



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Synthèse





3

CONTEXTE ET OBJECTIFS

4

ENSEIGNEMENTS

7

MÉTHODE: COMMENT IMAGINER LE FUTUR ?

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

9

REGARD SUR LES QUATRE SCÉNARIOS NEUTRES EN CARBONE

- 10 SCÉNARIO 1
Génération frugale
- 14 SCÉNARIO 2
Coopérations territoriales
- 18 SCÉNARIO 3
Technologies vertes
- 22 SCÉNARIO 4
Pari réparateur
- 26 Descriptif des 4 scénarios

28

BILAN COMPARÉ DES 4 SCÉNARIOS

- 30 Principaux indicateurs
- 31 Bilan énergie
- 32 Bilan GES

33

ENSEIGNEMENTS SECTORIELS

- 33 Adaptation au changement climatique
- 33 Aménagement territorial et planification urbaine
- 33 Bâtiments résidentiels et tertiaires
- 34 Mobilité des voyageurs et transport de marchandises
- 35 Alimentation
- 36 Production agricole
- 36 Production forestière
- 37 Production industrielle
- 38 Mix gaz et hydrogène
- 39 Mix électrique
- 39 Froid et chaleur distribués via les réseaux urbains et hors réseaux (dont biomasse énergie)
- 40 Carburants liquides
- 40 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse
- 41 Déchets
- 41 Puits de carbone

42

LIMITES ET PERSPECTIVES

- 42 Limites
- 43 Feuilletons « Transition(s) 2050 » à venir



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 d'absorption (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 non seulement sur le climat, mais également sur les écosystèmes et 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 en amont des délibérations collectives sur la future Stratégie Française Énergie-Climat (SFEC) et à la veille des débats de l'élection présidentielle de 2022.**

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. 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 **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 environnementaux sont plus pressants que jamais : la qualité et la disponibilité de la ressource en eau, la destruction et la perte de qualité des sols, l'érosion de la biodiversité, etc. Le choix de la stratégie française devra être justifié au regard de l'ensemble des enjeux écologiques, sociaux et économiques.

Par rapport aux « Visions ADEME » passées (publication de 2012 et actualisation en 2017), ce travail présente plusieurs nouveautés :

- la réalisation de **plusieurs scénarios** contrastés d'atteinte de la **neutralité carbone pour la France en 2050** (avec évaluation de l'empreinte carbone dans un second temps) et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ;
- une **comparaison multicritère de ces scénarios**, notamment technico-économiques, sociaux et environnementaux, des conditions de leur réalisation et de leurs conséquences ;
- une **rétrospective, un état des lieux et une trajectoire tendancielle** jusqu'en 2050 à laquelle comparer les scénarios.

C'est pour faciliter le passage à l'action que l'ADEME a réalisé cet exercice de prospective inédit, reposant sur deux ans de travaux d'élaboration et 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 deux webinaires en mai 2020 et janvier 2021 qui ont réuni près de 500 participants chacun afin d'échanger sur les résultats intermédiaires.

