

# TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT  
AGIR POUR LE CLIMAT

Synthèse

NOUVELLE ÉDITION 2024





## 4

### CONTEXTE ET OBJECTIFS

## 5

### ENSEIGNEMENTS

## 9

### MÉTHODE: COMMENT IMAGINER LE FUTUR ?

- 9 Quatre scénarios systémiques de société et un tendanciel
- 9 Hypothèses de cadrage
- 10 Adaptation et atténuation, les deux faces d'une même pièce

## 11

### REGARD SUR LES QUATRE SCÉNARIOS NEUTRES EN CARBONE

- 12 SCÉNARIO 1  
Génération frugale
- 18 SCÉNARIO 2  
Coopérations territoriales
- 24 SCÉNARIO 3  
Technologies vertes
- 30 SCÉNARIO 4  
Pari réparateur
- 36 Descriptif des 4 scénarios

## 38

### ANALYSES TRANSVERSALES

- 38 Principaux indicateurs
- 39 Évaluation des impacts des scénarios et de leur robustesse aux risques
- 44 Bilan comparé des 4 scénarios
- 52 Bilan énergie
- 54 Bilan GES
- 55 Qualité de l'air

## 56

### ENSEIGNEMENTS SECTORIELS

- 56 Adaptation au changement climatique
- 56 Aménagement territorial et planification urbaine
- 57 Bâtiments résidentiels et tertiaires
- 58 Numérique
- 59 Mobilité des voyageurs et transport de marchandises
- 60 Alimentation
- 60 Production agricole
- 61 Production forestière
- 62 Production industrielle
- 63 Mix gaz et hydrogène
- 64 Mix électrique
- 66 Froid et chaleur distribués via les réseaux urbains et hors réseaux (dont biomasse énergie)
- 66 Carburants liquides

- 67 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse
- 67 Déchets et ressources minérales
- 68 Puits de carbone
- 69 Économie et société

## 70

### ZOOM SUR LA SOBRIÉTÉ

## 71

### LIMITES ET PERSPECTIVES



## Pourquoi une mise à jour de cette synthèse, plus de 2 ans après sa première publication ?

La première édition du travail de prospective de l'ADEME, publiée en novembre 2021, a été, depuis, complétée par 17 feuillets : **l'objectif de cette nouvelle version de la synthèse est donc de donner une vision synthétique et consolidée de l'ensemble des résultats**. Il faut noter que, depuis la réalisation des travaux (2020-2021), plusieurs actualités interrogent *a priori* légitimement la pertinence de l'exercice et des principales conclusions et ce d'autant plus que les hypothèses initiales n'ont pas été revues à l'aune de ces événements (voir le [rapport](#) de novembre 2021).

Tout d'abord, le Gouvernement a avancé sur la planification écologique, en mettant en consultation une trajectoire climatique et énergétique. Dans ce contexte, les scénarios de l'ADEME restent pertinents pour nourrir les réflexions et contribuer aux débats dans la mesure où ils ont été construits sur la base d'hypothèses volontairement fortes et contrastées qui, de par leur gradation entre sobriété et innovation, illustrent des chemins types. Ils sont donc toujours d'actualité pour faire réfléchir décideurs et citoyens sur le modèle de société qu'ils souhaitent promouvoir pour atteindre la neutralité carbone.

Ensuite, **le contexte énergétique mondial a largement évolué**, avec des risques de rupture d'approvisionnement en gaz et en pétrole dus au conflit russo-ukrainien, mais également en électricité, accentués durant l'hiver 2022. Se pose alors, sur nos scénarios, la question de l'impact de ce contexte.

D'une façon générale, par rapport à une situation actuelle de très forte dépendance au gaz et aux produits pétroliers, les scénarios Transition(s) 2050 ont précisément pour objectif de se passer des énergies fossiles. Les scénarios 1 et 2, avec une consommation d'énergie moindre par rapport aux deux autres, sont sans doute plus résilients face à une telle crise. À l'inverse, S4 serait le plus sensible, en raison de sa plus forte dépendance au gaz naturel.

De plus, **l'hiver 2022-2023 a mis dans le débat public la notion de sobriété**, la France ayant dû recourir à une sobriété énergétique d'urgence pour passer l'hiver : les scénarios Transition(s) 2050 soulignent qu'il faut inscrire cette sobriété dans la durée de façon plus structurelle et ce pour l'ensemble de la société.

Enfin, et bien que les évaluations initiales de stockage de carbone des puits naturels aient été prudentes et réalisées dans un contexte climatique déjà défavorable (scénario 8.5 du GIEC), les dernières estimations du puits forestier publiées en 2023 sont encore plus défavorables : il a été divisé par 2 entre 2010 et 2020, pouvant aller jusqu'à une inversion dans certaines régions. Les perturbations climatiques induisent une diminution de la vitesse de croissance des arbres, une augmentation de leur mortalité et une modification des aires de compatibilité climatique des essences forestières. Pour autant, dans la mesure où l'atteinte de la neutralité carbone dans les trois premiers scénarios disposait de marges significatives, la neutralité carbone pourrait être atteinte y compris avec un puits forestier moindre. C'est plus incertain pour le scénario 4.

Ainsi, cette mise à jour donne une vision plus complète des résultats. En particulier, si tous les scénarios atteignent la neutralité carbone en 2050, ils ont des impacts très différents par exemple sur l'usage des sols ou le numérique. **Toutes ces nouvelles analyses nous permettent aujourd'hui de mieux qualifier chaque scénario** et en particulier :

- **leur robustesse face aux risques exogènes** (augmentation des événements extrêmes, augmentation du prix des fossiles et des matières premières...);
- **leurs impacts respectifs sur l'environnement, les personnes et l'économie**.

Cette synthèse a donc été enrichie de façon significative par :

- **de nouveaux enseignements (Enseignements - ens.)** sur : la sobriété (ens.2), les empreintes matières et carbone (ens.4), l'adaptation au changement climatique (ens.7), les impacts macroéconomiques (ens.10) et l'exigence de justice sociale (ens.11). La description des scénarios (**Regard sur les quatre scénarios**) et la description par secteur (**Enseignements sectoriels**) ont été actualisées en ajoutant de façon systématique un paragraphe sur les impacts macroéconomiques et sociaux ;
- **une comparaison des scénarios** à l'aune d'une analyse des risques exogènes qui pèsent sur eux et des risques associés à leurs impacts (**Évaluation des impacts des scénarios et de leur robustesse aux risques**) ;
- **un développement spécifique sur la sobriété (Page 70)**.

# CONTEXTE

## et objectifs

En ligne avec ses engagements internationaux de l'Accord de Paris (2015) et dans l'objectif collectif de stabiliser le climat sous le seuil des + 2 °C, la France a construit deux premières Stratégies Nationales Bas-Carbone (SNBC). Elles ont permis de fixer les grands objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et les budgets carbone qu'elle doit respecter pour les années à venir. La trajectoire de réduction des émissions et des absorptions des GES doit permettre d'atteindre un objectif de « neutralité carbone » d'ici 2050, soit un équilibre entre les flux annuels d'émissions et les flux absorbés (selon la loi Énergie-Climat de 2019).

Ceci implique, dès les prochaines années, d'indispensables transformations, rapides, profondes et systémiques, pour diminuer considérablement nos impacts néfastes sur le climat et les écosystèmes pour lutter contre les pollutions. Ces transformations supposent une mobilisation sans précédent de tous les acteurs de la société, d'importantes innovations techniques, institutionnelles et sociales, ainsi qu'une évolution profonde des modes de vie individuels et collectifs, des modes de production et de consommation, de l'aménagement du territoire...

**C'est à l'heure où des décisions doivent être prises pour réduire drastiquement les émissions de GES que l'ADEME publie ses travaux pour alimenter les délibérations collectives, notamment sur la future Stratégie française énergie-climat (SFEC).**

En effet, l'objectif de cet exercice de scénarisation est de contribuer à rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et sociales, pour nourrir des débats sur les options possibles et souhaitables pour les prochaines années<sup>1</sup>. C'est pour cette raison que les résultats sont présentés sous différentes formes, à la fois pour les spécialistes des secteurs concernés mais également pour un large public allant des acteurs publics ou privés aux citoyens.

Pour une vision d'ensemble des 4 scénarios, rendez-vous en [page 36](#).  
Pour découvrir le bilan comparé, rendez-vous en [page 44](#).

Les décisions collectives doivent en effet porter autant sur la société durable que nous souhaitons construire ensemble que sur les modalités de réalisation des transformations profondes et systémiques qui la rendront possible. C'est pourquoi l'ADEME propose ici, en plus du scénario tendanciel, **quatre scénarios « types » qui présentent, de manière volontairement contrastée, des options économiques, techniques et de société pour atteindre la neutralité carbone**, sans épuiser pour autant la diversité des futurs possibles qui pourront être décidés. Ces 4 scénarios sont désignés par les noms suivants:

- S1** Génération frugale
- S2** Coopérations territoriales
- S3** Technologies vertes
- S4** Pari réparateur

En plus de la question climatique et de l'urgence à laquelle nous faisons face, d'autres enjeux sociaux et environnementaux sont plus pressants que jamais: la qualité et la disponibilité de la ressource en eau (enjeu premier de nos sociétés), la destruction de la biodiversité, l'impact sur les ressources (matières, biomasse notamment) ou encore l'équité et la justice sociale. Le choix de la stratégie française devra être justifié au regard de l'ensemble des enjeux écologiques, sociaux et économiques.

C'est donc pour faciliter le passage à l'action que l'ADEME a réalisé cet exercice de prospective inédit, reposant sur quatre ans de travaux d'élaboration, la mobilisation d'une centaine de collaborateurs de l'ADEME et des échanges réguliers avec un comité scientifique. Les hypothèses et modèles ont été affinés et enrichis au travers d'échanges nourris avec une centaine de partenaires et prestataires extérieurs, spécialistes des différents domaines, ainsi que par l'organisation de plusieurs webinaires, lors de la phase de conception des scénarios et de présentation des résultats.

<sup>1</sup> Aucune technologie de rupture n'a été imaginée dans cet exercice de façon à ne pas introduire d'hypothèses trop fragiles qui auraient desservi la solidité du travail. En revanche, des évolutions de technologies existantes ont été intégrées en fonction des connaissances du moment sur les travaux en cours.

# ENSEIGNEMENTS

## 01

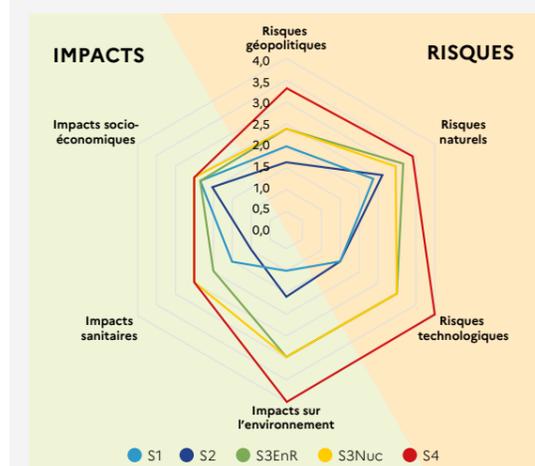
L'ADEME présente quatre voies (chacune dotée de sa propre cohérence interne) qui permettent d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle territoriale de la France en 2050, ainsi qu'une réduction de l'empreinte carbone par habitant. **Mais atteindre la neutralité repose sur des paris humains et/ou technologiques majeurs qui diffèrent selon les scénarios** : régulation de la demande, changement des pratiques de consommation, déploiement de technologies... Ces hypothèses de ruptures sont des conditions de réalisation des scénarios. En particulier S1, qui présente une mutation sociale rapide qui induit un risque fort quant à son acceptation, et S4, qui comporte un pari risqué sur les technologies de captage et stockage de CO2 dans l'air ambiant, encore très peu matures et donc peu développées à ce jour. **S2 et S3 apparaissent donc comme des scénarios plus équilibrés et réalisables dans cet univers des possibles, à condition de prendre dès maintenant des décisions permettant de les réaliser en assurant une cohérence d'ensemble, grâce à une planification orchestrée des transformations, associant État, territoires, acteurs économiques et citoyens.**

## 02

La sobriété, qui consiste à nous questionner sur nos besoins et à la façon de les satisfaire en limitant leurs impacts sur l'environnement, est le meilleur moyen d'aller rapidement vers la neutralité carbone tout en réduisant notre dépendance aux énergies fossiles. La sobriété est indispensable à l'atteinte de la neutralité carbone aux côtés de l'efficacité énergétique, mise en œuvre via des équipements plus performants consommant moins (techniques et technologies permettant de réduire la consommation d'énergie pour un même usage)<sup>2</sup>. De plus, au regard de la crise russo-ukrainienne et de l'incidence sans doute durable qu'elle aura sur les prix de l'énergie et des matériaux, S1 (Génération frugale) et S2 (Coopérations territoriales) semblent plus robustes dans l'évaluation des risques proposée dans cette synthèse ([Graphique 1](#)). En effet, les scénarios mettant en œuvre davantage de sobriété et fondés sur des principes de relocalisation/réindustrialisation protègent davantage contre les risques à la fois géopolitiques et naturels que les scénarios qui misent sur les technologies de décarbonation et sur la poursuite de la mondialisation. Ils nécessitent cependant des évolutions profondes de modes de vie et des politiques publiques ambitieuses pour les rendre désirables et accessibles à tous.

<sup>2</sup> Cf. [page 70](#).

Graphique 1 Cotations des risques et impacts par sous-catégorie



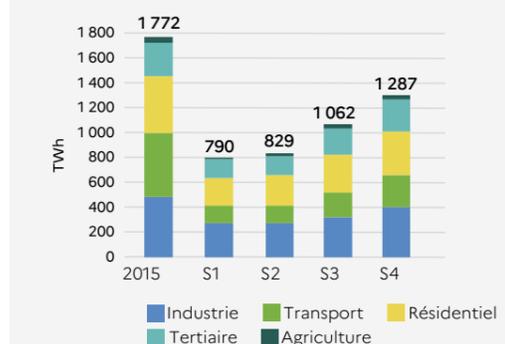
S3 présente deux options de production d'électricité : avec (S3Nuc) ou sans (S3EnR) nucléaire supplémentaire - voir la description du mix électrique en page 64.

## 03

La réduction de la demande d'énergie et le développement des énergies renouvelables sont des facteurs clés pour atteindre la neutralité carbone : avec une réduction de la consommation d'énergie finale en 2050 de - 23 % (S4) à - 55 % (S1) par rapport à 2015 ([Graphique 2](#)), il est possible de mettre en place un approvisionnement énergétique basé à plus de 70 % sur les EnR (énergies renouvelables) dans tous les scénarios. Cela nécessite cependant une modification radicale des usages et des techniques ainsi qu'une adaptation profonde du système productif agricole et industriel.

Graphique 2 Évolution de la consommation finale d'énergie par secteur (TWh)

Consommation finale d'énergie par secteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques hors consommation des puits technologiques et hors sources internationales)



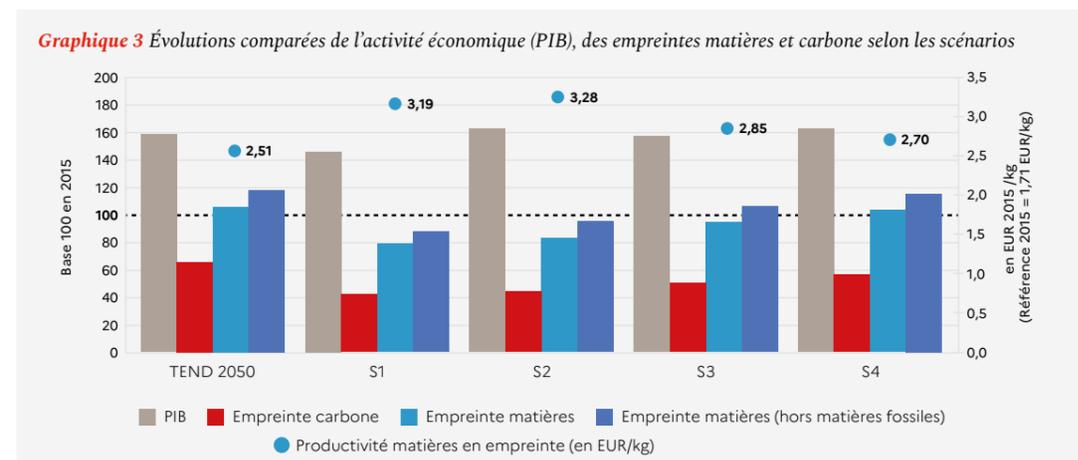
N.B. : consommation électrique des puits technologiques non inclus car n'appartenant à aucun secteur.

La part relative de l'électricité augmente dans tous les scénarios<sup>3</sup> (entre 42 et 56 % suivant les scénarios, contre environ 25 % aujourd'hui), mais cela ne signifie pas pour autant une augmentation du niveau absolu de demande d'électricité. En effet, la demande d'électricité peut être soit contenue autour du niveau actuel (S1 et S2) soit augmentée fortement (jusqu'à + 75 % dans S4). Dans tous les cas, le développement important des EnR électriques est indispensable. Tous les scénarios comportent également une part de nucléaire historique de base, et le recours aux technologies moins matures aujourd'hui (nucléaire EPR 2<sup>e</sup> génération et éolien en mer flottant) est nécessaire dans les scénarios avec les plus forts niveaux de consommation énergétique (S3 et S4).

**Dans tous les scénarios, la consommation d'énergie sous forme de chaleur baisse en 2050**, d'environ 50 % dans S1 et S2, de 38 % dans S3 et de 29 % dans S4 et est majoritairement alimentée par les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R).

## 04

**En 2050, l'empreinte carbone, qui prend en compte le contenu carbone des importations, diminue dans tous les scénarios par rapport à son niveau de 2015.** Mais, pour atteindre l'objectif des « 2 tonnes par habitant<sup>4</sup> », qui correspond à la cible au niveau mondial, il sera nécessaire qu'un grand nombre de pays se fixent des objectifs eux aussi ambitieux. **L'empreinte matières baisse également pour S1, S2 et S3 et se stabilise au niveau de 2015 pour S4**, notamment du fait de la forte diminution de la part de la catégorie « matières fossiles » dans l'empreinte. Si l'on exclut cette catégorie, l'empreinte matières baisse seulement dans S1 et S2. Un découplage absolu semble donc possible entre le niveau d'activité économique (croissant dans les 4 scénarios), l'empreinte GES (décroissante dans les 4 scénarios) et l'empreinte matières (décroissante uniquement dans S1 et S2, hors matières fossiles). Cependant, ce découplage reste nettement insuffisant pour inscrire la réduction des pressions générées sur l'environnement dans les cibles proposées à l'échelle mondiale.



## 05

**Au-delà des GES, les pressions sur l'environnement décroissent de S4 à S1, soulignant ainsi que la sobriété génère de nombreux cobénéfices.** Cela est vérifié avec une réduction de l'artificialisation des sols de 600 kha (l'équivalent du département de la Charente, **Graphique 4**) entre S4 et S1, l'atteinte plus facile de l'objectif ZAN<sup>5</sup>, une baisse

d'un facteur 2 de la consommation d'eau d'irrigation ou de métaux utilisés pour la transition énergétique (acier, aluminium, cuivre), la baisse des principaux polluants atmosphériques<sup>6</sup>, le moindre usage des intrants de synthèse en agriculture et une moindre production de déchets. La sobriété, c'est aussi le déploiement de mobilités actives porteuses d'une activité physique salutaire. La sobriété, c'est ainsi plus de biodiversité, un usage raisonné de l'eau, un environnement mieux préservé et une meilleure santé.

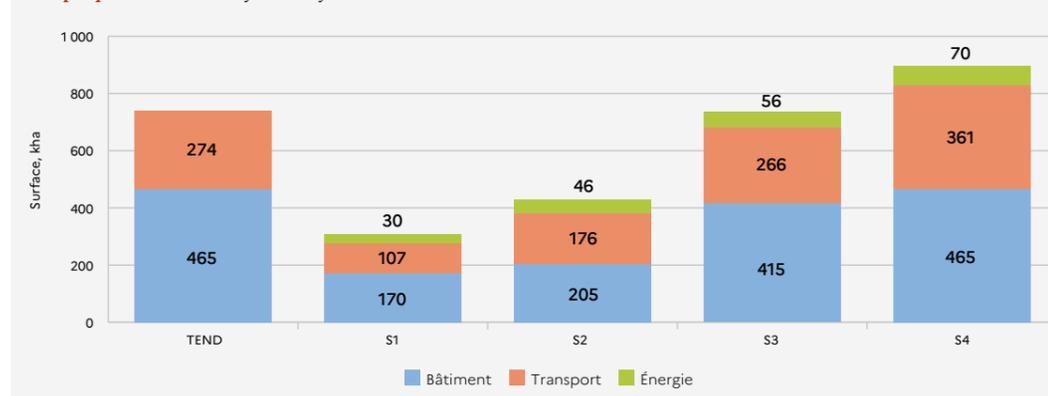
<sup>3</sup> Cf. graphique 19.

<sup>4</sup> Quantité de gaz à effet de serre en CO<sub>2</sub>eq émise par personne dans un monde neutre en CO<sub>2</sub> en 2050 pour respecter les engagements de l'Accord de Paris et maintenir l'augmentation de la température mondiale à un niveau inférieur à 2 degrés Celsius. En considérant que les émissions des pays exportateurs ont évolué selon le scénario NDC (STEPS / WEO-22 / IEA).

<sup>5</sup> Zéro Artificialisation Nette en 2050.

<sup>6</sup> NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM et COVNM (Composés organiques volatils non méthaniques).

**Graphique 4 Bilan des surfaces artificialisées additionnelles selon les scénarios**



## 06

**Dans les quatre scénarios étudiés, l'industrie se transforme non seulement pour s'adapter à une demande en profonde mutation (baisse des volumes consommés, exigences de durabilité...) mais également pour décarboner sa production. Cela nécessite des plans d'investissements de grande ampleur** (décarbonation des mix énergétiques, efficacité énergétique et matière, recyclage, captage et utilisation ou stockage du CO<sub>2</sub>..), tant pour la massification de technologies matures que pour l'émergence d'innovations de rupture et pour le déploiement des infrastructures nécessaires. Cela requiert, en outre, une mutation des modèles d'affaires, de la structure des emplois et compétences et l'intégration plus forte de matières premières issues du recyclage. Par ailleurs, certaines zones industrialo-portuaires sont particulièrement vulnérables au risque de submersion, risque qui est encore mal appréhendé.

prélèvements de biomasse en forêt... À l'inverse, S4 poursuit une logique de flux tendus avec une consommation intensive de ressources et expose très fortement la santé des écosystèmes face aux impacts du changement climatique de 2050. Dans tous les scénarios, la ressource en eau devient l'élément central de notre (in)capacité à nous adapter au changement climatique, suivant que nous saurons ou pas contenir ses usages et préserver sa qualité.

## 08

**Le vivant est l'un des atouts principaux de cette transition mais est fragilisé par le changement climatique.** Outre la valeur propre des écosystèmes pour la préservation de la biodiversité et les autres fonctions écologiques et d'aménagement du territoire, sa contribution à la décarbonation repose sur trois leviers spécifiques et interdépendants : le potentiel de réduction des émissions de GES, de stockage naturel de carbone et de mobilisation de biomasse renouvelable substituable aux ressources fossiles. Les scénarios présentent quatre équilibres possibles et contrastés entre services attendus (alimentation, stockage du carbone, autres usages de la biomasse...), impacts des systèmes de production et aménagement du territoire. Chacun des scénarios Transition(s) 2050 repose sur une vision systémique et contrastée des différents usages, potentiellement concurrents, de la biomasse (**Tableau 1**).

## 07

**Notre capacité d'adaptation au changement climatique dépend des scénarios : S1 et S2 apparaissent plus particulièrement résilients au changement climatique, la sobriété étant clairement un levier qui diminue l'exposition aux risques, en réduisant nos besoins d'énergie, d'eau, de**

**Tableau 1 Leviers mobilisés pour les différents scénarios**

		TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation de biomasse	Toutes biomasses	+	++	++	++++	+++
	Biomasses lignocellulosiques	+	+	++	+++	++
	Ressources agricoles	+	++	+	+++	+++
Valorisation de la biomasse	Produits biosourcés	++	+++	+++	++	+
	Méthanisation	+	++	++	+++	+++
	Combustion	++	+++	+++	++	+
	Biocarburant	++	+	+	+++	+++
	Pyrogazéification				+	

# METHODE

## Comment imaginer le futur ?

09

### L'adaptation des forêts et de l'agriculture devient absolument prioritaire pour lutter contre le changement climatique.

Tous les scénarios montrent le rôle primordial de la préservation des puits de carbone et de la capacité à produire de la biomasse en 2050. Les événements extrêmes déjà observés (méga-feux, inondations, attaques de parasites...) illustrent l'impact catastrophique du changement climatique, qui pourrait générer un effondrement de certains milieux naturels vivants et remettre en cause la faisabilité de tous les scénarios. Au-delà de l'intérêt de protéger les écosystèmes pour leur valeur propre, renforcer leur robustesse est donc un enjeu absolument prioritaire de la lutte contre le changement climatique pour préserver les stocks de carbone et les capacités de production de biomasse.

10

### Avec les hypothèses retenues, aucun des scénarios, y compris les plus sobres (S1 et S2), n'engendre de récession économique à long terme par rapport au niveau actuel de l'activité économique (Graphique 5) :

un découplage entre le produit intérieur brut (PIB) et les émissions territoriales de GES apparaît donc possible dans ces modélisations. Mieux encore, S2, comme S3 et S4, débouchent sur une réduction du chômage, une amélioration du revenu disponible des ménages et une baisse du déficit public par rapport au tendanciel. Seul S1 engendre une baisse du PIB sur les dix premières années et une dégradation de l'emploi par rapport au tendanciel. La transition

énergétique s'avère donc rentable à terme pour le pays, quel que soit le scénario, ce qui rejoint les conclusions du récent rapport PISANI-MAHFOUZ. Le remplacement des combustibles fossiles par des énergies renouvelables et, dans certains scénarios, le nucléaire, ainsi que la diminution globale de biens manufacturés, permettent à la France de réduire ses importations, d'échapper à la hausse des cours du pétrole et du gaz et de créer des emplois locaux.

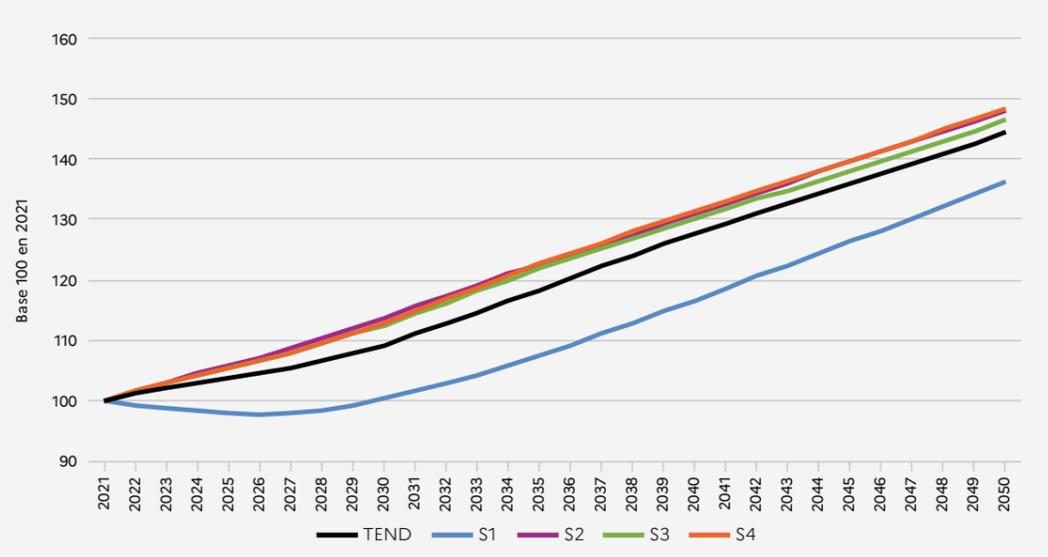
Il est également nécessaire d'accompagner les mutations dans des secteurs particulièrement sensibles comme les protéines, la logistique du dernier kilomètre, la construction neuve ou les gaz et carburants liquides qui ont été étudiés spécifiquement<sup>7</sup>.

11

### L'exigence de justice sociale et la transparence sont au cœur des attentes des citoyens.

Ces derniers attendent que les efforts soient partagés équitablement entre tous les acteurs, y compris économiques, et que l'État joue un rôle prépondérant, à la fois en tant que protecteur des plus vulnérables et comme régulateur des transformations. Compte tenu des préoccupations et tensions autour de la transformation des pratiques de production comme de consommation, de la justice sociale, de la redistribution, les citoyens interrogés dans le cadre de ces travaux formulent des attentes de renouvellement des formes démocratiques. Ainsi, les formes de participation, de délibération collective transparente et tenant compte des situations particulières, sont autant de moyens centraux pour co-définir et mettre en œuvre des mesures de transition ambitieuses qui fassent l'objet d'un nouveau contrat social.

Graphique 5 Évolution du PIB



7 Voir supports Transition(s) 2050 sur la Librairie ADEME

### Quatre scénarios systémiques de société et un tendanciel

Les quatre scénarios de neutralité carbone sont inspirés des scénarios du GIEC (P1 à P4 du rapport 1.5 °C)<sup>8</sup>. Ils se distinguent, par leur ambition, d'un scénario de prolongation des tendances (TEND), qui, en l'absence de ruptures, rend le chemin de développement incompatible avec la neutralité carbone (NC). Le scénario tendanciel et les quatre scénarios sont réalisés à l'échelle de la France métropolitaine. Des exercices spécifiques à l'Outre-mer sont en cours de réalisation en fonction des spécificités des territoires.

Les quatre scénarios sont construits de façon à s'approcher d'une cible de neutralité carbone en 2050. Cette cible n'a de sens pour le climat qu'au niveau de la planète. Au niveau des États, cette cible reste conventionnelle pour guider l'ambition de stratégie nationale. Celle-ci vise, à l'horizon 2050, des émissions annuelles nettes au moins nulles sur le territoire français métropolitain selon les normes de la convention d'inventaires d'émissions de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Ceci suppose que les émissions résiduelles de l'année 2050 soient au moins compensées par un volume égal d'absorption de CO<sub>2</sub>. Cela étant, nous avons également étudié l'empreinte carbone résultant des scénarios afin de donner une image plus fine de l'impact climat et matières de chaque scénario.

Chaque scénario est nourri par un récit, assumant la représentation du monde et les dimensions sociétales et politiques de la trajectoire choisie. Cette approche qualitative est complétée par un volet quantitatif de modélisation. Le principe général de ce volet est le suivant :

- hypothèses sur la demande en énergies, alimentation, et matériaux de chaque secteur « demandeur » (agriculture, bâtiments, transports, industrie...) adaptées aux principes généraux de chaque scénario et en tenant compte des évolutions de comportements et des évolutions technologiques envisageables sur la période, au vu de la connaissance au moment de la modélisation (2019/2020). Ces hypothèses sont traduites dans des modèles sectoriels ;
- hypothèses sur la production d'énergies, de biomasse et de matériaux pour répondre à la demande en visant le plus possible la décarbonation et des hypothèses sur l'évolution des techniques de production. Des modèles spécifiques ont été utilisés (par ex sur la production d'électricité) ;
- vérification des bouclages sur l'énergie, les sols, la biomasse et les principaux matériaux entre l'offre et la demande (avec, si nécessaire les technologies de captage et stockage du CO<sub>2</sub>).

Voir le détail de la méthodologie dans le rapport de novembre 2021.

