

NEUTRALITÉ CARBONE

Transition(s)2050 – Enseignements énergétiques pour la neutralité carbone

Eric Vidalenc*, David Marchal*,
Jean-Michel Parrouffe*

@ 65852

Mots-clés : neutralité carbone, électricité, gaz, flexibilité, France

Si l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 pour un pays comme la France repose sur un ensemble de leviers de transformations profondes du système productif (industrie, agriculture...) et des modes de vie, l'évolution du système énergétique (tant dans son offre que dans sa demande) est centrale. Le présent article présente les principaux enseignements issus de l'exercice de prospective Transition(s)2050 conduit par l'ADEME entre 2019 et 2022 concernant le système énergétique français, à la fois sur la consommation, l'énergie primaire et les vecteurs.

La neutralité carbone est devenue, depuis l'Accord de Paris de 2015, le concept politique et physique structurant les politiques environnementales et climatiques. Par incidence, la prospective énergétique se trouve très fortement impactée avec désormais un objectif incontournable en ligne de mire pour 2050. En outre, la neutralité carbone ne traite pas que des émissions de gaz à effet de serre (mais aussi des puits de carbone), et pas seulement du dioxyde de carbone (CO₂) (mais des principaux gaz à effet de serre dont le méthane [CH₄] et protoxyde d'azote [N₂O]). La nécessité d'une approche multisectorielle et transversale apparaît ainsi évidente pour traiter de l'ensemble du spectre de la question climatique¹.

Les émissions nationales en France sont de l'ordre de 430 Mt d'eqCO₂/an en 2019 (avec une forte baisse en 2020 à la suite des confinements et mesures sanitaires à moins de 400 Mt). 10 % des émissions de gaz à effet

de serre seulement sont liées à l'industrie de l'énergie en 2019-2020 [CITEPA, 2021]. Mais les émissions énergétiques (liés à la combustion de CO₂ notamment dans les véhicules, systèmes de chauffage ou procédés industriels ou agricoles) sont bien plus importantes, de l'ordre de 300 Mt, soit de l'ordre de 70 % des émissions en France.

L'évolution des modes de vie, des consommations de biens, de services, d'alimentation, l'aménagement du territoire sont autant de leviers pour faciliter l'atteinte de la neutralité carbone, qui traite d'autres sujets que le seul sujet énergétique. Et si un tel exercice de prospective va bien au-delà de la seule question énergétique, et *a fortiori* de la question du système électrique, dans *La Revue de l'Énergie*, il sera toutefois logiquement question du système énergétique et de ses différents composants et vecteurs.

* ADEME.

Archétypes et intérêt de scénarios contrastés

La réalisation d'un exercice de prospective sur la transition écologique à 2050 devrait dans l'idéal intégrer toutes les contraintes environnementales, au-delà du seul enjeu climatique. La complexité d'une telle approche, et ses interactions avec le reste du monde rend la chose difficile, notamment pour appréhender conjointement les enjeux locaux (pollution locale, biodiversité, sols, paysages) et globaux (changement climatique, impacts sur les ressources [métaux, matériaux non métalliques, biomasse, combustibles fossiles]...). Dans l'exercice de prospective Transition(s)2050, l'ADEME a priorisé l'objectif de neutralité carbone en 2050, au niveau métropolitain, en en faisant un objectif normatif de tous les scénarios construits, tout en cherchant à caractériser les autres impacts environnementaux.

L'ADEME a ainsi structuré son exercice autour de 4 récits décrivant des sociétés et modes de vie contrastés en 2050. Ils sont issus des archétypes des SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) présents dans la littérature scientifique depuis une dizaine d'années et repris par

le GIEC notamment dans son rapport 1,5° de 2019, et adaptés au contexte français.

Cette approche a permis de tester des hypothèses très contrastées et donc d'explorer des voies de transition fondamentalement différentes. Car il est nécessaire de rappeler que si l'objectif de neutralité carbone n'est plus discuté physiquement et (presque plus) politiquement, en tout cas en France, notamment au vu des engagements internationaux (Accord de Paris), les moyens de l'atteindre sont eux encore discutables. L'idée de l'ADEME était d'évaluer la pertinence de différentes voies de décarbonation pour enrichir les travaux de la Stratégie nationale bas carbone 3 (SNBC3) ou Stratégie française énergie climat (SFEC). C'est justement l'objet de Transition(s)2050 de présenter et d'évaluer les différentes options pour les trente petites années devant nous, sachant que l'avenir sera très sûrement composé d'hybridations de ces scénarios. Il faut toutefois garder à l'esprit la cohérence tant en termes de récit mais aussi en termes de bouclage énergétique que les scénarios présentent (exemple : les consommations électriques des puits de carbone [DACCS] sont prises en compte pour la demande adressée au système électrique).



Figure 1. Les quatre archétypes des scénarios de neutralité carbone et quelques éléments les caractérisant

Par la suite seront présentés les principaux enseignements de cette prospective sur le système énergétique avec d'abord un point central sur le niveau de consommation énergétique projeté dans les quatre trajectoires. Ensuite, l'évolution du mix énergétique sera abordée, avec notamment un focus sur le rôle central de la biomasse à la croisée de plusieurs enjeux (alimentaire évidemment, énergétique, matériaux mais aussi, et c'est nouveau dans la prospective, en tant que puits de carbone). Les vecteurs gaz et électriques feront l'objet de deux parties distinctes pour décrire les évolutions majeures qu'ils doivent connaître pour répondre aux enjeux de décarbonation. Une partie présentera le rôle croissant des réseaux électriques dans un contexte de productions plus locales. Enfin, une dernière partie sera consacrée à la complémentarité de ces vecteurs, entre autres, dans le système énergétique futur.

1. La sobriété, socle des scénarios

La sobriété² touche tous les pans des scénarios (consommation d'énergie des ménages, mais aussi industrie, alimentation) et génère de fait des interactions entre les différents sous-systèmes. Il serait de fait inadéquat de la modéliser *in fine* uniquement sous la forme d'une analyse de sensibilité, toutes choses égales par ailleurs. De manière concrète, certains secteurs ou branches industrielles répondent à un marché d'abord national; une évolution forte de la demande intérieure aura donc forcément des répercussions sur l'appareil productif et les volumes de produits. C'est ce genre d'interactions que l'exercice Transition(s)2050 a permis d'appréhender. Ainsi, lorsque la demande de logements neufs est drastiquement réduite dans un scénario comme S1, la demande de matériaux de construction (et donc la production industrielle) se contracte en conséquence.