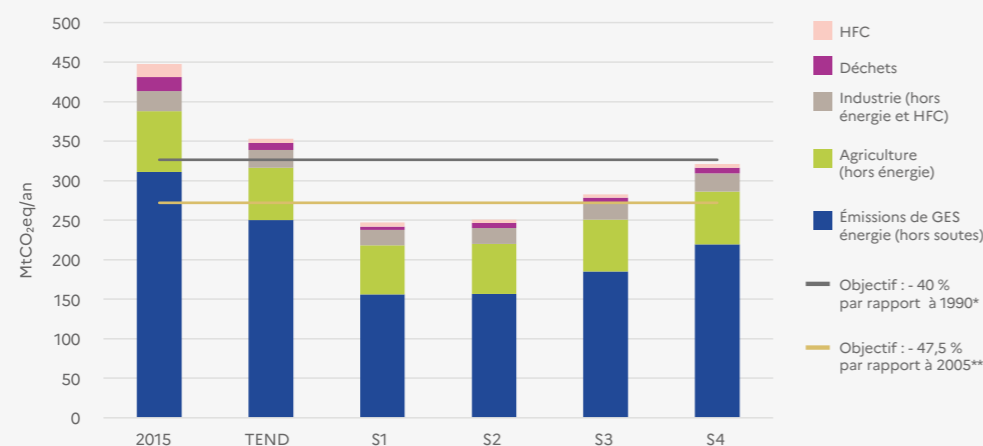
01

L'ADEME présente quatre voies qui pourraient permettre d'atteindre la neutralité carbone de la France en 2050, chacune dotée de sa propre cohérence interne. Mais toutes sont difficiles et nécessitent que les orientations collectives soient discutées et décidées rapidement pour accélérer la transition : certains choix, à plus ou moins court terme, peuvent être incompatibles avec l'orientation de tel ou tel scénario. Quelle que soit la voie choisie, parmi ces quatre ou d'autres menant à la neutralité carbone, **il faut veiller à la cohérence d'ensemble des choix réalisés, grâce à une planification orchestrée des transformations, associant État, territoires, acteurs économiques et citoyens.**

02

Atteindre la neutralité repose sur des paris humains ou technologiques forts dans tous les cas mais qui diffèrent selon les scénarios : régulation de la demande, changement de comportement, déploiement de technologies dans tous les secteurs... Ces hypothèses de ruptures sont des conditions de réalisation des scénarios. En particulier le scénario « S1 : Génération frugale » présente une mutation sociale rapide qui induit un risque fort quant à son acceptation et le scénario « S4 : Pari réparateur » comporte un pari risqué sur les technologies de captage et stockage de CO₂, BECCS et DACCS¹, encore peu développées à ce jour. S1 et S4 apparaissent donc comme des scénarios limites dans cet univers des possibles.

Graphique 1 Émissions de GES en 2030



* Objectif inscrit dans la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015.
 ** L'objectif de baisse des émissions françaises de - 47,5 % en 2030 par rapport à 2005 correspond à une cible de - 50 % par rapport à 1990. Il est envisagé dans le paquet *Fit for 55* pour la révision du règlement de partage de l'effort (ESR).

- 1 Outre la réduction des émissions industrielles par des technologies de CCS (*carbon capture and storage*), les puits technologiques employés sont :
- le recours à du CCS sur des unités fonctionnant à la biomasse (bioraffinerie ou cogénération bois), BECCS (*biomass energy CCS*) ;
 - le recours nécessaire à du CCS sur air ambiant (*direct air carbon capture and storage* [DACCS]).

03

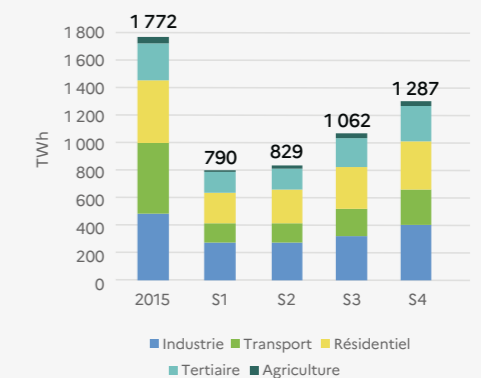
Pour tous les scénarios, il est impératif d'agir rapidement : l'ampleur des transformations socio-techniques à mener est telle que ces dernières mettront du temps à produire leurs effets. Il faut entreprendre dès cette décennie la planification et la transformation profonde des modes de consommation, de l'aménagement du territoire, des technologies et des investissements productifs. À titre d'exemple, tous les scénarios nécessitent une augmentation des capacités de production de biométhane de plus de 3 TWh/an (soit 150 nouveaux méthaniseurs/an environ), ainsi qu'une très forte croissance des capacités électriques des énergies renouvelables (EnR) (+ 5,5 à + 8,9 GW/an en moyenne sur la période 2020-2050, selon les scénarios). Cependant, ces efforts mettront du temps. Ainsi, les scénarios « S3 : Technologies vertes » et « S4 : Pari réparateur », qui s'appuient surtout sur les développements technologiques, présentent des émissions significativement plus élevées en 2030 que les scénarios « S1 : Génération frugale » et « S2 : Coopérations territoriales », qui mobilisent davantage le levier de la sobriété et plus largement, de la régulation de la demande (Graphique 1).