Tableau 2 Hypothèses de cadrage sur la démographie, le climat et l'économie sur la prospective ADEME

	TEND	Génération frugale S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
Démographie	65,6 M d'habitants en 2020; 67,4 en 2030; 69,7 en 2050 en Métropole Natalité: 1,8 enfant/femme, vieillissement (un quart de la population a + de 65 ans en 2050), solde migratoire + 70 000/an (source: INSEE, 2017, scénario fécondité basse, espérance de vie centrale et migration centrale)				
Évolution climat	Monde: + 5,4°C en 2100 France: + 3,9°C en France en 2100 (RCP 8.5 du GIEC)		Monde: + 3,2°C en 2100 France: + 2,1°C en 2100 (2070-2100) par rapport à la référence 1976-2005 (source: Météo-France DRIAS 2021 – RCP 4.5 – Logique NDC)		
Prix énergie importée	72 EUR/baril, 88 et 106 en 2030, 2040 et 2050 (source: Cadrage Commission européenne, 2020 <sup>9</sup> )				
Potentiel de croissance économique	Croissance potentielle de long terme (population active + productivité): 1,3 %/an en moyenne sur la période (dont 1,1 % de productivité) (source: SNBC, 2020) L'activité économique réelle et l'emploi varient selon les scénarios (cf. analyse macroéconomique)				

8 [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15\\_Summary\\_Volume\\_french.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf)

9 Les hypothèses de prix du scénario de référence de la Commission sont en page 33 du rapport: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219903975>

# REGARD

## sur les quatre scénarios neutres en carbone

Pour rédiger la présente version de la synthèse, aucune modification de ces hypothèses n'a été apportée par rapport à la version de novembre 2021. Cette synthèse intègre les principales conclusions des feuillets publiés après le rapport principal, les feuillets s'appuyant eux-mêmes sur les hypothèses initiales décrites ci-dessus.

Chacun des quatre scénarios est ainsi constitué par un corpus d'hypothèses interdépendantes permettant d'assurer une cohérence du système énergie-resource-territoire avec le récit du scénario. Ce travail va donc bien au-delà de la seule modélisation du système énergétique et décrit des transitions de société contrastées.

### Hypothèses de cadrage

Le **Tableau 2** récapitule les grandes hypothèses démographiques, climatiques et économiques utilisées en arrière-plan des scénarios. Les scénarios intègrent une taxe carbone afin de réduire la demande en énergie et de favoriser les investissements d'efficacité énergétique. Les recettes de cette taxe sont entièrement redistribuées aux ménages et aux entreprises, de façon à ne pas augmenter les prélèvements obligatoires.

Il est à noter qu'au regard de la date d'élaboration des scénarios (2020), ce travail ne prend pas en compte l'exercice de planification écologique mené par le Gouvernement depuis cette date.

Le scénario tendanciel (TEND) considère que les plans d'investissements et les programmes en cours de déploiement auront des effets sur les émissions : par exemple, l'application de la programmation pluriannuelle de l'énergie, les Programmes d'Investissements d'Avenir successifs, etc. En revanche, il ne suppose pas *a priori* que les objectifs politiques votés, mais pas encore traduits en mesures opérationnelles (SFEC, PPE en cours de débat), apportent les effets espérés.

La croissance potentielle de l'économie française correspond, dans le TEND, aux hypothèses retenues dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC, 2020), lesquelles reposent sur la théorie économique selon laquelle le taux de croissance de long terme est la somme des taux de croissance démographique et de la productivité.

Dans ce **scénario tendanciel**, la consommation d'énergie se maintient à un niveau élevé, simplement atténué d'environ 15 % par rapport à aujourd'hui. Les émissions de GES ne sont réduites que d'un facteur 2, ce qui est largement insuffisant pour que les puits, essentiellement naturels, parviennent à annuler

ces émissions. Le bilan net reste ainsi élevé à + 131MtCO<sub>2</sub>eq. **La neutralité carbone n'est donc pas atteinte**, ce qui souligne la nécessité de mettre en œuvre des transformations de rupture, imaginées dans les quatre autres scénarios.

### Adaptation et atténuation, les deux faces d'une même pièce

L'objectif de l'adaptation au changement climatique est de rendre notre société plus robuste face aux menaces qu'il présente, c'est-à-dire capable de maintenir ses fonctionnalités écologiques, sociales, économiques ou culturelles en composant avec les aléas climatiques.

En tout lieu, le climat influe sur l'environnement du territoire (faune, flore, qualité de l'air...), les ressources naturelles disponibles (eau, sols, énergie...), les conditions de production du secteur primaire (agriculture, sylviculture), les conditions d'existence et les besoins des populations (alimentation, chauffage, rafraîchissement, mobilité, protection contre les intempéries, etc.). Tout comme, dans bien des cas, il affecte la nature des activités économiques ou les conditions dans lesquelles elles sont menées. En cela, l'adaptation au changement climatique est désormais une dimension incontournable de l'exercice prospectif.

L'ambition de rendre nos scénarios cohérents avec les changements annoncés du climat nous a conduit d'une part à identifier des hypothèses climato-sensibles dans les chapitres sectoriels afin d'en évaluer les conditions de faisabilité et d'autre part à présenter des « photographies » de réponses possibles face au changement climatique.

Les principaux impacts en France sont relativement bien caractérisés et leur évolution attendue à 2050 encore peu différenciée selon les scénarios climatiques. Aussi, par hypothèse, les quatre scénarios connaissent les mêmes aléas climatiques. Les stratégies d'adaptation associées aux scénarios sont différentes du fait :

- de modalités de prise en charge de la nature et de la biodiversité qui auront un impact différencié sur les habitants et les organisations, en fonction de choix en termes d'urbanisation, d'occupation des sols, d'infrastructures, de modes de production et de consommation ;
- de rapports sociaux et d'organisations collectives différenciés (eux-mêmes issus de la perception du risque, de la sensibilisation des citoyens...), qui entraînent des stratégies d'adaptation différentes.

Pour les pages suivantes, les quatre scénarios de neutralité carbone et le récit qualitatif de ce que serait la société en 2050 sont décrits en termes de :

- adaptation au changement climatique ;
- bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols ;

- aménagement du territoire-bâtiments-mobilité ;
- industrie-matériaux-économie circulaire ;
- systèmes énergétiques décarbonés ;
- GES et puits de carbone ;
- macroéconomie-emploi-société.



# SCÉNARIO 1

## Génération frugale

### LA SOCIÉTÉ EN 2050

Des transformations importantes dans les façons de se déplacer, se chauffer, s'alimenter, acheter et utiliser des équipements, permettent l'atteinte de la neutralité carbone sans impliquer de technologies de captage et stockage de carbone, non éprouvées et incertaines à grande échelle. De nouvelles attentes des consommateurs, mais surtout de nouvelles pratiques s'expriment rapidement dans les modes de consommation. La croissance de la demande énergétique, qui épuise les ressources, s'interrompt grâce à des innovations comportementales, organisationnelles autant que technologiques.

La transition est conduite principalement grâce à la frugalité par la contrainte et par la sobriété. La capacité des acteurs économiques à s'adapter rapidement à l'évolution de la demande est parfois difficile. La contrainte vient de mesures coercitives pour une partie (obligations, interdictions, quotas, limites de vitesse et des vols intérieurs...), qui doivent faire l'objet de débats pour faciliter leur compréhension et leur appropriation. La sobriété se fait aussi par la réduction volontaire de la demande en énergie, matières et ressources, grâce à une consommation et une production des biens et services au plus près des besoins : évolution de l'assiette alimentaire, usages d'espaces et de services partagés, consommation partagée, transformation des bâtiments vacants et des résidences secondaires en résidences principales...

Mais les mesures contraignantes et la capacité à obtenir une implication de tous reste incertaine et fait courir le risque de clivages forts au sein de la société, du fait de la remise en question de la centralité de la consommation de masse. Par conséquent, les mesures sont autant que possible adoptées en priorisant une vision équitable de la transition. Les normes et valeurs évoluent vers une économie du lien plus que du bien, très ancrée sur les territoires et leurs ressources. La nature est sanctuarisée, ce qui conduit à une exploitation raisonnée.

Le chemin emprunté vise à limiter les externalités négatives. En agissant à la source, les émissions liées aux usages sont réduites rapidement et le report ou déplacement d'impact vers les autres pays est évité.

Les liens avec les autres territoires, notamment les dimensions internationales, se réduisent, dans un monde où le local et durable, par opposition au global et consommable, est privilégié.

## 01. Adaptation au changement climatique

### Respect de la nature et sobriété

La nature est sanctuarisée comme un tout auquel l'humanité appartient, et contribue aux capacités d'adaptation au changement climatique : nature en ville et ré-ensauvagement des espaces permettent non seulement de lutter contre les îlots de chaleur ou les précipitations intenses, mais aussi de maintenir les continuités écologiques et les dynamiques d'adaptation des écosystèmes.

Une partie de l'appareil productif est fondé sur les *low-tech* (par opposition aux *high-tech*) et sur les petites et moyennes entreprises : les systèmes techniques et les technologies, simplifiés et rendus plus robustes, sont plus contrôlables et réparables par les citoyens. Ainsi, la sobriété, en réduisant les impacts sur les milieux et la dépendance aux infrastructures, permet de mieux absorber des aléas climatiques directs ou leurs impacts socio-économiques.

La sobriété est clairement un levier qui diminue l'exposition aux risques (agriculture, industrie, bâtiments et cadre bâti, transports). Ce scénario laisse aussi une place importante aux dynamiques naturelles (forêts) et à l'auto-organisation, qui permettent d'absorber plus facilement certains impacts climatiques. En contrepartie, ce scénario peut conduire à des baisses de rendement (agriculture, industries), intégrées dans les modèles économiques.

## 02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

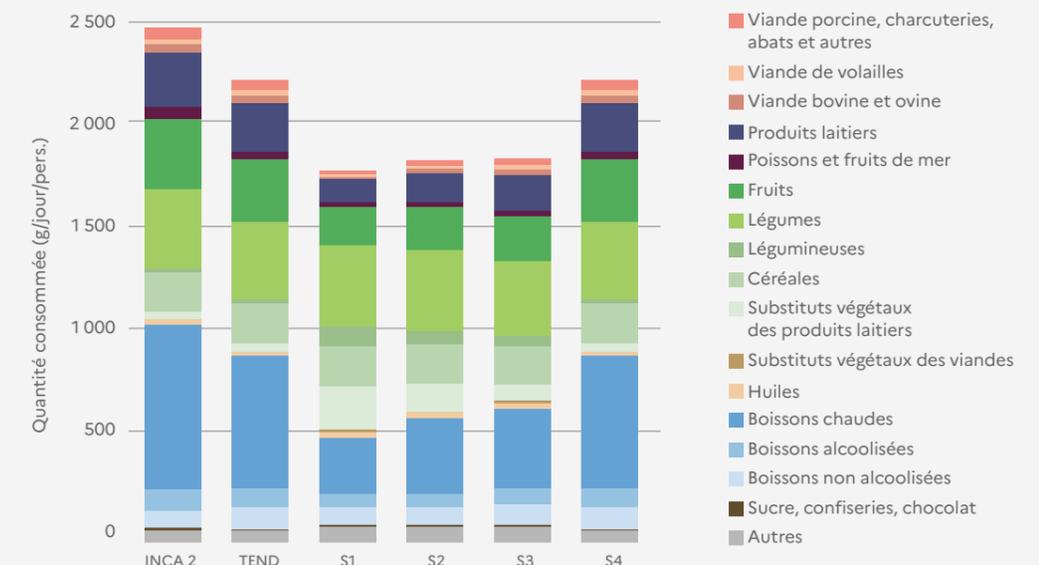
### Profonde transformation des habitudes alimentaires et mobilisation raisonnée de la ressource forestière

L'évolution des systèmes agricoles (70 % de production à très bas niveau d'intrants, dont agriculture biologique) suit celle des régimes alimentaires, à savoir une division par 3 des quantités de viande (*Graphique 6*) avec des cheptels plus extensifs mais moins nombreux. La consommation de produits exotiques est réduite.

Les surfaces occupées par des espaces naturels non productifs augmentent ainsi de manière conséquente. Les impacts sur les écosystèmes sont réduits. Hors alimentation, la méthanisation et la combustion sont deux voies importantes de valorisation de biomasses majoritairement agricoles. La sobriété dans les usages énergétiques et matières du bois (sciage, panneaux et bâtiments) permet de satisfaire les besoins avec une collecte de bois en forêt restée constante.

Enfin, le très faible besoin de sols pour l'aménagement (peu de constructions neuves) et les infrastructures de transport limite l'artificialisation et permet d'atteindre le zéro artificialisation nette en 2050 sans trop de difficulté (1 400 ha à compenser en 2050).

Graphique 6 Composition de l'assiette du régime moyen français dans chaque scénario en 2050, représentée en quantités consommées par jour et par personne, boissons incluses, sauf eau (INCA2 représente le régime moyen actuel)



Sources : données intermédiaires du projet SISAE.

### 03. Aménagement du territoire-bâtiments-mobilités

**Limitation de la construction neuve, rénovation rapide et modification d'ampleur des modes de vie**

Le parc de bâtiments est massivement mobilisé et rénové. Le parc de logements existant est mieux utilisé : 2,1 personnes par logement contre 2 dans le tendancier, les résidences secondaires passent de 9 % à 2,5 % du parc. Cela permet de réduire drastiquement le nombre de constructions neuves, donc la consommation de matériaux de construction, ce qui engendre une réduction des émissions de GES de l'industrie liée à l'activité bâtiment (ex. : ciment). Un rééquilibrage territorial s'opère en faveur des villes moyennes et des zones rurales.

La rénovation énergétique est d'une ampleur inégalée par la proportion du parc concerné (80 % des logements rénovés à un niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC rénovation) ou plus, 80 % des surfaces tertiaires suivent la trajectoire prévue par le décret tertiaire du 23 juillet 2019). Le chauffage au bois se développe, le recours au gaz réseau diminue fortement. L'utilisation de matériaux biosourcés croît.

La vie quotidienne dans les logements évolue également fortement (baisse du taux d'équipement, mutualisation d'appareils type lave-linge...). La consommation d'électricité pour les usages spécifiques (électroménager, électronique, éclairage...) est réduite par près de trois de 2015 à 2050.

**Une baisse de la demande de mobilité importante**

Les kilomètres parcourus baissent de 26 % d'ici 2050 de par l'évolution vers davantage de proximité et de la baisse de la mobilité. Cela favorise en particulier les modes actifs (marche et vélo), tandis que la voiture et l'avion sont en fort retrait (moitié moins de trajets en voiture par rapport à 2015). Les voitures s'électrifient progressivement pour couvrir à terme 90 % des usages, deviennent plus légères et leur vitesse de circulation baisse (par ex. : 110 km/h sur autoroute). Parallèlement, le covoiturage solidaire et l'autostop se développent dans les zones rurales. La relocalisation de l'économie et la sobriété tendent à une baisse de 45 % des trafics de marchandises nationaux. Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 91 %.

**LES KILOMÈTRES PARCOURUS BAISSENT DE 26 % D'ICI 2050, PAR L'ÉVOLUTION VERS DAVANTAGE DE PROXIMITÉ ET LA BAISSÉ DE LA MOBILITÉ.**



### 04. Industrie-matériaux-économie circulaire

**Une production industrielle contractée et un marché réorienté sur le « made in France »**

La demande matérielle décroît significativement, en lien avec des évolutions fortes des modes de vie : réduction de 30 % de la surface des maisons individuelles neuves par rapport à aujourd'hui, division par 2 du nombre de voitures produites, baisse de 70 % de la consommation d'engrais de synthèse par habitant...

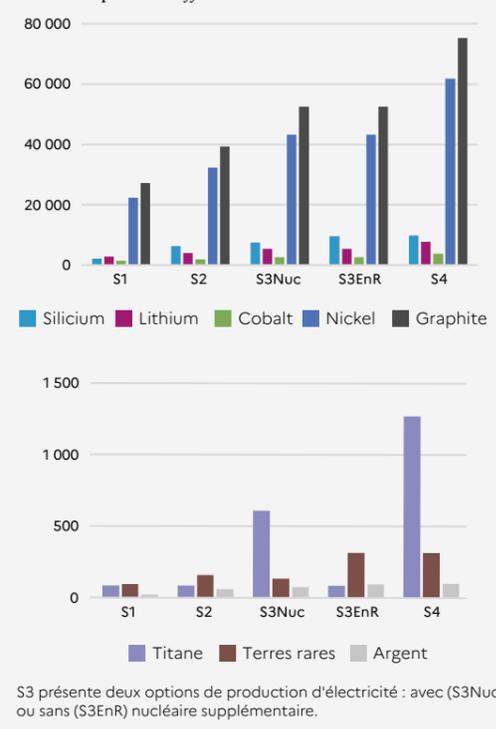
L'économie de la durabilité et de la réparation prend une place conséquente afin d'augmenter la durée de vie des objets et des équipements. La production des déchets est réduite d'un tiers en 2050, avec un taux de valorisation très élevé de 93 %.

Le « made in France » et les produits locaux sont privilégiés par les consommateurs finaux dans un souhait de maîtrise de l'empreinte carbone.

En conséquence, la production industrielle recule en volume physique et des transferts d'activité s'effectuent vers d'autres secteurs. La production de certaines filières est relocalisée. Le système productif se décarbone principalement via la biomasse, pour atteindre - 53 % de consommations énergétiques et - 79 % d'émissions de GES en 2050.

L'analyse des consommations de ressources liées au développement des principales technologies de la transition écologique (EnR électriques et véhicules électriques) montre que S1 permet de limiter les risques d'approvisionnement pour les matériaux et métaux les plus critiques (nickel et graphite notamment (Graphique 7)).

**Graphique 7** Besoins annuels en petits matériaux et métaux en tonnes pour les différents scénarios



### 05. Systèmes énergétiques décarbonés

**Baisse de la demande énergétique globale et doublement de la consommation de biomasse énergie**

Outre une réduction drastique, déjà engagée, de l'usage de charbon (hors hauts fourneaux), le pétrole est limité à quelques usages spécifiques difficilement substituables, notamment pour le transport routier et aérien longue distance et en tant que matière première dans l'industrie.

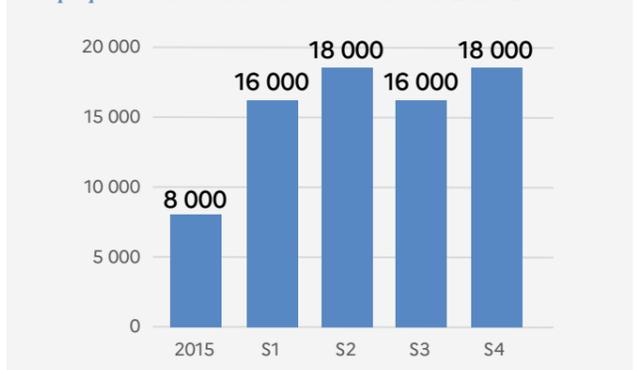
Le gaz suit la même trajectoire de réduction très forte de consommation (par exemple 3 millions de logements encore chauffés au gaz en 2050 contre 10 millions aujourd'hui). Il est presque intégralement renouvelable, sans pour autant nécessiter des

<sup>10</sup> Le mix de consommation finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour produire d'autres vecteurs (gaz utilisé pour produire de l'électricité, électricité utilisée pour produire de l'hydrogène, pertes...). Ainsi, dans ce scénario, la consommation totale d'électricité est de 400 TWh et celle de gaz de 148 TWh.

cultures énergétiques dédiées, ce qui rend le scénario moins sensible à une crise énergétique mondiale (réduction des approvisionnements ou augmentation des prix).

Grâce à l'efficacité énergétique et au développement maîtrisé des nouveaux usages, la consommation d'électricité est maîtrisée (- 15 % vs 2015) et peut être satisfaite quasi exclusivement par les EnR. Le développement des EnR repose surtout sur des projets de taille modeste portés par les collectivités et les citoyens avec une forte pénétration du PV sur toiture (2/3 de la puissance de PV installée). Parallèlement, la capacité nucléaire installée diminue rapidement, l'ensemble des réacteurs nucléaires existants étant arrêtés et aucun nouveau réacteur n'étant mis en service à l'exception de celui de Flamanville, la capacité installée est de 1,6 GW en 2050.

**Graphique 8** Nombre de mâts d'éoliennes terrestres en 2015 et 2050



**L'hydrogène comme levier de décarbonation du gaz du réseau**

L'hydrogène est principalement utilisé dans le *power-to-gas* (production de méthane à partir d'électricité). Cela permet de décarboner le vecteur gazier de façon décentralisée via des unités de petite taille implantées près des unités de méthanisation pour valoriser le CO<sub>2</sub> issu du biogaz épuré. Dans une moindre mesure, la production d'hydrogène pour les usages industriels historiques (méthanol et engrais) continue de s'appuyer sur les procédés actuels de vaporeformage du gaz de réseau (décarboné à 88 % dans ce scénario). La mobilité hydrogène, qui supposerait de nouvelles technologies, ne se développe pas dans ce scénario.

Le mix de la consommation d'énergie finale<sup>10</sup> est composé de 301 TWh d'électricité, 265 TWh de chaleur, 110 TWh de gaz et 70 TWh de combustibles liquides.



## 06. GES et puits de carbone

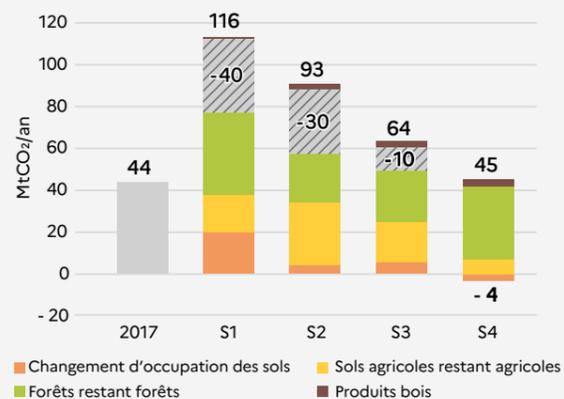
### Des émissions maîtrisées ne mobilisant que les puits biologiques

La récolte de bois est stable et seuls les puits biologiques sont mobilisés (sols, forêts, biomasse<sup>11</sup>). Ceux-ci sont significativement plus développés qu'aujourd'hui (de l'ordre de 80 MtCO<sub>2</sub>e/an pour la seule forêt et 116 MtCO<sub>2</sub>e au total contre 44 MtCO<sub>2</sub>e aujourd'hui de puits naturels nets totaux) avec des pratiques agricoles modifiées et, surtout, une croissance significative de la forêt maintenue dans une gestion extensive (Graphique 9).

La philosophie de ce scénario est basée sur la sanctuarisation du vivant et sur une réduction des consommations qui permettent de se passer des puits technologiques. Le bilan net des émissions est de -42MtCO<sub>2</sub>e, ce qui permet d'avoir une marge de manœuvre si le changement climatique avait un impact plus important sur les forêts et les sols que ce qui a été prévu dans l'exercice.

Les émissions de CO<sub>2</sub>e en empreinte<sup>12</sup> passent de 10,9 t/hab en 2015 à 4,2 t/hab en 2050.

Graphique 9 Puits naturels de carbone en 2050 dans la biomasse et les sols



N.B. : depuis novembre 2021, le puits carbone forestier 2050 a été revu à la baisse et fait l'objet de nouvelles études qui seront publiées en 2024. Pour autant, S1, S2 et S3 disposaient de marges significatives (symbolisées par des hachures dans le graphique) qui pourraient permettre l'atteinte de la neutralité carbone dans ce contexte. C'est plus incertain pour S4.

## 07. Macroéconomie-emploi-société

### Une croissance durablement ralentie

La transition repose essentiellement sur une baisse de la production de biens carbonés et de la construction neuve dans le résidentiel et le tertiaire. La baisse d'investissements qui en découle n'est pas compensée par la hausse des investissements d'efficacité énergétique, surtout les 10 premières années. Le supplément d'importations de biens matériels n'est pas compensé par la baisse des importations d'énergies fossiles. L'emploi diminue fortement malgré une augmentation dans le secteur de l'énergie, ce qui débouche sur une baisse du revenu disponible qui n'est pas entièrement contrebalancée par la baisse des prix et de la facture énergétique des ménages. La consommation est moins dynamique. En définitive, le taux de croissance du PIB reste positif mais est légèrement inférieur au tendanciel sur le long terme et la dette publique s'en trouve durablement dégradée.

### Modes de vie

Dans l'étude sociologique menée avec 31 citoyens<sup>13</sup>, S1, parfois vu comme une utopie, est néanmoins controversé. Les pratiques de consommation partagée et collaborative sont tantôt perçues comme vecteur de nouvelles formes d'entraide et de solidarité, tantôt comme liberticides et comme une régression dans les aspirations à la consommation individuelle et à la propriété. Cette tension reflète des valeurs assez distinctes, polarisées autour d'une approche du progrès : là où d'aucuns voient des pratiques favorisant de nouvelles formes d'innovations sociales et dessinant une nouvelle forme de vivre ensemble, d'autres voient une régression de l'autonomie individuelle qui affecte profondément leurs modes de vie.

<sup>11</sup> Les océans constituent également des puits de CO<sub>2</sub>, mais ils n'ont pas été pris en compte en l'absence de référence nationale.

<sup>12</sup> En considérant que les émissions des pays exportateurs ont évolué selon le scénario NDC (STEPS / WEO-22 / IEA) (voir détails dans le feuillet « Empreintes carbone et matières »).

<sup>13</sup> Cf. feuillet « Modes de vie ».

# SCÉNARIO 2

## Coopérations territoriales

### LA SOCIÉTÉ EN 2050

La société se transforme dans le cadre d'une gouvernance partagée et de coopérations territoriales. Organisations non gouvernementales, institutions publiques, secteur privé et société civile trouvent des voies de coopération pragmatiques qui permettent de maintenir la cohésion sociale.

Pour atteindre la neutralité carbone, la société mise sur une évolution progressive mais à un rythme soutenu du système économique vers une voie durable alliant sobriété et efficacité. La consommation de biens devient mesurée et responsable, le partage se généralise. Les transformations dans l'habitat (logements vacants réinvestis, espaces de partage et de convivialité), les habitudes de travail, l'alimentation, les déplacements ou la consommation sont de fait moins contraints que dans S1 mais marquent une rupture avec l'histoire récente. Nature et biodiversité sont appréhendées pour leur valeur intrinsèque. De fait, les impacts sur le territoire national sont réduits, de même que dans les pays d'où nous importons, grâce à des règles strictes et des échanges internationaux réduits.

L'évolution des valeurs de la société permet des investissements massifs dans les solutions d'efficacité et d'énergies renouvelables. Mais aussi dans le renouvellement et l'adaptation des infrastructures, ainsi que dans des politiques de réindustrialisation sur des secteurs industriels ciblés, alliant sobriété et efficacité. Ces investissements sont favorisés par des incitations financières, définies par des politiques et réglementations fondées sur des critères sociaux et environnementaux.

La volonté de traiter l'ensemble des sujets en même temps et en cherchant le consensus de tous les acteurs peut freiner la transformation des systèmes productifs et des modes de vie.

## 01. Adaptation au changement climatique

### Génie écologique et équilibre entre échelons national et local

La stratégie d'adaptation au changement climatique s'appuie sur une gouvernance équilibrée entre le niveau national et régional : l'échelon national coordonne et mutualise les besoins d'investissements d'adaptation au changement climatique entre l'ensemble des bassins de vie régionaux et planifie des stocks de ressources stratégiques, tandis que l'échelon régional, voire infrarégional, suit en continu les pressions exercées sur les ressources naturelles pour ajuster les politiques publiques et sectorielles.

Les techniques de génie écologique sont développées : les services écosystémiques sont intégrés à tous les programmes de construction et de maintenance des infrastructures, les villes sont structurées par leurs trames écologiques. Les citoyens verdissent les espaces publics et privés, créant ainsi des couloirs de biodiversité. Ils se préparent collectivement à faire face aux chocs climatiques. De fait, S2 est plutôt résilient face au changement climatique.

## 02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

### Diversification, reterritorialisation et mobilisation raisonnée des ressources végétales et forestières

La transition alimentaire s'accélère grâce à des politiques publiques ambitieuses et une éducation renforcée autour des enjeux nutritionnels et environnementaux de l'alimentation. Celle-ci devient plus sobre, plus végétale, issue de productions durables et fortement relocalisée. L'impact environnemental de l'assiette diminue fortement. La consommation de viande recule de 50 % par rapport à la consommation actuelle, ce qui permet une extensification des productions et une alimentation animale produite localement. Les pertes et gaspillages sont réduits de moitié. Les circuits de proximité deviennent la principale voie de commercialisation.

Les ressources agricoles et les biomasses lignocellulosiques prennent part de façon équilibrée à cette transition. La part de la récolte de bois en forêt pour des usages matière augmente notamment à destination du bâtiment. Pour les usages énergétiques, la combustion et la méthanisation sont privilégiées ; la production de biocarburants s'est développée avec notamment l'émergence de biocarburants avancés valorisant des ressources lignocellulosiques.

L'irrigation reste contenue, en particulier en été grâce à un assolement et des pratiques culturales plus favorables. De même, l'artificialisation des sols est limitée, le rythme d'artificialisation permettant quasiment l'atteinte du ZAN à 2050, avec un besoin de 3 500 ha à compenser en 2050.

LA CONSOMMATION DE VIANDE RECULE DE 50 % PAR RAPPORT À LA CONSOMMATION ACTUELLE, CE QUI PERMET UNE EXTENSIFICATION DES PRODUCTIONS ET UNE ALIMENTATION ANIMALE PRODUITE LOCALEMENT.

## 03. Aménagement du territoire-bâtiments-mobilités

### Rénovation massive, ville du quart d'heure

La ville se construit dans un équilibre entre aménagements et intégration des éléments naturels. Elle se densifie en hauteur et de manière maîtrisée. C'est « la ville du quart d'heure » où tout (ou presque) est à proximité. Un rééquilibrage territorial s'opère en faveur des villes moyennes.

Le partage des bâtiments, de pièces de vie ou d'équipements se généralise. En moyenne, environ 150 000 logements par an sont construits après l'optimisation de l'utilisation des locaux vides. Les surfaces tertiaires sont à un ratio similaire à celui observé en 1990 (soit 12 m<sup>2</sup> par habitant).

La rénovation énergétique accélère très sérieusement : 80 % des logements sont rénovés à un niveau au moins BBC-rénovation (Bâtiment Basse Consommation), 71 % des surfaces tertiaires suivent la trajectoire prévue par le décret tertiaire du 23 juillet 2019. Réseaux de chaleur, chauffage au bois et pompes à chaleur électriques se développent, ainsi que les matériaux biosourcés.

### La soutenabilité des transports au cœur de la transition écologique

La demande de mobilité, en repli de 8 %, se tourne vers plus de proximité avec le développement des trains du quotidien, des vélos cargos, pliants, vélomobilités, mini-voitures et autres, du covoiturage et de l'électrification massive portés par des investissements dédiés importants. Cela entraîne une diminution des externalités des véhicules (impacts environnementaux, congestion, sédentarité, etc.).

Les trafics de marchandises baissent de 35 % en tonne-km sous l'effet d'une réduction des volumes et des distances parcourues avec une part du ferroviaire et du fluvial qui fait plus que doubler. L'optimisation des remplissages et de l'efficacité permet de réduire également les consommations d'énergie, qui se tournent vers un mix de plus en plus diversifié et adapté aux ressources locales.

Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 95 %.

LE RECYCLAGE EST TRÈS DÉVELOPPÉ, MAIS LES QUANTITÉS TOTALES À RECYCLER SONT RÉDUITES DU FAIT DE L'EFFICACITÉ DES ACTIONS D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE.

## 04. Industrie-matériaux-économie circulaire

**Des chaînes de valeur réindustrialisées et spécialisées par région sous l'impulsion des pouvoirs publics**

La planification publique accompagne et finance une politique industrielle bas-carbone vers davantage d'efficacité (énergétique, matière), de spécialisations régionales et d'économie circulaire.

Le recyclage est très développé (*Graphique 10*), mais les quantités totales à recycler sont réduites du fait de l'efficacité des actions d'économie circulaire. Les demandes en matières premières de récupération et en énergie parviennent cependant à un équilibre, ce qui entraîne un fort taux de valorisation (95 %) et une quasi-disparition des centres de stockage.

En outre, un important effort de réindustrialisation est mené dans des secteurs ciblés dont la production est décarbonée (filiales métaux, transports et chimie en particulier). Ceci permet de limiter l'impact de la baisse de la demande bien que la production en volume physique recule dans la plupart des secteurs.

