ainsi qu'une grande sobriété imposée, impliquant une importante réduction des besoins énergétiques, grâce à un effort collectif important et des mesures contraignantes quant à l'usage de la voiture. La préférence pour le local paraît proche du concept de localisme et nous y souscrivons. En revanche, si des efforts sont envisageables, par exemple en améliorant l'isolation des bâtiments, il ne faut pas tendre vers des mesures qui induiraient des changements comportementaux non désirés et impacteraient le bien-être général. Il est mentionné par exemple dans ce scénario une division par 3 de la consommation de viande, une réduction des vols en avion et des trajets en voiture, et une fiscalité carbone dissuasive. Si une partie de la population pourrait l'accepter sans difficulté, une autre partie s'en offusquerait certainement, et par conséquent, si d'autres options existent (nous y reviendrons), de telles mesures sont à éviter. Une partie de ce scénario est donc à retenir, mais pas la partie qui concerne une sobriété imposée de manière brutale, accompagnée d'une décroissance économique et d'un protectionnisme généralisé.
- S2 : Le deuxième scénario repose sur « un protectionnisme ciblé », une « réindustrialisation de secteurs clés », et une « fiscalité carbone et environnementale croissante » amenant là encore à des efforts conséquents pour une forte diminution de l'usage de la voiture. Les deux premiers points paraissent particulièrement pertinents, car il est nécessaire que la France retrouve une souveraineté nationale dans certains secteurs, dont celui de l'énergie. En ce qui concerne la fiscalité carbone et environnementale, c'est une mesure qui paraît au premier abord écologique, voire éthique (principe du pollueur payeur). Toutefois, il faut être prudent au niveau de l'introduction de ces mesures, et ce pour plusieurs raisons. D'abord, cela peut occasionner une baisse significative du pouvoir d'achat (mouvement des Gilets Jaunes suite à l'augmentation des taxes sur l'essence). De plus, comme il est souvent difficile de calculer l'empreinte carbone d'un produit (Finon 2015), cela conduit à des difficultés organisationnelles, des lourdeurs administratives, et cela incite également à chercher des stratégies de contournement, ou, pire, à des stratégies de délocalisation industrielle. Le principe d'une fiscalité carbone reste intéressant, mais là encore, il faut prendre garde à son acceptabilité et préférer des alternatives. Certains éléments de ce second scénario sont donc intéressants, mais les efforts à faire pour réduire la consommation énergétique globale paraissent peu réalistes et difficilement acceptables.
- S3 : Le troisième scénario repose sur des « investissements dans les technologies vertes » et une fiscalité carbone centrée sur les produits sans concurrence internationale, ce qui paraît pertinent. Au niveau des logements, un investissement massif est prévu dans la

déconstruction de logements énergivores et la reconstruction de logements économes en énergie. Malgré tout, bien que l'effort soit moindre que dans les scénarios 1 et 2, ce scénario repose sur une baisse de 30% de la consommation de viande et une tendance forte au télétravail et au covoiturage. Ces hypothèses de travail sont intéressantes, mais elles reposent sur des changements significatifs des comportements et une modification des modes de vie qui ne sont pas forcément souhaitables socialement (par exemple, le recours au télétravail conduit à des risques accrus d'isolement et de stress), avec un impact potentiel sur le bien-être des personnes. C'est un pari risqué, car il pourrait mener à des luttes entre certaines catégories de personnes, par exemple les pro-viande aux anti-viande, les pro-voitures individuelles aux anti-voitures individuelles, etc. Ce scénario est globalement plus acceptable que les deux premiers, mais il repose encore sur des changements comportementaux discutables et une baisse significative des besoins énergétiques qui paraît peu réaliste.

- S4 : Ce dernier scénario est intitulé « Pari réparateur ». Il repose sur un mode de vie pratiquement inchangé, des besoins énergétiques qui restent conséquents, et une confiance dans la capacité à réparer les dégâts environnementaux, typiquement par des innovations technologiques permettant une capture et un stockage du CO₂.
Ce scénario est certes moins ambitieux que les précédents du point de vue de la réduction des besoins énergétiques, mais il paraît cependant plus réaliste relativement à la tendance actuelle de consommation et à la difficulté d'induire des changements comportementaux.

Globalement, c'est à partir du 4^{ème} scénario que nous proposons de bâtir une stratégie de transition énergétique. Nous ne mentionnons pas ici les nombreuses recommandations et orientations du rapport de l'ADEME qui concernent chaque secteur industriel, l'impact sur les modes de vie, les problématiques organisationnelles, programmatiques ou sociétales, et nous invitons donc le lecteur à s'y référer pour trouver des réponses complémentaires (ADEME 2021). Attention cependant, même si le scénario 4 est celui qui fonde notre stratégie, d'une part, cela n'exclut pas la mise en œuvre de solutions intéressantes proposées dans les autres scénarios, et d'autre part, cela n'exclut pas non plus quelques adaptations que nous pourrions trouver pertinentes, et que nous allons développer par la suite.

3. Propositions spécifiques

Nous développons ci-dessous quelques mesures complémentaires au scénario de l'ADEME.