Si les deux premiers scénarios intègrent la sobriété comme un levier central, dans aucun des scénarios la demande énergétique totale ne croît par rapport à aujourd'hui. En effet, même dans le tendanciel (qui s'appuie sur les

dynamiques observées — pic de consommation d'énergie atteint en 2005 en France avec une baisse de l'ordre de 10 % depuis, ou encore pic de consommation brute d'électricité atteint en 2010 malgré le développement de nouveaux usages électriques — [SDES, 2020]), les efforts engagés et les dynamiques démographiques ou de saturation de marché (par exemple d'électroménager) aboutissent à une diminution significative de la consommation énergétique.

Au-delà du volet énergétique et climatique, la sobriété limite également la pression sur les ressources et présente plusieurs cobénéfices (sanitaires, économiques, environnementaux...) :

- Matériaux utiles pour assurer la transition écologique (TE) : les scénarios les plus sobres énergétiquement permettent de réduire les impacts environnementaux et besoins.
 - Les quantités utilisées pour les énergies renouvelables (EnR) et les véhicules électriques (VE) passent du simple au double entre S1 et S4 pour l'acier, l'aluminium, et le cuivre.
 - Concernant la construction : la quantité de matériaux varie d'un facteur 2 entre S1 et S4.
- Sols : les scénarios les plus sobres permettent de limiter la pression sur les sols,

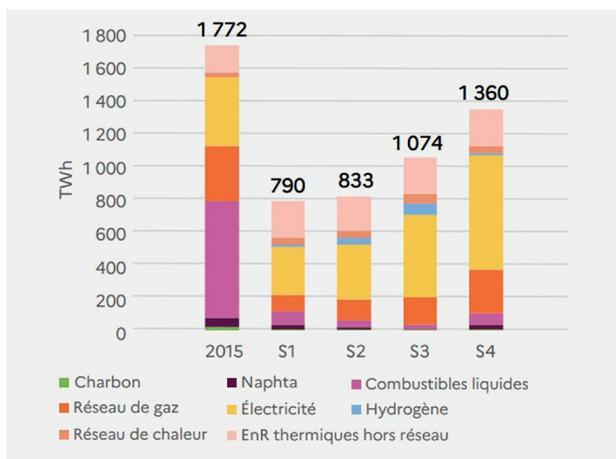


Figure 2. Consommation finale d'énergie par vecteurs énergétiques dans les 4 scénarios de neutralité carbone

avec 600 000 ha d'artificialisation en plus entre S4 et S1 (l'équivalent du département de la Charente).

- Eau d'irrigation : S1 permet de réduire de 30 % les besoins d'eau d'irrigation par rapport à aujourd'hui, tandis que S4 les augmente de 30 %.

Ainsi, la sobriété, à la différence d'autres leviers qui peuvent déplacer la pression sur d'autres enjeux écologiques ou dans d'autres territoires, permet souvent de réduire l'ensemble des pressions.

2. Évolution des énergies primaires : des renouvelables massivement

Le passage d'un système structuré par des énergies primaires associées à un usage (le pétrole pour les transports, le gaz pour la chaleur, le nucléaire pour l'électricité) à un système plus diversifié avec des énergies primaires majoritairement renouvelables et décentralisées va nécessiter des transformations techniques et sociétales profondes. Dans un système énergétique français bas carbone, les ressources primaires disponibles seront renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse, sols) et disponibles localement pour l'essentiel, et possiblement pour un certain complément, non renouvelables (uranium) et essentiellement importées.

En dépit des différences sectorielles importantes dans les transformations associées à chaque scénario, la diversification du mix de production énergétique national est un enjeu commun. En effet, les quatre scénarios reposent tous sur le développement massif des énergies renouvelables, ainsi que sur la diversification des vecteurs et énergies primaires.

Néanmoins, cette similarité cache des transformations d'ampleurs et de natures très différentes. Les différences importantes de niveau de demande impliquent un nombre d'installations de capacités de production et des investissements à réaliser également très contrastés. Les contraintes d'usages dans les transports, le

bâtiment, l'industrie et l'agriculture, ainsi que les limites de gisements ou le contexte plus général de chaque scénario, conduisent à des mix énergétiques qui se différencient selon les facteurs clés suivants :

- un recours important à la biomasse forestière pour l'énergie et la combustion, qui est plus marqué dans S1 et S2;
- un développement plus marqué des biocarburants dans S3 et S4;
- un développement plus marqué des réseaux de chaleur et de la pyrogazéification dans S3;
- un développement des technologies nucléaires EPR2 uniquement dans S3 et S4;
- un développement de l'éolien en mer flottant faible dans S1 et S2 et plus fort dans S3 et S4;
- un recours plus important à des importations de gaz dans S4 et à l'importation d'une partie de l'hydrogène et de la biomasse (sans précision sur son origine) nécessaire à l'industrie dans S3.

3. Recours à la biomasse : compromis entre de l'alimentation, énergie, matières et puits de carbone

Pour l'ensemble des scénarios, la production nationale de biomasse pour des usages autres qu'alimentaires (produits biosourcés, énergétiques) est environ deux fois supérieure à celle de 2017, ce qui représente un enjeu considérable pour les secteurs agricoles et forestiers. Convertie en énergie, cette biomasse contribue au mix énergétique dans des proportions significatives, de l'ordre de 290 TWh dans S1 à plus de 380 TWh dans S3. En termes relatifs, par rapport aux consommations intérieures brutes en énergie primaire, la biomasse contribue au mix énergétique à hauteur de 16,9 % (dans S4) à 31 % (dans S1) en 2050, contre 5,1 % aujourd'hui.

Cette évolution est le fruit de compromis différents dans chaque scénario entre le stockage de carbone dans les écosystèmes et la récolte accrue pour remplacer des matériaux et énergies non renouvelables, qui structurent

Transition(s)2050 – Enseignements énergétiques pour la neutralité carbone

notamment les scénarios de production forestière.

De tels niveaux de mobilisation sont en particulier permis par l'évolution des régimes alimentaires vers une réduction de la part carnée (il faut quatre fois moins de surface agricole pour nourrir un végétarien qu'un gros mangeur de viande³), qui permet de libérer des surfaces agricoles, facilitant la mise en place d'agroforesterie, le changement de pratiques agricoles et l'afforestation. Ces 3 leviers contribuent à l'augmentation du puits de carbone biologique (agricole et forestier).

Par exemple, dans S1 et S2 la biomasse additionnelle provient en grande partie des biomasses d'origine agricole : cultures intermédiaires, résidus de culture (pailles) et surplus de prairies, qui sont mobilisés et valorisés pour les usages non alimentaires. Par ailleurs, dans ces deux scénarios, les niveaux de prélèvement

de bois en forêt sont limités pour privilégier le stockage de carbone dans les écosystèmes. *A contrario*, S3 et S4 ont les plus hauts niveaux de mobilisation de la biomasse (augmentation des niveaux de prélèvement de bois en forêt notamment) pour maximiser les effets de substitution aux ressources fossiles et le stockage du carbone dans les produits plutôt que sur pied. Néanmoins, ce dernier levier demeure limité en raison du flux de biomasses orienté vers la valorisation énergétique. S3 intègre par exemple l'option d'un développement important de cultures lignocellulosiques pour répondre à la demande en bioénergies.