Au bilan, une réduction des consommations énergétiques de 47 % et des émissions de GES de 84 % est atteinte en 2050 dans l'industrie.

L'empreinte matières<sup>14</sup> en 2050 de la France est inférieure de 19 % à celle de 2015, liée notamment à la sobriété, à la rénovation des bâtiments (qui consomme moins de matériaux que la construction neuve) et au recyclage.

*Graphique 10 Taux de matières premières recyclées dans l'industrie*

**TAUX D'INCORPORATION DE MATIÈRES PREMIÈRES RECYCLÉES DANS L'INDUSTRIE**  
(en volume, pour : acier, aluminium, verre, papier-carton, plastiques)



<sup>14</sup> En considérant que l'efficacité matière des pays exportateurs n'a pas évolué (voir détails dans le feuillet « Empreintes carbone et matières »).



## 05. Systèmes énergétiques décarbonés

**Une panoplie d'usages directs et indirects de l'hydrogène**

Le recours à l'hydrogène décarboné, à hauteur de 96 TWh en 2050, exclusivement produit par électrolyse, est nécessaire dans les transports, pour le *power-to-methane* et dans l'industrie pour la production d'engrais, de méthanol, la synthèse de carburants liquides et la réduction de l'acier.

**Scénario le plus ambitieux pour le développement de la biomasse énergie**

En conséquence des hypothèses de ce scénario, le mix énergétique est dominé par la biomasse et l'électricité quasi

intégralement décarbonée. La consommation totale d'électricité augmente légèrement par rapport à 2015 (+ 12 %), liée au développement de la mobilité électrique et la production d'hydrogène par électrolyse. La production d'électricité est principalement assurée par le développement des EnR avec des installations de grande taille afin de bénéficier des économies d'échelle et d'exploiter en priorité le meilleur productible. Le nucléaire historique est prolongé en partie sans construction de nouvelles centrales EPR.

La forte baisse de la consommation de gaz (158 TWh en 2050) permet de couvrir la grande majorité de la demande avec du gaz décarboné (82 %). Le couplage méthanisation/*power-to-methane* en produit 127 TWh.

Le mix de la consommation d'énergie finale<sup>15</sup> est composé de 343 TWh d'électricité, 260 TWh de chaleur, 126 TWh de gaz et 42 TWh de combustibles liquides.

<sup>15</sup> Le mix de consommation finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour produire d'autres vecteurs (gaz utilisé pour produire de l'électricité, électricité utilisée pour produire de l'hydrogène, pertes...). Ainsi, dans ce scénario, la consommation totale d'électricité est de 535 TWh et celle de gaz de 158 TWh.



## 06. GES et puits de carbone

### Maintien des puits naturels et appel limité au captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CCS)

Ce scénario s'appuie sur l'évolution des pratiques agricoles pour favoriser le stockage de carbone dans les sols. Notamment par l'implantation de haies, de l'agroforesterie intra-parcellaire (pratique la plus efficace en matière de stockage) et le développement des couverts végétaux pour préserver les sols et leur fertilité. Les niveaux de prélèvements de bois en forêt restent modérés, ce qui permet le maintien d'un puits de carbone important en forêt. Au total, les puits naturels s'élèvent à 93 MtCO<sub>2</sub>.

Le captage de CO<sub>2</sub> est déployé sur quelques procédés aux émissions incompressibles comme les cimenteries du Nord-Est de la France et le stockage est effectué en Mer du Nord, à hauteur de 3 MtCO<sub>2</sub> en 2050.

Les émissions totales de GES de 68 MtCO<sub>2</sub>eq sont ainsi réduites en bilan net à - 28 MtCO<sub>2</sub>eq, ce qui constitue une assurance compte tenu des estimations plus défavorables publiées en 2023 sur le puits carbone forestier et l'incertitude à 2050.

## 07. Macroéconomie-emploi-société

### Des résultats économiques bénéfiques maximisant le revenu disponible des ménages

D'après la modélisation macroéconomique réalisée, la diminution des investissements productifs des entreprises est plus que compensée par la hausse des investissements d'efficacité énergétique et des investissements dans les énergies renouvelables. Les importations diminuent si bien que le solde de la balance commerciale s'améliore. L'emploi augmente. Le taux de chômage baisse et la consommation s'accroît au profit essentiellement de biens décarbonés et de services produits localement. Le revenu disponible des ménages augmente, ce qui favorise une hausse du taux de croissance annuel par rapport au tendanciel.

Concernant plus spécifiquement l'électricité, S2 est également le scénario le plus économique au regard du coût complet de l'électricité consommée en 2050 (investissements et fonctionnement compris), même si l'écart entre scénarios est relativement faible (17 % entre S2 et S4). Cela est dû au fait qu'avec un niveau de consommation totale d'électricité modéré, de l'ordre de 535 TWh, S2 peut reposer sur un approvisionnement renouvelable à 85 %, basé essentiellement sur les technologies et les gisements les plus compétitifs ainsi que sur une flexibilité importante

apportée notamment par les électrolyseurs installés en quantité significative, qui permet de réduire les coûts des autres flexibilités (imports, batteries, centrales gaz).

### Modes de vie

Dans l'étude sociologique menée avec 31 citoyens<sup>16</sup>, les conditions collectives d'organisation de la vie sociale et économique sont perçues très favorablement par les enquêtés. Les pratiques de sobriété (de partage notamment) sont traversées par deux appréciations distinctes : synonymes de nouvelles valeurs ou de pratiques porteuses d'un renouveau du lien social pour beaucoup, elles sont repoussées par ceux qui valorisent l'attachement à la propriété individuelle et par ceux qui craignent les risques de mésusages ou d'indisponibilités des services partagés. Ceci révèle le besoin de développement d'un champ d'innovations techniques ou servicielles, permettant l'accès à des modes de vie plus sobres. La fiscalité est tantôt perçue comme un outil d'austérité, tantôt comme d'une meilleure équité sociale. Enfin, la participation politique renouvelée est vue soit comme la voie pour construire une nouvelle forme de responsabilité collective soit, dans quelques cas, comme un encadrement non nécessaire et contraignant, notamment dès lors qu'elle implique des choix restrictifs en matière de consommation.

<sup>16</sup> Cf. feuilletton « Modes de vie ».

# SCÉNARIO 3

## Technologies vertes

### LA SOCIÉTÉ EN 2050

C'est plus le développement technologique qui permet de répondre aux défis environnementaux que les changements de pratiques et d'organisation sociale vers plus de sobriété. De fait, les manières d'habiter, de se déplacer ou de travailler ressemblent beaucoup à celles d'aujourd'hui au sens où elles restent individuelles, avec cependant quelques différences. Par exemple, l'alimentation est un peu moins carnée et plus équilibrée. La mobilité est prédominante mais avec des véhicules plus légers et électrifiés. L'industrie produit un peu moins en volume mais bénéficie d'énergies décarbonées.

Les métropoles se développent. Les technologies et le numérique, qui permettent l'efficacité énergétique ou matière, sont dans tous les secteurs. Les meilleures technologies sont déployées largement et accessibles de manière généralisée aux populations solvables. C'est une voie dans laquelle le découplage entre création de richesses et impacts environnementaux constitue toujours la ligne d'horizon. Mais en se focalisant sur la production verte ou décarbonée, il existe un risque de ne pas suffisamment maîtriser les consommations d'énergie et de matières et de ne pas permettre aux plus pauvres d'accéder aux besoins de base.

Les effets rebonds peuvent être significatifs en l'absence de politiques visant à les contrecarrer (réglementation, tarification...). La dépendance aux énergies fossiles diminuant lentement, l'atteinte de la neutralité repose sur une mobilisation maximale de la biomasse, notamment forestière, pour produire de l'énergie et récupérer le CO<sub>2</sub> pour le stocker en sous-sol, ce qui diminue sa capacité de puits de carbone.

La mise en valeur du capital naturel permet de mieux préserver la nature qu'aujourd'hui : c'est en lui donnant un prix que l'on espère trouver les solutions techniques pour la protéger.

L'État planificateur met en place des politiques fortes pour favoriser la décarbonation de l'économie, dans un contexte de concurrence internationale et d'échanges mondialisés.

## 01. Adaptation au changement climatique

### La technologie au service de ressources à développer

La nature est vue comme un ensemble de ressources à développer, utiliser et optimiser pour le bénéfice des humains, dans une relation de croissance mutuelle entre des écosystèmes naturels et une activité humaine intense dans tous les domaines de l'économie. Dans ce cadre, les technologies sont un moyen de connaissance, de suivi et de régulation des impacts du changement climatique. Elles apportent également de nouvelles flexibilités et capacités d'adaptation (agriculture de précision, développement du dessalement d'eau de mer, domotique...).

Ce scénario s'appuie davantage sur des techniques maîtrisées et des partenariats qui mutualisent les efforts d'adaptation des acteurs publics et privés. Des besoins en connaissances complémentaires sont nécessaires pour s'assurer de la robustesse des trajectoires de décarbonation face au changement climatique, notamment sur la ressource en eau pour S3. Pour autant, l'adaptation au changement climatique est difficile car tous les effets sur l'environnement (artificialisation des sols et consommation d'eau notamment) ne peuvent pas être compensés par la technologie.



## 02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

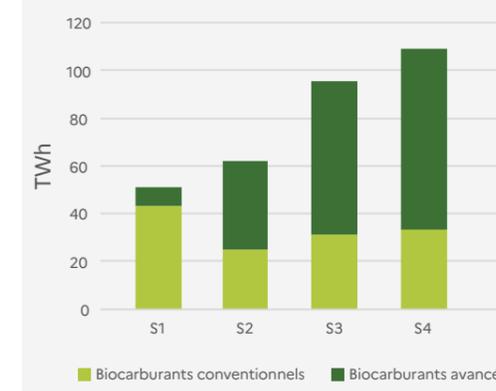
### Une consommation de biomasse maximale pour des usages multiples

Les régimes alimentaires évoluent significativement (mais de façon moins marquée que dans S1 et S2) sous l'effet d'un compromis entre des enjeux de santé et d'environnement et la recherche de plaisir individuel : - 30% de consommation de viande, + 30% de consommation de produits biologiques, hausse de la consommation de produits locaux. Mais ce scénario mise avant tout sur les performances des filières pour réduire l'empreinte environnementale de l'alimentation.

Il est nécessaire de produire 98 TWh de biocarburants liquides et d'électrocarburants<sup>17</sup>, malgré une baisse de la demande de 76% de carburants liquides en 2050 par rapport à aujourd'hui. Toutes les technologies de production de carburants liquides renouvelables disponibles sont mises à contribution, y compris les plus coûteuses. La filière algale contribue à la production de biocarburants et ceux de troisième génération représentent 12% de la production totale (Graphique 11).

La forte demande en énergie décarbonée crée des tensions sur la biomasse. Cela favorise une intensification de l'agriculture avec un usage important des intrants de synthèse, une augmentation des surfaces de cultures énergétiques, une plus grande spécialisation des régions et une intensification de l'exploitation forestière pour les besoins énergétiques.

Graphique 11 Production de biocarburants conventionnels et avancés dans chaque scénario en 2050



17 « Electrocarburants » ou « e-fuels » produits en utilisant l'hydrogène produit via l'électrolyse à partir d'électricité renouvelable.



UNE RECONFIGURATION PHYSIQUE DES MÉTROPOLIS AVEC UN NOUVEAU CYCLE DE DÉCONSTRUCTION/RECONSTRUCTION HAUSSMANNIEN.

### 03. Aménagement du territoire-bâtiments-mobilités

#### Rénovation massive et déconstruction-reconstruction

Les métropoles concentrent l'intérêt et les activités des citoyens. Cette attractivité nécessite une reconfiguration physique avec un nouveau cycle de déconstruction/reconstruction haussmannien générant une consommation massive de ressources naturelles (Graphique 12) qui entraîne une demande de transport importante ainsi qu'une forte consommation de sols. Atteindre le ZAN en 2050 dans ce scénario nécessiterait une surface de compensation annuelle à partir de 2050 très élevée (l'équivalent de la surface de Paris, chaque année). La question de savoir si les surfaces nécessaires à cette compensation sont bien disponibles reste ouverte. Les modes constructifs évoluent vers l'industrialisation et la préfabrication pour répondre aux besoins de constructions neuves de logements collectifs. L'offre de matériaux et de systèmes constructifs moins carbonés se développe.

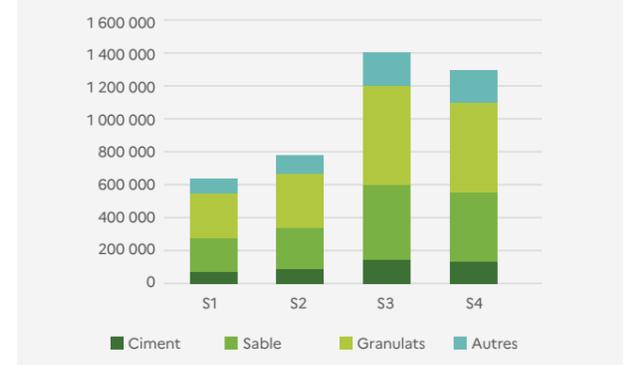
L'innovation technique permet une meilleure efficacité des équipements. Les rénovations touchent l'ensemble des postes de travaux mais sans s'inscrire dans une trajectoire Bâtiment Basse Consommation (BBC-rénovation) avec une rénovation par geste plutôt que globale. Dans le tertiaire, la rénovation énergétique du parc s'accélère. En 2050, 72 % des surfaces tertiaires présentes en 2015 suivent la trajectoire prévue par le décret tertiaire du 23 juillet 2019.

#### La recherche d'efficacité prime pour la mobilité

La demande de transport est satisfaite par les différents modes, menant à une hausse de 23 % des kilomètres parcourus pour les voyageurs par rapport à 2015, tandis que le transport de marchandises est stable. Le report modal est faible et concentré dans les grandes villes et les grands axes des lignes ferroviaires et fluviales. Les principaux efforts sont concentrés sur l'accélération de la décarbonation des flottes et de l'énergie, en particulier par l'électrification des véhicules. Le mix énergétique est plus diversifié pour les marchandises, avec l'électricité pour les utilitaires et sur les axes d'autoroutes électriques, mais aussi le biogaz, l'hydrogène et les biocarburants.

Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 94 %.

Graphique 12 Consommation de matériaux pour la construction neuve (résidentiel, EPHAD, commerce, hôtel, enseignement et bureau) Milliers de tonnes cumulées entre 2015 et 2050



### 04. Industrie-matériaux-économie circulaire

#### Une poursuite des tendances de consommation permise par la décarbonation du mix énergétique

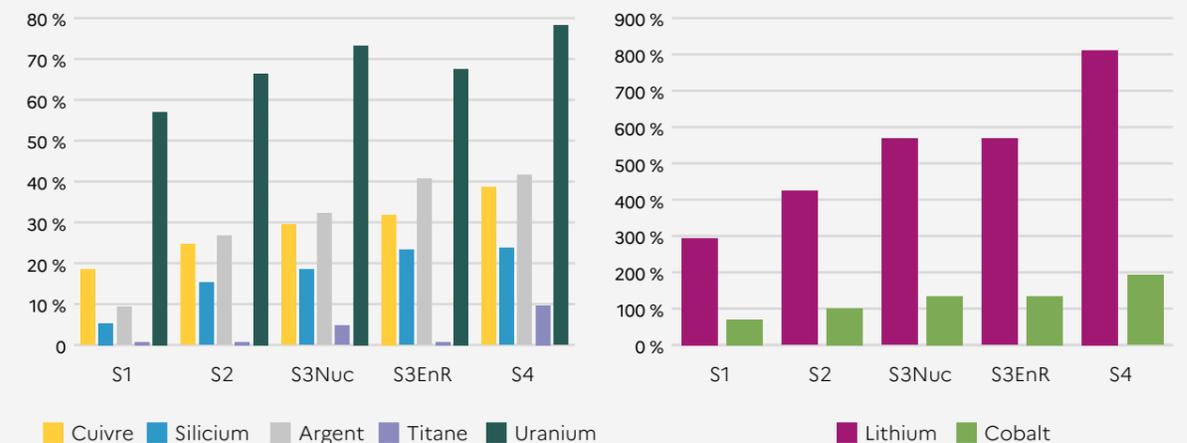
Par rapport à aujourd'hui, la production industrielle est en légère baisse en volume. Cependant, certains secteurs comme l'aluminium ou l'ammoniac voient leurs volumes progresser, notamment grâce à la dynamique du transport. Par ailleurs, si les échanges commerciaux se concentrent dans l'Union Européenne, ils se maintiennent à volume constant.

Cette dynamique de production demande beaucoup de ressources et donc de matières premières issues des déchets.

Les déchets plastiques sont ainsi récupérés pour le recyclage chimique. De la même façon, les combustibles solides de récupération (CSR) sont fortement sollicités (18 Mt en 2050) entraînant une légère distorsion de la hiérarchie de gestion des déchets vers l'énergie plutôt que vers le recyclage.

Concernant les métaux de la transition écologique, la demande en aluminium est critique dans la mesure où elle augmente fortement (+ 91 % par rapport à 2014) ce qui nécessitera de sécuriser les approvisionnements, notamment au niveau européen. Par ailleurs, les besoins en lithium, cobalt (Graphique 13) et, dans une moindre mesure, terres rares et graphite, dépassent le poids actuel de la France dans le monde (environ 1 %) ce qui peut induire des difficultés d'approvisionnement sauf à développer des mines de lithium en France et en Europe (présent en particulier dans les sources géothermales).

Graphique 13 Besoins matières annuels moyens entre 2020 et 2050 et comparaison avec la consommation française 2020 pour 7 matériaux et métaux



N.B. : 100 % correspond à la consommation française, tous secteurs confondus, par an entre 2015 et 2020 selon les matières et les données disponibles. L'échelle de droite est différente. S3 présente deux options de production d'électricité : avec (S3Nuc) ou sans (S3EnR) nucléaire supplémentaire - voir description du mix électrique page 64.

La décarbonation de l'industrie s'opère via l'électrification des procédés et le recours à l'hydrogène. En complément, 11 MtCO2 d'émissions issues de zones industrielles fortement émissives sont captées et stockées en 2050 (offshore et onshore : Nord-Est, bassin aquitain).

Au bilan, une réduction des consommations énergétiques de 30 % et des émissions de GES de 86 % est atteinte en 2050 pour l'industrie.

## 05. Systèmes énergétiques décarbonés

### L'innovation au service de la décarbonation et des renouvelables

La fourniture d'énergie doit répondre à la demande de biens et de services, en particulier numériques (page 58), fortement consommateurs ainsi qu'aux besoins de mobilités. Pour cela, la biomasse est très mobilisée, en particulier les déchets pour la méthanisation et le bois pour l'énergie. Grâce aux ressources disponibles, la pyrogazéification tient un rôle important dans ce scénario (67 TWh). Les carburants fossiles restent encore faiblement utilisés (10 %) dans le transport.

### Une consommation massive d'hydrogène pour tous les usages avec un recours aux importations

La demande en hydrogène décarboné (à hauteur de 94 TWh en 2050) est principalement tirée par les usages industriels. Elle est satisfaite pour moitié environ par des importations, facilitées par la mise en place d'infrastructures de transport et de stockage d'hydrogène dès 2030.

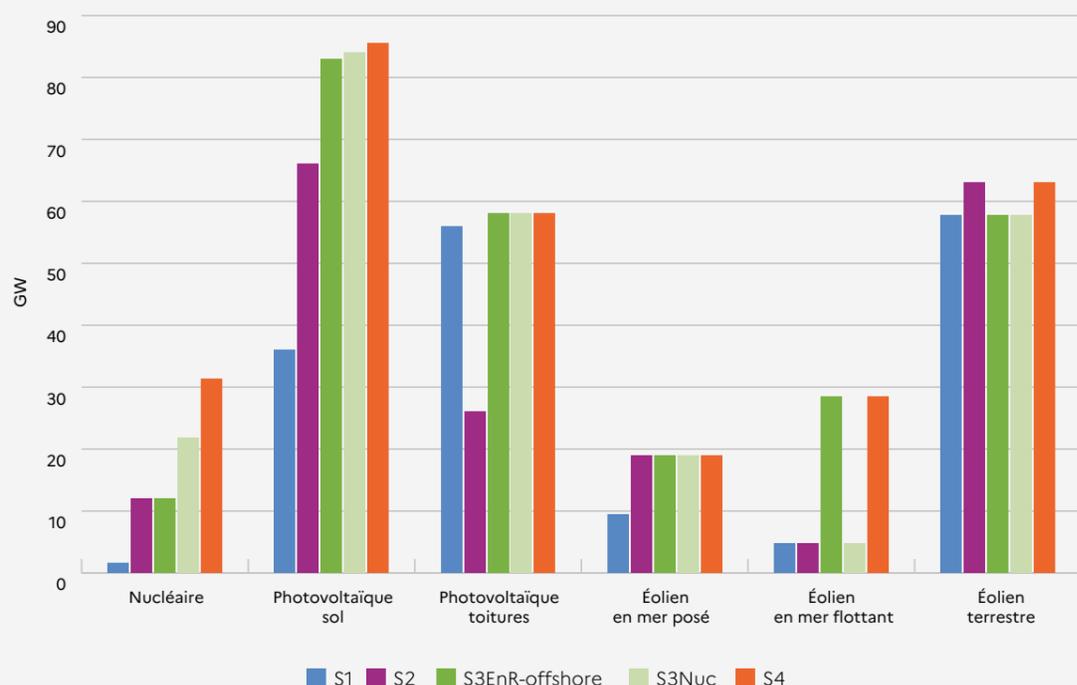


Pour faire face à l'augmentation significative de la consommation d'électricité (+37 % par rapport à 2015), la production d'électricité peut se faire suivant 2 options (Graphique 14) :

- avec le nucléaire historique et le développement des EnR, dont un recours massif à l'éolien flottant (+ 28 GW vs 2020) : S3EnR-offshore ;
- avec le nucléaire historique plus le développement de 3 paires d'EPR supplémentaires, aux côtés des EnR avec moins d'éolien flottant (+ 5 GW) : S3Nuc.

Le mix de la consommation d'énergie finale<sup>18</sup> est composé de 517 TWh d'électricité, 290 TWh de chaleur, 161 TWh de gaz et 36 TWh de combustibles liquides.

Graphique 14 Capacités installées de nucléaire et d'EnR variables en 2050 pour tous les scénarios (parc installé)



<sup>18</sup> Le mix de consommation finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour produire d'autres vecteurs (gaz utilisé pour produire de l'électricité, électricité utilisée pour produire de l'hydrogène, pertes...). Ainsi, dans ce scénario, la consommation totale d'électricité est de 640 TWh et celle de gaz de 219 TWh.

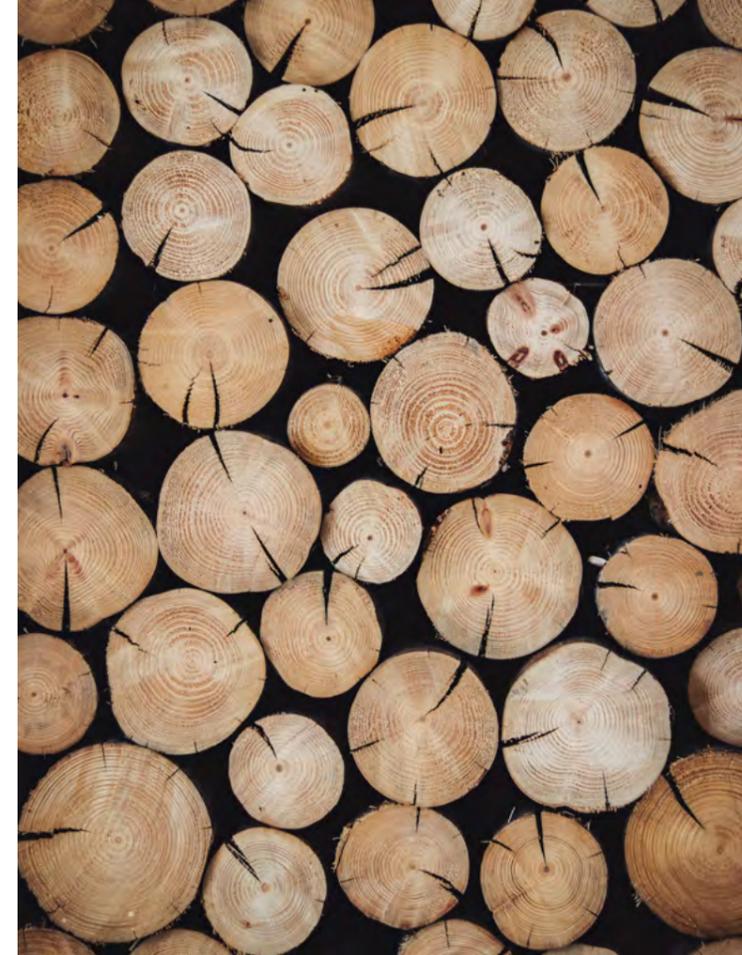
## 06. GES et puits de carbone

### Recours au captage et au stockage de CO<sub>2</sub> sur des unités fonctionnant à la biomasse (BECCS)

Les émissions de GES s'élèvent à 85 MtCO<sub>2</sub>. Pour arriver à la neutralité, l'appel aux puits naturels principalement constitués par l'agroforesterie, les couverts végétaux et la forêt à hauteur de 64 MtCO<sub>2</sub>/an et le recours au CCS sur les unités industrielles et les UIOM (11 MtCO<sub>2</sub>/an) ne suffisent pas.

S3 prévoit un développement plus important de la demande en biomasses, ce qui explique une récolte de bois plus forte qu'aujourd'hui et une réduction du puits forestier plus forte que prévue compte tenu des estimations plus défavorables publiées en 2023 sur le puits carbone forestier et l'incertitude à 2050. Ces biomasses sont valorisées en énergie (méthanisation, bois-énergie, biocarburants et pyrogazéification) et via des paiements pour services environnementaux (ex. : stockage de carbone). Le développement d'unités de taille moyenne de chaudières biomasse et de bioraffineries avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (appelé BECCS), permet de compenser 21 MtCO<sub>2</sub>/an.

En empreinte, la consommation de CO<sub>2</sub>eq par habitant est en-dessous de celle de 2015, à savoir 5 tonnes pour 10,9 en 2015<sup>19</sup>.



## 07. Macroéconomie-emploi-société

### Les ressorts de la croissance de S3 sont comparables à ceux de S2 mais de moindre ampleur

La production industrielle est quasi équivalente à celle du tendancier et le nombre de véhicules en circulation est plus important que dans les scénarios précédents. La désinflation est moins importante que dans S2 et les importations de véhicules restent conséquentes, si bien que l'amélioration du solde de la balance commerciale exerce un effet d'entraînement plus limité sur la croissance que dans S2. Elle reste néanmoins supérieure à celle du tendancier. Il apparaît que l'arbitrage entre développement du nucléaire ou hausse de l'éolien offshore, toutes choses égales par ailleurs, n'a quasi aucune incidence sur les agrégats macroéconomiques.

De même, aucune incidence n'est observée sur le prix du MWh électrique entre les deux filières industrielles (éolien flottant ou

nouveau nucléaire) modélisées dans S3EnR-offshore et S3Nuc qui s'établit à 82 EUR/MWh dans les deux options pour un investissement cumulé de 1 300 Md EUR sur la période 2020-2050.

### Modes de vie

Dans l'étude sociologique menée avec 31 citoyens<sup>20</sup>, les risques de *greenwashing* et d'insuffisance des technologies vertes pour répondre aux enjeux écologiques sont cités par les enquêtés malgré une très forte optimisation environnementale des modes de production. Les solutions techniques, et les outils numériques notamment, divisent les enquêtés : parmi les risques relevés, celui de déshumanisation des rapports sociaux, de suppression d'emplois liée à la robotisation ou encore d'intrusion du numérique dans la vie quotidienne. D'un autre côté, les outils connectés sont perçus comme autant d'opportunités pour aider les citoyens à une meilleure maîtrise de leur consommation quotidienne et de leur empreinte carbone. Enfin, une attention particulière aux inégalités sociales est perceptible chez les réticents à ce scénario, qui y voient un risque de régression pour les catégories les plus fragiles.

<sup>19</sup> En considérant que les émissions des pays exportateurs ont évolué selon le scénario NDC (STEPS / WEO-22 / IEA) ; voir détails dans le feuillet « Empreintes carbone et matières ».

<sup>20</sup> Feuillet « Modes de vie ».

# SCÉNARIO 4

## Pari réparateur

### LA SOCIÉTÉ EN 2050

Comme dans les autres scénarios, les modes de vie sont profondément différents de ceux que nous connaissons aujourd'hui. Mais la tendance à l'individualisation de ceux-ci, qui s'est accentuée au début du XXI<sup>e</sup> siècle, est sauvegardée. Les appareils sont très prisés dans la maison pour cuisiner, alerter, régler (lumière, énergies), sécuriser. Les applications sont très développées, notamment pour s'alimenter (sainement) ou se déplacer (efficacement). Mais ce foisonnement de biens consomme beaucoup d'énergie, d'eau, de sols et de matières avec des impacts potentiellement forts sur l'environnement.

Les enjeux écologiques globaux sont perçus comme des contreparties du progrès économique et technologique : la société place sa confiance dans la capacité à gérer, voire réparer, les systèmes sociaux et écologiques avec plus de ressources matérielles et financières pour conserver un monde vivable. Ceci conduit à remettre en cause un certain nombre d'objectifs inscrits aujourd'hui dans la loi (division par deux de la consommation d'énergie, zéro artificialisation nette...). Les enjeux écologiques locaux (ressources, pollution, bruit, biodiversité...) sont traités avec des solutions techniques. Mais cet appui exclusif sur les technologies est un pari dans la mesure où certaines d'entre elles ne sont pas matures. C'est le cas du captage du CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant qui est à un stade expérimental en 2021 et pour lequel aucune étude ne permet de savoir s'il sera déployable à des coûts et impacts acceptables et dans les temps impartis.

La mondialisation s'accélère, avec une amélioration des aides au bénéfice des pays les plus en difficulté.

La logique de ce scénario correspond au développement de deux dynamiques récentes sans précédent en rupture avec les tendances passées :

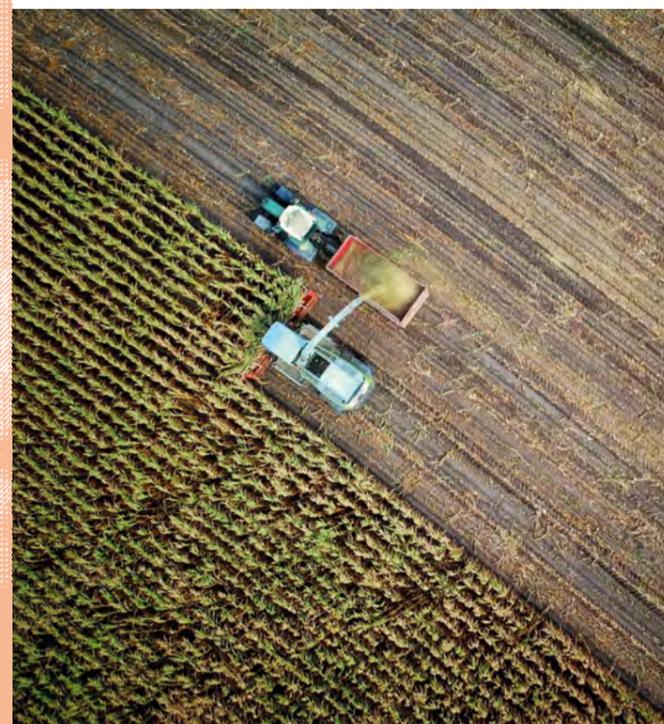
- l'émergence d'une classe moyenne mondiale qui pourrait contribuer à une croissance robuste de la production et de la consommation ;
- la révolution numérique qui facilite la vie des citoyens et des entreprises. Présent partout et pour toutes les activités, le numérique est également grand consommateur d'énergie malgré les progrès techniques pour le rendre plus efficace.