3.1 Avantages du photovoltaïque

Les avantages du solaire photovoltaïque sont nombreux. Selon les spécialistes, il faut seulement environ 3 ans pour qu'un panneau solaire photovoltaïque produise l'équivalent électrique de l'énergie nécessaire à sa production et leur durée de vie est supérieure à 25 ans (De Wild-Scholten 2013). 95% des panneaux sont recyclables. Enfin, le coût de production/installation par kWh est devenu très compétitif, sans doute même moins cher que celui du nucléaire pour ce qui concerne les grandes installations (CRE 2019).

Il convient de préciser que l'empreinte carbone de l'installation de nouveaux panneaux solaires dépend fortement du site de production et de la nécessité éventuelle de le transporter sur de longues distances. Ainsi, selon une étude de Artaud, si ce panneau est produit en Chine, la quantité de GES émise est près de 3 fois supérieure à celle qui serait émise s'il était produit en France, en tenant compte des émissions en Chine et des émissions dues au transport par cargo. En termes de bilan carbone, il est donc préférable de produire ces panneaux en France, d'autant plus que la ressource, le silicium, y est abondant. On remarque ici qu'une production française augmenterait les

GES émis sur le territoire français, ce qui est contradictoire avec l'objectif de neutralité carbone, mais réduirait les GES émis par les Français, ce qui est le plus important.

Il pourrait toutefois s'avérer difficile de mettre en œuvre une production en France, si les entreprises sont mises en compétition avec les entreprises étrangères pour la production et vente de panneaux solaires. C'est l'un des inconvénients majeurs de la mondialisation, qui, dans le cas présent, est clairement en opposition avec les objectifs écologiques. Si l'objectif est d'atteindre la souveraineté énergétique, une solution serait d'imposer des règles commerciales qui obligent à produire ces panneaux en France, par exemple en taxant fortement les importations, ou plus directement, en exigeant par la loi qu'on ne puisse installer en France que des panneaux produits en France.

3.2 La technologie STEP, alliée naturelle du photovoltaïque

La technologie STEP consiste à exploiter deux bassins d'eau, l'un en hauteur et l'autre plus bas, à les relier par des canalisations et à faire monter (par pompage) ou descendre l'eau, selon qu'on dispose d'une énergie électrique en surplus à dépenser ou au contraire qu'on souhaite produire. EDF exploite cette technologie en coordination avec l'énergie hydraulique des grands cours d'eau, en faisant par exemple remonter l'eau dans le bassin haut aux heures creuses afin de disposer de plus d'énergie de production aux heures pleines (Ministère 2006). Il n'y a cependant aucune contraindre à exploiter des STEP pour stocker l'énergie provenant d'une autre source énergétique. Il est important de noter qu'on peut fonctionner en circuit fermé, de sorte qu'il n'y a aucune consommation d'eau durant le cycle de montée et descente (les bassins doivent être fermés pour éviter l'évaporation).

Or, précisément, l'inconvénient majeur du photovoltaïque et de l'éolien, c'est leur intermittence. Il est possible de stocker l'énergie par différents moyens (batteries, hydrogène, piles à combustible, etc.), mais c'est souvent compliqué, cher et d'une haute technicité. Les STEP offrent un moyen de stockage relativement simple de l'énergie et sont rapides à construire et à exploiter. Il n'est pas nécessaire d'avoir un grand dénivelé, une petite colline suffit (pour 2 fois moins de différentiel de hauteur, il suffit de multiplier par 2 le débit descendant pour obtenir la même énergie). De plus, une grande partie du territoire français est constitué de montagnes et de collines et les bassins peuvent être enterrés pour ne pas nuire au paysage. Il est donc possible d'installer un grand nombre de STEP proches des sites de production électrique basé sur le photovoltaïque ou l'éolien. On peut noter qu'il existe déjà des exemples de STEP associées à du photovoltaïque, citons par exemple l'entreprise STEPSOL, en Corse, qui propose cette solution.

Autres remarques :

- En terrain plat, il est également possible de construire une STEP, en surélevant le premier bassin avec une structure artificielle et/ou en enfouissant le second en profondeur.
- La production électrique des panneaux solaires est la plus faible lorsqu'il pleut fortement. Or, l'énergie issue de l'eau de pluie peut opportunément être exploitée, soit par un ruissellement dirigé en alimentant directement en eau le bassin du haut, soit en faisant tourner une turbine dans un ruisseau dont le débit a fortement augmenté, afin d'alimenter en électricité la station de pompage, en complément de l'énergie des panneaux solaires.
- Pour une production limitée, des petites éoliennes peuvent également être mises à contribution pour compléter le système de production.

3.3 Production d'électricité à partir de déchets végétaux

Les groupes électrogènes fonctionnent souvent avec de l'essence ou du diesel. On peut les remplacer par du bioéthanol ou du biométhane. Il est cependant plus intéressant d'exploiter les déchets verts lorsqu'on en dispose, à la fois pour produire de l'électricité et de la chaleur. Si on souhaite équiper un

village en panneaux solaires photovoltaïques et STEP avec l'objectif d'atteindre l'autonomie complète, l'ajout d'une micro-centrale électrique/chaleur est la solution complémentaire qui paraît la plus appropriée. Elle permet en effet d'une part d'améliorer la robustesse globale en assurant une production électrique en période de maintenance, de panne, ou d'insuffisance ponctuelle, et d'autre part de valoriser des déchets. Il est également possible d'exploiter des groupes électrogènes qui brûlent du méthane. Cette idée est intéressante, car il est possible de produire du méthane à partir de CO₂, d'H₂O et d'énergie (réaction de Sabatier). Ainsi, même si on ne dispose pas d'une station de méthanisation (à partir de déchets verts), on peut exploiter le surplus d'énergie photovoltaïque pour produire chimiquement du méthane pendant l'été, le stocker et l'exploiter pendant l'hiver. Le CO₂ est ainsi recyclé et la surface des panneaux solaires est ajustée au besoin annuel plutôt qu'au besoin maximal journalier. Remarque : la production et l'exploitation de l'hydrogène est également possible, mais son stockage est difficile, complexe et coûteux.