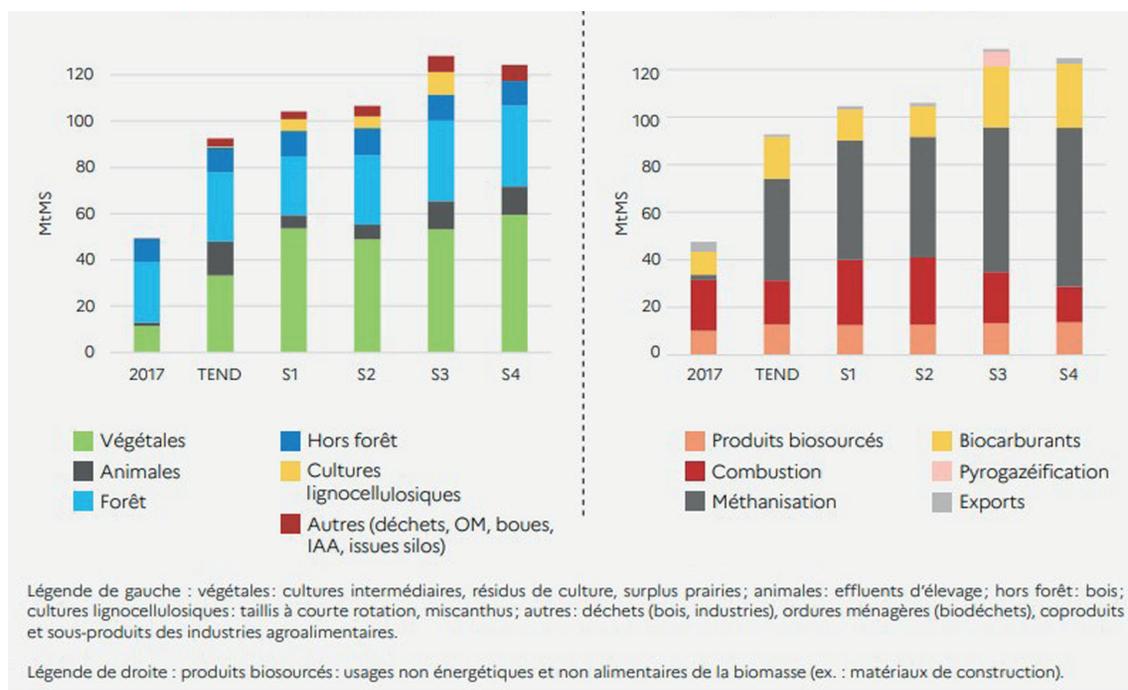


Figure 3. Ressources en biomasse utilisées dans les scénarios de neutralité carbone et tendanciel, valorisation non alimentaire

Figure 4. Usages de la biomasse dans les scénarios de neutralité carbone et tendanciel, valorisation non alimentaire

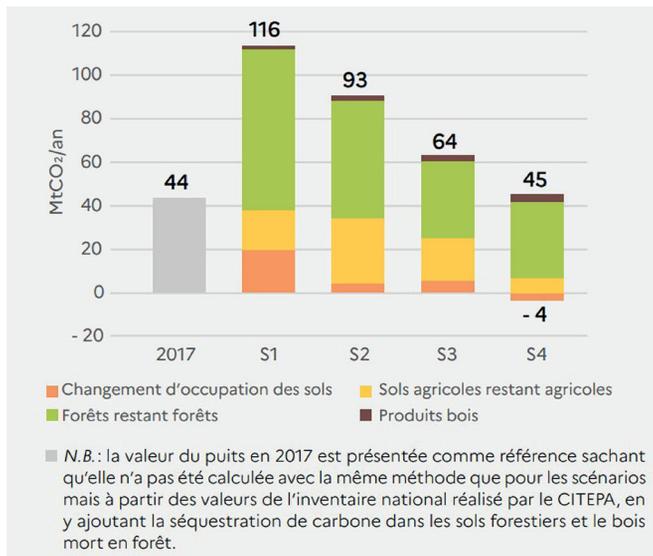


Figure 5. Les puits de carbone dans les quatre scénarios de neutralité carbone

4. Le vecteur gazier, une place réduite facilitant sa décarbonation... et de nouveaux services rendus en termes de flexibilité

Considérant les potentiels mobilisables pour une décarbonation forte du réseau de gaz, une priorisation des usages où le gaz est difficilement substituable apparaît nécessaire. Il n'apparaît pas faisable en moins de 30 ans, même dans des logiques très productives, de produire autant de gaz renouvelable en France que ce qui est consommé aujourd'hui.

Ainsi, la baisse de la demande en gaz apparaît dans tous les scénarios comme indispensables : de -15 à -66 % par rapport à 2015, notamment sous l'effet d'évolution structurelle de sobriété et d'efficacité énergétique (isolation des logements, rendement des chaudières...), mais aussi de la substitution par d'autres vecteurs (réseaux de chaleur, technologies hybrides, électrification de process industriels...). Ce sont les secteurs du bâtiment principalement et de l'industrie qui voient ces consommations diminuer drastiquement (de plus de 85 % pour le chauffage dans le résidentiel et tertiaire dans S1 et S2 par exemple).

Les usages prioritaires sont alors :

- Transport longue distance ;
- Industrie haute température (fours verriers, hauts-fourneaux) ;
- Gaz matière première ;
- Logements collectifs avec chauffage individuel actuellement équipés au gaz ;
- Production d'électricité.

Le potentiel de développement de la production de gaz renouvelable apparaît significatif (entre 30 à 43 % de la consommation actuelle de gaz fossile) avec :

- Un premier pilier, commun à tous les scénarios, mais dans des modalités assez différentes (modèle territorial, centralisé...) : la méthanisation (94 TWh à 128 TWh/an à horizon 2050). Cela signifie atteindre des taux de développement des capacités de biométhane dans tous les scénarios d'au moins +3 TWh/an (soit environ +150 méthaniseurs/an).
- Un deuxième pilier avec la méthanation/*power-to-methane* (jusqu'à 36 TWh).
- Enfin, en voie complémentaire, la pyrogazéification en fonction des ressources disponibles (jusqu'à 67 TWh) mais absente dans les trajectoires reposant le plus sur les territoires et la maîtrise de la demande (S1 et S2).

Transition(s)2050 – Enseignements énergétiques pour la neutralité carbone

Ainsi, à condition que la consommation de gaz diminue fortement par rapport à aujourd'hui (-50 % à -66 %) et considérant les potentiels cités, une forte décarbonation du gaz est possible (82 à 88 % dans S1, S2, S3).