## 01. Adaptation au changement climatique

### Une stratégie nationale guidée par des politiques de sécurité

Ce scénario poursuit une logique de flux tendus (industries, transports) avec une consommation intensive de ressources (en particulier l'eau pour les usages agricoles) et un urbanisme très exposé (bâtiments et cadre bâti). Les réponses aux risques climatiques reposent souvent sur des technologies encore à tester, voire à imaginer. Néanmoins, S4 ne semble pas tenable face aux impacts du changement climatique de 2050 sans une augmentation des inégalités (accès à la ressource en eau, assurances, technologies de gestion du risque) et une dégradation de la santé des écosystèmes (accroissement des pressions et impacts environnementaux).

La stratégie d'adaptation s'appuie en particulier sur une gouvernance nationale et des stocks stratégiques pour faire face aux aléas climatiques plus fréquents. La maîtrise technique de la nature par la communauté humaine devient un objectif de résilience. Les défis écologiques sont gérés par des solutions ciblées et technocentrées, mais la perte de sols et l'exploitation massive des forêts pour l'énergie fragilisent la capacité de la société à s'adapter. L'incertitude des événements climatiques contribue à la création d'un gigantesque marché assurantiel de la protection individuelle contre les conséquences du changement climatique.



## 02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

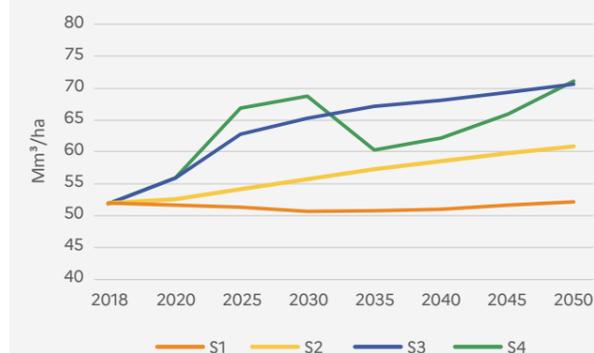
### Des leviers technologiques au service de filières productives et spécialisées

L'agriculture et les industries agroalimentaires sont fortement spécialisées et compétitives. La principale évolution des régimes alimentaires repose sur l'inclusion, encore faible, de protéines alternatives comme les viandes de synthèse ou les insectes. De fait, l'élevage et les systèmes agricoles intensifs, dominés par les systèmes conventionnels raisonnés (70 % des exploitations), sont majoritaires. L'agriculture utilise toutes les technologies pour optimiser sa production et limiter ses impacts mais consomme environ 65 % d'eau d'irrigation de plus qu'aujourd'hui.

L'utilisation de biomasse lignocellulosique et de déchets bois en vue d'une valorisation énergétique est favorisée. Les filières méthanisation et biocarburants représentent la majorité de la consommation de biomasse (plus de 75 % de la biomasse valorisée énergétiquement). Mais la technologie *power-to-liquid* ou la filière algale de biocarburants sont également développées, quoique dans une moindre mesure.

Le paysage sylvicole s'en trouve modifié en profondeur, avec des coupes massives avant 2030 suivies par un reboisement en résineux (Graphique 15).

Graphique 15 Récolte de bois en forêt dans les différents scénarios



La consommation de sols est plus importante que dans les autres scénarios, ce qui rend très difficile l'atteinte de l'objectif ZAN : il faudrait en effet reconverter près de 2 fois la surface de Paris (19 500 ha) en zones naturelles pour compenser l'artificialisation, ce qui est un pari audacieux sur une année et quasi impossible tous les ans si ce rythme d'artificialisation se poursuit les années suivantes.

### 03. Aménagement du territoire- bâtiments-mobilités

#### Efficacité énergétique et innovation technique

Les grandes villes et l'artificialisation des sols se développent en lien avec la recherche d'un « toujours plus » de confort. La technologie s'invite autant dans l'industrialisation de la rénovation des bâtiments ou l'efficacité énergétique des équipements, que dans la mobilité. Notamment en permettant de choisir à tout instant son mode de transport ou de se laisser conduire par son véhicule.

Dans le bâtiment, la rénovation se fait à deux vitesses. Les logements dont l'architecture permet une industrialisation de la rénovation (via la préfabrication) sont isolés à un niveau très performant (BBC-rénovation, voire passif). Les autres poursuivent un rythme tendanciel de rénovation par geste, sans s'inscrire dans une trajectoire de performance. Le rendement des équipements est amélioré et favorise l'apparition de nouvelles technologies très efficaces, notamment pour les équipements thermiques dans le parc rénové. Le parc tertiaire croît, pour atteindre 1 133 millions de mètres carrés de surfaces chauffées en 2050, dont un quart de bâtiments construits après 2015. La surface tertiaire représente en 2050 un ratio de 16 m<sup>2</sup>par habitant contre 15 m<sup>2</sup>en 2015.

#### La technologie s'immisce dans les moteurs et la gestion des mobilités

Les kilomètres parcourus augmentent de 39 % sous l'effet d'une hausse des voyages longue distance, en particulier aériens et d'une recherche constante de vitesse. La voiture individuelle garde une place centrale, malgré l'essor de véhicules autonomes partagés. Poussée par l'essor du e-commerce, la logistique est de plus en plus connectée, à flux tendus, et valorise la rapidité des livraisons. Cela soutient l'hégémonie des transports maritimes et routiers, tandis que la fragmentation des envois multiplie les livraisons en véhicules utilitaires légers. Les progrès technologiques facilitent l'électrification, le recours au biogaz augmente, mais la décarbonation est limitée par les ressources disponibles.

Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 90 %.



LA FORTE DEMANDE EN ÉNERGIE NÉCESSITE D'UTILISER PLUSIEURS LEVIERS DE DÉCARBONATION : BIOMASSE, EN PARTICULIER FORESTIÈRE, ÉNERGIES RENOUVELABLES, BIOGAZ ET BIOCARBURANTS. MAIS CELA NE SUFFIT PAS.

### 04. Industrie-matériaux- économie circulaire

#### Une décarbonation de l'industrie focalisée sur le captage et stockage géologique de CO<sub>2</sub>, dans un univers où consommation et mondialisation s'intensifient

Dans un monde globalisé favorisant les échanges de matières avec une consommation qui croît plus vite que la production, les marchés recourent davantage aux importations. Celles-ci sont complétées par une production nationale dont la décarbonation est focalisée sur le captage et stockage géologique de CO<sub>2</sub> (CCS) ainsi que la progression de l'électrification.

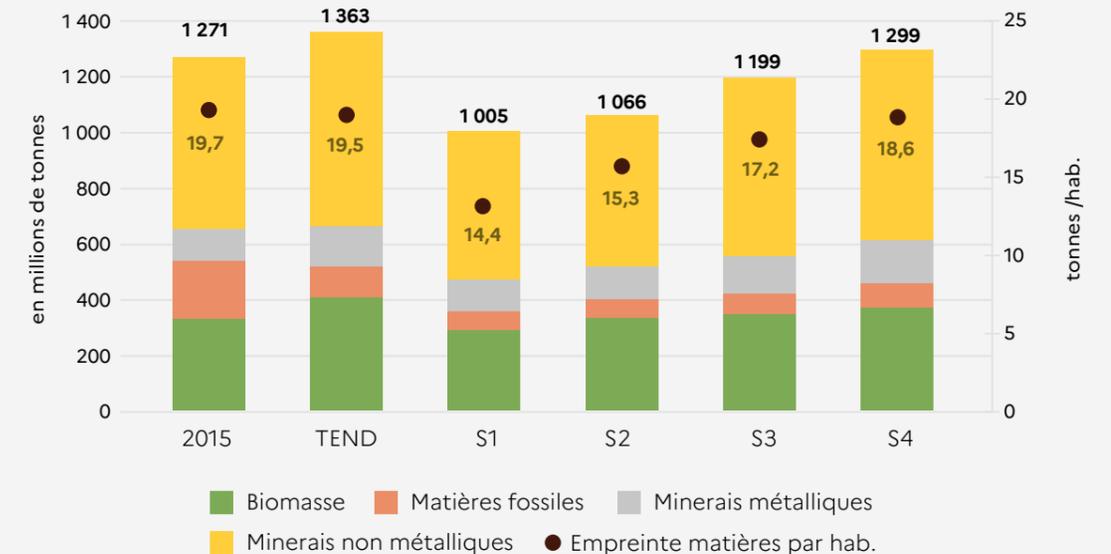
Pour fournir cette production, les besoins en ressources sont immenses. Ils sont satisfaits par l'exploitation des ressources naturelles, mais aussi par un recyclage poussé à son maximum grâce à des technologies de pointe.

Au bilan, les consommations énergétiques de l'industrie ne se réduisent que de 19 % en 2050, induisant un recul de 54 % des émissions de GES avant captage.

L'empreinte matières est légèrement plus importante qu'en 2015<sup>21</sup> en raison du maintien de la consommation de masse, d'une économie mondialisée et peu régulée et d'une agriculture intensive (Graphique 16).



Graphique 16 Empreinte matières de la France en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios



<sup>21</sup> En considérant que l'efficacité matière des pays exportateurs n'a pas évolué (voir détails dans le feuillet « Empreintes carbone et matières »).

## 05. Systèmes énergétiques décarbonés

### Forte électrification et recours massif aux importations

Malgré des systèmes relativement efficaces dans l'industrie, le bâtiment ou les transports, la demande énergétique est forte. Cela nécessite d'utiliser plusieurs leviers de décarbonation : biomasse, en particulier forestière, énergies renouvelables, biogaz et biocarburants. Mais cela ne suffit pas.

S4 mise également sur une spécialisation de certains pays étrangers dans la production de gaz décarboné ou renouvelable, qui permet à la France d'en importer (44 TWh de gaz renouvelable ou décarboné) pour porter à 51 % le niveau global de décarbonation du gaz. Ainsi, 133 TWh de gaz naturel doivent encore être importés (environ un tiers des importations 2015). Ce scénario est donc particulièrement sensible à une pénurie d'approvisionnement en gaz et/ou à une variation mondiale du prix du gaz.

La demande en électricité est très forte (+ 75 % par rapport à 2015) ce qui nécessite à la fois le développement des EnR (dont l'éolien flottant pour 28 GW supplémentaires) et la construction de 5 paires d'EPR supplémentaires.

### La concurrence d'autres technologies compromet la place de l'hydrogène

Le développement de l'hydrogène est limité, compte tenu de la concurrence avec d'autres technologies : avancées technologiques sur les batteries dans la mobilité, fort déploiement du captage et stockage de CO<sub>2</sub>(CCS) dans la chimie et dans l'air ambiant (DACCS) en défaveur du *power-to-methane*.

Le mix de la consommation d'énergie finale<sup>22</sup> est composé de 709 TWh d'électricité, 271 TWh de chaleur, 270 TWh de gaz et 73 TWh de combustibles liquides.

<sup>22</sup> Le mix de consommation finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour produire d'autres vecteurs (gaz utilisé pour produire de l'électricité, électricité utilisée pour produire de l'hydrogène, pertes...). Ainsi, dans ce scénario, la consommation totale d'électricité est de 810 TWh et celle de gaz de 371 TWh.

## 06. GES et puits de carbone

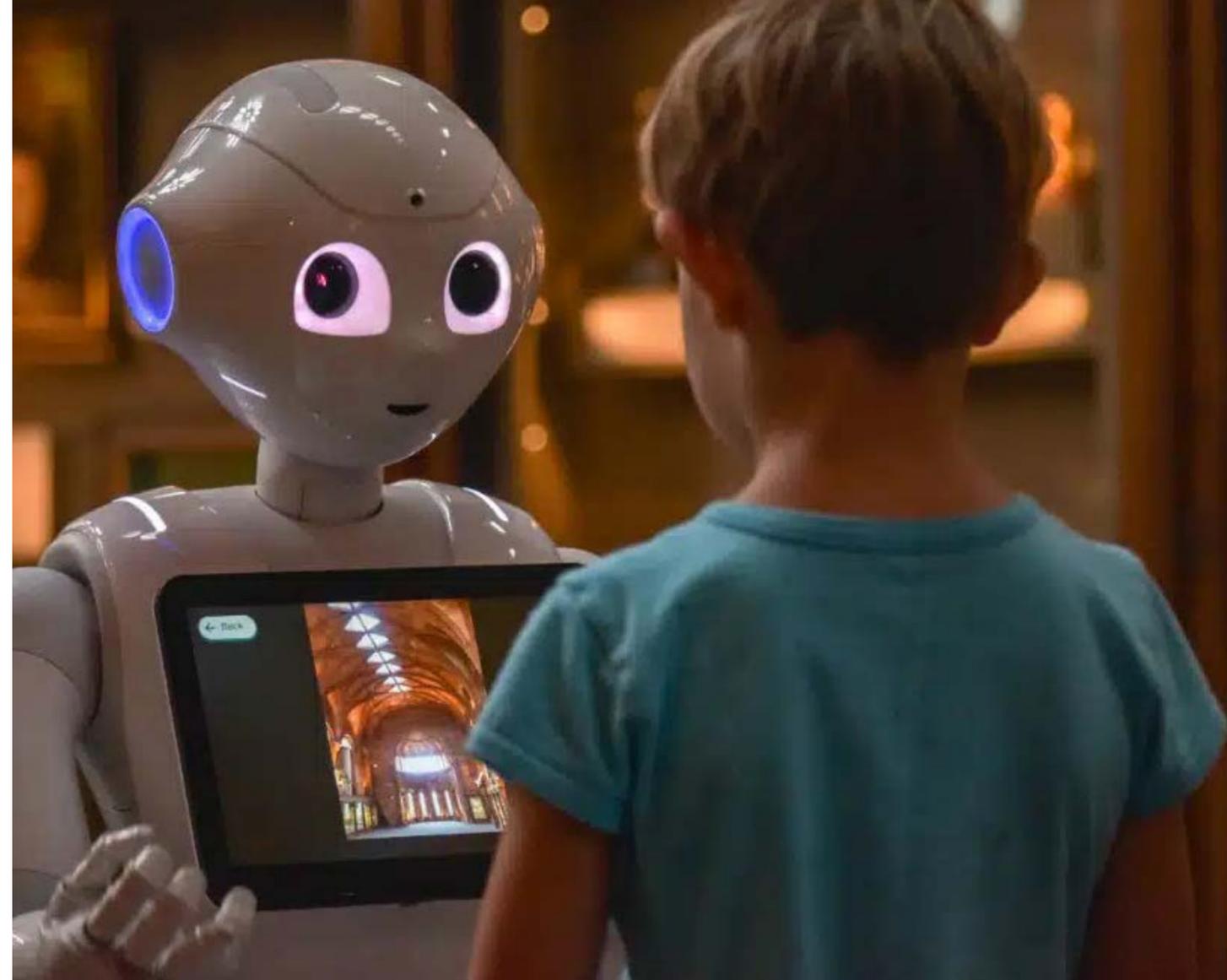
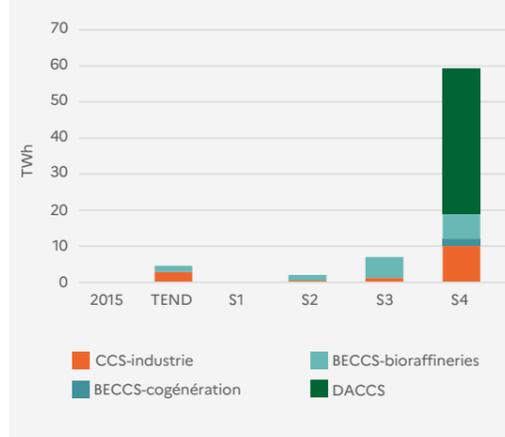
### Nécessaire développement des puits technologiques

Ce scénario présente le niveau d'émissions le plus élevé (135 MtCO<sub>2</sub>/an) et le puits naturel le plus faible (41 MtCO<sub>2</sub>/an). Compte tenu des estimations publiées en 2023 sur le puits carbone forestier plus défavorables que prévues et l'incertitude à 2050, il n'est pas certain que la neutralité carbone puisse être atteinte sauf à augmenter le recours aux puits technologiques plus fortement que lors des simulations (2020-2021).

Pour compenser, le recours au CCS et aux puits technologiques est ici le plus important :

- fort développement du CCS dans l'industrie (41 MtCO<sub>2</sub>/an) sur tout le territoire grâce au développement des infrastructures nécessaires : canalisations de transport et sites de stockage géologique de CO<sub>2</sub> pour moitié environ en mer du Nord et pour moitié en France, sur les premiers sites démonstrateurs de stockage dans les zones identifiées (Bassin parisien, Bassin aquitain...);
- large utilisation de la biomasse énergie avec captage et stockage de CO<sub>2</sub>(BECCS) (29 MtCO<sub>2</sub>/an);
- mise en œuvre du captage et du stockage de CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant (DACCS) à hauteur de 27 MtCO<sub>2</sub>/an. Ce qui est un pari très risqué et qui se traduit par une très forte consommation énergétique de 59 TWh/an, soit 6 % de la consommation d'électricité (*Graphique 17*).

**Graphique 17** Consommation d'électricité associée au CCS et aux puits de carbone en 2050 selon les scénarios



## 07. Macroéconomie-emploi-société

### Les investissements lourds et peu rentables dans les DACCS pénalisent les résultats macroéconomiques

L'atteinte de la neutralité carbone suppose un supplément d'investissement de décarbonation dans l'industrie qui s'avère moins rentable que les précédents, car le coût d'abattement de la tonne de CO<sub>2</sub> est croissant. À cela s'ajoute la nécessité d'investir dans le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>. La neutralité est atteinte grâce à des innovations technologiques fort coûteuses et peu productives qui limitent la compétitivité des entreprises et accroissent les pressions inflationnistes. Les créations d'emplois sont plus nombreuses que dans les scénarios précédents (notamment dans l'industrie et le BTP) mais leur effet d'entraînement sur le PIB est compensé par une moindre hausse du revenu disponible brut que dans S2 et un impact négatif de l'évolution des échanges extérieurs en volume sur la croissance.

<sup>23</sup> Feuilleton « Modes de vie »

### Modes de vie

Dans l'étude sociologique menée avec 31 citoyens<sup>23</sup>, S4 apparaît aux enquêtés comme celui de la « science-fiction », plus précisément d'une dystopie futuriste, du fait des développements technologiques qu'il suppose. Si les consommations individuelles y sont maintenues, les enquêtés apparaissent fortement frileux vis-à-vis des promesses techniques au cœur du scénario : captage et stockage carbone, voiture autonome, robotisation poussée, mais aussi production alimentaire en laboratoire sont vus comme peu matures et générateurs d'angoisse. En lien sans doute avec une potentielle génération d'impacts environnementaux par ces technologies, plusieurs répondants estiment que, seules, elles ne sont pas en mesure d'apporter une réponse convaincante aux questions posées par le changement climatique. Quant aux risques sociaux, la poursuite de la métropolisation et la diminution de l'emploi au profit d'assistances numériques et robotisées sont assimilées à un risque de précarisation de certains emplois et d'augmentation des inégalités.



## S1 GÉNÉRATION FRUGALE



## S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES



## S3 TECHNOLOGIES VERTES



## S4 PARI RÉPARATEUR

MODES DE VIE

MODES DE VIE

<b>Société</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recherche de sens</li> <li><b>Frugalité choisie mais aussi contrainte</b></li> <li>Préférence pour le local</li> <li>Nature sanctuarisée</li> </ul> 
<b>Alimentation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Division par 3 de la consommation de viande</li> <li><b>Part du bio: 70 %</b></li> </ul> 
<b>Habitat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rénovation massive et rapide</li> <li><b>Limitation forte de la construction neuve</b> (transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales)</li> </ul>
<b>Mobilité des personnes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Réduction forte de la mobilité</b></li> <li>Réduction d'un tiers des km parcourus par personne</li> <li>La moitié des trajets à pied ou à vélo</li> </ul> 
<b>Technique</b> Rapport au progrès, numérique, R&D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Innovation autant organisationnelle que technique</li> <li><b>Règne des low-tech</b>, réutilisation et réparation</li> <li>Numérique collaboratif</li> <li><b>Consommation des data centers stable</b> grâce à la stabilisation des flux</li> </ul>
<b>Gouvernance</b> Échelles de décision, coopération internationale	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Décision locale</b>, faible coopération internationale</li> <li>Réglementation, interdiction et rationnement <i>via</i> des quotas</li> </ul>
<b>Territoire</b> Rapport espaces ruraux – urbains, artificialisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rôle important du territoire pour les ressources et l'action</li> <li><b>« Démétropolisation »</b> en faveur des villes moyennes et des zones rurales</li> </ul>
<b>Macro-économie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Nouveaux indicateurs de prospérité</b> (écarts de revenus, qualité de la vie...)</li> <li>Commerce international contracté</li> </ul> 
<b>Industrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Production au plus près des besoins</b></li> <li>70 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage</li> </ul> 

<ul style="list-style-type: none"> <li>Évolution soutenable des modes de vie</li> <li><b>Économie du partage</b></li> <li>Équité</li> <li>Préservation de la nature inscrite dans le droit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Division par 2 de la consommation de viande</b></li> <li>Part du bio: 50 %</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rénovation massive, <b>évolutions graduelles mais profondes des modes de vie</b> (cohabitation plus développée et adaptation de la taille des logements à celle des ménages)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Mobilité maîtrisée</b></li> <li>- 17 % de km parcourus par personne</li> <li>Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investissement massif (efficacité énergétique, EnR et infrastructures)</li> <li>Numérique au service du développement territorial</li> <li><b>Consommation des data centers stable</b> grâce à la stabilisation des flux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gouvernance partagée</li> <li><b>Fiscalité environnementale</b> et redistribution</li> <li>Décisions nationales et coopération européenne</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Reconquête démographique des villes moyennes</b></li> <li>Coopération entre territoires</li> <li>Planification énergétique territoriale et politiques foncières</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Croissance qualitative, <b>« réindustrialisation »</b> de secteurs clés en lien avec territoires</li> <li>Commerce international régulé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Production en valeur plutôt qu'en volume</li> <li><b>Dynamisme des marchés locaux</b></li> <li>80 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage</li> </ul> 
---	---	--	---	--	---	--	---	---

<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Plus de nouvelles technologies que de sobriété</b></li> <li>Consumérisme « vert » au profit des populations solvables, société connectée</li> <li>Les services rendus par la nature sont optimisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baisse de 30 % de la consommation de viande</li> <li><b>Part du bio: 30 %</b></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Déconstruction-reconstruction</b> à grande échelle de logements</li> <li>Ensemble des logements rénovés mais de façon peu performante: la moitié seulement au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mobilités accompagnées par l'État pour les maîtriser: infrastructures, télétravail massif, covoiturage</li> <li><b>+ 13 % de km parcourus par personne</b></li> <li>30 % des trajets à pied ou à vélo</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciblage sur les <b>technologies les plus compétitives pour décarboner</b></li> <li>Numérique au service de l'optimisation</li> <li>Les <b>data centers</b> consomment 10 fois plus d'énergie qu'en 2020</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cadre de <b>régulation minimale</b> pour les acteurs privés</li> <li>État planificateur</li> <li>Fiscalité carbone ciblée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Métropolisation</b>, mise en concurrence des territoires, villes fonctionnelles</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Croissance verte</b>, innovation poussée par la technologie</li> <li>Spécialisation régionale</li> <li>Concurrence internationale et échanges mondialisés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Décarbonation de l'énergie</b></li> <li>60 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage</li> </ul> 
---	---	---	--	---	---	--	--	---

<ul style="list-style-type: none"> <li>Sauvegarde des modes de vie de <b>consommation de masse</b></li> <li>La nature est une ressource à exploiter</li> <li>Confiance dans la capacité à réparer les dégâts causés aux écosystèmes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consommation de viande quasi-stable (baisse de 10 %), complétée par des <b>protéines de synthèse ou végétales</b></li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maintien de la <b>construction neuve</b></li> <li>La moitié des logements seulement est rénovée au niveau BBC</li> <li><b>Les équipements se multiplient</b>, alliant innovations technologiques et efficacité énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmentation forte des mobilités</li> <li>+ 28 % de km parcourus par personne</li> <li>Recherche de <b>vitesse</b></li> <li>20 % des trajets à pied ou à vélo</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Innovations tout azimut</li> <li>Captage, stockage ou usage du carbone capté indispensable</li> <li>Internet des objets et intelligence artificielle omniprésents: les <b>data centers</b> consomment <b>15 fois plus d'énergie</b> qu'en 2020</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soutien de l'offre</li> <li>Coopération internationale forte et ciblée sur quelques filières clés</li> <li><b>Planification centralisée du système énergétique</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Faible dimension territoriale, <b>étalement urbain</b>, agriculture intensive</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Croissance économique carbonée</b></li> <li>Fiscalité carbone minimaliste et ciblée</li> <li>Économie mondialisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Décarbonation de l'industrie pariant sur le <b>captage et stockage géologique de CO2</b></li> <li>45 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage</li> </ul>
--	---	--	--	--	--	---	--	--

## Principaux indicateurs pour chaque scénario

Tableau 3 Valeurs de quelques indicateurs en 2015 et en 2050

Indicateurs	2015	2050			
		S1	S2	S3	S4
<b>ÉNERGIE</b>					
Consommation d'énergie finale, avec usages non énergétiques, y compris consommation des puits technologiques (TWh)	1 772	790	833	1 074	1 360
Réduction de la consommation primaire d'énergies fossiles par rapport à 2012	- 7 %	- 89 %	- 94 %	- 96 %	- 79 %
Part d'EnR dans la consommation d'énergie	15 %	88 %	86 %	81 %	70 %
Part d'électricité dans la consommation d'énergie finale (hors soutes et hors usages non énergétiques)	27 %	42 %	44 %	52 %	56 %
Indépendance énergétique (part de la production d'énergie primaire en France)	52 %	81 %	88 %	93 %	80 %
<b>CLIMAT</b>					
Quantités de GES émis Métropole hors UTCATF* (MtCO <sub>2</sub> eq)	445	74	68	85	135
Réduction des émissions par rapport à 1990	- 16 %	- 86 %	- 87 %	- 84 %	- 75 %
Quantités de carbone séquestré dans les puits naturels - bilan net** (MtCO <sub>2</sub> eq)	- 44	- 116	- 93	- 64	- 41
Quantités de GES stockés par les CCS sur unités industrielles (MtCO <sub>2</sub> eq)	0	0	- 2	- 9	- 37
Quantités de GES stockés par BECCS (MtCO <sub>2</sub> eq)	0	0	- 1	- 21	- 29
Quantités de GES stockés par DACCS (MtCO <sub>2</sub> eq)	0	0	0	0	- 27
Bilan net de GES** (MtCO <sub>2</sub> eq)	401	- 42	- 28	- 9	1
Empreinte carbone (tCO <sub>2</sub> eq/hab.)	10,9	4,2	4,5	5,0	5,8
<b>RESSOURCES</b>					
Quantités de déchets collectés hors TP (Mt)	141	60	65	104	93
Déchets en centre de stockage de déchets non dangereux et non inertes (Mt/an)	18,4	1,1	0,6	1,5	3,2
Quantités de matériaux de construction nécessaires (Mt, moyenne annuelle 2015-2050)	51	18	22	40	37
Quantité de matériaux de construction ré-employés (milliers de tonnes)	550	3 925	3 666	3 719	12 018
Consommation d'eau en agriculture pour l'irrigation (milliards de m <sup>3</sup> )	3,3	1,8	2,3	3,1	4,5
Quantité de biomasse mobilisée comme matériaux (MtMS)***	10,3 (2017)	12,7	12,9	13,5	13,9
Quantité de biomasse mobilisée à des fins énergétiques (MtMS)	34 (2017)	90,5	91,5	115,2	109,6
Empreinte matières (t/hab.) <sup>24</sup>	19,7	14,4	15,3	17,2	18,6
Surfaces artificialisées additionnelles à l'année de référence 2015 (Milliers ha) <sup>25</sup>		307	427	737	896
Surface agricole utile (Milliers ha)	28 778	25 636	27 712	27 164	26 695
Surface forêts et peupleraies en métropole (Milliers ha)	16 914 (2020)	19 769	17 515	17 564	17 264
<b>ÉCONOMIE</b>					
Évolution du PIB (base 100 en 2021)	100 (2021)	136	148	147	148
« Reste à vivre »**** (EUR/an.ménage)		30 376	32 769	31 650	31 985
Évolution de l'emploi (base 100 en 2021)	100 (2021)	96	103	103	116
Coût complet de l'électricité (EUR/MWh)		85	74	82	87

\* Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

\*\* Inclus une estimation de la quantité séquestrée dans les sols et le bois mort en forêt (- 9 MtCO<sub>2</sub>eq) qui s'ajoute à l'inventaire officiel du secteur UTCATF pour la France (- 35 MtCO<sub>2</sub>eq).

\*\*\* Millions de tonnes de matière sèche.

\*\*\*\* Revenu disponible des ménages après prise en compte des factures énergétiques et des remboursements d'emprunt.

<sup>24</sup> Au sens de l'International Resources Panel, à savoir les minerais non métalliques (matériaux de construction pour l'essentiel), minerais métalliques, les matières fossiles et la biomasse, sachant que l'ONU recommande de viser un objectif d'empreinte de 5 t/hab de matières premières.

<sup>25</sup> Indicateurs issus des travaux réalisés dans le cadre du « Feuilleton Sols » à partir des fichiers fonciers pour les bâtiments, les infrastructures de transport et les énergies renouvelables.

## Évaluation des impacts des scénarios et de leur robustesse aux risques

L'exercice de prospective Transition(s) 2050 consiste à proposer 4 scénarios contrastés atteignant la neutralité carbone en France en 2050, et à caractériser leurs impacts environnementaux et économiques. Ces différents impacts ont notamment fait l'objet de publications de feuillets dédiés en 2022 et 2024. Dans cette partie, l'ADEME entend donner une vision d'ensemble de ces impacts en réalisant une analyse de la robustesse des scénarios aux risques exogènes d'une part et leurs impacts d'autre part. L'évaluation est réalisée en deux parties :

- La première présente la robustesse de chaque scénario par rapport à des risques exogènes, dont l'occurrence est indépendante du cadre fixé par le scénario (Tableau 4) ;
- La seconde présente les impacts qui peuvent être potentiellement induits par la mise en œuvre de chaque scénario (Tableau 5).

La méthodologie de calcul est la suivante : pour chaque indicateur, la classe de risque/impact est déterminée par la valeur de l'indicateur ou l'appréciation qualitative, puis chaque classe est affectée d'une valeur entière de 1 (la moins risquée, vert) à 4 (la plus risquée, rouge). La cotation d'un sous-total (lorsqu'il y a plusieurs indicateurs pour un même risque ou impact) est la classe de risque déterminée par la moyenne arithmétique de chaque risque qui compose le sous-total avec les intervalles suivants : vert (<= 1,5), jaune (1,5 < X <= 2,5), orange (2,5 < X <= 3,5), rouge (> 3,5). La moyenne totale est déterminée par la moyenne arithmétique de chaque indicateur avec les mêmes intervalles de valeur.

**AVERTISSEMENT** : Le travail exposé ci-après n'est valable que pour les critères étudiés et avec les cotations choisies. Il ne constitue en aucun cas une liste exhaustive des risques auxquels seraient exposés les scénarios ou les impacts qu'ils pourraient induire. Il n'a notamment pas été possible de coter l'impact sur la biodiversité ou sur les paysages dans la mesure où ces domaines auraient nécessité une territorialisation des équipements. De même, il n'a pas été possible de passer des émissions sectorielles de polluants atmosphériques à l'impact sur la qualité de l'air. Le détail des indicateurs avec les valeurs et les cotations est sur le portail des données de l'ADEME.

### Tableau 4 : Robustesse des scénarios à des risques exogènes

Tous les scénarios n'ont pas la même robustesse face aux différentes crises qui pourraient survenir. Le Tableau 4 « Évaluation des risques exogènes sur les scénarios » présente différents risques exogènes et le niveau de robustesse de chaque scénario. L'évaluation s'appuie autant que possible sur des indicateurs chiffrés. Pour chaque risque, l'appréciation de la robustesse de chaque scénario est cotée en fonction de la valeur de l'indicateur et à partir de la situation actuelle. Par exemple, en ce qui concerne le risque d'incendie de forêts, il est considéré que la situation de 2015 est déjà à un niveau de risque non négligeable (couleur orange). Dans ces conditions, aucun des scénarios ne peut être coté avec un risque plus faible.