3.4 Stratégie d'investissement et subsidiarité

L'intermittence du solaire et de l'éolien pose problème si on souhaite atteindre l'autonomie pour ce type de couplage. Cependant, alors que l'énergie produite par une éolienne peut devenir négligeable, l'énergie produite par un panneau solaire ne peut descendre en dessous d'environ 10% de sa capacité maximale. En surdimensionnant les panneaux solaires, on peut donc atteindre l'autonomie, même en période de temps très nuageux. Autrement dit, le couplage photovoltaïque/STEP/méthane est une solution qui peut se suffire à elle-même et qui paraît adaptée pour satisfaire les besoins de nombreux villages isolés. Comme il s'agit d'une solution low-tech, on peut également considérer que sa mise en œuvre est possible à grande échelle, avec un processus de décision et un contrôle décentralisé, au nom du principe de subsidiarité. Par exemple, on peut envisager qu'une commune investisse dans un tel système de production. L'électricité produite lui appartiendrait, et, si on autorise le monopole, la vente aux habitants de la commune lui permettrait de rembourser un prêt long terme.

Théoriquement, on pourrait assurer la production électrique de cette manière pour la France entière, car la production électrique à l'aide de STEP peut aisément être régulée en ouvrant ou en fermant des vannes. Cependant, ce n'est malheureusement pas la solution miracle, car il faudrait un nombre gigantesque de panneaux solaires et de STEP associées pour produire toute l'électricité dont la France a besoin. Il y a certes en France de nombreux sites où on pourrait en installer, mais il ne faudrait pas que cela se fasse au détriment de cultures essentielles à nos besoins alimentaires, ou aux dépens de nos belles forêts ou paysages, ce que certains ont déjà pu déplorer (polémique vis-à-vis du site de production photovoltaïque près de Saucats dans les Landes par exemple). On peut noter qu'il est possible d'installer des STEP dans les villes, là où précisément de nombreux panneaux solaires ont déjà été installés sur les toits, ou pourraient l'être bientôt. La ville de Marseille offre par exemple un grand potentiel de développement photovoltaïque/STEP, avec des collines facilitant le positionnement en hauteur des bassins hauts.

Le potentiel des STEP ou/et des stations de méthanisation ou de production électrique à partir des déchets verts couplées au photovoltaïque est difficile à définir. Une estimation empirique suggère qu'on pourrait atteindre 200 TWh annuel à l'horizon 2050, ce qui représenterait tout de même plus de la moitié de la production électrique nucléaire actuelle. Les sites à privilégier sont dans les massifs montagneux et les collines, même si le dénivelé est faible, pour alimenter des villages, en privilégiant des parcs de taille raisonnable (si nécessaire, on peut dimensionner une micro-STEP pour seulement 1000 m² de panneaux solaires, ce qui représente une quarantaine de toitures), ou au contraire dans les villes en exploitant les panneaux installés sur les toits des maisons et des bâtiments.

Un des avantages importants de cette solution est l'adaptation aux villages et aux zones relativement isolées, qui pourraient facilement atteindre l'autonomie énergétique (toutes les villes et villages des DOM-TOM, de Corse, ainsi que de nombreux sites du Massif Central, de Bretagne, de Provence, des Alpes, des Vosges, des Pyrénées, du Limousin, entre autres), en réduisant de surcroît les pertes dues à l'acheminement de l'électricité sur de longues distances. Surtout, la solution de couplage solaire / STEP/méthane/déchets verts permet de supprimer les contraintes liées au besoin de régulation de la production électrique. Elle est donc indépendante des problématiques de raccordement au réseau électrique global.

Enfin, au niveau du coût d'installation et de production, le couplage solaire / STEP est très compétitif. Par rapport au photovoltaïque seul, il y a un surcoût, mais la maintenance des STEP est relativement simple et leur longévité est très bonne. Selon une étude ministérielle, pour un prix du baril à 100\$, une STEP est deux fois moins chère qu'une centrale thermique au fuel, qui est pourtant réputée pour son faible coût (voir le rapport ministériel (Ministère 2006)).

3.5 L'éolien

De nombreuses associations ont dénoncé le gigantisme des éoliennes, visibles à des kilomètres, et leur nuisance. Sans entrer dans les détails techniques, nous devons acter qu'il existe une opposition à l'installation de grandes éoliennes à certains endroits. Avant l'installation, il y a systématiquement une enquête publique. Certaines personnes y sont très favorables, d'autres moins. Une question importante est de déterminer à quel point on peut considérer l'opinion négative d'un groupe de personnes éventuellement minoritaire sur un tel projet, et le type d'argument avancé. Le problème, c'est qu'il existe de nombreuses façons de biaiser cette consultation, par exemple en interrogeant des personnes qui sont assez éloignées de l'éolienne en question, et qui vont recevoir un avantage pécunier substantiel. Il est important de noter qu'il y a des substitutions possibles à l'éolienne, par exemple des panneaux solaires couplés à une STEP placés un peu plus loin. Il convient donc d'être un peu plus strict sur les critères d'acceptation de ces projets et exiger un consensus très fort. Nous proposons un critère simple. Si 10 personnes habitant proches d'un site de construction potentiel d'une éolienne s'opposent au projet, celui-ci doit être abandonné et des solutions alternatives doivent être recherchées.