Les usages et production du gaz renouvelable sont source de flexibilité et de résilience pour le système énergétique, et plus particulièrement le mix électrique, via notamment les pompes à chaleur hybrides ou d'autres

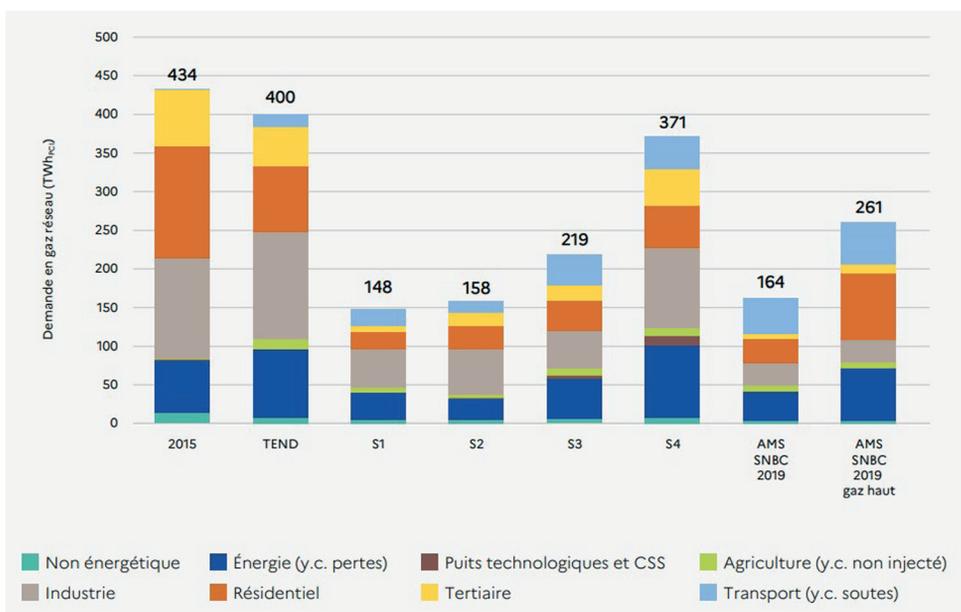


Figure 6. Consommation de gaz dans les 4 scénarios de neutralité carbone et le tendanciel en 2050, par rapport à 2015

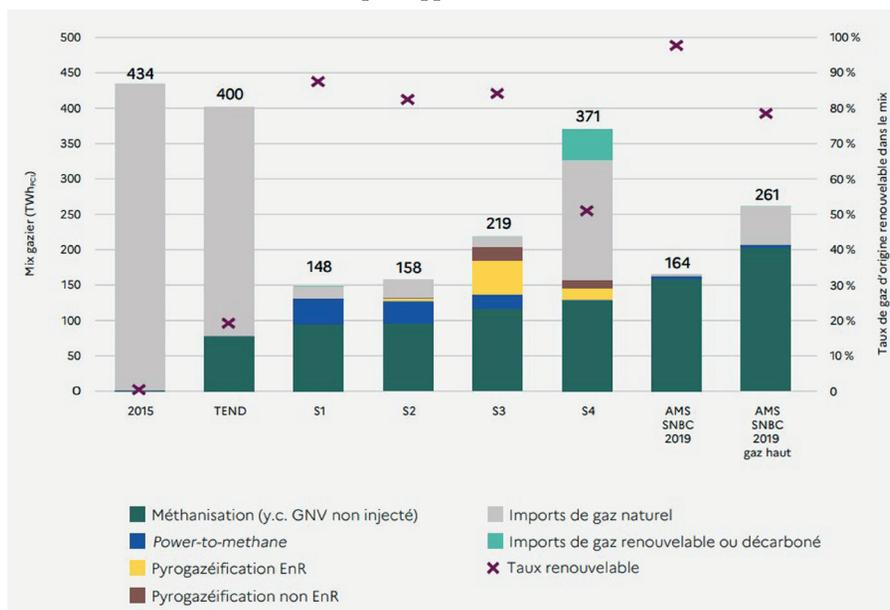


Figure 7. Mix gazier dans les quatre scénarios de neutralité carbone et tendanciel en 2050

technologies comme les centrales fonctionnant au gaz pour l'essentiel renouvelable.

5. L'électrification de l'ensemble des usages

Par «électrification», il faut entendre le mouvement massif de conversion des usages énergétiques aux vecteurs électriques. Dans Transition(s)2050, la part de l'électricité dans les usages croît en pourcentage dans tous les scénarios : de 27 % aujourd'hui, à 47-62 % en 2050. Ces chiffres seraient encore plus importants en prenant en compte le taux d'électrification indirect (prise en compte de l'électricité utilisée pour fabriquer les vecteurs finaux utilisés par chaque secteur consommateur [H₂, électro-carburant...]). En effet, la consommation finale d'électricité est de 301, 343, 517 et 709 TWh, respectivement dans S1, S2, S3 et S4, alors que la consommation totale est de 408, 535, 652 et 835 TWh. On peut constater qu'en

valeur absolue, les scénarios n'aboutissent pas nécessairement à une forte augmentation de la consommation d'électricité (S1 est inférieur à la consommation d'aujourd'hui, S2 légèrement supérieur). Ce point est important à souligner alors qu'aujourd'hui, le vecteur électrique peut être considéré comme le «vecteur à tout faire», avec toutes les limites et dépendances que cela implique. Par exemple, l'électricité pouvant être utilisée, lors des périodes de forte production EnR, pour décarboner les vecteurs gaziers, cela peut justifier le maintien d'un recours au gaz éventuellement plus important (par exemple dans l'industrie...) avec l'enjeu d'articuler le développement de nouveaux usages avec une offre électrique cohérente.