### Tableau 5 : Impacts des scénarios

Dans le Tableau 5 « Évaluation des impacts des scénarios » sont analysés les impacts des scénarios sur les milieux, les personnes ou des indicateurs macroéconomiques. L'évaluation s'appuie sur les mêmes principes que dans le Tableau 4.

Tableau 4 Évaluation des risques exogènes sur les scénarios

ROBUSTESSE DES SCÉNARIOS À DES RISQUES EXOGÈNES						
RISQUES	S1	S2	S3- EnR- Offshore	S3- Nuc	S4	Commentaires
<b>RISQUES GÉOPOLITIQUES</b>						
• Accès du pays aux énergies importées						Indicateurs : Quantité et nombre d'énergies importées S1 et S2 présentent de faibles quantités importées et un seul vecteur alors que S3 et S4 importent des quantités plus importantes et/ou un nombre plus élevé de vecteurs.
• Capacité à financer l'achat des énergies fossiles						Indicateur : Quantité d'énergies fossiles importées S2 et S3 importent peu d'énergies fossiles, ce qui n'est pas le cas pour S1 (carburants) et surtout S4 (besoin de 30 % du gaz naturel de 2015)
• Consommation de matières importées						Indicateur : Évolution de l'empreinte matières des produits importés Notre consommation directe ou indirecte de matières importées diminue peu dans S1 et S2 (-10 à -7 %) et augmente peu dans S3 et S4 (+13 % dans S4) ce qui diminue peu ou renforce notre dépendance en matières par rapport aux autres pays, notamment pour les métaux stratégiques.
<b>RISQUES NATURELS</b>						
• Incendies de forêts						Indicateur qualitatif Le risque incendie peut être déjà considéré comme non négligeable et s'accroît dans tous les scénarios. S4 prévoyant un reboisement avec plus de résineux et TCR (taillis à courte rotation), il peut être considéré comme plus risqué. Les pertes de bois par incendie s'ajoutent au risque de perte de la fonction de puits de CO2 liée au changement climatique.
• Sécheresse/déficit hydrique sur la production agricole						Indicateur : Quantité d'eau d'irrigation S1 et S2 sont proches de 2015 qui présente déjà une situation préoccupante. S3 et S4 la dépassent et donc présentent un risque fort. La qualité des sols n'est pas chiffrée mais se dégrade de S1 à S4 (utilisation croissante d'intrants de synthèse).
• Régime des vents sur la production électrique éolienne (1)						Indicateur : Part de perte d'électricité éolienne sur la production totale d'électricité Dans tous les scénarios, le risque est considéré comme négligeable en l'absence d'adaptation du système. S3 EnR-Offshore et S4 développant au maximum l'éolien terrestre et offshore, ils sont un peu plus vulnérables que les autres (voir page 64 pour la description du mix électrique).
• Phénomènes météo extrêmes sur les bâtiments						Indicateur : Surfaces de bâtiments touchés en ha avec taux de risque très important. RCP 8.5 (voir feuilleton Adaptation) S2 et S3 classés en risque non négligeables car l'impact sera important et S4 en risque fort pour tenir compte des différences de surfaces touchées.
• Phénomènes météo extrêmes sur les infrastructures de transports						Indicateurs : Importance de l'usage des réseaux et capacité d'adaptation (voir feuilleton Adaptation) Tous les scénarios présentent une très mauvaise robustesse et un risque fort. Seul S2 allie la construction d'infrastructures (plus adaptées) et la sobriété des usages, ce qui réduit son risque par rapport aux autres.
<b>RISQUES TECHNOLOGIQUES</b>						
• Absence de maturité économique et technique des puits technologiques						Indicateur : Part des puits technos dans l'atteinte de la neutralité carbone S1 et S2 ne font pas ou quasiment pas appel aux puits technologiques. S3 dépend essentiellement du CCS et du BECCS qui présentent un risque non négligeable sur le stockage du CO2. S4 dépend fortement du DACCS (20 % des puits) dont le développement et l'intérêt économique ne sont pas assurés.
• Cyber attaques / vols de données / atteintes sur le réseau						Indicateur : Importance du numérique Les différences entre scénarios sont surtout dues au nombre d'objets connectés, à leur durée d'usage et aux consommations unitaires avec un risque de base moyen. Dans S3 et surtout S4, le numérique va se déployer massivement, en grande partie avec le déploiement des objets connectés dans l'industrie, bâtiments, villes... avec un risque cyber accru, non négligeable (S3), voire fort pour S4 où ce déploiement est le plus élevé.

Légende pour les risques/impacts

■ Très bonne robustesse, risque limité / Très peu d'impacts, risque limité	■ Robustesse faible, risque non négligeable/ Impacts importants, risque non négligeable
■ Bonne robustesse, risque moyen, à surveiller/ Impacts limités, risque moyen, à surveiller	■ Très mauvaise robustesse, risque fort / Impacts très forts, risque fort

(1) Dans tous les scénarios, l'impact du changement climatique sur la production nucléaire étant très faible, elle n'a pas été cotée.

Tableau 5 Évaluation des impacts des scénarios

IMPACTS DES SCÉNARIOS						
IMPACTS	S1	S2	S3- EnR- Offshore	S3- Nuc	S4	Commentaires
<b>IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT</b>						
• Quantité et qualité de l'eau disponible						Indicateurs : Quantité d'eau prélevée pour l'irrigation et part d'agriculture à bas niveau d'intrants Les prélèvements en S1 et S2, du même ordre de grandeur que les prélèvements 2015, sont supposés de risque moyen mais les niveaux d'intrants sont différents. S3 et S4 nécessitent beaucoup d'eau et ont des pratiques agricoles qui risquent de dégrader sa qualité.
• Artificialisation des sols						Indicateur : Surfaces artificialisées sur 30 ans En S1 et S2, les sols sont moins artificialisés. Ils atteignent l'objectif légal de 2031(2) et de faibles surfaces à compenser en 2050. Ce qui n'est pas le cas dans S3 et S4, avec une artificialisation très élevée dans S4.
• Capacité des puits naturels						Indicateur : Part des puits naturels sur la capacité totale de stockage Les puits naturels diminuent de S1 à S4. Dans S1 et S2, les forêts sont préservées, permettant ainsi une reconstitution des puits via les sols.
<b>IMPACTS SANITAIRES</b>						
• Santé physique liée à l'alimentation						Indicateur : Rapport protéines animales/protéines végétales et usage des intrants (qualitatif) La proportion protéines animales/végétales augmente de S1 à S4 sans atteindre le niveau de 2015 mais l'utilisation de produits de synthèse augmente de S1 à S4 avec cependant dans S4 des progrès sur la diminution de la persistance des molécules liées aux intrants qui diminue les risques(3).
• Risque nucléaire						Indicateurs : Nouveaux EPR et sortie mal anticipée Le risque d'accident nucléaire sur une centrale ou lié aux déchets radioactifs est faible en France mais peut augmenter dans le cas d'une perte de compétences accrue par une sortie rapide du nucléaire (S1). Par ailleurs, d'autres facteurs peuvent conduire à augmenter le risque (S3Nuc et S4) : • le manque de retour d'expérience sur le fonctionnement des nouveaux types de réacteurs • la nécessité de prolongation(4) du nucléaire historique, qui pourrait conduire à des arbitrages entre sûreté et disponibilité de l'électricité.
<b>IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES</b>						
• Chômage						Indicateur : Indice de l'emploi L'emploi est dégradé en S1 par rapport à 2021 et par rapport au tendanciel. Il remonte légèrement dans S2 et S3 pour s'améliorer plus nettement dans S4.
• Dette publique						Indicateur : Indice de dette publique/PIB Tous les scénarios marquent une forte dégradation de l'indice de la dette publique par rapport à 2021 avec S1 beaucoup plus pénalisant que les autres, en particulier par rapport au tendanciel, les autres scénarios ayant une meilleure évolution que le tendanciel.
• Inégalités de revenus						Évolution de l'indice de Gini(5) en 2050 par rapport à 2017 Dans tous les scénarios, l'indice augmente par rapport à 2017, ce qui correspond à une dégradation des inégalités mais dans des proportions très faibles. Seul S1 présente un léger avantage par rapport aux autres qui ont des résultats quasi identiques.
• Difficultés d'implanter de nouvelles ENR						Indicateurs : Nombre d'éoliennes et surface de PV au sol Le nombre d'éoliennes terrestres varie peu d'un scénario à l'autre. Les éoliennes offshore sont développées, surtout dans S3 EnR-Offshore et S4, ce qui ajoute un niveau de risque. Sur le PV, la surface au sol utilisée augmente de S1 à S3/S4 qui ont une surface équivalente. S2 profite des bénéfices de la concertation.
• Difficultés d'implanter de nouveaux EPR						Indicateurs : Nombre de nouveaux EPR. Seuls S3Nuc et S4 supposent de nouveaux investissements dans le nucléaire.

(2) Réduction de moitié du rythme de nouvelle artificialisation entre 2021 et 2031 par rapport à la période 2011-2021 (soit - 50 % en 10 ans).

(3) À noter que le risque de Toxi-Infections Alimentaires, plus fort dans les petites productions (S1, S2) que dans les grosses (S3, S4), n'a pas pu être analysé.

(4) Tous les scénarios supposant une prolongation du nucléaire historique au-delà de 50 ans dépendent du respect des prescriptions de sûreté qui seront données par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

(5) L'indice de Gini est un indicateur des inégalités variant entre 0 pour une société parfaitement égalitaire dans laquelle tous les ménages ont des revenus identiques et 1 pour une société parfaitement inégalitaire dans laquelle un ménage dispose de l'intégralité des revenus (cf. feuilleton Effets redistributifs).

## Synthèse

Au total, les 2 groupes (robustesse à des risques exogènes et impacts) sont composés de 3 sous-catégories de risques ou impacts cotés, suivant le tableau ci-dessous :

Tableau 6 Synthèse des résultats de l'évaluation des risques et impacts par sous-catégorie

	S1	S2	S3- EnR-Offshore	S3- Nuc	S4
<b>ROBUSTESSE DES SCÉNARIOS À DES RISQUES EXOGÈNES</b>					
Risques géopolitiques	2,00	1,67	2,33	2,33	3,33
Risques naturels	2,40	2,60	3,20	3,00	3,40
Risques technologiques	1,50	1,50	3,00	3,00	4,00
<b>Synthèse sur les risques</b>	<b>2,20</b>	<b>2,10</b>	<b>2,90</b>	<b>2,80</b>	<b>3,50</b>
<b>IMPACTS DES SCÉNARIOS</b>					
Impacts sur l'environnement	1,00	1,67	3,00	3,00	4,00
Impacts sanitaires	1,50	1,00	2,00	2,50	2,50
Impacts socio-économiques	2,40	2,00	2,40	2,60	2,60
<b>Synthèse sur les impacts</b>	<b>1,80</b>	<b>1,70</b>	<b>2,50</b>	<b>2,60</b>	<b>3,00</b>

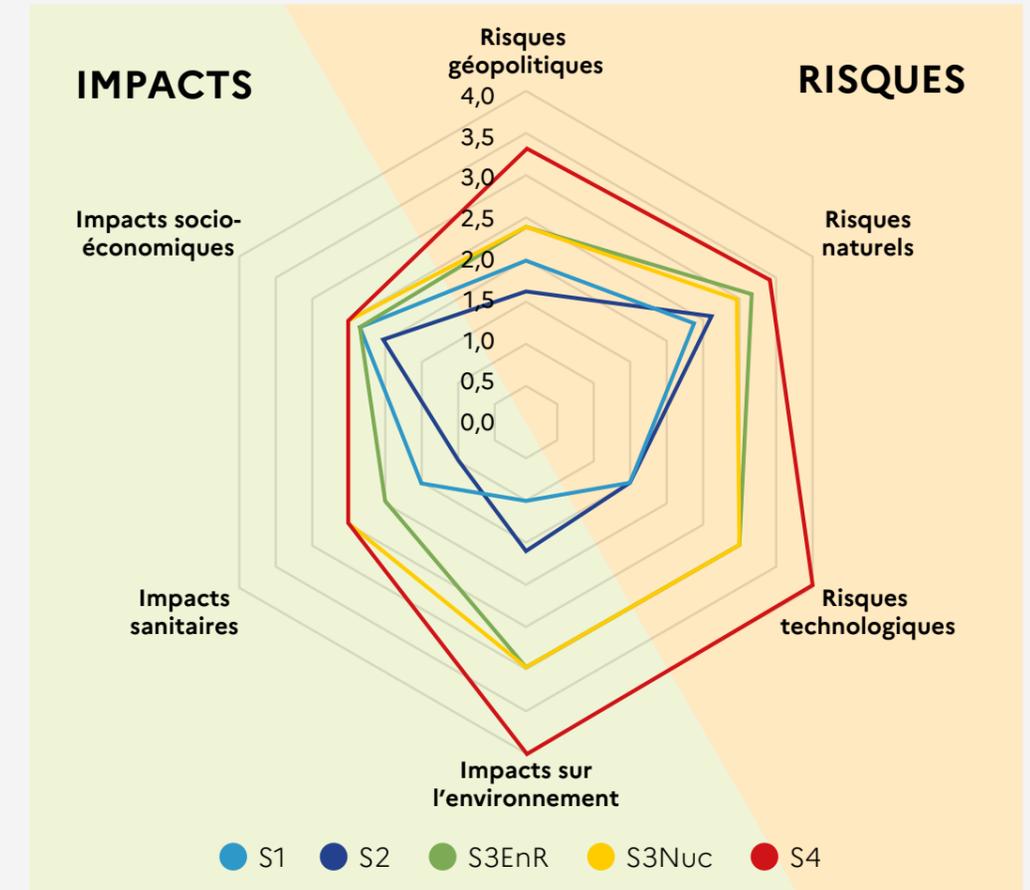
Dans les 2 groupes, il apparaît que :

- à part S1 (mais avec peu de marge sur les risques naturels), tous les autres scénarios ont au moins un risque non négligeable (orange) ce qui montre qu'ils peuvent être fragilisés par des facteurs extérieurs et doivent donc être accompagnés de mesures pour limiter les risques concernés ;
- seuls S1 et S2 ont des risques ou impacts limités (vert) ce qui montre que la sobriété est un facteur d'atténuation des risques

et des impacts, sans cependant qu'elle soit une assurance complète. C'est le cas en particulier pour les risques socio-économiques dans S1, avec des niveaux d'impact forts sur la dette publique et le chômage ;

- seul S4 a des risques forts (rouge), ce qui en fait globalement le scénario le plus risqué mais avec un avantage sur le niveau de chômage.

Graphique 18 Cotations des risques et impacts par sous-catégorie



S3 présente 2 options de production d'électricité : avec (S3Nuc) ou sans (S3EnR) nucléaire supplémentaire, voir page 64 pour la description du mix électrique.

Il est également possible de regarder le niveau général de cotation de chaque risque :

Le graphique fait ressortir les conclusions suivantes :

- S1 et S2 sont les scénarios pour lesquels les niveaux de risques et impacts (surface dans le graphique « radar ») sont les plus faibles ; à l'inverse, S4 a globalement des niveaux de risques et impacts plus élevés, sauf pour les impacts socio-économiques ;
- les risques naturels sont les plus importants et touchent fortement tous les scénarios, ce qui signifie que les mesures d'adaptation doivent être impérativement développées, quel que soit le scénario ;
- les risques géopolitiques et technologiques ainsi que les impacts sanitaires sont globalement croissants de S1 à S4, ainsi la sobriété contribuerait à une diminution de ces risques sans pour autant les supprimer.

# Bilan comparé des scénarios

S1 Génération frugale | S2 Coopérations territoriales | S3 Technologies vertes | S4 Pari réparateur

## ÉNERGIE

### 4 mix énergétiques variés pour 2050

#### UNE PART CROISSANTE DE L'ÉLECTRICITÉ

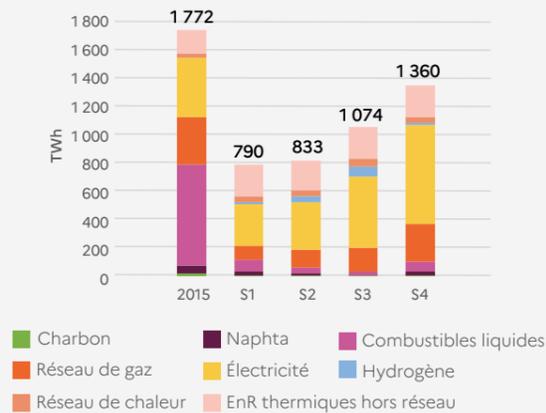
#### QUASI DISPARITION DES ÉNERGIES FOSSILES

#### UN VECTEUR GAZ QUI CONSERVE UN TALON DE CONSOMMATION

#### UNE DEMANDE D'ÉNERGIE À LA BAISSÉ

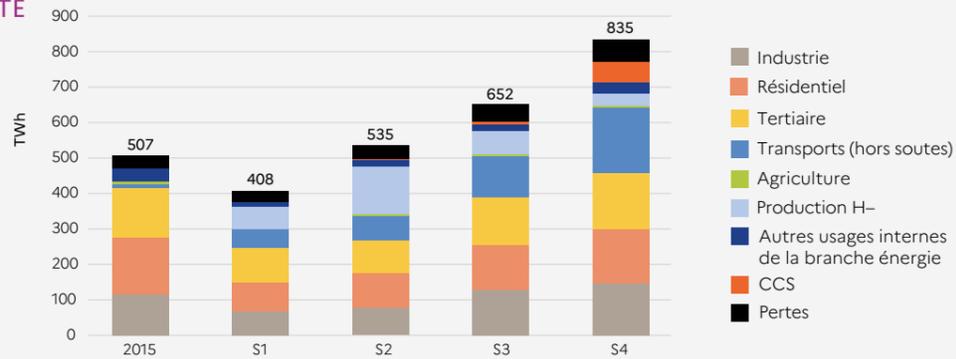
N.B. : la consommation d'énergie finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques ou non énergétiques comme l'hydrogène. À titre d'illustration, la consommation d'électricité (non représentée sur ce graphique) utilisée pour fabriquer de l'hydrogène à usage énergétique est respectivement de 62 TWh, 135 TWh, 65 TWh et 33 TWh dans S1, S2, S3 et S4. La différence des demandes de consommation avec le graphique de la demande d'énergie par secteur provient de la consommation des puits technologiques qui n'est affectée à aucun secteur. La différence avec la consommation finale brute d'énergie provient de la consommation pour usages non énergétiques.

Demande finale énergétique par vecteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors sources internationales)

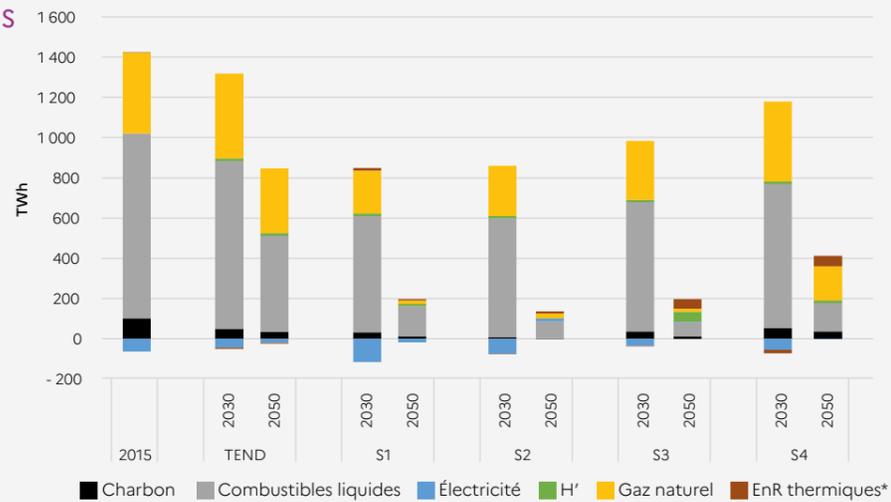


#### CONSOMMATION TOTALE D'ÉLECTRICITÉ PAR LA BRANCHE ÉNERGIE, SECTEURS, PUIITS TECHNOLOGIQUES

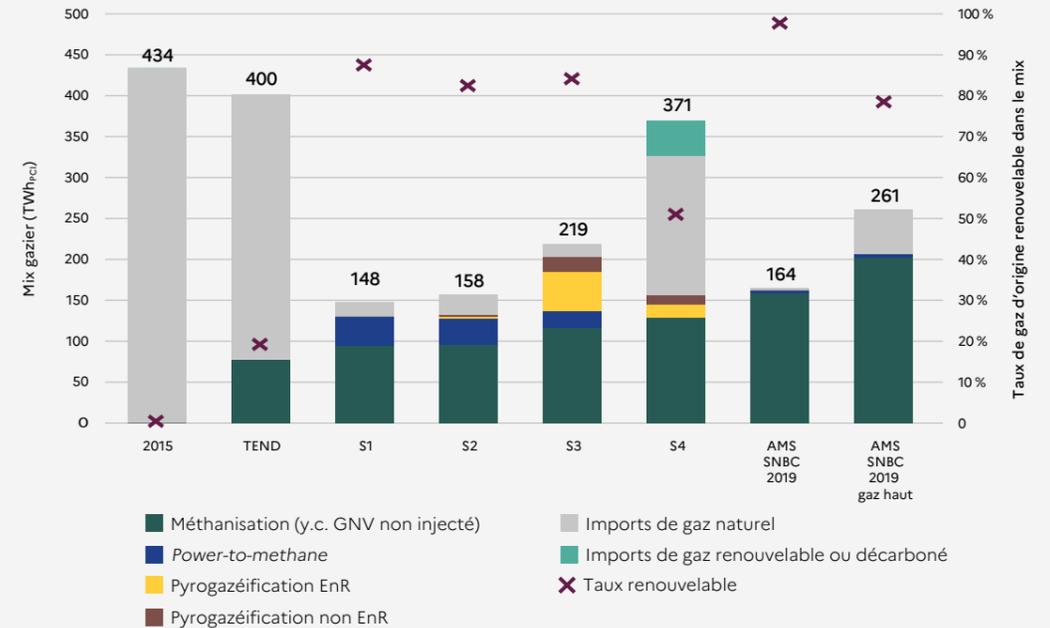
Consommation totale d'électricité en 2050



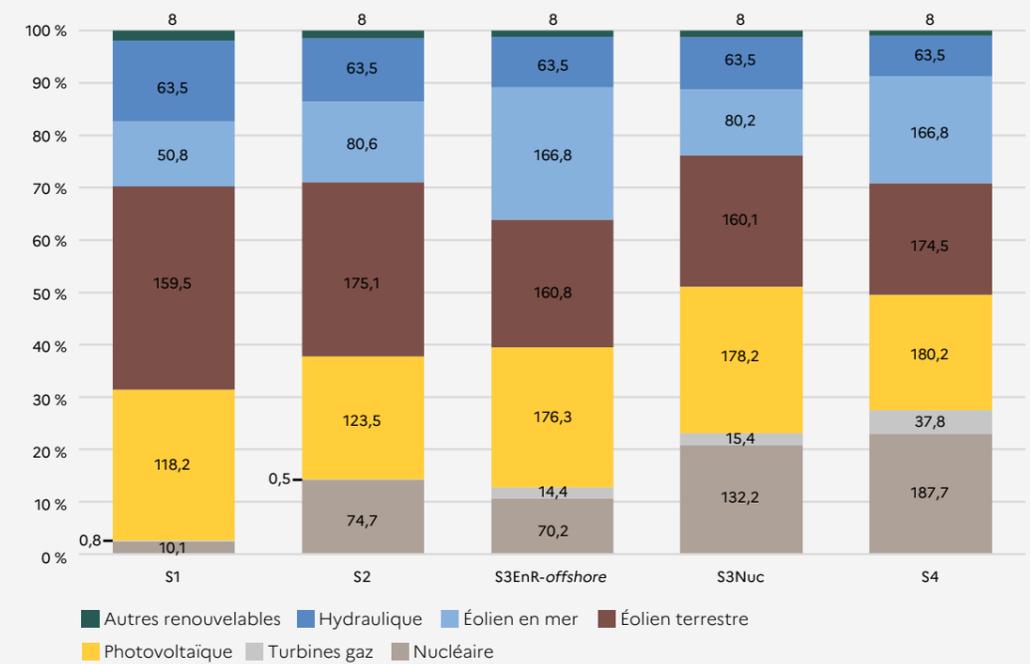
#### ÉVOLUTION DES ÉCHANGES EXTÉRIEURS D'ÉNERGIE SELON LES SCÉNARIOS AUX HORIZONS 2030 ET 2050



### MIX GAZIER EN 2015 ET EN 2050 POUR LES 5 SCÉNARIOS ADEME ET LE SCÉNARIO AMS (RÉFÉRENCE ET VARIANTE GAZ HAUT)



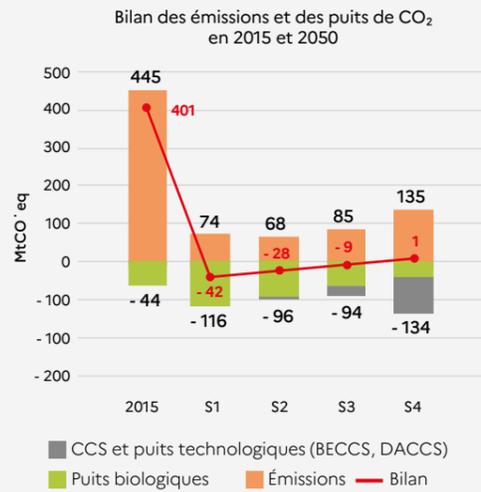
### PART DU MIX DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (EN ÉNERGIE TWh) EN 2050



# CLIMAT

## Le rôle majeur des puits biologiques pour atteindre la neutralité en 2050

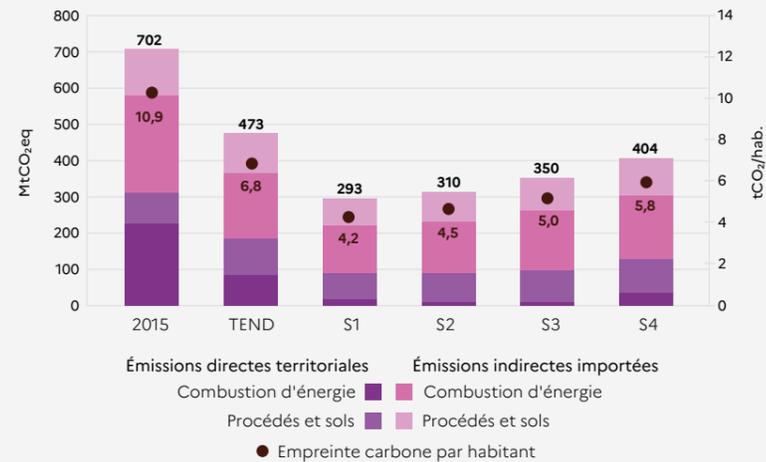
### QUATRE SCÉNARIOS NEUTRES EN 2050, AVEC UN RECOURS PLUS OU MOINS IMPORTANT AUX PUIITS DE CARBONE



### LES PUIITS BIOLOGIQUES EN CROISSANCE DANS S1 ET S2 GRÂCE À LA FORÊT ET AU CHANGEMENT DE PRATIQUES AGRICOLES

Bien que les évaluations initiales de stockage des puits naturels aient été prudentes et réalisés dans un contexte climatique déjà défavorable (scénario 8.5 du GIEC), les estimations du puits forestier publiés en 2023 sont encore plus défavorables : il a d'ores et déjà été divisé par deux entre 2010 et 2020, pouvant aller jusqu'à une inversion du puits dans certaines régions. De nouvelles études sont en cours à date (décembre 2023) et n'ont donc pas été intégrées dans les modélisations réalisées en 2020-2021. Néanmoins, les trois premiers scénarios disposaient de marges significatives (environ 40, 30 et 10 MtCO<sub>2</sub> respectivement pour S1, S2 et S3) qui pourraient permettre l'atteinte de la neutralité carbone y compris avec un puits forestier moindre. C'est plus incertain pour le scénario 4.

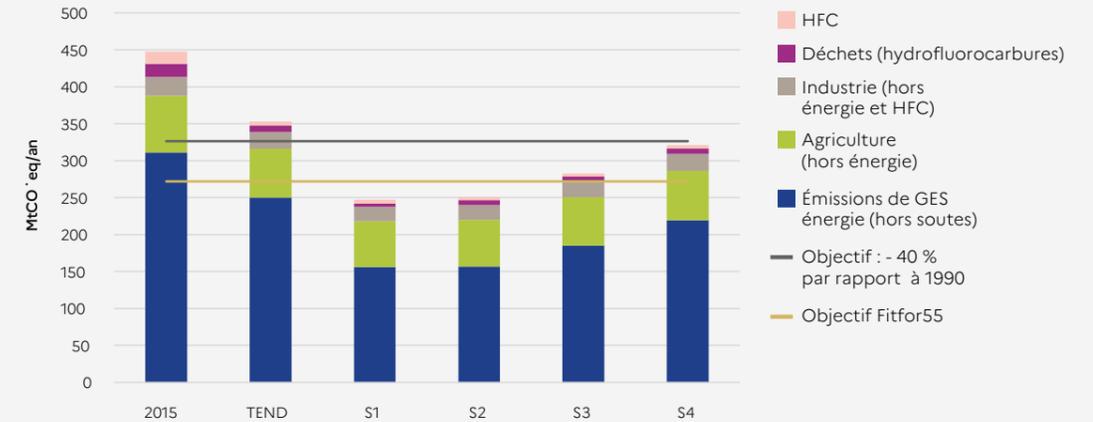
### COMPOSITION DE L'EMPREINTE CARBONE EN 2015 ET PROJECTION 2050 SELON LES SCÉNARIOS



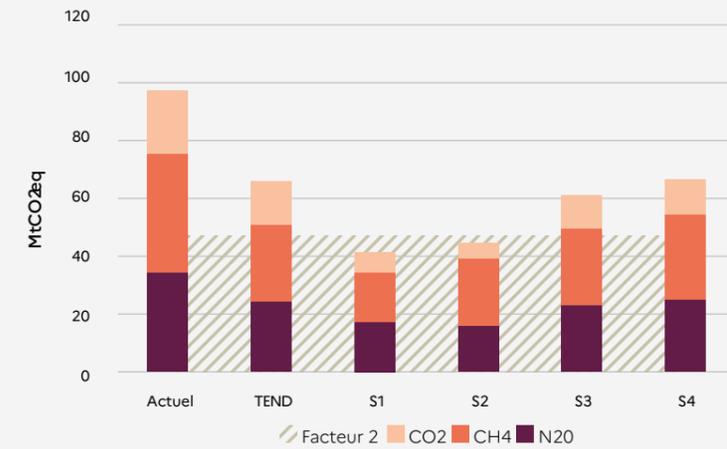
Note de lecture : en empreinte, les émissions territoriales sont exprimées hors émissions liées à la production des exportations.