Par ailleurs, tout projet d'installation d'une éolienne doit être comparé à un projet d'installation de panneaux photovoltaïques, car, comme cela a été indiqué précédemment, le coût de production du kWh est meilleur pour le photovoltaïque et l'intermittence de l'éolien est plus prononcée, ce qui implique des moyens accrus pour le stockage de l'énergie.

3.6 Le bioéthanol

L'ADEME a étudié de nombreux biocarburants issus de la biomasse comme substituts aux énergies fossiles, en particulier dans le domaine des transports (ADEME 2021). Le bio-éthanol en fait partie, mais il n'est toutefois pas recommandé pour les voitures. Nous proposons malgré tout d'approfondir cette option. En premier lieu, quelques éléments structurants.

- Le (bio)éthanol peut être produit à partir de différentes plantes, comme la betterave, le maïs, le blé, ou en tant que carburant de deuxième génération. Il peut aussi être produit par d'autres moyens, essentiellement chimiques.
- Selon un rapport de l'ADEME, après analyse du cycle de vie complet de la production d'éthanol, par exemple à partir de la betterave, le rendement énergétique est proche de 1,7, ce qui signifie qu'on produit 1,7 fois plus d'énergie qu'on en consomme pour une quantité donnée d'éthanol (ADEME 2010). Cette étude est fondamentale, car d'autres études, qui entretiennent une polémique, suggèrent que le rendement serait inférieur à 1. Toutefois, ces

dernières sont basées sur des stratégies de culture américaine, avec par exemple l'usage intensif d'engrais, ainsi qu'une récupération d'eau par des pompes gourmandes en énergie.

- Le bioéthanol fait partie des sources d'énergie renouvelable avec un impact à peu près neutre concernant le CO₂. En effet, après avoir cultivé, on peut replanter, et ainsi obtenir un recyclage d'une partie du CO₂. Il faut cependant tenir compte du cycle de vie complet, et notamment de l'usage d'engrais pour la croissance des plantes et de la gestion des déchets verts pour ce qui concerne les parties non exploitées des plantes. Cette exploitation doit donc être envisagée avec une gestion écologique et responsable permettant d'atteindre un bilan neutre pour les gaz à effet de serre.
- L'éthanol est déjà intégré dans les carburants automobiles, typiquement à hauteur de 5% dans le Super 95 E5. Il existe aussi du E85 (85% d'éthanol) déjà utilisé par de nombreuses voitures. Le coût du bioéthanol est déjà compétitif par rapport à celui de l'essence, notamment à cause des taxes sur les produits pétroliers.
- La production française de bioéthanol est de 20 millions d'hectolitres (soit environ 12 TWh). La consommation d'essence (et de diésel, et d'éthanol) pour le trafic routier français (voitures et camions) est environ de 50 millions de mètre cube, soit 500 millions d'hectolitres. Il faudrait multiplier par 25 la production d'éthanol pour obtenir le même volume. De plus, l'essence ayant un rendement environ 1,5 fois plus grand que l'éthanol. Il faudrait multiplier par 37,5 cette production pour satisfaire la demande en carburant pour le trafic routier, ce qui est colossal et pratiquement hors d'atteinte.

Etant donné l'ampleur des besoins, il n'est pas raisonnable de remplacer totalement l'essence par l'éthanol. Il faut donc déterminer la part qu'on souhaite allouer à ce carburant. De façon surprenante, le développement du bioéthanol n'a pas reçu de soutien politique ces dernières années. Les raisons invoquées sont les suivantes :

- Il est en concurrence avec les cultures servant à l'alimentation.
- Le développement de la filière conduirait à une déforestation massive.
- Il y aurait besoin de beaucoup d'eau, ce qui compliquerait la gestion de l'eau de nombreux territoires déjà en difficulté.
- Ces nouvelles cultures nécessiteraient des engrais et des pesticides et contribueraient à dégrader les nappes phréatiques et l'environnement de manière générale.

Ces arguments sont tous pertinents, mais des solutions existent et méritent d'être discutées. Tout d'abord, la concurrence avec d'autres cultures serait surtout dramatique dans les pays où l'alimentation n'est pas assurée, comme l'Ethiopie, ce qui a été dénoncé à juste titre par certaines associations. En France, cependant, il n'y a aucune pénurie alimentaire, et il y a très peu de risque que cela survienne, même si on doublait ou triplait la production de bioéthanol, qui reste modeste (1% de la production céréalière actuelle). De plus, il y a des productions qui sont largement exportatrices et qui participent peu à l'autonomie alimentaire des Français, en particulier les exploitations viticoles. Si une partie de ces exploitations étaient converties au bioéthanol, il y aurait un impact négligeable sur la production alimentaire à destination des Français (une conversion de 50% des viticultures permettrait de plus que doubler la production d'éthanol). De plus, si on systématisait la production d'éthanol vinique (issu des déchets de la production viticole), cela permettrait de conserver la production de raisin et de vin tout en recyclant des déchets et donc sans augmenter les surfaces agricoles. Il y a donc un potentiel de développement sans entrer en concurrence avec les cultures alimentaires.