L'électrification évoque à la fois des opportunités et des contraintes : par exemple, la flexibilité nécessaire à une augmentation importante des EnR dans le mix électrique peut être vue comme une contrainte pour les utilisateurs ; mais dans le même temps, le

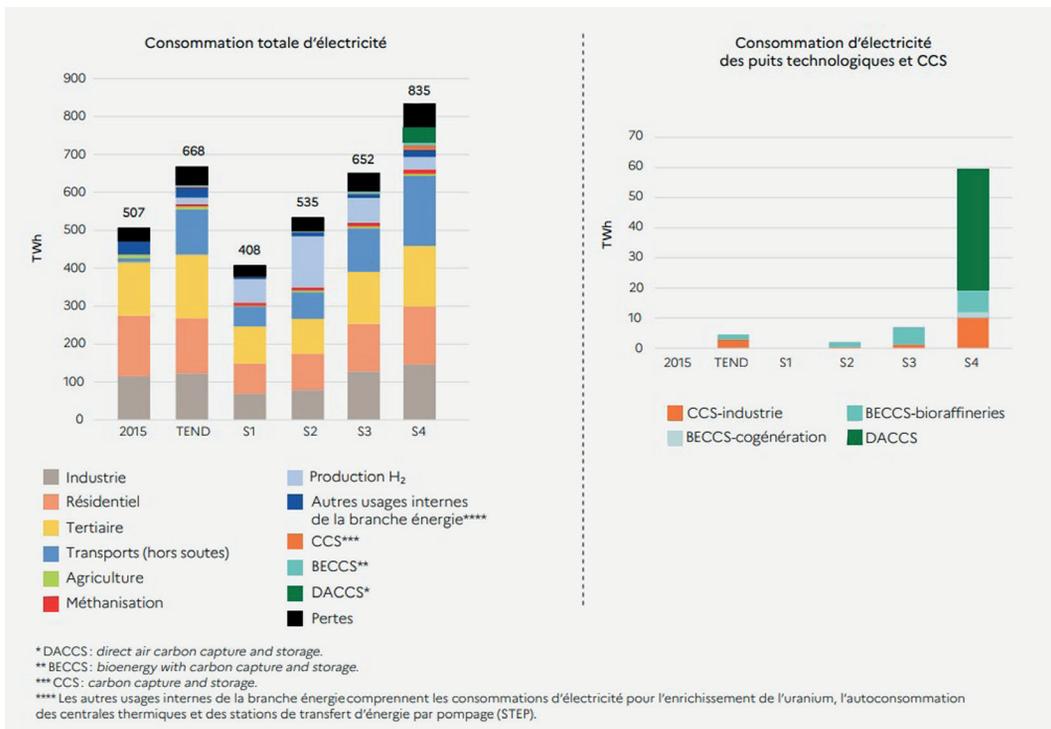


Figure 8. Consommation d'électricité par usages, par scénarios de neutralité carbone en 2050

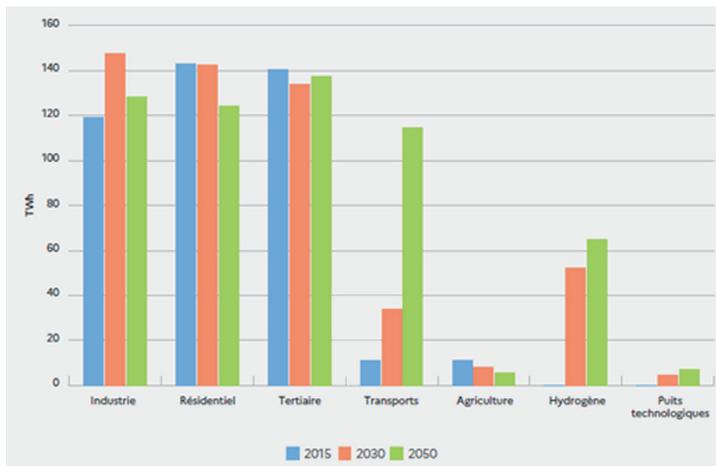


Figure 9. Évolution de la consommation finale d'électricité en 2030, 2050 dans S2 pour les grands secteurs consommateurs, plus les nouveaux usages tels que l'hydrogène et les puits de CO₂



Figure 10. Réflexions interservices conduites au sein de l'ADEME pendant le projet Transitions(s)2050 sur les opportunités et contraintes liées à l'électrification du système énergétique

caractère très facilement pilotable de certains nouveaux usages de l'électricité (électrolyseur, véhicules électriques ou tout autre équipement avec une capacité de stockage, y compris l'eau chaude sanitaire pour rester sur des technologies éprouvées depuis des décennies) apparaît comme une opportunité pour faciliter le développement des EnR. Une réflexion interne à l'ADEME conduite pendant le projet a permis de faire émerger quelques-unes des représentations associées à l'électrification.

Raisonnement sur l'électrification nécessite d'intégrer une approche systémique pour prendre en compte les besoins et potentiels des autres

vecteurs énergétiques. Il est également important de ne pas opposer mais plus sûrement d'articuler électrification, sobriété des usages et efficacité énergétique. En effet, l'évolution du mix électrique prendra du temps et les nouveaux moyens de production (EnR ou nucléaire) ont également des impacts (sols, ressources, déchets, etc.).

Au final, les différents secteurs s'électrifient à des degrés divers en fonction de certaines de ces limites, d'inerties des systèmes sociotechniques, ou de substituabilité faible. De manière synthétique, on peut identifier :

Secteurs sans regrets :

- **MOB** : véhicules particuliers et VUL avec charge intelligente
- **MOB** : autobus selon distance
- **BAT** : PAC dans logement isolé
- **H2** : électrolyse

Options sous conditions :

- **MOB** : transports de marchandises longues distances
- **BAT** : complémentarité avec les autres vecteurs énergétiques pertinents localement (bois, réseaux de chaleur)
- **BAT** : climatisation à 26°C
- Usages de l'**H2** encore incertains pour mobilité, sidérurgie, méthanol
- **IND** : chaleur haute et basse température

À éviter :

- **MOB** : VE attention à la surenchère de taille des véhicules et des batteries
- **MOB** : électrifier la mobilité sans changer les comportements de distance et de recharge
- **BAT** : effet joule, électrification des passoires énergétiques sans rénovation
- **H2** pour raffinage
- **IND** : électrification sans efficacité énergétique

Figure 11. Synthèse de la pertinence de l'électrification dans une perspective de TE pour le contexte français

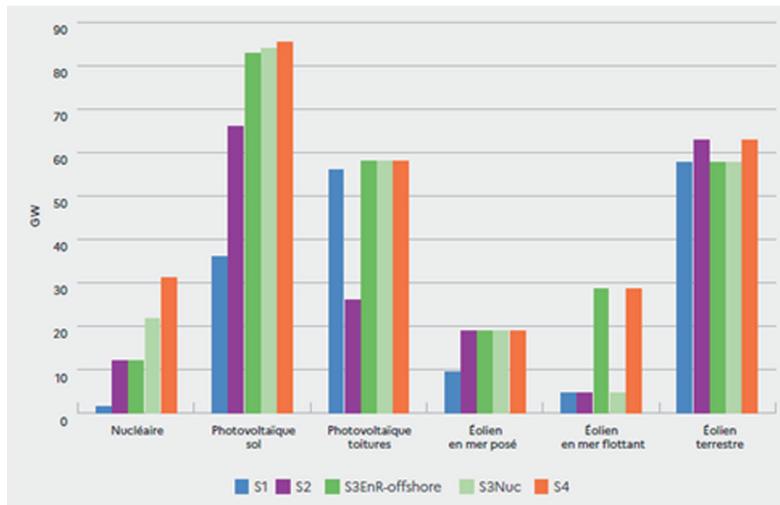


Figure 12. Capacités installées de nucléaire et d'EnR variables en 2050 dans tous les scénarios