### DES OBJECTIFS RÉGLEMENTAIRES DE RÉDUCTION DES GES PAS TOUJOURS ATTEINTS

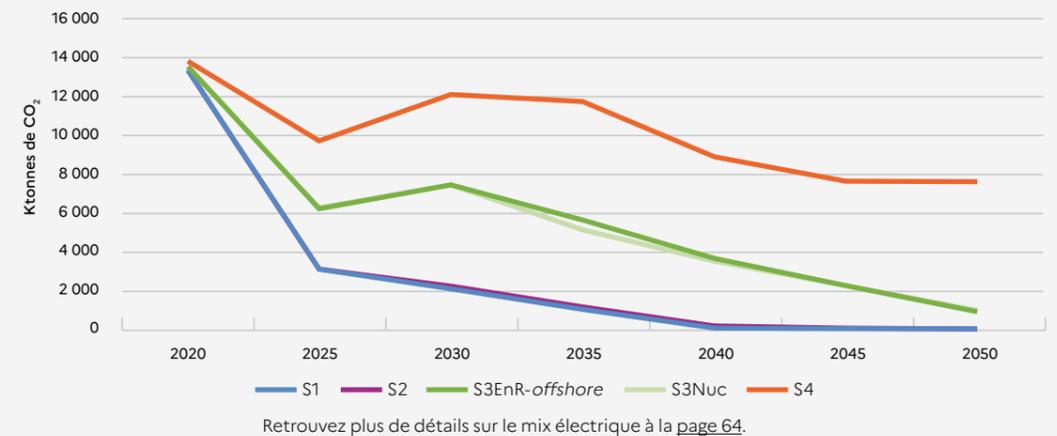
Comparaison avec les objectifs de réduction d'émissions français et européens en 2030 par rapport à 1990



### ÉMISSIONS TERRITORIALES DE GES ACTUELLES ET À L'HORIZON 2050 DU SECTEUR AGRICOLE



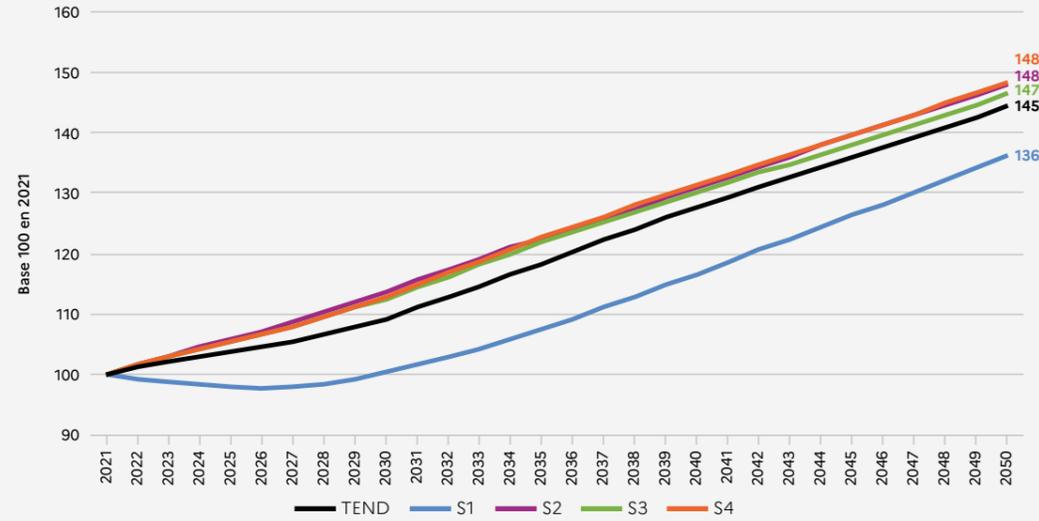
### ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO2 LIÉES À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN FRANCE



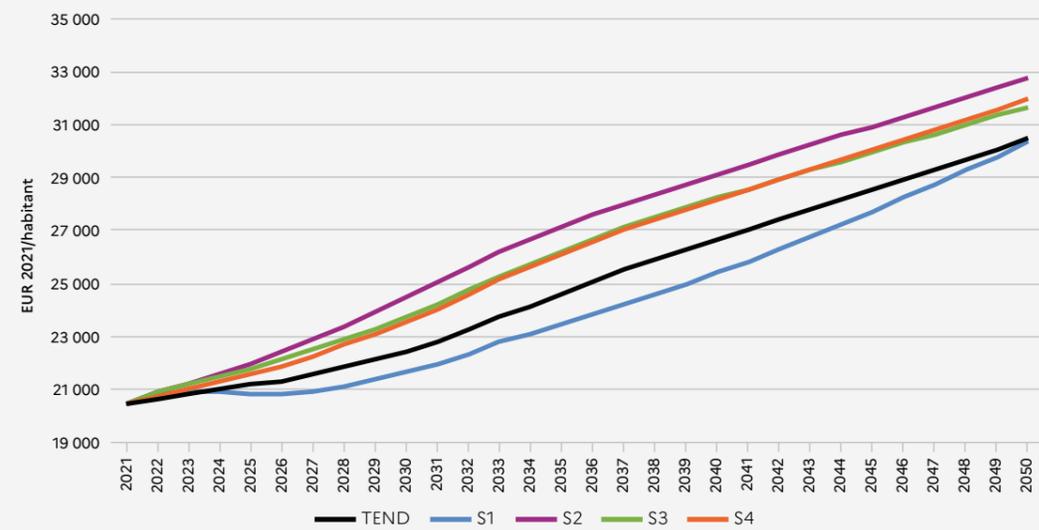
Retrouvez plus de détails sur le mix électrique à la page 64.

# ÉCONOMIE

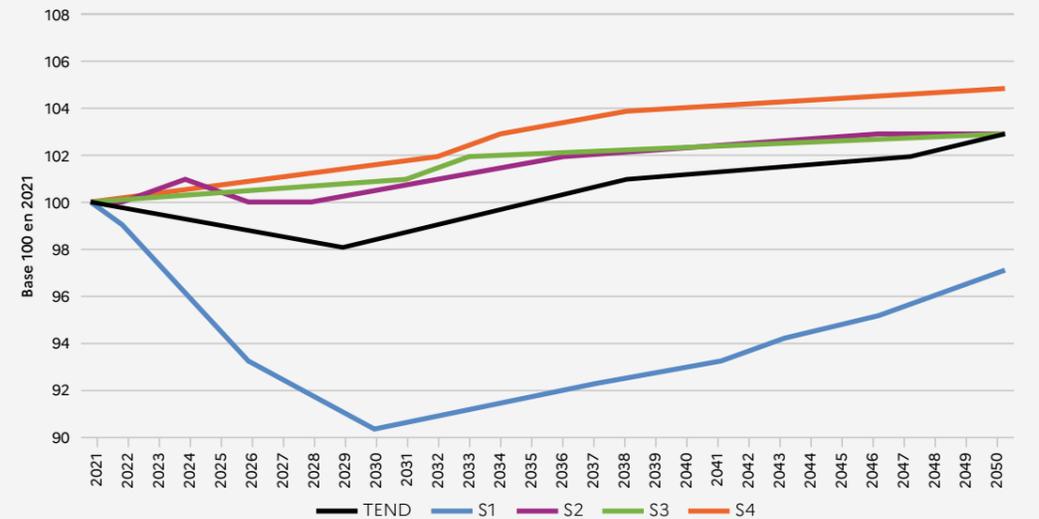
## ÉVOLUTION DU PIB



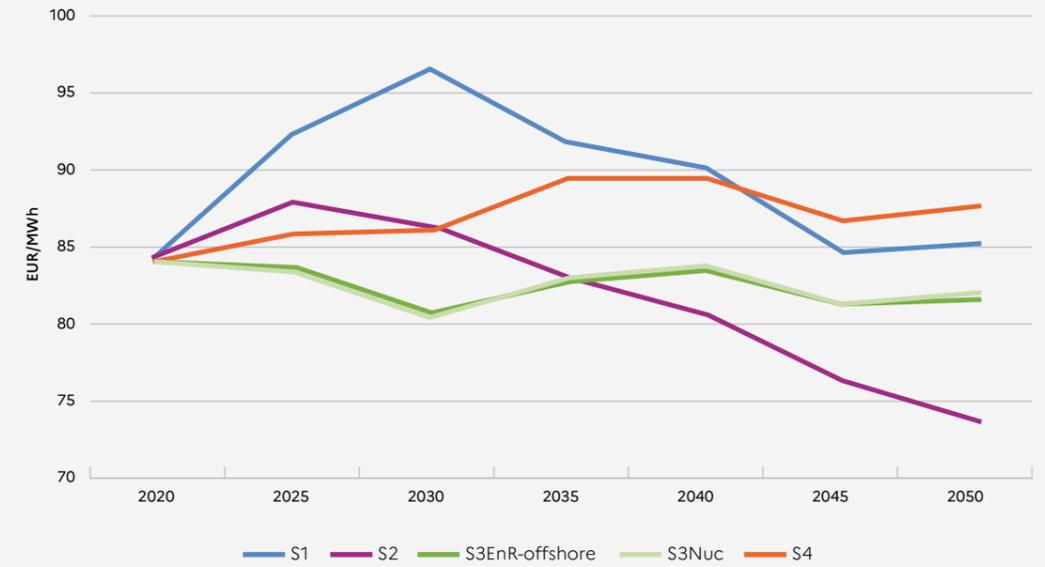
## REVENU DISPONIBLE DES MÉNAGES



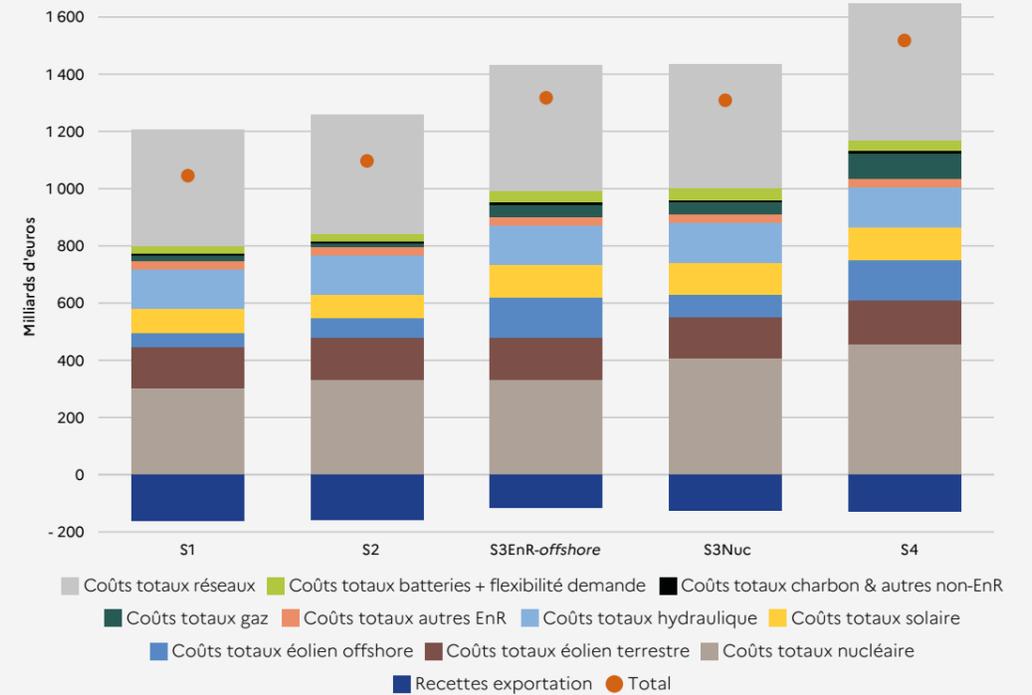
## ÉVOLUTION DE L'EMPLOI



## ÉVOLUTION DES COÛTS COMPLETS ANNUALISÉS (PRODUCTION, RÉSEAU, FLEXIBILITÉ) DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE RAPPORTÉS AU MWh DE CONSOMMATION FINALE (EUR HT/MWh)



## COÛTS COMPLETS ACTUALISÉS SUR LA TRAJECTOIRE 2030-2060 DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE DE CHAQUE SCÉNARIO



NB : les valeurs négatives représentent des recettes (exportations nettes).

# RESSOURCES

## Une pression contrastée sur les ressources

### 2 SCÉNARIOS LIMITENT LE RECOURS À L'IRRIGATION

Besoin en eau pour l'irrigation en 2020 et 2050



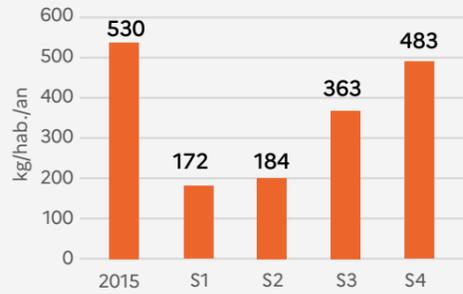
### UNE MOBILISATION DE LA BIOMASSE MULTIPLIÉE PAR 2 AU MOINS

Mobilisation de la biomasse pour les usages non alimentaires en 2017 et 2050



### MOINS DE DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS

Déchets ménagers et assimilés collectés en 2015 et 2050

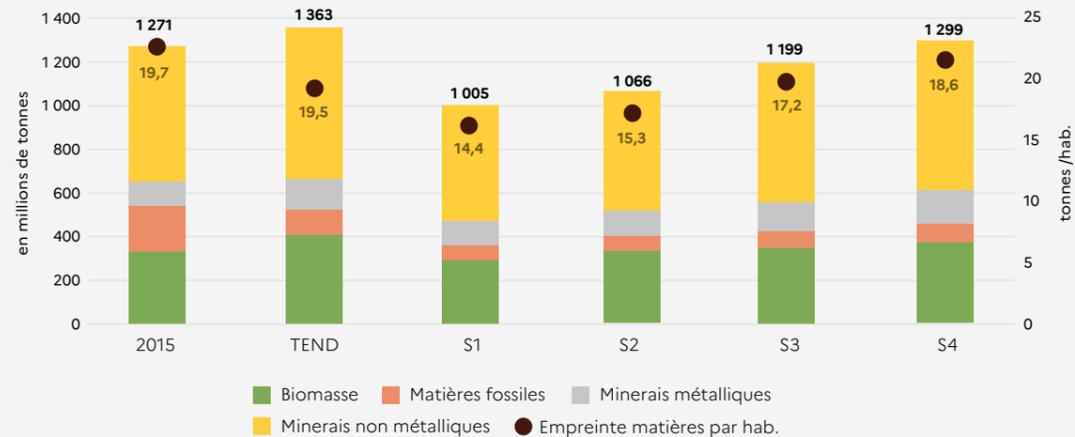


### CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION NEUVE (RÉSIDENTIEL, EPHAD, COMMERCE, HÔTEL, ENSEIGNEMENT ET BUREAU)

MILLIERS DE TONNES CUMULÉES ENTRE 2015 ET 2050



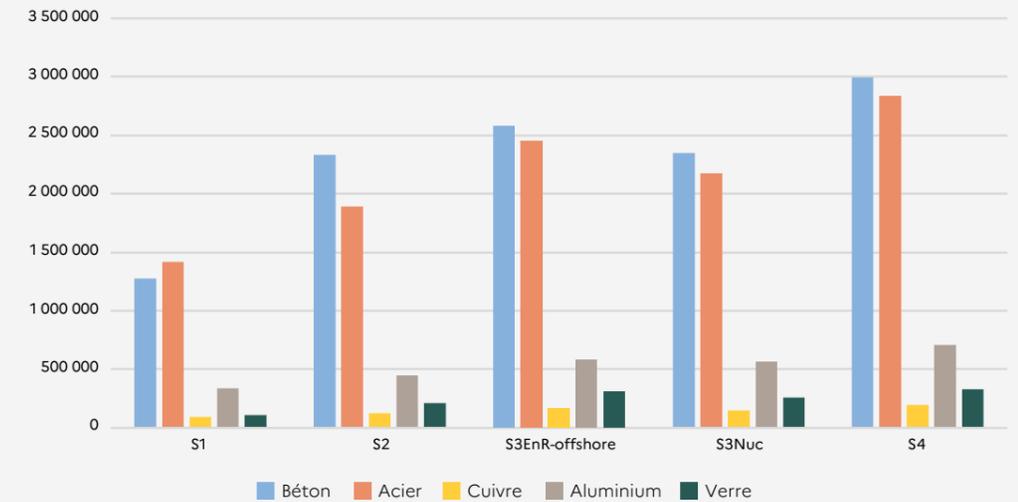
### EMPREINTE MATIÈRES DE LA FRANCE EN 2015 ET PROJECTION EN 2050 SELON LES SCÉNARIOS



### BILAN DES SURFACES ARTIFICIALISÉES ADDITIONNELLES SELON LES SCÉNARIOS



### RÉSULTATS ANNUELS EN GRANDS MATÉRIAUX ET MÉTAUX EN TONNES POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS





## Bilan énergie

En prenant en compte l'activation différenciée des facteurs de baisse (sobriété, efficacité) ou de hausse (relocalisation de l'industrie dans S1 et S2) de la consommation d'énergie finale, celle-ci est inférieure de 23 % (dans S4) à 55 % (dans S1) par rapport à 2015, hors usages non énergétiques. L'intensité de cette baisse est la plus importante pour le secteur des transports (- 73 % dans S1 et S2 par rapport à 2015). Elle résulte à la fois de la sobriété d'usage dans S1 et S2, mais également de l'efficacité des moteurs électriques dans tous les scénarios. En ce qui concerne le bâtiment, les baisses de consommation énergétique sont supérieures à 45 % dans S1 et S2 alors qu'elles sont d'environ 16 % seulement dans S4 (Graphique 19).

La demande par vecteur énergétique évolue fortement dans tous les scénarios :

- **les combustibles fossiles liquides disparaissent quasiment intégralement dans tous les scénarios, au profit des énergies de réseau** (électricité, gaz et chaleur) rendant la Nation moins dépendante à une situation de pénurie et l'économie française moins sensible à une hausse brutale des cours des énergies fossiles ;
- **les énergies renouvelables distribuées hors réseau** (bois énergie, biocarburants, chaleur renouvelable issue des pompes à chaleur, géothermie) **augmentent de 32 à 45 % dans tous les scénarios par rapport à 2015 ;**
- **la part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale s'accroît dans tous les scénarios** : elle représente entre 42 % (S1) et 56 % (S4) de la consommation

finale des usages énergétiques en 2050, contre 27 % aujourd'hui. Mais cette augmentation de la part relative n'aboutit pas nécessairement à une hausse de la consommation totale d'électricité en valeur absolue en 2050, y compris en tenant compte de l'électricité utilisée pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques finaux comme l'hydrogène. Par rapport à 2015, la quantité d'électricité à produire (y compris les pertes) baisse de 20 % dans S1, est relativement stable dans S2 (+ 6 %), et augmente de près de 30 % dans S3 et de 65 % dans S4.

La production d'électricité est assurée essentiellement par les énergies renouvelables dans tous les scénarios (leur part est supérieure à 70 % en 2050). Le niveau de consommation et le contexte politico-économique des scénarios rendent nécessaire d'implanter des nouvelles centrales nucléaires dans une des variantes de S3 (3 paires d'EPR supplémentaires), en alternative à de l'éolien flottant et dans S4 (5 paires d'EPR supplémentaires).

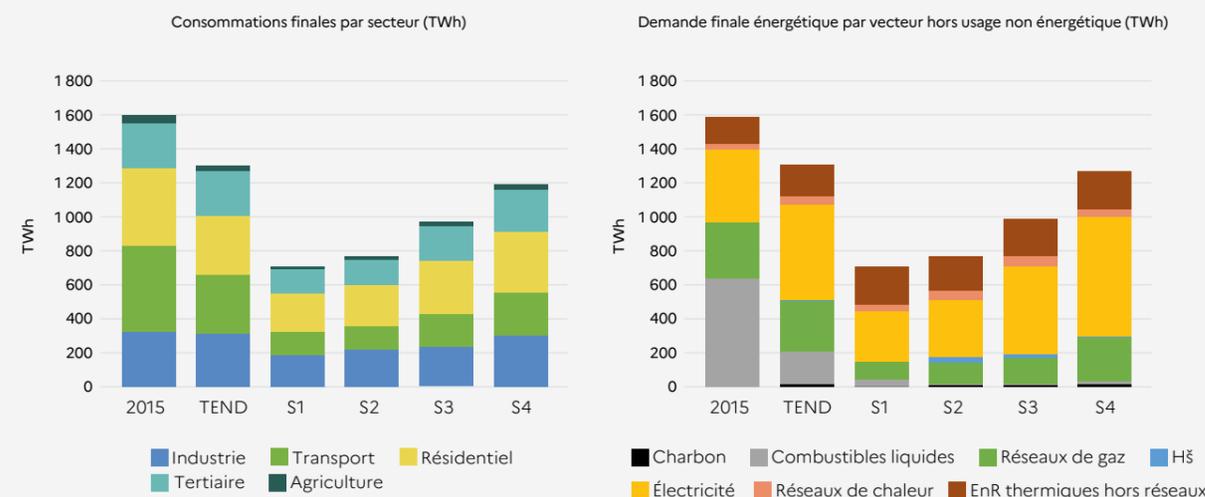
La part du réseau de gaz diminue dans tous les scénarios, pour atteindre un talon de consommation d'environ 150 TWh dans S1 et S2 (soit une baisse de plus de 65 % par rapport à 2015), qu'il est possible de produire très majoritairement à partir d'énergies renouvelables. La baisse de la demande de 15 % seulement dans S4 nécessite de conserver une part significative de gaz naturel importé (environ 50 %), dont les impacts GES sont compensés par le développement du DACCS.

Les réseaux de chaleur se développent dans tous les scénarios (jusqu'à 2,3 fois plus de chaleur livrée dans S3), sauf dans S1 en raison d'un moindre développement urbain.

Dans les scénarios, les énergies renouvelables deviennent majoritaires dans l'approvisionnement énergétique. Les EnR, qui couvrent environ 15 % de la

consommation finale brute d'énergie aujourd'hui, en couvrant de 70 % (S4) à 88 % (S1) en 2050.

Graphique 19 Consommation finale d'énergie par secteurs et par vecteurs en 2050 par rapport à 2015



NB : la consommation d'énergie finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques ou non énergétiques comme l'hydrogène. À titre d'illustration, la consommation d'électricité (non représentée sur ce graphique) utilisée pour fabriquer de l'hydrogène dans S1, S2, S3 et S4 est respectivement de 62TWh, 135TWh, 65TWh et 33TWh.

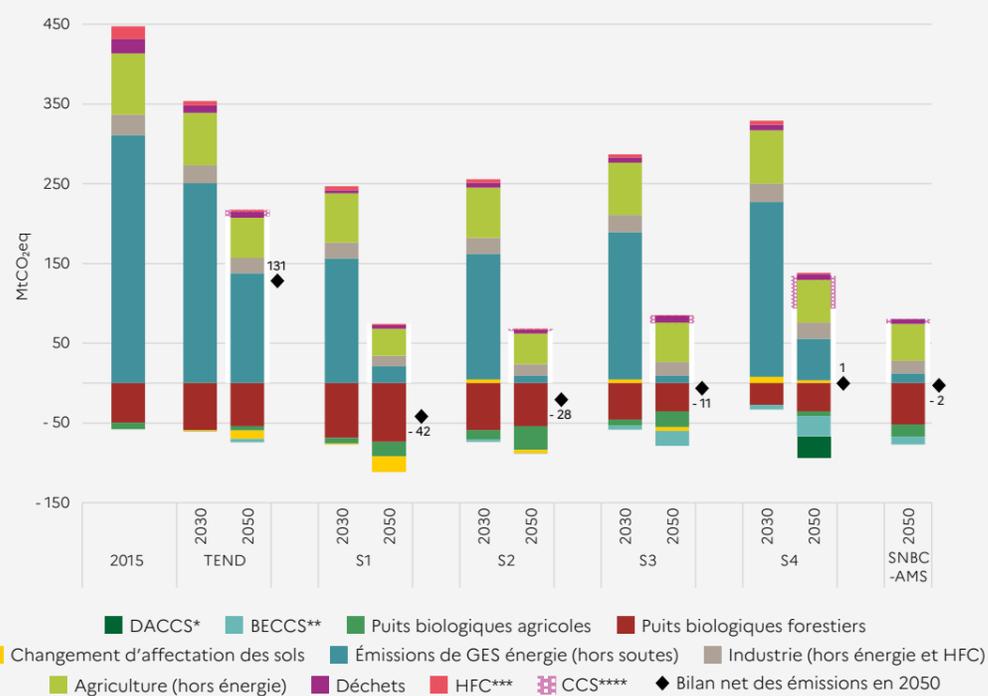
## Bilan GES

Le bilan des émissions et de la séquestration des GES montre que, dans les quatre scénarios, les émissions nettes annuelles sont annulées en 2050 grâce à leur réduction drastique et à une combinaison de puits naturels et de puits technologiques. Tous les scénarios présentent également un talon d'émissions jusqu'en 2050, qui correspond à certains usages où la consommation d'énergie carbonée ne peut être évitée, mais surtout aux émissions des procédés (industriels et fermentation entérique) (**Graphique 20**).

Mais depuis ces travaux (2020-2021), les estimations du puits forestier publiées en 2023 sont plus défavorables. Ainsi, les perturbations climatiques induisent une diminution de la vitesse de croissance des arbres (-10 % entre 2015 et 2020), une augmentation de la mortalité des peuplements (+54 % entre 2015 et 2020) et vont également modifier les aires de compatibilité climatique des essences forestières.

Pour autant, les trois premiers scénarios disposaient de marges significatives (environ 40, 30 et 10 MtCO<sub>2</sub> respectivement pour S1, S2 et S3) qui pourraient permettre l'atteinte de la neutralité carbone y compris avec un puits forestier moindre. C'est plus incertain pour le scénario 4. La moindre pression sur les terres et les ressources en biomasse dans S1 et S2 permet aux puits biologiques (forestiers et agricoles) de contribuer davantage à la séquestration, supérieure à 90 MtCO<sub>2</sub> par an. En revanche, la plus grande exploitation des forêts et la moindre évolution des régimes alimentaires et agricoles dans S3 et S4, associées à une forte demande d'énergie, limitent la capacité des puits biologiques et nécessitent le développement rapide de solutions technologiques de captage du CO<sub>2</sub> en particulier dans S4 par le recours nécessaire à du CCS sur air ambiant (DACCS) dont le déploiement d'ici 2050 est incertain.

**Graphique 20** Bilan des émissions et du captage des GES



Sur ce graphique, les émissions sont représentées en positif au-dessus de l'axe des abscisses et les puits en négatif en dessous. Cependant, la contribution des technologies de CCS autres que BECCS et DACCS a été considérée comme une réduction d'émissions et non un puits. C'est pourquoi elle apparaît en négatif dans la partie supérieure du graphique. Les émissions non énergétiques de l'agriculture sont des émissions de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> qui ne sont pas issues de la combustion d'énergie.

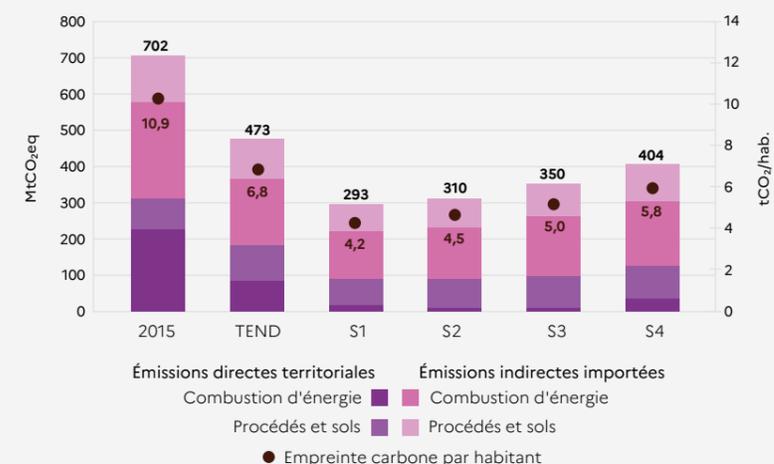
\* DACCS : direct air carbon capture and storage.  
 \*\* BECCS : bioenergy with carbon capture and storage.  
 \*\*\* HFC : hydrofluorocarbures (gaz réfrigérants).  
 \*\*\*\* CCS : carbon capture and storage.

Selon les scénarios, l'empreinte carbone<sup>26</sup> de la France baisse entre 15 % (S4) et 38 % (S1) par rapport au scénario tendanciel, en grande partie grâce à la décarbonation des émissions sur le territoire français (dites « émissions territoriales » dans le **Graphique 21**). La baisse de la demande énergétique, couplée à un mix énergétique décarboné, permet de réduire fortement les émissions générées par la combustion d'énergies (entre -23 % et -48 % selon les scénarios).

S1 et S2 permettent de réduire plus efficacement les émissions de GES importées grâce aux efforts sur les procédés industriels et à la baisse de l'impact du changement des terres.

En revanche, l'objectif des « 2 tonnes par habitant<sup>27</sup> » ne semble pas atteignable sans une politique concertée au niveau international (le scénario le plus sobre, S1, n'atteint que 4,2 tonnes/hab. en 2050).

**Graphique 21** Composition de l'empreinte carbone en 2015 et projection 2050 selon les scénarios



Note de lecture : en empreinte, les émissions territoriales sont exprimées hors émissions liées à la production des exportations.

## Qualité de l'air

Pour tous les scénarios, pour tous les secteurs et pour toutes les substances étudiées (NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM et COVNM<sup>28</sup>), des réductions d'émissions importantes sont observées en 2050, comparativement aux niveaux d'émissions de 2015. Toutefois, aucun scénario ne se distingue à la baisse pour tous les polluants et tous les secteurs. Les résultats principaux peuvent être résumés par secteur comme suit :

- pour le secteur de l'agriculture : les émissions de NH<sub>3</sub> sont réduites de 60 % pour S4, 64 % pour S3 et 71 % pour S2 en 2050, comparées au niveau de 2015<sup>29</sup>. Les réductions d'émission sont obtenues notamment grâce à la diminution des cheptels et des apports d'engrais minéraux des pâtures ainsi que l'augmentation du taux de méthanisation.
- pour le secteur résidentiel-tertiaire : les émissions sont toutes réduites de façon importante en raison

de la réduction des consommations totales de combustibles et de l'évolution du mix combustibles. Les 4 scénarios sont indifférenciés en 2050 sur les NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> et c'est S4 qui aboutit aux plus fortes baisses pour les PM (particules fines) et les COVNM du fait d'une moindre consommation de bois bûches au profit des granulés.

- pour le secteur du transport, toutes les émissions de polluants sont à la baisse en 2050 comparativement à 2015 et pour tous les scénarios, principalement en raison de l'électrification d'une part très importante du parc de véhicules particuliers. De manière générique, les seules augmentations concernent le transport international (croisière aérienne et maritime internationale), qui devient prépondérant pour certains polluants et dont les émissions augmentent dans S3 et S4.

<sup>26</sup> En considérant que les émissions des pays exportateurs ont évolué selon le scénario NDC (STEPS / WEO-22 / IEA) (voir détails dans le feuillet « Empreintes carbone et matières »).

<sup>27</sup> Quantité de gaz à effet de serre en CO<sub>2</sub>eq émise par personne dans un monde neutre en CO<sub>2</sub> en 2050 pour respecter les engagements de l'Accord de Paris et maintenir l'augmentation de la température mondiale à un niveau inférieur à 2 degrés Celsius.

<sup>28</sup> Composés Organiques Volatils Non Méthaniques.

<sup>29</sup> Les émissions de S1 n'ont pas été étudiées car, compte tenu de la baisse drastique sur les cheptels, la question de l'ammoniac en agriculture serait en grande partie réglée.

# ENSEIGNEMENTS

## sectoriels



### Adaptation au changement climatique

Aux côtés des enjeux techniques ou économiques, les contraintes, conditions de réalisation et hypothèses climato-sensibles, sont des éléments de difficulté supplémentaires mais incontournables dans la construction de futurs alternatifs. Globalement, la résilience des scénarios au changement climatique diminue de S1 à S4. Ceci repose en très grande partie sur des pratiques qui auront un impact en particulier sur la préservation des sols, la végétalisation des villes ou la dépendance de la société aux infrastructures. Ce qui pose la question de notre rapport à la nature, sachant que la lutte contre le changement climatique et la protection de la biodiversité sont intimement liés.

Cela étant, quel que soit le scénario, ce travail de prospective a mis en évidence quatre éléments incontournables à prendre en compte :

- l'eau est d'ores et déjà l'enjeu majeur du XXI<sup>e</sup> siècle avec des interrogations sur sa disponibilité, sa qualité et la quantité ;

- il n'est plus possible de s'appuyer sur la météo passée pour estimer les risques futurs. Il faut donc suivre, rectifier et s'adapter continuellement ;
- la fragilité des zones industrialo-portuaires, qui concentrent une majorité d'industries lourdes, fait l'objet de peu de réflexions collectives sur les mesures d'adaptation à long terme à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou futures, notamment vis-à-vis du risque de submersion ;
- il est indispensable de mettre en œuvre des mesures d'adaptation dès aujourd'hui, même si nous n'avons pas toutes les connaissances : ce que nous savons nous permet d'agir dès maintenant.