De même, la déforestation massive ne pourrait survenir que si on développait le bioéthanol à grande échelle pour remplacer l'essence. Or, précisément, nous posons la question du développement potentiel de ce carburant en préservant nos forêts.

En ce qui concerne l'eau, il est vrai que c'est une difficulté importante qu'il ne faut pas négliger. Toutefois, cela est dû surtout aux techniques de l'agriculture intensive, qui négligent les systèmes de régulation de l'arrosage pour des raisons de coûts. Voir à ce sujet le rapport ministériel (Bisch 2018). On retrouve là l'impact de la mondialisation qui pousse les agriculteurs vers la compétitivité au détriment de la gestion de l'environnement. Un des éléments essentiels de la solution, c'est la sortie du mode concurrentiel dans le secteur agricole, afin de relâcher les contraintes de coût et inciter les agriculteurs à mettre en œuvre des solutions plus écologiques, dans le cas présent avec une plus grande maîtrise de la gestion de l'eau (système de goutte à goutte par exemple). Un autre élément du problème est le choix du mode de production. Le maïs, notamment, requiert énormément d'eau. L'option la plus avantageuse, en première génération, semble être la betterave, qui requiert 3 fois moins de surface agricole par hectolitre produit par rapport à une culture céréalière et qui peut être cultivée en hydroponie, avec une gestion parcimonieuse des ressources en eau. Il y a donc des solutions au problème de l'eau. Concernant l'usage d'engrais et de pesticides, là encore on peut le réduire en adoptant des règles commerciales interdisant la concurrence déloyale ou permettant d'aider les agriculteurs.

Au final, que cela soit clair, on ne peut pas remplacer le carburant de nos voitures exclusivement par le bioéthanol. Toutefois, il serait dommage de se passer d'une source d'énergie qui représente déjà une part importante des besoins en carburant et qui pourrait aider à subvenir aux besoins énergétiques qui s'avèrent colossaux à l'horizon 2050. L'alternative (pas d'éthanol) est de passer à 100% de voitures électriques et de multiplier par près de 2 la production électrique française, ce qui est une véritable gageure. Développer le nucléaire, par exemple, n'est pas simple, en raison des conditions d'exploitation (exigence d'une source d'eau froide à proximité). Quant au développement des énergies renouvelables, on l'a vu, elles-mêmes requièrent un espace important. Enfin, l'usage intensif de batteries pourrait être la source de problèmes environnementaux majeurs (exploitation minière polluante, recyclage de certains matériaux) et questionne notre souveraineté énergétique. Le bioéthanol n'a pas ces inconvénients. Nous proposons donc de développer cette filière, en complément d'autres carburants (bio-NGV notamment) afin de maintenir les moteurs thermiques pour les voitures, en les associant à l'électrique pour des véhicules hybrides dans le cas de la conduite en ville.

Quelle pourrait être la part du bioéthanol ? De 1% de la production de céréales, on pourrait passer à 5% sans empiéter de manière significative sur la production alimentaire. Mais puisqu'il faut optimiser le rendement à l'hectare, c'est le bioéthanol de seconde génération (déchets viniques et forestiers) qu'il faut privilégier, ainsi que le bioéthanol issu de la betterave cultivée sous serre pour ce qui est du bioéthanol de première génération. A l'horizon 2050, on peut ainsi envisager que la production de bioéthanol pourrait être multipliée par 10 ou 20 (voir également les arguments de la section sur la démographie), afin de satisfaire une bonne partie des besoins en carburant liquide des voitures qui ne seraient pas électriques.

3.7 Contre les défauts de la mondialisation

On l'a vu à travers plusieurs exemples, la mondialisation non régulée des échanges a un impact significatif sur l'environnement. En particulier, elle pousse les agriculteurs à choisir une culture intensive en minimisant les coûts associés à la gestion de l'eau et en maximisant la croissance rapide des plantes à l'aide d'engrais et de pesticides, et en se souciant peu de la valorisation des déchets. Ces problèmes, ainsi que les solutions préconisées, sont clairement décrits dans le rapport de

l'ADEME (ADEME 2021). Pour autant, la transition n'est pas simple, car les aides fournies aux agriculteurs se font au coup par coup, et le problème de la concurrence déloyale reste entier. Un des éléments complémentaires et indispensables de la réponse à apporter est par conséquent de briser la concurrence déloyale au moyen de taxes et de lois contraignantes obligeant certaines productions sur le sol français, avec une préférence nationale pour les achats. C'est d'autant plus important que la valorisation des déchets, par exemple pour produire du biogaz, permet d'éviter de nouvelles cultures ou de nouveaux champs de panneaux solaires. La production d'engrais à partir de déchets provenant d'autres cultures permet également de réduire les besoins énergétiques associés à la production d'engrais. On comprend bien que le coût associé à cette stratégie n'est pas incitatif dans un contexte de concurrence internationale, c'est pourquoi les mesures associées à cette localisation de la production revêtent toute leur importance.

De plus, en réduisant les importations, on réduit la facture énergétique associée au transport en cargo depuis l'autre côté du globe. Ce n'est pas comptabilisé dans le calcul de la neutralité carbone du territoire, mais, comme nous l'avons indiqué précédemment, c'est important pour la réduction des GES des Français, critère indissociable de toute stratégie globale de réduction des GES.