- Les secteurs ou usages à électrifier en priorité et sans regret (avec parfois quelques conditions) : la mobilité des personnes, le chauffage de logements isolés avec des pompes à chaleur, et la production d'hydrogène qui viendra se substituer à de l'hydrogène issu d'énergies fossiles ;

- Ceux pour lesquels l'électrification ne peut se faire que sous conditions : les transports de marchandises, des usages d'électricité spécifiques avec un besoin d'efficacité énergétique et de sobriété (climatisation en limitant la température de consigne, industrie...);

- Ceux pour lesquels il faut éviter d'électrifier : la mobilité sans réflexion sur les modes de déplacement et les tailles de véhicules, les usages inefficaces dans les bâtiments, l'industrie, et pour les secteurs (raffinage par exemple) dont l'avenir n'est pas compatible avec les enjeux de la transition énergétique.

Concernant la production d'électricité, l'enjeu du système électrique sera de se maintenir à un niveau de décarbonation très bas (de 15 à 30 Mt de CO₂/an pour 550 à 500 TWh de production en moyenne ces dernières années),

et de s'améliorer, sachant qu'une grande partie du parc actuel sera obsolète et intégralement remplacée d'ici 2050. Un feuilleton spécifique [ADEME, 2022] a été dédié à la production et permet d'explorer différentes voies, avec ou sans nucléaire neuf notamment, pour répondre à des consommations électriques très variées. L'analyse sur le coût en €/MWh en 2050 aboutit à des résultats relativement similaires, malgré des mix techniques très contrastés : de -12 % (pour S2) à +4 % (pour S4) par rapport à 2020.

6. Un paysage énergétique en forte mutation avec des intégrations croissantes entre vecteurs

Au-delà des valeurs absolues, les interactions entre vecteurs devraient devenir plus importantes dans l'optique de la neutralité carbone et de la résilience du système énergétique, notamment dans un contexte de réchauffement climatique. Le concept d'intégration sectorielle, ou de couplage intersectoriel est illustré par la comparaison des 2 diagrammes de Sankey suivants (cf. Figures 13 et 14). Ainsi, jusqu'à 135 TWh d'électricité sont utilisés pour produire de l'hydrogène dans le scénario S2 pour une utilisation directe dans l'industrie, la mobilité, et permettant d'injecter 36 TWh de méthane de synthèse dans le réseau de gaz.

De façon plus détaillée, le couplage intersectoriel peut-être illustré par les exemples suivants :

- La flexibilité du système électrique apportée par la pilotabilité des électrolyseurs est importante car ils peuvent exploiter les potentiels renouvelables sans peser sur les périodes critiques. Ils représentent par exemple une puissance moyenne effaçable de 13 GW dans le scénario S2;
- Les pompes à chaleur hybrides avec appoint gaz (utilisant le gaz du réseau très majoritairement décarboné dans les 3 premiers scénarios) permettent de limiter la pointe de consommation sur le système électrique — pointe réalisée avec du gaz — lors des périodes les plus froides;
- Le couplage intersectoriel entre mobilité-bâtiment-production PV devrait pouvoir apporter une flexibilité aussi de premier ordre en incitant les VE à se recharger aux moments les plus adéquats pour le système électrique (notamment pendant la production PV). Dans S3EnR par exemple, en 2050, avec 33 M de VE dont la charge est pilotée intelligemment à 70 %, le profil journalier moyen de recharge présente une pointe de consommation méridienne à environ 18 GW, alors que la demande en soirée et de nuit ne dépasse pas 10 GW [ADEME, 2022];

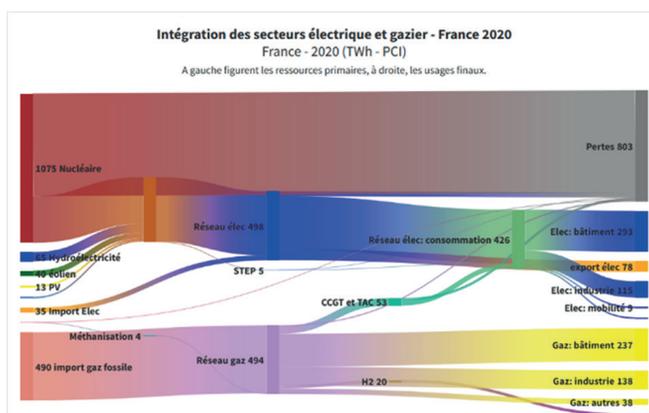


Figure 13. Diagramme de Sankey du système énergétique français en 2020 : une certaine « étanchéité » ou spécialisation des vecteurs énergétiques

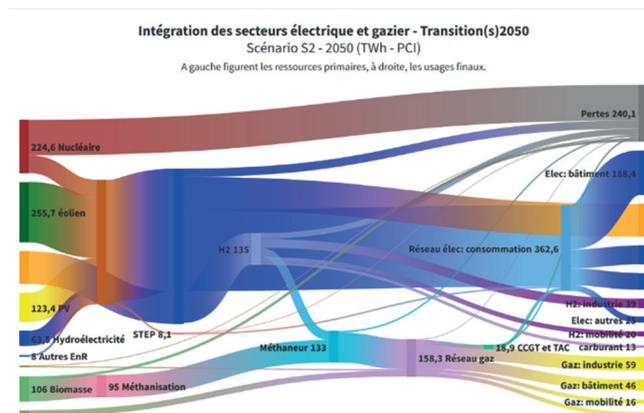


Figure 14. Diagramme de Sankey du système énergétique dans S2 en 2050 : une certaine « perméabilité » ou complémentarité des vecteurs énergétiques

- La biomasse solide et liquide permet la production de gaz renouvelables (hydrogène, méthane) utilisés pour sécuriser les approvisionnements dans tous les autres secteurs à certaines conditions (notamment la réduction de consommation).

Outre ces complémentarités entre vecteurs, l'adaptation des réseaux et plus largement du système énergétique à un climat plus chaud qu'aujourd'hui est incontournable. Les stratégies peuvent là aussi varier considérablement (entre solutions technologiques, fondées sur la nature, comportementales...) comme le feuilleton dédié l'illustre [ADEME, 2022].

7. Les réseaux, un rôle croissant, même dans un contexte de productions plus locales

Passer d'une production de gaz intégralement importée à quelques milliers de méthaneurs sur le territoire, passer de quelques dizaines de centrales électriques thermiques à des dizaines de milliers d'éoliennes et millions de panneaux solaires va profondément redistribuer les lieux de production sur le territoire. Le taux de couverture de la consommation d'électricité par tous les territoires va donc mathématiquement s'améliorer.