Concernant l'adaptation du système électrique au changement climatique, les simulations<sup>30</sup> montrent que les perturbations seraient de très faible impact, concentrées principalement sur l'éolien (2 à 4 %) (variations des vents) et un peu sur le nucléaire (0,7 %) (refroidissement en été). Ces impacts peuvent être compensés par des importations ou de très faibles productions au gaz.



### Aménagement territorial et planification urbaine

Pour l'aménagement du territoire et l'urbanisme, la séquence « Éviter, Réduire et Compenser » permettra de repenser la ville et le territoire avec une gestion sobre et durable des ressources, notamment des sols. La priorité doit évidemment aller à l'évitement, ce qui est le cas en particulier de S1, avec la priorité à la rénovation des bâtiments existants et à une meilleure occupation des bâtiments ainsi qu'avec l'arrêt de construction d'autoroutes, ce qui permet

de réduire les aménagements associés car déjà existants. À l'exception de S4, la Nature trouve une place sans équivoque au sein de ces scénarios pour les cobénéfices qu'elle peut apporter en matière de bien-être, biodiversité, lutte contre le changement climatique, aussi bien côté atténuation qu'adaptation (séquestration carbone, effet sur le rafraîchissement urbain, etc.).



### Bâtiments résidentiels et tertiaires

Il est nécessaire d'accélérer dès maintenant la transition des bâtiments. S1 table sur une rénovation thermique d'envergure et des usages sobres des bâtiments pour réduire leur empreinte climat. S2 et S3 conduisent à des émissions similaires, mais avec deux stratégies différentes : priorité à l'isolation de l'enveloppe des bâtiments (S2) ou priorité à la décarbonation des modes de chauffage (S3). En améliorant moins l'isolation des bâtiments, S3 et S4 déplacent la responsabilité de l'action de décarbonation pour le secteur du bâtiment vers d'autres secteurs (développement d'énergies peu émissives pour S3, captage et stockage de CO<sub>2</sub> pour S4).

La transition des bâtiments nécessite de ne négliger aucun levier d'action : **la rénovation énergétique** est un incontournable (surtout dans S1, S2 et S3 qui mènent en 2050 à un parc résidentiel où **environ 90 % des logements existants en 2015 ont été rénovés**) (*Graphique 22*) ; **la vie quotidienne** fait l'objet de mesures spécifiques afin d'accompagner l'évolution des imaginaires (limiter la surface par personne, utiliser moins d'équipements...); les consommations liées à de **nouveaux usages** (climatisation, *data centers*) doivent être maîtrisées ; enfin, **les leviers d'action à l'échelle du parc** (réutilisation du bâti existant,

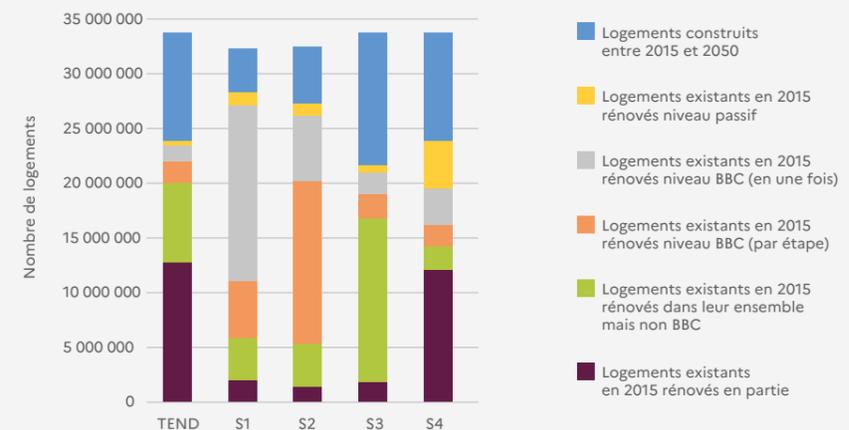
augmentation de l'intensité d'usage pour construire moins...) constituent une opportunité de sobriété : ils permettent de réduire de 2 millions le nombre de résidences principales dans S1 et S2 par rapport aux autres scénarios.

S3 et S4 génèrent les plus grandes consommations de matériaux : entre 1300 et 1400 millions de tonnes en cumulé sur la période 2015-2050. C'est plus du double de la consommation de S1. Dans tous les scénarios, c'est le résidentiel qui entraîne la consommation de matériaux la plus importante.

Le bâtiment génère entre 50 % et 60 % de l'artificialisation des sols suivant les scénarios, ce qui en fait le premier facteur d'artificialisation devant les infrastructures.

Au-delà des impacts sur l'environnement, les scénarios vont également avoir des impacts sur les compétences, les savoir-faire ou sur la façon de travailler dans le bâtiment, impacts développés dans le feuilleton « *Construction neuve* » pour S2 et S3 pour 11 secteurs d'activités allant des aménageurs/urbanistes aux équipementiers.

**Graphique 22** Parc de résidences principales en 2050 – répartition par niveau de performance énergétique dans tous les scénarios (nombre de logements)



<sup>30</sup> Voir Feuilleton « *Système électrique : quels impacts du changement climatique à l'horizon 2050 ?* ».

À l'occasion d'un travail conjoint, l'ADEME et l'ARCEP ont étudié l'impact environnemental du numérique par la méthode ACV multicritère, en particulier pour les quatre scénarios en 2050 en comparaison au tendanciel et avec les limites méthodologiques inhérentes à tout exercice de prospective et détaillées dans le rapport<sup>31</sup>.

Pour tous les scénarios, les terminaux représentent la part la plus importante dans l'empreinte environnementale du numérique, suivis des centres de données et de réseaux, et ce pour l'empreinte carbone et l'épuisement des ressources abiotiques (minéraux métalliques et non métalliques). De plus, l'analyse du scénario tendanciel montre que le secteur du numérique ne s'inscrit pas dans une dynamique de décarbonation et de réduction des impacts environnementaux. En revanche, les scénarios misant sur des politiques de sobriété numérique ou d'éco-conception (comme S1 et S2) montrent qu'il existe des pistes d'actions permettant de décarboner sensiblement le secteur du numérique.

Plus en détails, il en ressort que :

- l'empreinte carbone (y compris la phase de fabrication) pourrait tripler dans le scénario tendanciel par rapport à 2020, voire quadrupler ou plus dans S4, du fait notamment de l'explosion du nombre d'objets connectés, du volume de données et du développement des centres de données ou, à l'inverse, être divisée par trois dans S1. Dans tous les scénarios, les terminaux représentent toujours la majorité de l'empreinte carbone (environ 75 % en 2050 (Graphique 23)) ;
- sur l'ensemble des autres critères, notamment l'épuisement des ressources abiotiques, les terminaux sont également responsables de la majorité des impacts (entre 60 % et 86 % selon les critères dans le scénario tendanciel). S4 mobilise le numérique en appui à la décarbonation, ce qui génère plus d'impacts, notamment sur les ressources abiotiques.

Graphique 23 Impact CO<sub>2</sub>eq des biens et services numériques sur l'empreinte carbone



<sup>31</sup> <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>

Cinq leviers ont été identifiés pour réduire les émissions liées à la mobilité des personnes et des marchandises : la modération de la demande de transport, le report modal, le remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique des véhicules et la décarbonation de l'énergie. En partie grâce aux schémas d'aménagement du territoire plus recentrés sur l'économie locale, S1 et S2 peuvent agir plus fortement sur les trois premiers leviers et sur certains leviers d'efficacité en lien avec la sobriété, tandis que S3 et S4 agissent plus fortement sur les deux derniers leviers, plus technologiques. Les quatre scénarios explorent ainsi un vaste éventail des futurs possibles : par exemple, en matière de besoins de mobilité voyageurs, qui évoluent de - 26 % (S1) à + 39 % (S4) par rapport à 2015.

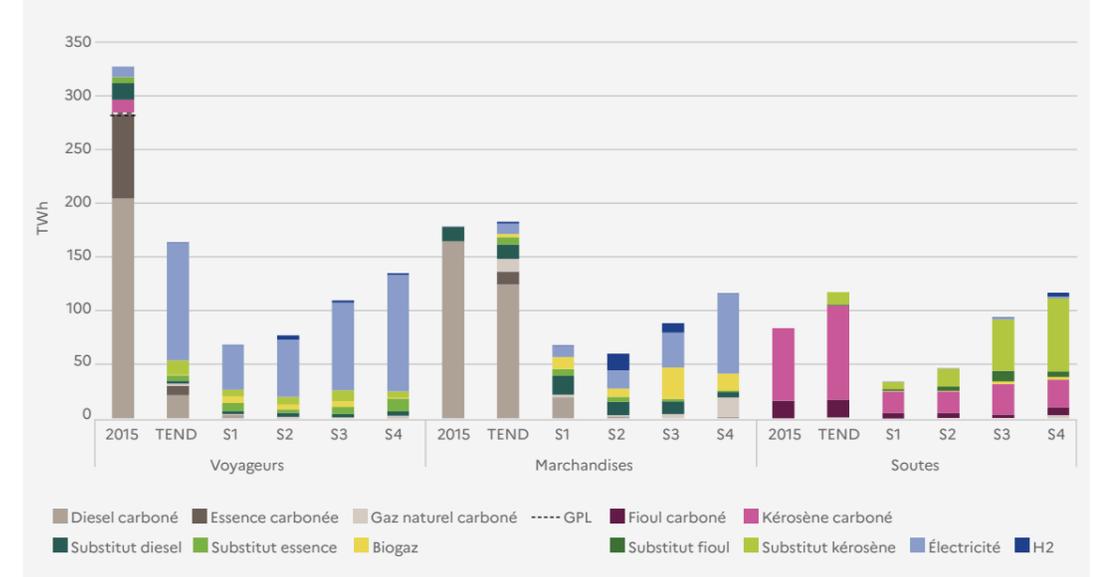
Les leviers de sobriété permettent de diviser par plus de deux les besoins énergétiques par rapport au scénario tendanciel et de réduire plusieurs pressions environnementales liées aux mobilités. Les leviers d'efficacité et de décarbonation sont indispensables dans tous les scénarios. En particulier, l'électrification est incontournable pour les véhicules routiers légers. La biomasse (biocarburants et biogaz) complète le mix des poids lourds, du maritime ou de l'aérien, plus difficiles à décarboner. L'hydrogène est sollicité en complément dans certains scénarios (Graphique 24).

Ainsi :

- pour le transport de voyageurs, 80 à 87 % de la demande énergétique en 2050, transports aériens longues distances inclus, est réalisée par des vecteurs énergétiques sans carbone fossile (électricité, hydrogène, biocarburants liquides et gazeux et carburants de synthèses), ce qui diminue fortement les polluants atmosphériques locaux (- 95 % par exemple pour les NOx dans tous les scénarios) ;
- pour le transport de marchandises, la décarbonation est plus lente et les vecteurs énergétiques sont plus diversifiés, notamment pour les poids lourds et le transport maritime international. Selon les scénarios, les vecteurs sans carbone fossile remplissent 65 à 91 % de la demande énergétique en 2050.

Les scénarios vont également entraîner des transformations dans l'organisation des transports sur toute la chaîne logistique, comme le décrit le feuilletton « Logistique des derniers kilomètres » pour S1 et S4 avec, pour S4, la domination dans cette organisation des entreprises du numérique du fait de la nécessaire maîtrise des données.

Graphique 24 Demande énergétique des transports en 2050 par vecteur et par scénario (pour le transport de voyageurs, de marchandises et les soutes [transports internationaux])



## Alimentation

Trois leviers principaux permettent de réduire drastiquement les impacts environnementaux de l'alimentation **pour construire des stratégies de co-bénéfices entre impact climat et impact santé** :

- l'évolution des régimes alimentaires vers des **régimes plus sains et moins carnés** *via*, en particulier, la division par 3 (S1) et 2 (S2) ou une baisse de 30 % (S3), des consommations de viande par rapport à aujourd'hui ;
- la demande en produits à forte valeur environnementale (**bas niveau d'intrants**), dont on suppose qu'ils deviennent majoritaires dans S1 et S2 ;
- la **réduction des pertes et gaspillages**, qui atteint 50 % dans tous les scénarios *via* des leviers plutôt comportementaux dans S1 et S2 et plutôt technologiques et digitaux dans S4.

Ainsi, S1 et S2 misent sur une grande sobriété pour les individus comme pour les entreprises et les collectivités et sur un rôle social renforcé d'une alimen-

tation saine et durable. S3 et plus encore S4 misent davantage sur l'innovation technologique où les gains d'efficacité sont pilotés notamment par l'intelligence artificielle ou le numérique, avec un effet moindre sur la modification des régimes alimentaires et la qualité environnementale des produits, ce qui nécessite un report des efforts sur d'autres secteurs. Ces deux derniers scénarios génèrent moins des gains en matière de santé que S1 et S2.

**En prenant en compte uniquement l'impact d'une moindre consommation de viande sur les émissions agricoles (poste majoritaire dans l'assiette actuelle), les scénarios se traduisent par une réduction d'émissions carbone d'environ 40 % pour S1 par rapport aux émissions actuelles, contre seulement 6 % dans S4. Des impacts du même ordre de grandeur sont estimés sur l'empreinte sol.**

Enfin, le feuillet « Filières protéines » décrit les impacts sur les emplois et la chaîne de valeur de cette filière pour S2 et S3 ainsi que les conséquences pour les agriculteurs.

## Production agricole

À l'horizon 2050, **le secteur agricole est à la croisée de multiples enjeux** : il doit à la fois répondre aux demandes alimentaires et non alimentaires, fournir différents services écosystémiques indispensables (stockage de carbone, mais aussi réservoirs de biodiversité, conservation des sols et de la qualité des eaux...) et s'adapter à l'évolution du climat, tout en contribuant à l'objectif de neutralité carbone de la France. En fonction des scénarios, différents leviers interdépendants sont mobilisés, comme par exemple : l'agroécologie, la réduction des cheptels et un passage à des systèmes plus extensifs, la baisse des besoins en irrigation, la production de biomasse à vocation énergétique.

Les simulations réalisées montrent que diviser **par deux les émissions de GES du secteur agricole à 2050 n'est possible que dans S1 et S2** par davantage de sobriété et une meilleure prise en compte du rôle essentiel du monde vivant dans le maintien de nos capacités de production (**Graphique 25**). L'ensemble des acteurs de la filière doivent effectuer une transition, en particulier *via* **l'évolution des régimes alimentaires**. Pour être couronnée de succès, cette transition d'ampleur doit être accompagnée.

Au-delà du volet émissions de GES, les scénarios plus extensifs S1 et S2 permettent également de réduire la consommation d'eau d'irrigation (divisée par deux par rapport à aujourd'hui dans S1), ainsi que l'usage des produits phytosanitaires (divisé par cinq dans S2 par rapport à aujourd'hui) et des fertilisants de synthèse (azote minéral) au profit des apports d'azote d'origine biologique ou du développement des légumineuses, qui permettent une fixation symbiotique d'azote.

*A contrario*, S3 et S4 favorisent les systèmes plus intensifs, mais optimisés techniquement pour réduire leurs impacts (en comparaison des systèmes actuels et tendanciels). La contribution du secteur agricole à la production de biogaz et de biocarburant est la plus haute dans S3.

Les baisses d'émission de NH<sub>3</sub> obtenues entre 2020 et 2050 sont de 69 % pour S2, 61 % pour S3 et 57 % pour S4. Ces baisses sont principalement fondées sur un recul des cheptels, un recul de la fertilisation minérale et la mise en place de pratiques de réduction au niveau de la gestion des déjections animales.

**Graphique 25** Émissions territoriales de GES actuelles et à l'horizon 2050 du secteur agricole



## Production forestière

La recherche d'équilibres entre le stockage de carbone dans les écosystèmes et la récolte accrue pour remplacer des matériaux et énergies d'origine non renouvelable structure les scénarios de production forestière. Ainsi, en faisant varier le **taux de prélèvement de bois sur l'accroissement biologique des forêts (qui passe de 59 % en 2018 à environ 55 % dans S1, jusqu'à 82 % pour S4 en 2050), le puits forestier se réduit fortement dans S3 et S4 et la disponibilité du bois pour les filières bois matériaux et énergie diffère selon le scénario** : stabilité pour S1 jusqu'en 2050, + 9 Mm<sup>3</sup>/an dans S2 et + 19 Mm<sup>3</sup>/an dans S3 et S4 par rapport à aujourd'hui.

Dans tous les cas, il est essentiel de **cesser le défrichement des forêts**, pour les gérer de façon **durable** et reconstituer les peuplements sinistrés, favoriser leur résilience et leur **adaptation** face aux impacts du changement climatique tout en protégeant la **biodiversité** et le **stockage de carbone**. L'orientation de la récolte du bois vers des usages à longue durée de vie en favorisant l'utilisation du **bois en cascade**<sup>32</sup> constitue également un levier d'atténuation efficace.

<sup>32</sup> Principe selon lequel le bois est utilisé dans l'ordre de priorité suivant : 1) produits à base de bois, 2) prolongement de leur durée de vie, 3) réutilisation, 4) recyclage, 5) bioénergie et 6) élimination.

## Production industrielle

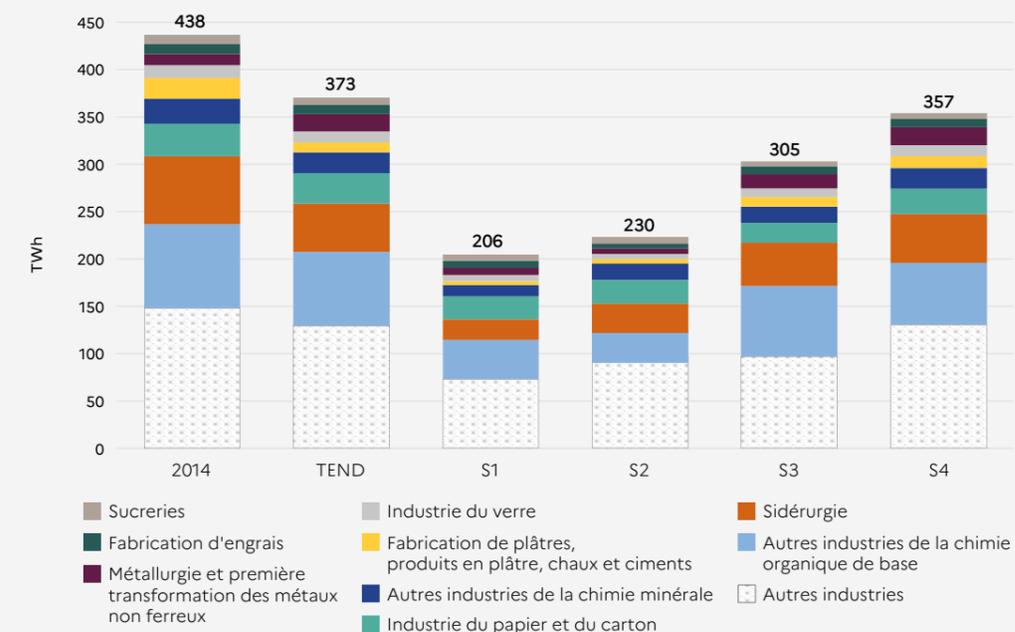
Les scénarios 2 et 3 permettent d'atteindre une forte réduction des émissions industrielles : respectivement de 84 et 86 % (incluant le CCS). Dans S2, c'est essentiellement par d'importants efforts de sobriété et d'efficacité couplés à une forte réindustrialisation ; dans S3, c'est grâce à une forte décarbonation du mix énergétique. Cette réduction est plus faible (79 %) dans S1 car essentiellement tirée par les efforts de sobriété des consommateurs favorisant la production industrielle locale, sans recours au CCS. Enfin, si S4 ne permet qu'un recul des émissions de 54 %, le pari technique effectué sur le CCS déployé à grande échelle est susceptible d'abattre 96 % des émissions par rapport au niveau de 2014. S1 et S2 limitent par ailleurs le risque de « fuites de carbone » en évitant la délocalisation des industries lourdes dans des pays à plus faible fiscalité carbone.

Cette décarbonation profonde de l'industrie repose, en premier lieu, sur le **recul de la demande physique** en produits industriels : une baisse de la production de matériaux primaires<sup>33</sup> est observée dans tous les scénarios (de respectivement 38 %, 26 %, 14 % et 2 % dans S1, S2, S3 et S4). Cette baisse résulte d'évolutions des secteurs aval (baisse de la construction neuve dans le bâtiment, diminution des plastiques et engrais pour la chimie...), de l'amélioration de l'efficacité matière et du recyclage, ainsi que de l'évolution des soldes commerciaux. Ce recul en volume s'intègre dans un nouveau modèle industriel privilégiant la qualité à la

quantité et fondé sur l'économie circulaire avec des produits de qualité, plus chers mais durables, éco-conçus, réparables, réutilisables et recyclables (S1 et S2), ou un modèle plus quantitatif, mais avec des procédés et des énergies décarbonés (S3 et S4).

Cette transition de l'industrie nécessite d'anticiper et d'accompagner les nouveaux modèles d'affaires et le positionnement de l'industrie bas-carbone française dans le commerce international. Elle implique, en outre, **des plans d'investissements bas-carbone de grande ampleur** (décarbonation des mix énergétiques, efficacité énergétique et matière, captage, stockage ou utilisation du CO<sub>2</sub>(CCUS)...), tant pour la massification de technologies matures que pour des innovations de rupture en matière de procédés industriels et pour le déploiement des infrastructures nécessaires. Pour cela, la visibilité et la sécurisation des marchés bas-carbone, de même qu'un accompagnement public en matière de dispositifs incitatifs et d'aménagement du territoire, seront clés. Enfin, elle implique surtout une mutation de la structure des emplois du secteur et donc le besoin d'une politique volontariste de la part des acteurs publics et privés en matière d'emploi et de compétences. **La compréhension et la construction de ces transformations par l'ensemble de la société** (citoyens, salariés) seront primordiales pour fédérer la société autour de cette « nouvelle révolution industrielle bas-carbone » (Graphique 26).

Graphique 26 Répartition des consommations d'énergie (dont matières premières) en 2014 et en 2050, par scénario et par type d'industrie (IGCE et autres)



<sup>33</sup> En moyenne, sur les 70 sous-secteurs industriels considérés (NCE 12 à 38).

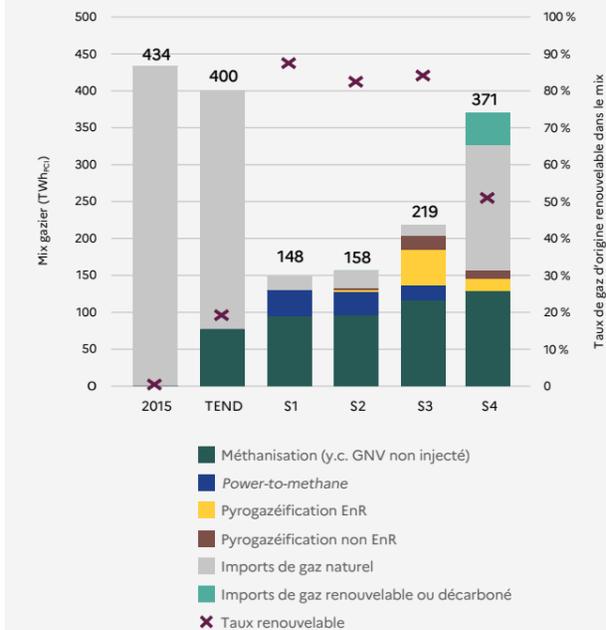
## Mix gaz et hydrogène

**Le potentiel de développement des filières de production de gaz renouvelable à l'horizon 2050 est très important par rapport à aujourd'hui : entre 130 TWh<sub>PCI</sub> et 185 TWh<sub>PCI</sub>, soit 30 à 43 % de la consommation actuelle de gaz fossile.** Quel que soit le scénario, la méthanisation est le premier pilier de la décarbonation du gaz (Graphique 27). La deuxième voie repose sur le couplage de la méthanisation avec le *power-to-methane* qui permet de valoriser le CO<sub>2</sub> biogénique émis par la méthanisation. En fonction des ressources disponibles, la pyrogazéification peut être une voie complémentaire. **Une forte décarbonation du gaz est possible (82 à 88 %), à condition que la demande en gaz diminue** de manière importante par rapport à aujourd'hui (de - 50 à - 70 %). Dans le cas contraire, la situation nécessite des importations de gaz renouvelable ou décarboné<sup>34</sup> et un recours aux puits technologiques pour compenser les émissions liées au gaz naturel restant.

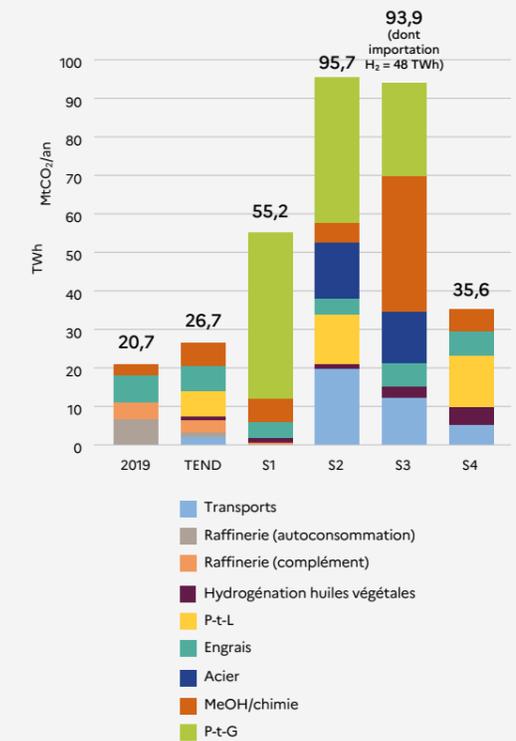
Les consommations d'hydrogène sont supérieures à celles d'aujourd'hui dans tous les scénarios (jusqu'à 4,5 fois) et la technologie de **l'électrolyse** s'avère indispensable pour remplacer l'hydrogène actuellement produit à partir de gaz fossile (Graphique 28). Au maximum, la production d'hydrogène sur le sol français atteint 96 TWh en 2050 (S2) pour des usages diffus (*power-to-gas* et mobilité) auxquels s'ajoutent des usages industriels plus centralisés tels que la production d'engrais et de méthanol, la synthèse de carburants liquides et la réduction de l'acier. Seul S3 repose également sur des importations d'hydrogène (48 TWh).

La décennie 2020-2030 est cruciale pour engager le pays sur la bonne trajectoire de développement des capacités d'électrolyse. Dans le même temps, **de nouveaux secteurs consommateurs d'hydrogène** vont émerger avant 2030 : les mobilités lourdes utilisant l'hydrogène de manière directe ou indirecte, le *power-to-gas*, la production de méthanol et la sidérurgie.

Graphique 27 Mix gazier en 2015 et en 2050 pour les cinq scénarios ADEME (référence et variante gaz haut)



Graphique 28 Bilan des consommations d'hydrogène en 2050 en TWh pour les différents scénarios, incluant l'autoconsommation des raffineries



\* P-t-G : power-to-gas ; \*\* P-t-L : power-to-liquid.

<sup>34</sup> Production par des pays pétroliers par exemple, qui pourraient vouloir garder leur modèle d'affaire en produisant des carburants ou des gaz de synthèse à l'aide de leur fort ensoleillement.



## I Mix électrique

Les scénarios de mix électrique font varier deux facteurs principaux : d'une part, des niveaux de demande d'électricité très différents (de 400 TWh dans S1 à 800 TWh dans S4, en incluant tous les usages de l'électricité, y compris pour fabriquer l'hydrogène ou d'autres vecteurs finaux et pour alimenter le captage technologique du carbone); d'autre part, des logiques contrastées d'aménagement, d'implication de la population ou de gouvernance publique sous-jacentes aux quatre scénarios. Ainsi, S1 et S2 reposent uniquement sur l'installation de nouvelles capacités d'énergies renouvelables, mais avec deux logiques différentes : pour S1, parcs de petites tailles et répartition diffuse sur le territoire pour favoriser l'appropriation par les citoyens et les collectivités territoriales ; dans S2, grands parcs et minimisation des coûts. S3 et S4 sont dans la même logique de minimisation des coûts que S2, mais la hausse de la demande d'électricité nécessite un rôle fort de l'État qui permet le déploiement industriel et massif de technologies, telles que les EPR (S3Nuc<sup>35</sup> et S4) et l'éolien flottant (S3EnR-offshore et S4).

Quels que soient ces choix technologiques, tous les scénarios impliquent le développement massif des énergies renouvelables (solaire, éolien terrestre et en mer) et deux d'entre eux nécessitent en complément du nouveau nucléaire (Graphique 29).

L'analyse sur le coût en EUR HT/MWh de l'électricité en 2050 aboutit à des coûts relativement similaires entre les scénarios : de -12 % (pour S2) à +4 % (pour S4) par rapport à 2020. Cela signifie que les coûts de l'électricité pourront rester maîtrisés jusqu'en 2050. C'est dans S2 que le coût de revient du MWh est le plus faible à l'horizon 2050 : un niveau de consommation d'électricité modéré (537 TWh) permettant la scénarisation d'un mix électrique reposant très majoritairement sur les technologies les plus compétitives.

La modélisation des deux variantes de S3 aboutit à un coût (environ 1 300 M€ de coût complet sur la trajectoire 2020-2060) et un bénéfice CO<sub>2</sub> pour le système électrique proche (Graphique 30). Les deux options industrielles contrastées : recours massif à l'éolien flottant et développement de 3 paires d'EPR supplémentaires sont donc comparables d'un point de vue économique.

Le système électrique est sensible aux conditions météorologiques, que ce soit au niveau de la production, du transport ou de la consommation.

Il est donc important d'évaluer dans quelles mesures le changement climatique peut impacter le système élec-

trique à horizon 2050<sup>36</sup>. Les principales conclusions de la modélisation sont les suivantes :

1. Dans tous les scénarios, le changement climatique impacte la demande annuelle d'électricité à la baisse de 1 % en moyenne en la déplaçant de l'hiver à l'été. Les consommations de chauffage baissent en moyenne de 15 % et celles de climatisation augmentent de 14 %.