3.8 Impact de la démographie

Dans l'étude de ses 4 scénarios, l'ADEME a indiqué qu'elle fixait au préalable les paramètres démographiques et donc la population totale en 2050 (69,7 M), ces éléments étant en dehors de son domaine d'expertise. Il est toutefois très important de considérer cette variable, car l'émission de GES est proportionnelle au nombre d'habitants. Si des efforts substantiels sont faits pour réduire de 10% l'émission de GES par habitant et que dans le même temps, la population augmente de 10%, globalement, l'émission de GES sur le territoire français stagnerait, et on s'éloignerait de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. De plus, comme cela a été souligné, le développement des énergies renouvelables requiert des surfaces importantes, en compétition avec les surfaces agricoles à destination de l'alimentation. Ceci nous ramène au concept d'empreinte écologique et aux limites des ressources naturelles exploitables par les habitants d'un territoire. La taille de la population est ainsi un paramètre clé qu'il convient de prendre en considération.

Dans son étude, l'ADEME a pris en compte les données de l'INSEE et a considéré une croissance naturelle faible de 0,1% (elle est actuellement de 0,21%, mais la tendance est à la baisse) et un solde migratoire positif de 70 000 personnes. Ces chiffres sont approximatifs et peuvent présenter certains biais, mais nous proposons malgré tout de les exploiter pour effectuer une projection à l'horizon 2050. Nos hypothèses sont les suivantes : dans les 2 premières options, la croissance naturelle est identique à 0,1% par an et nous considérons dans le premier cas un solde migratoire constant de 70 000 personnes (hypothèse ADEME) et dans le deuxième un solde migratoire nul. Enfin, dans la troisième option, nous proposons une croissance naturelle à 0,15% (politique nataliste) avec un solde migratoire annuel négatif de 80 000 personnes, ce qui correspond à peu près à une division par 2 de l'immigration (150 000 au lieu de 300 000), suite à une politique volontariste de la réduire pour des raisons que nous ne discuterons pas ici. Les résultats sont présentés figure 6. Remarque : seule la population métropolitaine est considérée afin de pouvoir comparer les chiffres sur la même base que ceux de l'ADEME.

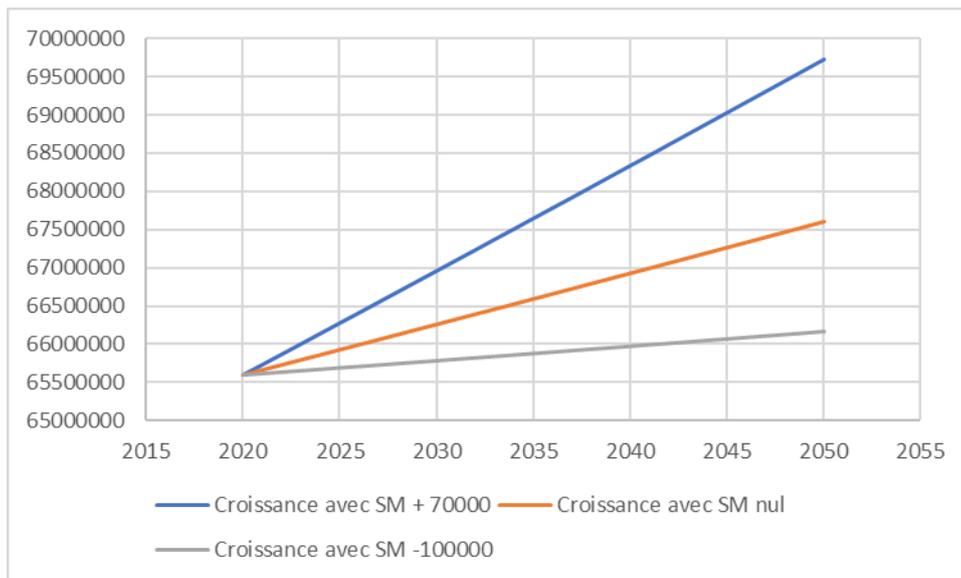


Figure 6 : Evolution de la population selon que le solde migratoire soit positif, constant ou négatif.

On constate que l'impact est important puisque si la croissance de la population reste la même, il y aura en 2050 4,1 millions d'habitants en plus, ce qui représente une augmentation de 6%. Cela signifie au niveau des besoins énergétiques, si le besoin par habitant est constant, également une augmentation de 6%, et donc des difficultés accrues pour la transition écologique et la recherche de substitutions aux énergies fossiles. De plus, dans cette projection, la part due au solde migratoire n'est pas négligeable, puisque si on compare avec la 3^{ème} courbe, la différence est également d'environ 6%. A la lecture du rapport de l'ADEME, vus les efforts nécessaires pour chaque réduction de 1% des GES, on comprend que le nombre d'habitants soit une variable qui doit être sérieusement prise en compte dans la stratégie globale. En outre, relativement aux scénarios de l'ADEME, 6% de population en moins signifie également un besoin en surfaces agricoles dédiées à l'alimentation réduit de 6%. Autrement dit, c'est autant de surfaces agricoles en plus que l'on peut destiner à autre chose, par exemple la production de biocarburants. En théorie, 6% des surfaces cultivées alimentaires représente des surfaces gigantesques, de l'ordre de 1,7 millions d'hectares, soit plus de 5 fois les surfaces actuellement dédiées à la production d'éthanol. De 12 TWh, on pourrait ainsi atteindre 60 TWh. On gagnerait ainsi à la fois en baissant les besoins de consommation et en augmentant la production énergétique. Et ce n'est pas tout, dans le scénario 4, une part des besoins en énergie est dédiée à la fixation et au stockage du carbone, pour compenser les GES émis par les carburants d'origine fossile des secteurs aérien et maritime en particulier. Or, si la population est moindre, la consommation dans les secteurs aérien et maritime est moindre également, ce qui permet de réduire les besoins de stockage du CO₂.