Mais dans le même temps, les échanges entre régions, et *a fortiori*, entre pays, vont augmenter de façon notable. Car ressources et capacités à les valoriser ne sont pas forcément également réparties. Les temporalités des productions renouvelables ne sont pas forcément en adéquation avec les consommations locales. Et des questions d'équité, de complémentarité, de valorisation des ressources locales et de solidarité vont se poser entre territoires, notamment dans un pays où la péréquation constitue une notion clé du système énergétique.

À titre illustratif, concernant les interconnexions avec l'étranger, celles-ci devraient considérablement se développer pour favoriser le développement des énergies renouvelables. Au-delà de 39 GW, les interconnexions

permettent certes de limiter l'écrêtement des EnR et de réduire le recours au gaz en Europe, mais ces valorisations ne compensent pas économiquement leur coût supplémentaire. Il y aurait donc de la place, voire du besoin, pour beaucoup plus de réseaux, sans pour autant que ces développements apparaissent illimités avec notamment des complémentarités entre sources et foisonnement.

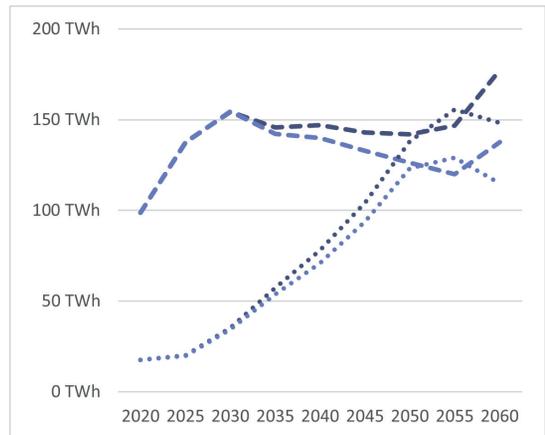


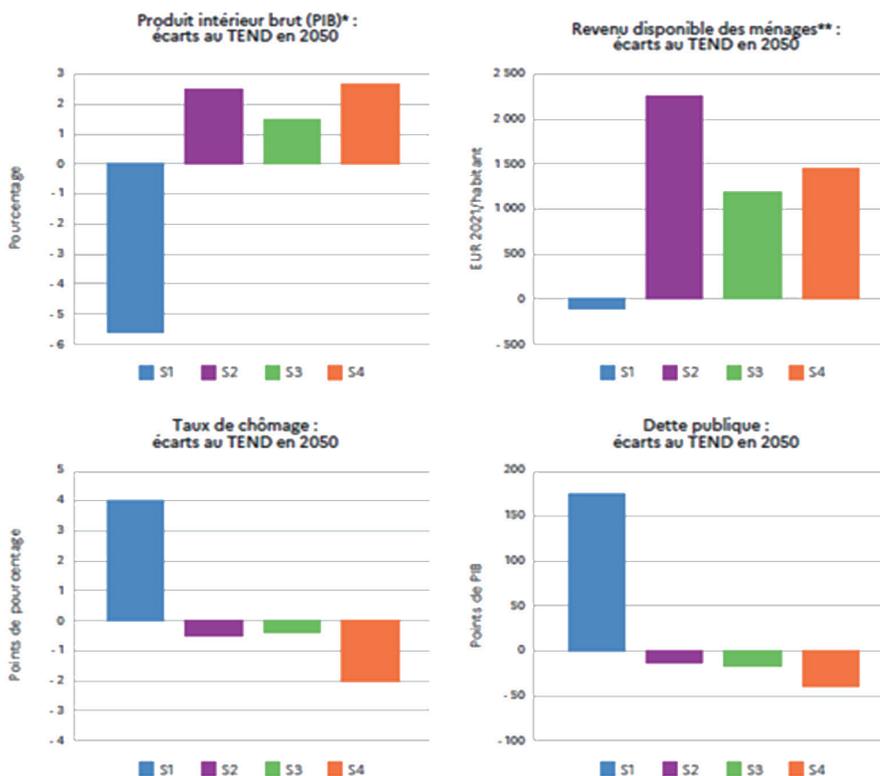
Figure 15. Évolution des flux d'imports (pointillés) et exports (tirets) annuels dans S2 avec variantes de capacités d'interconnexion (en foncé 45 GW d'interconnexion et en clair 39 GW)

Conclusion

Chaque scénario représente un monde avec son système sociotechnique, ses valeurs, croyances, régulations, etc. Mais au-delà de chacun des archétypes décrits succinctement dans le présent article, nous avons tenté ici de tirer les enseignements communs, ou bien de mettre en exergue les tensions qui risquent d'apparaître dans certaines trajectoires.

Il convient tout d'abord de rappeler que, par définition, tous les scénarios atteignent la neutralité carbone à 2050. Certains la dépassent même, atteignant des émissions négatives annuelles (S1, S2 et S3 avec respectivement -42, -28, -9 Mt eqCO₂/an en 2050), émissions

négatives pouvant être perçues comme une assurance en cas de défaut d'une option ou levier mobilisé dans ce scénario. Mais au-delà du point d'arrivée, chaque scénario doit aussi s'apprécier dans sa temporalité et sa trajectoire complète, ainsi qu'à l'aune d'autres indicateurs socio-économiques ou environnementaux. À titre illustratif, tous les scénarios ne respectent pas à l'horizon 2030 les objectifs d'énergies renouvelables fixés dans les lois TECV ou EC, ou bien les réductions de GES du Fit for 55 européen. Plus structurellement, lorsque l'on calcule l'intégrale des émissions sur la période 2020-2050, entre S2 et S4 par exemple, c'est l'équivalent de plus de 4 années d'émissions annuelles françaises qui sont émises dans S4! Sur des aspects socio-économiques



* Tous les scénarios, y compris S1, ont un PIB croissant. La croissance est cependant plus faible dans S1 que dans le TEND.

** Revenu disponible brut des ménages, après factures énergétiques et annuités d'emprunts liées aux investissements d'efficacité énergétique dans le transport et le logement, après redistribution de la taxe carbone.

Figure 16. Comparatif des principaux agrégats macroéconomiques : PIB, taux de chômage, revenu disponible des ménages, dette publique

également, les évaluations macroéconomiques permettent d'apprécier les trajectoires à l'aune d'autres critères.