2. Évolution des productibles :

2.1. Le productible photovoltaïque n'est en moyenne pas impacté par le changement climatique ;

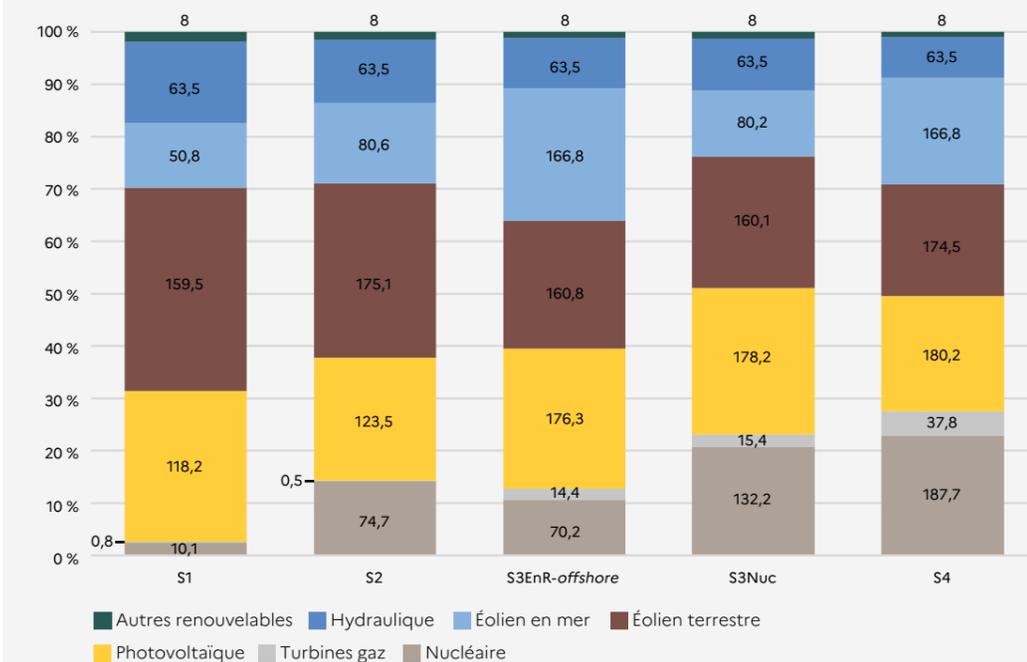
2.2. Pour les filières renouvelables impactées (éolien, hydraulique), l'évolution du productible national dépend du productible régional et donc des évolutions moyennes des régimes de vent et de précipitations anticipées aux échelles régionales ;

2.3. Dans tous les scénarios, compte tenu des répartitions régionales des parcs éoliens et de leur dimensionnement, la prise en compte du changement climatique conduit à ce que le taux de charge moyen soit plus faible qu'escompté, de l'ordre de 2,1 à 3,6 %, plus particulièrement marquée sur le pourtour méditerranéen, ce qui conduit à une baisse de production éolienne sur l'année d'environ 2 à 4 % ;

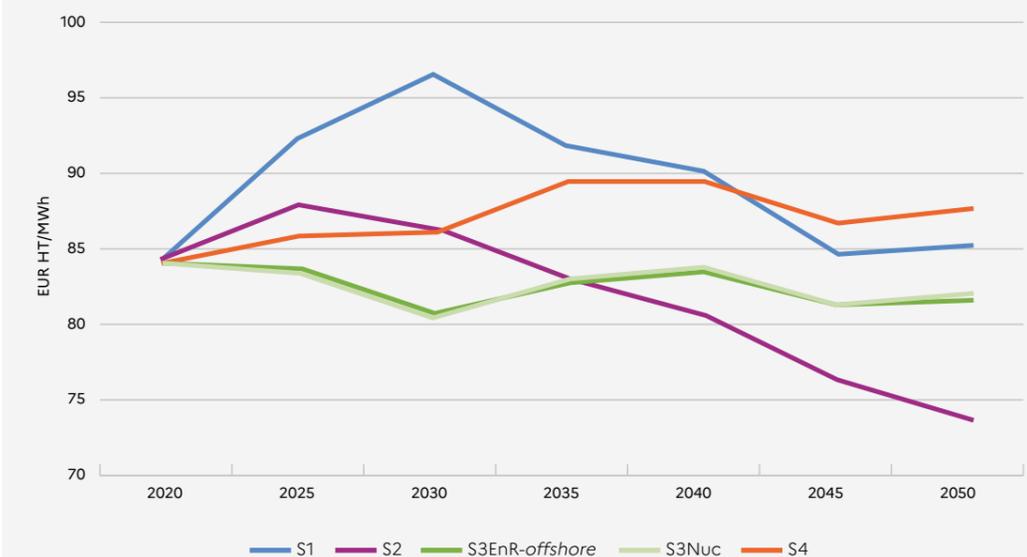
2.4. Pour les parcs nucléaires, la prise en compte des épisodes de fortes chaleurs conduit à une perte de production de l'ordre de 0,7 %. Cette valeur est faible par rapport aux variations habituelles de production nucléaire (de l'ordre de 6 %) pour gérer la variabilité interannuelle des énergies renouvelables. De plus, ces pertes, centrées sur l'été, sont compensées par des imports et une faible hausse de la production au gaz.

En dehors de S1, scénario le plus sobre, le changement climatique impacte à la baisse plus fortement la production éolienne que la demande annuelle de chauffage et de climatisation, générant ainsi un déficit de production de l'ordre de 2 à 10 TWh (soit des valeurs inférieures à 1,5 % de la production électrique totale des scénarios). Ainsi, la modélisation horaire du système électrique montre que la planification à climat constant peut exposer le système électrique à des déficits de production, s'il n'y a pas adaptation du système électrique.

Graphique 29 Composition du mix de production d'électricité (en TWh) en 2050



Graphique 30 Évolution des coûts complets annualisés (production, réseau, flexibilité) du système électrique rapportés au MWh de consommation finale (EUR HT/MWh)



Note de lecture : les courbes S3EnR-offshore et S3Nuc apparaissent superposées.

<sup>35</sup> S3 est divisé en 2 options de production d'électricité (voir description de S3, 05. Systèmes énergétiques décarbonés).

<sup>36</sup> Voir Feuilleton « Système électrique : quels impacts du changement climatique à l'horizon 2050 ? ».

## Froid et chaleur distribués via les réseaux urbains et hors réseaux (dont biomasse énergie)

Les besoins de chaleur représentent aujourd'hui environ 50 % de la consommation d'énergie finale en France, principalement pour le chauffage et les procédés industriels. Cette chaleur peut être distribuée via des réseaux urbains ou produite de façon décentralisée (« chaleur hors réseaux »).

Dans tous les scénarios, la demande de chaleur diminue par rapport à 2015 (700 TWh), assez fortement dans S1 (351 TWh), S2 (358 TWh) et S3 (440 TWh) et dans une moindre mesure dans S4 (612 TWh) avec la disparition ou quasi-disparition du fioul et du charbon. Le gaz se maintient, mais à des niveaux faibles : entre 11 et 32 % hors réseaux (45 % en 2015) et entre 10 et 12 % dans les réseaux urbains (39 % en 2015) suivant les scénarios, avec un gaz décarboné à plus de 80 % dans S1, S2 et S3.

Les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R - biomasse, déchets, chaleur de récupération, biogaz, biocarburant, solaire thermique, pompe à chaleur aérothermique et géothermie) progressent et deviennent majoritaires dans tous les scénarios. Hors réseaux, elles passent de 15 % en 2015 à environ 60 % dans S1, S2 et S3 et 32 % dans S4. Dans les réseaux, elles augmentent très fortement dans tous

les scénarios, passant de 50 % en 2015 à environ 90 %. Globalement, la répartition de la production de chaleur entre réseaux et hors réseaux montre, sur l'ensemble des scénarios, un accroissement de la part des réseaux en 2050, qui passe de 3 % en 2015 à 8 % dans S1, 10 % dans S2 et S3 et 6 % dans S4.

Faibles dans S1 (6,4 TWh) et S2 (6,5 TWh), les livraisons de froid sont plus significatives dans S3 (25,2 TWh) et S4 (28,4 TWh), grâce à des technologies décentralisées de type pompes à chaleur.

Pour le chauffage au bois résidentiel, les tendances actuelles se poursuivent dans S1, à savoir une consommation nationale de bois constante et une augmentation du nombre de ménages se chauffant au bois. Les autres scénarios présentent en revanche des consommations inférieures, qui s'expliquent par une sobriété énergétique importante (S2), un parc de chauffage électrique largement déployé dans les logements (S3) ou une exigence sociale d'automatisation ne laissant que peu de place aux systèmes de chauffage au bois, notamment bûche (S4). Enfin, une tendance commune à chacun des scénarios est l'accroissement significatif de la biomasse dans les réseaux entre aujourd'hui et 2050.

## Carburants liquides

**Quel que soit le scénario, malgré une forte baisse de la demande en carburants liquides, l'offre en biocarburants, même complétée par des carburants de synthèse, ne permet pas de répondre à la demande du secteur des transports.** Dans S1 et S2, l'offre en carburants liquides provient essentiellement des biocarburants conventionnels (produits à partir de ressources agricoles), actuellement la seule voie mature de production de biocarburants : elle varie de 25 TWh dans S2 à 43 TWh dans S1. Son développement dépend de l'évolution de la demande alimentaire. Dans S3 et S4 en revanche, la production de biocarburants avancés se développe en complément des biocarburants conventionnels via la diversification des ressources, notamment lignocellulosiques.

Toutefois, ce développement des biocarburants avancés est limité par la disponibilité des ressources. Il dépend des politiques de gestion des forêts et de la production de déchets, qui déterminent les ressources totales de biomasse et déchets carbonés

non recyclables. Il dépend également des autres usages de ces intrants pour la fabrication de matériaux, la combustion directe ou la production de gaz. Ainsi, dans S1, la filière ne se développe que de façon marginale en raison de la tension sur la ressource et pour privilégier le stockage de carbone dans les écosystèmes. *A contrario*, S3 et S4 mobilisent largement la biomasse, ce qui permet un large recours aux biocarburants avancés, qui contribuent entre 8 et 76 TWh en fonction des scénarios.

Face aux limites des ressources en biomasse, les électrocarburants peuvent compléter les carburants liquides renouvelables. Leur développement est toutefois contraint par les volumes d'électricité requis et peut se trouver en concurrence avec les usages directs de l'hydrogène ou du *power-to-gas* (production de méthane à partir de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>), d'où un développement minoritaire des électrocarburants dans S2, S3 et S4.

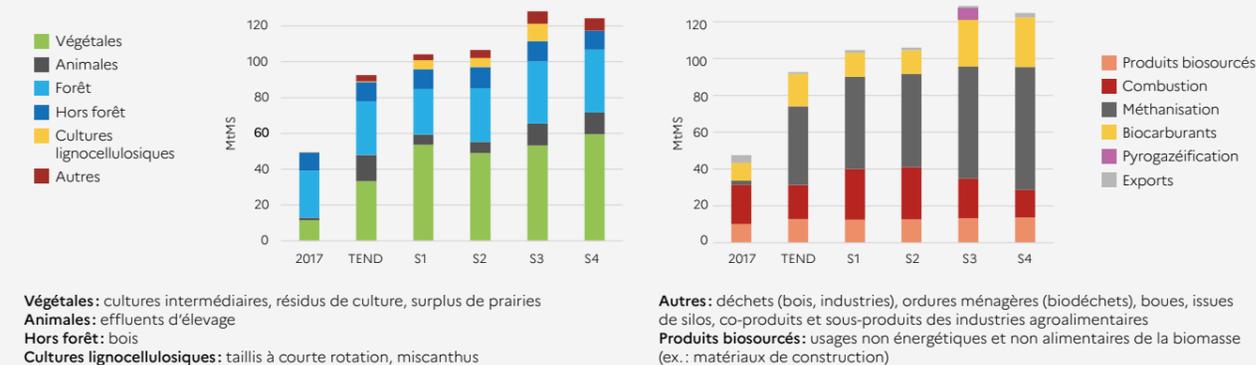
## Ressources et usages non alimentaires de la biomasse

Pour l'ensemble des scénarios, **la consommation de biomasse pour un usage autre qu'alimentaire est plus que doublée par rapport à 2017 mais avec des stratégies différentes en termes de ressources mobilisées, tout en respectant les limites physiques tous usages considérés (Graphique 31).**

Le volume de biomasse mobilisée dépasse les 100 millions de tonnes de matière sèche (MtMS) en 2050 et atteint même 120 MtMS dans S3 et S4. Ce qui fait de cette ressource un « pilier » indispensable à l'ensemble des scénarios. Dans tous les scénarios, la biomasse végétale d'origine agricole présente le plus fort levier de croissance et augmente de 11 MtMS

en 2017 à 50 MtMS au moins en 2050. Les scénarios se différencient cependant par le volume total de biomasse et la répartition entre les ressources mobilisées : forestières, cultures agricoles, effluents. Les usages visés (produit biosourcé, combustion, méthanisation, biocarburant) varient également d'un scénario à l'autre. La combustion, qui représente aujourd'hui près de la moitié des usages, croît peu en valeur absolue : dans tous les scénarios, elle représente moins de 30 % des usages (en tonnage). À l'inverse, la méthanisation mobilise *a minima* près de la moitié des tonnages de biomasses (agricoles, lignocellulosiques, déchets).

**Graphique 31** Ressources et usages non alimentaires de la biomasse en millions de tonnes de matière sèche (MtMS)



## Déchets et ressources minérales

Les scénarios étudiés correspondent à une baisse de 30 % environ de la quantité de déchets dans S1 et S2 par rapport à 2015, tandis que le niveau de production de déchets est maintenu dans S3 et S4 (entre 90 000 et 100 000 kt/an), notamment en raison de la plus forte production de déchets du bâtiment, elle-même engendrée par le scénario « haussmannien » de déconstruction/construction. S1, S2 et S3 atteignent l'objectif de réduire de 50 % la quantité de déchets mis en décharge à l'horizon 2025 (en 2026 pour S1). S4 atteint cet objectif seulement en 2028.

L'exercice montre que, quel que soit le scénario, la demande de matières premières de recyclage et d'énergie aboutit à une quasi-disparition du stockage final de déchets. Dans S3, **la demande en combustibles solides de récupération est telle que la hiérarchie de la gestion des déchets en est bousculée** : priorité à la

valorisation énergétique au détriment d'une partie de la valorisation matière. Dans tous les scénarios, soit par principe, soit par nécessité, **l'usage circulaire de la matière, y compris de la matière organique**, est un élément central du modèle économique et de la politique de gestion des déchets.

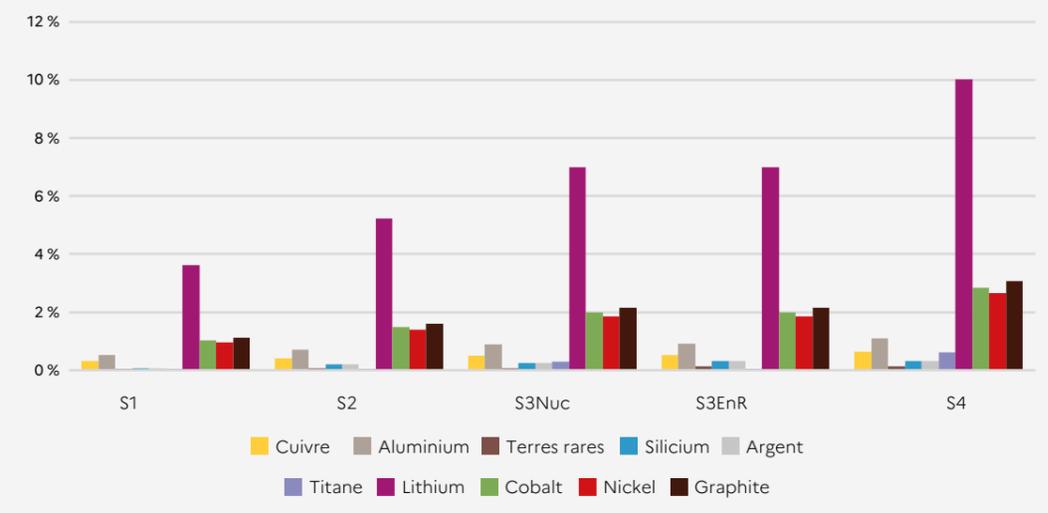
Par ailleurs, la production de déchets dépend de la production industrielle et donc de la demande finale. C'est pourquoi **il est indispensable d'agir autant sur la demande finale que sur les consommations intermédiaires**, de façon à limiter les impacts sur l'aval de la chaîne logistique.

Concernant les besoins en métaux pour la transition énergétique (PV, éolien, véhicules électriques et nucléaire), une analyse spécifique permet de souligner les points suivants :

Pour les « grands matériaux et métaux<sup>37</sup> » : des consommations négligeables pour le béton, l'acier et le verre mais qui peuvent, pour l'aluminium et le cuivre des véhicules, contribuer de façon prédominante à l'augmentation des besoins français en 2050. Pour les « petits métaux<sup>38</sup> » (Graphique 32) : des approvisionnements à sécuriser en terres rares pour les éoliennes en mer et en matières pour les batteries des véhicules (lithium, cobalt, nickel et graphite).

Selon les scénarios considérés, l'empreinte matières en 2050 diminue entre - 5 % (S4) et - 26 % (S1) par rapport au scénario tendanciel. La décarbonation de l'économie induit un fort recul de la consommation de matières fossiles ainsi que des minerais métalliques et non métalliques. La contraction de la consommation de ces derniers est toutefois moins importante dans les scénarios qui misent davantage sur les technologies pour décarboner l'économie, à savoir S3 et S4.

Graphique 32 Besoins matières annuels moyens de la France entre 2020 et 2050 rapportés à la production mondiale 2020 pour 10 matériaux et métaux



## I Puits de carbone

La protection des stocks de carbone et des puits actuels dans les écosystèmes, ainsi que le développement d'une séquestration additionnelle sont deux leviers essentiels pour atteindre la neutralité carbone et dont le développement peut s'appuyer sur des puits naturels et sur des puits technologiques. Ainsi, tous les scénarios montrent une augmentation des puits d'un facteur 2 à 3 par rapport à 2017. Dans S1 et S2, cette augmentation repose principalement sur les puits naturels (forêts, sols agricoles) tandis qu'elle repose majoritairement sur les puits technologiques (BECCS, DACCS) dans les scénarios S3 et S4. Concernant le puits forestier, si les estimations de 2023 sont très dégradées par rapport aux travaux initiaux de 2020/2021 (voir Bilan GES page 54), la comparaison entre scénarios reste pertinente, avec S1 et S2 plus résilients que S3 et S4 car ils ont des marges de manœuvre plus importantes.

Outre leur valeur propre pour la biodiversité, les écosystèmes naturels sont des stocks et des puits de carbone majeurs. **Les puits « naturels » jouent un rôle primordial pour atteindre la neutralité carbone**

à l'horizon 2050. Un enjeu crucial est donc d'éviter des dégradations quasi-irréversibles à des échelles de temps humaines et d'assurer des pratiques agricoles et des gestions sylvicoles durables qui garantissent le bon fonctionnement des écosystèmes et favorisent leur résilience face aux impacts du changement climatique.

Les puits technologiques sont aujourd'hui peu ou pas développés. En fonction des scénarios et des horizons de temps considérés, ils n'ont pas tous le même potentiel, ni surtout le même impact. Le BECCS pourra s'appuyer sur le **déploiement du CCS qui est une technologie nécessaire pour que l'industrie réduise ses émissions incompressibles**. Le DACCS, déployé uniquement dans S4 et caractérisé par une forte consommation d'énergie et de ressources, pourrait ne pas être opérationnel suffisamment tôt pour contribuer à atteindre la neutralité carbone en 2050 et s'avère extrêmement coûteux en énergie (6 % de la consommation d'électricité).

<sup>37</sup> Dont la consommation est supérieure à 50 kt/an, soit le béton, l'acier, le cuivre, l'aluminium et le verre.

<sup>38</sup> Dont la consommation est inférieure à 10 kt/an, soit les terres rares, le silicium, l'argent, le titane, le lithium, le cobalt, le nickel et le graphite.

## I Économie et société

La modélisation économique réalisée avec le modèle ThreeME montre que les différentes mesures permettant d'atteindre la neutralité carbone, y compris la sobriété, n'entraînent pas de décroissance économique, puisque tous les scénarios engendrent une croissance du PIB sur les 30 années, même si S1 présente des performances moindres que les trois autres. S2, qui est un scénario très sobre (même niveau de demande énergétique que S1 mais avec un peu moins de contraintes et plus de concertation), présente des performances macroéconomiques globalement très intéressantes et systématiquement meilleures que le scénario tendanciel. Il est également le moins cher concernant le coût complet du MWh électrique.

Même constat concernant le choix des systèmes de production électrique, puisque les deux options de production de S3 (avec ou sans développement de nouvelles centrales nucléaires) aboutissent aux mêmes niveaux d'investissement et au même coût complet du MWh électrique. Les résultats macroéconomiques ne constituent donc pas un critère de choix premier entre les scénarios.

Concernant les effets redistributifs sur les ménages en fonction de leurs revenus, la modélisation réalisée pour le feuillet « Effets redistributifs » montre que :

- **la diffusion du progrès technique, par l'amélioration du parc de logements et de véhicules, participe pleinement à la réduction de la consommation énergétique, mais avec des effets redistributifs distincts.** Dans le secteur du logement, pour lequel les efforts d'amélioration s'inscrivent dans un temps long, les gains d'efficacité des bâtiments profitent plus fortement aux ménages aisés, au risque de renforcer la vulnérabilité énergétique des plus modestes, en particulier dans S3 et S4. Dans le secteur du transport, le renouvellement du parc de véhicules, plus rapide, laisse entrevoir une répartition plus homogène des gains d'efficacité, quel que soit le scénario.
- **l'évolution des inégalités de revenu n'est affectée que marginalement par la transition énergétique, elle dépend plus largement de la répartition catégorielle des revenus et des mécanismes de redistribution des fruits de la croissance économique.** Autrement dit, les scénarios de transition ne sont pas intrinsèquement générateurs ou supprimeurs d'inégalités si l'indicateur principal est celui des revenus ;
- **les différents scénarios réduisent globalement la dépendance des ménages à l'énergie, en particulier dans S1 et S2, qui recourent massivement à la rénovation et touchent tous les publics.** En revanche, de nouvelles vulnérabilités apparaissent chez les ménages modestes dans S3 et S4 dans la mesure où ils bénéficient moins des logements neufs performants ;

Quant à la faisabilité et la désirabilité des scénarios, une enquête sociologique a été menée auprès de 31 personnes sélectionnées pour incarner une diversité de caractéristiques socio-démographiques (âge, sexe, CSP, revenu, habitat, structure du ménage, situation géographique) répondant donc à une méthode d'enquête qualitative. Les résultats montrent qu'aucun scénario n'est plébiscité ou rejeté, soulignant ainsi la nécessité de construire des accords autour des choix de société à envisager. Loin d'être uniquement individuelle, la transition doit s'opérer de manière collective, en engageant fortement les acteurs, privés comme publics. Plus que l'attachement à la liberté individuelle liée à la consommation de masse, ce qui compte pour les citoyens relève du contrat social à construire, avec un accent notamment prononcé sur le traitement des inégalités afin que la transition écologique soit juste socialement et sur le renouvellement des formes démocratiques avec une participation accrue des citoyens aux décisions.

Dans le prolongement des préoccupations sociales et dans la mesure où tous les secteurs seront touchés par des évolutions plus ou moins fortes de leurs métiers quel que soit le scénario, il est nécessaire d'anticiper la montée en compétence et l'évolution des filières professionnelles (par exemple un fort besoin sur la rénovation énergétique) ainsi que les impacts locaux de reconversion si l'activité disparaît ou se transforme (raffineries par exemple). Les évolutions en matière de santé/sécurité au travail entraînées par ces transformations doivent également être prises en compte.

# ZOOM

## sur la sobriété

La décarbonation de l'énergie sera d'autant plus facilitée que la demande sera faible. Or, la réduction de cette demande est déterminée par deux facteurs : la démarche de sobriété, c'est-à-dire le questionnement des modes de vie, de consommation et de production afin de maîtriser la consommation de biens, d'énergie et de services et l'efficacité énergétique, qui permet, principalement grâce à la performance des équipements, de réduire la quantité d'énergie nécessaire à leur production (toutes choses égales par ailleurs). Mais le potentiel de l'efficacité énergétique se heurte à des limites physiques et surtout à celle des technologies disponibles.

On n'échappe donc pas à une interrogation sur la sobriété, d'autant que la crise de 2022 met en lumière la fragilité de nos sociétés aux coûts des énergies et aux difficultés d'approvisionnement en matériaux.

**S1 et S2 font le choix d'une mobilisation plus importante de la sobriété en changeant la logique de développement socio-économique sans exclure la technologie, qui a son rôle à jouer, mais sans être l'élément principal.** Conséquences : moins d'équipements à construire (infrastructures, bâtiments, production d'énergie) donc moins de matières à consommer (matériaux, métaux, énergie, eau) et moins de sols artificialisés, moins de transports donc moins de dépendance à une rupture de la chaîne logistique, plus de conservation de forêts et de sols donc plus de puits de carbone naturels, d'adaptation au changement climatique, de protection de la ressource en eau et de la biodiversité. Enfin, S1 et S2 privilégient

**Défi difficile donc, mais indispensable, car il n'est pas possible de consommer des biens matériels de façon infinie dans un monde fini<sup>40</sup> : cela mène inévitablement à une impasse.** Au moins trois voies doivent être développées conjointement pour cheminer vers la sobriété :

- **La première** est la chasse aux gaspillages, aux économies de matières, d'eau et d'énergie qui a l'avantage de ne pas toucher aux modes de vie et de faire des économies : isolation des bâtiments, réduction du gaspillage alimentaire, écoconduite, extinction des lumières ou ralentissement du chauffage dans les locaux inoccupés ou la nuit, écoconception, réparation et ré-emploi... Cette sobriété des petits gestes est rapide à mettre à œuvre et a montré son efficacité cet hiver 2022-2023, avec environ 10 % d'économie de gaz et d'électricité.
- **La deuxième** est de proposer les équipements et les infrastructures pour tester, donner à voir et rendre possibles des changements de pratiques : véhicules libre-service, aires de covoiturage, pistes cyclables, ateliers de réparation, mise à disposition de tutoriels, locaux/plateformes d'échanges ou d'acquisition de biens d'occasion, y compris pour les entreprises, des objets réparables, réutilisables ou réemployables...
- **La troisième**, plus complexe et plus longue dans ses effets, est la transformation des normes sociales et des imaginaires et des *business models* (écoconception généralisée, économie de la fonctionnalité).

les liens sociaux à l'accumulation de biens matériels, sachant que la population qui, aujourd'hui, n'accède pas à ses besoins de base (se nourrir, se loger, s'instruire, se soigner, se cultiver...) pourra consommer plus d'énergie,<sup>39</sup> alors que l'autre partie de la population devra en consommer moins.

**Beaucoup d'impacts sont donc largement positifs, sans compter que les performances économiques ne sont pas discriminantes et que la désirabilité n'est pas moindre que celle des autres scénarios.** Mais la sobriété heurte cependant le mode de pensée dominant de la culture consumériste du monde moderne. Elle est souvent perçue comme une privation et s'avère clivante : cela étant, ce qui semble être une privation pour une génération ou un individu donné peut au contraire apparaître comme une évidence pour un autre. Or, **la mise en œuvre à grande échelle de politiques de sobriété nécessite des transformations économiques et sociales rapides et fortes, qui peuvent rencontrer de fortes résistances.** S2 surmonte cette difficulté par la recherche d'un consensus social le plus large possible au travers d'une gouvernance ouverte, mais ceci ralentit le rythme de la transformation. S1, qui a des objectifs de sobriété beaucoup plus forts et plus rapides, doit inévitablement recourir en parallèle à la contrainte *via* la réglementation ou le rationnement *via* des quotas, ce qui impose un important effort d'explication et des compensations pour la faire accepter. La difficulté à y parvenir fait courir le risque de clivages forts, voire violents, au sein de la société.

<sup>39</sup> Voir également le rapport du GIEC, IPCC\_AR6\_WGIII\_SummaryForPolicymakers.pdf\_C10, page 44.

<sup>40</sup> « Quiconque croit que la croissance exponentielle peut continuer sans fin dans un monde fini, est soit un fou soit un économiste. » Kenneth BOULDING, économiste et philosophe Américain (1910 – 1993).

# LIMITES

## et perspectives

Cet exercice intègre des avancées analytiques dans un certain nombre de domaines jusque-là peu ou mal étudiés dans les prospectives du climat. Il contient également des limites, à la fois pour chaque secteur (détaillées dans les chapitres dédiés) et de façon transverse.

- **Une modélisation nécessairement théorique** : tout modèle est par définition une simplification de la réalité. Ceux utilisés dans cet exercice présentent des degrés de finesse variés, sans qu'il soit possible de quantifier les marges d'incertitude associées aux résultats des modélisations. Les résultats présentés ici doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur. L'ADEME propose dans cet exercice plusieurs archétypes de scénarios, qui présentent de manière volontairement contrastée des options économiques, techniques et de société pour atteindre la neutralité carbone, sans épuiser pour autant la diversité des futurs possibles qui pourront être choisis.
- Par ailleurs, les scénarios et les feuillets, sont fondés sur des hypothèses sous-jacentes volontairement fortes. De par leur gradation entre sobriété et innovation, ces scénarios illustrent des chemins types visant à faire réfléchir les décideurs et les citoyens sur le modèle de société qu'ils souhaitent promouvoir. Cet exercice conduit par l'ADEME est donc distinct de celui de la planification écologique mené par le Gouvernement.
- **L'absence de modélisation formelle de crises et de ruptures**, qu'elles soient économiques, environnementales ou systémiques. Des transformations fortes des systèmes sociaux pourraient plus facilement advenir dans un contexte de crise ou suite à une crise majeure qui jouerait ainsi un rôle d'accélérateur de changement.
- **Optimisation multicritère**. Nous avons fait le choix de construire les scénarios sur les deux seuls critères que sont l'énergie et les émissions de GES. Si d'autres impacts sont documentés, les scénarios ne sont pas conçus pour être optimisés dans une optique multicritère, notamment pour prendre en compte le coût économique de la transition. Or, une telle approche pourrait amener à revoir certaines trajectoires.

• **Biodiversité et écosystèmes**. Aucun chiffrage précis des impacts sur la biodiversité et les écosystèmes n'a pu être réalisé, en particulier par manque de déclinaison territoriale des scénarios.

• **Ressource en eau**. La question de l'usage de l'eau et des impacts sur la ressource et les milieux aquatiques n'a pas pu être étudiée de manière approfondie. Néanmoins, des réflexions ont été initiées avec des partenaires spécialisés pour approfondir ce sujet stratégique.

• **Territorialisation des scénarios**. L'intérêt est évident, notamment pour permettre un passage à l'action cohérent avec les contraintes inhérentes à chaque territoire. Le temps imparti n'a pas permis de concrétiser cet objectif, mais des travaux ont d'ores et déjà débuté.

• **Une société faite de diversité**. Les leviers explorés dans les scénarios expriment des moyennes pour l'ensemble des Français. Or, il y a besoin d'explorer, au-delà de ces moyennes, la façon dont les différents groupes sociaux, caractérisés par des normes, des pratiques et des ressources différentes, peuvent se saisir de ces leviers. Il en est de même pour les aspects sociaux et d'équité de la transition. En particulier sur les questions de répartition de la richesse et des inégalités, ou sur le rôle ou l'attractivité des territoires dans la transition.

• **Une connaissance encore imparfaite des leviers de sobriété et de puits technologiques**. La comparaison de scénarios construits sur des forces motrices très différentes peut laisser penser que les différents leviers considérés (sobriété, efficacité énergétique, nouvelles technologies...) bénéficient du même niveau d'expertise et retours d'expériences. Or, que ce soit dans le champ de la sobriété ou des puits technologiques, les connaissances sont bien moins matures que sur l'efficacité énergétique ou les énergies renouvelables, qui bénéficient d'études et recherches depuis plusieurs décennies désormais.

L'ensemble des documents ainsi que les différents supports de communication (vidéo, podcasts, récits imaginaires associés) sont disponibles sur : <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>

## SYNTHÈSE TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Cette nouvelle édition de la synthèse permet d'avoir une vision globale des principales conclusions à retenir de l'ensemble des travaux constituant Transition(s) 2050, à savoir le rapport complet de novembre 2021 et les 17 feuillets parus depuis cette date. Enrichie de près de 30 pages avec de nouveaux graphiques et une analyse des risques, cette synthèse donne suffisamment de détails au lecteur pour lui permettre de se questionner sur les enjeux à considérer pour arriver à la neutralité carbone en 2050 et agir en toute connaissance de cause.

Cet ouvrage est le résultat d'un travail de plus de quatre ans mené par l'ADEME, en interaction avec des partenaires extérieurs, afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique ni « la » bonne trajectoire, mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.

**Retrouvez les scénarios ADEME**  
en ligne sur [www.ademe.fr/les-futurs-en-transition](http://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition)

**Crédits photo:** ADEME, Getty Images, Unsplash, Shutterstock

**Illustrations:** Stéphane Kiehl

**Conception éditoriale et graphique:** bearideas

**Dépôt légal:** © ADEME Éditions, mars 2024



La version numérique de ce document est conforme aux normes d'accessibilité PDF/UA (ISO 14289-1), WCAG 2.1 niveau AA et RGAA 4.1 à l'exception des critères sur les couleurs. Son ergonomie permet aux personnes handicapées moteurs de naviguer à travers ce PDF à l'aide de commandes clavier. Accessible aux personnes déficientes visuelles, il a été balisé de façon à être retranscrit vocalement par les lecteurs d'écran, dans son intégralité, et ce à partir de n'importe quel support informatique.

Version e-accessible par  DocAxess

011628