Alors que les indicateurs économiques et sociaux incitent à stimuler la croissance de la population, l'impact démographique sur l'environnement et sur la soutenabilité de la transition énergétique suggère au contraire qu'il faut la limiter. En vérité, ce n'est pas nouveau, de nombreuses associations écologistes soulignent depuis longtemps l'impact de la surpopulation mondiale sur l'écosystème terrestre. D'ores et déjà, les politiques publiques françaises doivent considérer que la croissance de la population doit être maîtrisée et limitée pour répondre aux problématiques environnementales et aux défis posés par la production énergétique décarbonée dans l'hypothèse d'une souveraineté énergétique de la France.

A l'échelle mondiale, est-ce que chaque pays ne devrait pas avoir une population adaptée aux ressources de son territoire et ne pas dépendre des autres pour l'eau, l'alimentation, et l'énergie.

Pour ce qui concerne la France, Le meilleur compromis repose sans doute sur une stagnation ou une croissance faible de la population, suivant la tendance naturelle, comme cela est suggéré par la troisième courbe. Il est possible d'envisager une baisse de la natalité et de conserver une immigration forte, mais la régulation des naissances pose un problème éthique. Il est donc sans doute préférable de préserver la natalité existante et d'adopter une politique visant à réduire l'immigration.

3.9 Puits de carbone

L'étude de l'ADEME aborde la problématique du captage et séquestration du carbone dans un chapitre dédié, en particulier pour les besoins du scénario 4, celui que nous avons retenu, au moins dans ses grandes lignes (ADEME 2021). Les solutions préconisées sont nombreuses. Citons quelques exemples notables, sans être exhaustifs :

- La reforestation.
- La carbonatation minérale, par exemple l'association entre carbonate et calcium afin de produire des roches calcaires potentiellement utilisables dans le domaine du bâtiment.
- Les biochars, c'est-à-dire des composés organiques solides résultant de la pyrolyse de biomasses, que l'on pourrait ensuite stocker facilement.
- Les DACCS, c'est-à-dire les techniques de capture directe du CO₂ dans l'air, suivies d'un stockage. Le gain en termes de GES est évident, mais ces systèmes requièrent de l'énergie, ce qui déplace le problème.
- Les BECCS, qui consistent à capturer le CO₂ issue d'une combustion et à le transformer en un composé liquide stockable.

On le voit, il existe un grand nombre d'options possibles pour capter et séquestrer le carbone. La plupart des techniques étant encore d'un faible niveau de maturité, il n'est pas opportun à ce stade de définir précisément la ou les options les plus appropriées. L'essentiel est de comprendre qu'il y a des solutions et qu'il est important d'investir en R&D pour améliorer ces techniques, trouver les meilleures options et les mettre en œuvres. De plus, il revient à l'état de définir clairement ses priorités. Par exemple, si l'usage de matériaux riches en carbone pour le bâtiment (sans compter le bois) représente un surcoût non négligeable, l'état peut mettre en œuvre une stratégie volontariste de réduction des GES en prenant en charge ce surcoût, ou en taxant les matériaux qui ne permettent pas le stockage du carbone.

4. Conclusion

Tout d'abord, il faut reconnaître à la fois l'ampleur des enjeux, neutralité carbone à l'horizon 2050, abandon progressif des énergies fossiles, souveraineté énergétique, et la grande complexité des variables du problème, que ce soit au niveau de la diversité des sources d'énergie, chacune ayant ses qualités et ses limites, au niveau organisationnel, sociétal et bien entendu au niveau de l'impact environnemental.

Le rapport de l'ADEME sur la transition énergétique est une source particulièrement riche, précise et instructive sur laquelle nous devons nous appuyer pour définir la stratégie à suivre vers l'horizon 2050. Chacun des 4 scénarios étudiés par l'ADEME comporte des propositions intéressantes, mais c'est le scénario 4 qui à notre préférence, car il nous paraît le plus réaliste et le plus acceptable pour la population. Globalement, l'objectif est de préserver nos modes de vie, avec une maîtrise des besoins énergétiques des Français. On peut noter que dans les 3 autres scénarios, la baisse de la consommation énergétique est très importante, alors même que la population est en croissance, ce qui paraît peu réaliste. Concrètement, le scénario 4 conduit également à l'abandon progressif des