En premier enseignement majeur, la baisse de la consommation énergétique finale est un point clé si l'on ne veut pas faire reposer la neutralité carbone sur des puits de carbone encore incertains et risqués. La sobriété permet notamment dans cette perspective d'avoir de nombreux cobénéfices environnementaux au-delà des seules réductions de gaz à effet de serre et d'être un levier mobilisable pour partie rapidement. Ensuite, les trois vecteurs majeurs de la transition seront l'électricité, la biomasse et le gaz, avec des enjeux de décarbonation différents : une décarbonation à maintenir et améliorer légèrement pour l'électricité, une soutenabilité d'exploitation à assurer pour la biomasse, et une décarbonation à réaliser pour le gaz aujourd'hui encore très largement fossile. En 2050, si le vecteur électrique peut sembler hégémonique, avec une place plus importante qu'aujourd'hui, la biomasse et le vecteur gaz doivent tenir un rôle significatif dans le système énergétique, pas uniquement en termes quantitatifs, mais également dans la diversité, la flexibilité, la souplesse et la résilience qu'ils peuvent apporter au système énergétique (et électrique notamment).

Il apparaît aussi que les 28 années qu'il reste pour atteindre la neutralité carbone sont en fait bien peu, particulièrement à l'échelle des inerties et temporalités du système énergétique où les infrastructures sont construites pour plusieurs décennies. Il convient donc d'éviter dès à présent tous les investissements qui pérennieraient une dépendance aux énergies fossiles, et d'accélérer les efforts pour se mettre sur une trajectoire cohérente avec les objectifs que nous nous sommes collectivement fixés avec l'Accord de Paris, et plus particulièrement en France dans la loi Énergie Climat de 2019. Que ce soit concernant la sobriété, l'efficacité ou la décarbonation de l'offre énergétique, aucune des dynamiques actuelles n'est en phase pour être au rendez-vous de la neutralité carbone d'ici 2050. Il convient d'accélérer et changer de rythme dans toutes les politiques concernant

le sujet climatique, c'est-à-dire l'ensemble des politiques publiques (mobilité, industrie, économie, logement, agriculture, énergie...).

Enfin, si la transformation du système énergétique français est indispensable pour l'atteinte de la neutralité carbone, l'atteindre seule ne serait pas d'un grand intérêt pour le climat vu le poids actuel des émissions françaises, que ce soit en approche nationale ou même d'empreinte. Les questions de coopération seront donc centrales dans les années à venir. À la fois en termes techniques comme les analyses l'illustrent sur les interconnexions pour bénéficier au mieux des complémentarités territoriales et entre vecteurs énergétiques; mais aussi en termes géopolitiques, pour que les premiers pays à réaliser ces changements puissent en faire bénéficier d'autres moins avancés dans leur décarbonation. Les freins sont de types divers selon les contextes géographiques (systèmes techniques et modes de vie pour l'Amérique du Nord, croissance démographique pour l'Afrique, développement économique rapide pour l'Asie...) et appelleront donc des réponses différentes. Sans cela, «être le premier pays à la neutralité carbone» ne servirait en France qu'une simple cause d'indépendance énergétique, objectif louable pour un pays comme la France qui importe l'intégralité de ses énergies primaires non renouvelables, mais bien insuffisant pour préserver un climat vivable d'ici la fin du siècle (entre +1,5 °C et +2 °C en 2100, alors que nous sommes déjà à +1,1 °C [IPCC, 2022]), que ce soit pour les citoyens français ou du reste du monde.

RÉFÉRENCES

- ADEME, 2022. Modélisation et optimisation des mix électriques français et européen sur la période, 2020-2060.
- ADEME, 2021. Rapport Transition(s)2050.
- ADEME, 2022. Feuilleton Mix électrique.
- ADEME, 2022. Feuilleton Les effets macroéconomiques.
- IPCC, 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability, Assessment Report 6, WGII.
- IPCC, 2019. Special Report 1.5°.
- SDES-MTES, 2020. Chiffres clés de l'énergie, Édition 2020.

NOTES

1. La question de l'adaptation a été traitée dans un «feuilleton» spécifique, car même dans un monde neutre en carbone à l'horizon 2050, le réchauffement climatique global sera supérieur (+1,5 °C à minima) à ce qu'il est en 2020 (+1,1 °C), et ses impacts aussi. Cette question n'est toutefois pas développée dans le présent article.

2. Le GIEC dans le volet 3 de son AR6 publié en 2022 mentionne la sobriété pour la première fois et apporte une définition de celle-ci reprise ici : «ensemble de mesures et de pratiques quotidiennes qui évitent la demande en énergie, matériaux, sol et eau tout en offrant à chacun une vie décente dans les limites planétaires». En France, des acteurs institutionnels, académiques ou associatifs comme négaWatt, Virage Énergie, ECEEE entre autres, portent depuis des années la notion de sobriété, particulièrement appliquée au secteur de l'énergie, et ont contribué à faire émerger cette notion dans les scénarios de RTE ou l'ADEME en 2021.

3. Régime alimentaire contenant 170 grammes de viande par jour (incluant tous les produits carnés, y compris sous forme de produits transformés), ce qui correspond à une à deux portions de viande par jour.

BIOGRAPHIES

Directeur adjoint de l'ADEME Hauts-de-France, **ERIC VIDALENC** a été en charge du pilotage du projet Transition(s)2050 de 2019 à 2021. Il intervient ponctuellement à titre d'expert pour la Commission européenne (H2020, Horizon Europe). Par ailleurs, il est conseiller scientifique de Futuribles; nommé au Comité Éthique et Société de l'ANDRA.

DAVID MARCHAL est directeur exécutif adjoint de l'expertise et des programmes. Il coordonne notamment les différents travaux de prospective réalisés au sein de sa direction et a par ailleurs par le passé piloté plus spécifiquement les études relatives au mix électrique, ainsi que les contributions de l'ADEME à la PPE.

JEAN-MICHEL PARROUFFE est expert national Énergie à l'ADEME. Docteur en génie chimique de l'université McGill (Montréal), titulaire de maîtrises en génie mécanique de l'université Laval (Québec) et en génie industriel de l'École polytechnique de Montréal, il a travaillé comme chercheur chez Hydro-Québec et à l'Institut Canadien de Recherche sur les Pâtes et Papiers. Ensuite, il a œuvré comme consultant en gestion des technologies de l'énergie, puis comme directeur de projets d'une firme spécialisée dans les projets d'énergies renouvelables. De 2007 à 2022, il était chef du service Réseaux et Énergies renouvelables de l'ADEME qui a pour mission le développement des EnR, des réseaux de chaleur et réseaux électriques intelligents, ainsi que du stockage de l'énergie.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Consommation électrique et neutralité carbone, *Bertrand Château (n° 661, mars-avril 2022)*
- Électrifier et décarboner en même temps, *Thibaut Brac de la Perrière, Jean-Jacques Coursol, Laurent Joudon, Jacques Merley (n° 652, septembre-octobre 2020)*
- La sobriété énergétique, une notion disruptive de plus en plus étudiée, *Edouard Toulouse (n° 649, mars-avril 2020)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.