énergies fossiles et permet d'atteindre la neutralité carbone au plus tard en 2050. La difficulté majeure est de trouver les sources d'énergie qui vont remplacer les énergies fossiles. Le mix énergétique que nous proposons est légèrement différent de celui de l'ADEME. Nous préconisons en effet un investissement prioritaire dans le couplage photovoltaïque / STEP en veillant à préserver au maximum nos forêts et nos paysages, avec un objectif à préciser, qui pourrait être de l'ordre de 200 TWh (l'ADEME propose 180 TWh). Concernant l'énergie nucléaire, nous proposons d'augmenter sa capacité comme le prévoit l'ADEME, mais cela ne sera pas facile et surtout, cela prendra du temps, car de nombreuses centrales sont en fin de vie, et les sites potentiels pour des centrales d'envergure ne sont pas nombreux. Comme l'explique clairement l'agence de l'énergie, un développement massif de la biomasse est attendu, notamment par valorisation des déchets de toute nature ainsi que par la production de biogaz et de biocarburants. Nous proposons d'aller encore plus loin en développant, de façon raisonnable, la filière bioéthanol de 1^{ère} et 2^{ème} génération en tant que carburant pour certaines voitures. Par rapport au scénario 4, nous pourrions avoir 120 TWh de bioéthanol (10 fois plus qu'aujourd'hui). Sur ces 120 TWh, 60 TWh de biomasse pourraient être produits en plus relativement au scénario 4 de l'ADEME grâce à la réduction des besoins de surfaces agricoles (population plus faible). L'éolien terrestre, l'éolien en mer, les hydroliennes, et d'autres sources d'énergie doivent aussi être considérées, sans être prioritaire eu égard à leurs coûts, et surtout en veillant à leur acceptabilité par la population. Par rapport au scénario 4, cela pourrait conduire à 10 ou 20 TWh en moins, mais ce serait compensé par le photovoltaïque (+20 TWh, voir paragraphe précédent). Comme on peut le constater, bien que les besoins associés à notre scénario soient moindres (hypothèse démographique différente), la production globale est supérieure (+60 TWh), grâce à l'hypothèse démographique différente. Puisque certains éléments sont plutôt favorables à notre scénario, plutôt que de réduire les ambitions, nous proposons au contraire de rester sur la même ligne en ce qui concerne l'effort de stockage du carbone. De façon logique, cela devrait ainsi permettre d'atteindre l'objectif de neutralité carbone avec environ 3 ans d'avance et d'avoir un solde négatif de GES en 2050, c'est-à-dire que la France pourrait activement participer à la réduction mondiale des GES.

Pour finir, rappelons que le sujet est complexe, qu'il faut être prudent sur les options qui semblent les plus avantageuses et que ce scénario ne doit surtout pas être considéré comme un objectif définitif et non négociable. Il faut au contraire envisager une étude permanente impliquant les acteurs de chaque domaine, étudier toutes les problématiques afin d'adapter et de modifier éventuellement les choix de la façon la plus pertinente, pour atteindre au final les objectifs qui ont été fixés, notamment la neutralité carbone le plus tôt possible.

Références

(AIE 2021) Data and statistics : France - Balances 2020 [archive], Agence internationale de l'énergie, octobre 2021.

(ADEME 2010) Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie, « Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France », rapport de l'ADEME acv_biocarburants_premiere_generation_france_2010-rapport, février 2010.

(ADEME 2013) Document technique, L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 ».

(ADEME 2021a) Transitions 2050, Choisir Maintenant, Agir pour le Climat, ADEME éditions, novembre 2021. Voir également les autres rapports (feuilletons) associés.

(ADEME 2021b) Transitions 2050, Choisir Maintenant, Agir pour le Climat, Feuilleton, Mix Electrique, Quels alternatives et quels points communs ? Rapport de l'ADEME, Février 2022.

(Affaire du Siècle 2021) Site web de l'association Notre Affaire à Tous, chapitre « L'affaire du siècle », <https://notreaffaireatous.org/actions/laffaire-du-siecle/>

(Bisch 2018) Pierre Etienne Bisch, « Cellule d'expertise relative à la gestion quantitative de l'eau pour faire face aux épisodes de sécheresse », Ministère de la transition écologique et solidaire, Rapport CGEDD n° 011865-01, CGAAER, mai 2018.

(Cancel 2019) Cancel Christophe Artaud, document pédagogique de l'Université d'Aix-Marseille, BTS Electrotechnique, le_solaire_photovoltaique_etat_de_lart-cycle_de_vie-energie_grise.

(CRE 2019) Rapport de la Commission de Régulation de l'Energie, Coûts et rentabilités du grand photovoltaïque en métropole continentale, février 2019.

(De Wild-Scholten 2013) M.J. de Wild-Scholten, Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 119, Pages 296-305, 2013.

(Finon 2015) Dominique Finon, La taxation du carbone, un instrument difficile à manier, Leçons de l'expérience internationale, La Revue de l'Énergie n° 625 – mai-juin 2015.

(GIEC 2021) Rapport du GIEC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Août 2021 : <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-reportworking-group-i/>

(MTE 2021) Site web du Ministère de la Transition Ecologique, « Bilan Energétique de la France », <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/6-bilan-energetique-de-la-france>

(Ministère 2022) Site web du Ministère de la Transition Ecologique, Stratégie Bas-Carbone, <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

(Ministère 2006) Rapport du Ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie, « Rapport sur les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France, 2006.

(Prix-Elec 2022) Site web Prix-Elec, Coûts de Production Électricité en France en 2022 : Répartition et Analyse, <https://prix-elec.com/energie/production>

(Wiki EC 2022) Page Wikipédia sur l'Empreinte Carbone, paragraphe consacré à la France, https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_carbone#France

(Wiki EE 2022) Page Wikipédia sur l'Empreinte Ecologique https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_%C3%A9cologique