04

La réduction de la demande d'énergie est le facteur clé pour atteindre la neutralité carbone : de - 23 % (S4) à - 55 % (S1) pour la demande finale en 2050 par rapport à 2015 suivant les scénarios (Tableau 4). Cela nécessite cependant une modification radicale des usages et des techniques de l'habitat, des mobilités ainsi qu'une adaptation profonde du système productif agricole et industriel (Graphique 2). La réduction plus (S1) ou moins (S4) forte de la consommation de ressources naturelles, notamment grâce à l'économie circulaire, participe directement à cette baisse de la demande d'énergie. Elle se matérialise par ailleurs par la quantité de déchets collectés qui augmente de S1 à S4. Elle nécessite de transformer les imaginaires et les pratiques de consommation pour engager un cercle vertueux de sobriété.

Graphique 2 Consommation finale par secteur

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



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

05

L'industrie va devoir se transformer non seulement pour s'adapter à une demande en profonde mutation (baisse des volumes produits, exigences de durabilité...) mais également pour décarboner sa production. Cela nécessitera des plans d'investissements de grande ampleur (décarbonation des mix énergétiques, efficacité énergétique et matière, captage et utilisation ou stockage du CO₂...), tant pour la massification de technologies matures que pour l'émergence d'innovations de rupture dans les procédés industriels et pour le déploiement des infrastructures nécessaires. **Une compréhension et construction de ces transformations par l'ensemble de la société** (citoyens, salariés) sera primordiale pour fédérer autour de cette « nouvelle révolution industrielle bas carbone ».

06

Le vivant est l'un des atouts principaux de cette transition. 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 de la France repose sur trois leviers spécifiques et interdépendants : le potentiel de réduction des GES, le potentiel de stockage naturel de carbone et le potentiel de mobilisation de biomasse renouvelable substituable aux ressources fossiles. Les scénarios de l'ADEME présentent quatre équilibres possibles et contrastés entre services attendus (alimentation, stockage du carbone, biomasse...), impacts des systèmes de production et aménagement du territoire (Tableau 1).

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 ?

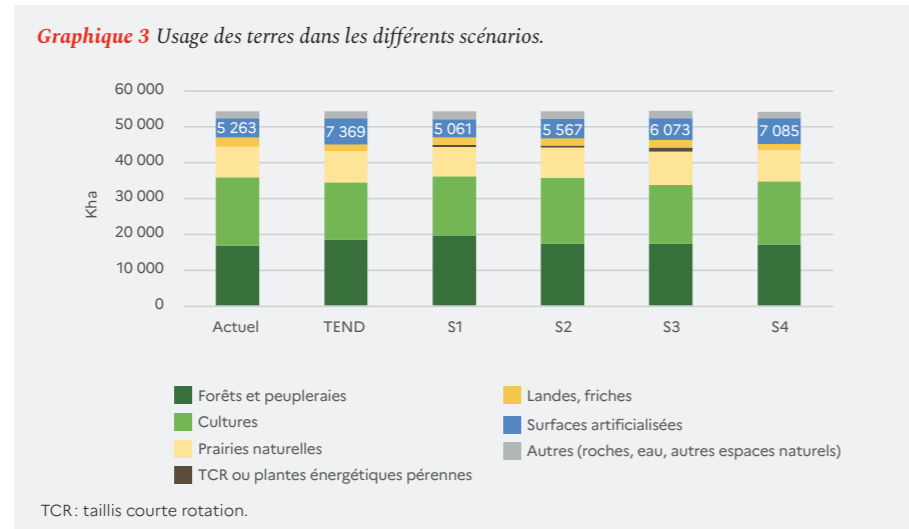
07

L'adaptation des forêts et de l'agriculture devient donc 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 résilience est donc un enjeu absolument prioritaire de la lutte contre le changement climatique, notamment pour préserver les stocks de carbone et les capacités de production de biomasse.

08

La pression sur les ressources naturelles est très différente d'un scénario à l'autre. C'est particulièrement le cas pour l'eau d'irrigation ou les matériaux de construction, dont les volumes consommés varient d'un facteur 2 entre le scénario le moins consommateur et le plus consommateur. Même constat sur les sols artificialisés, en légère baisse par rapport à aujourd'hui pour S1, mais en hausse de +40% pour S4² (Graphique 3). Par ailleurs, le recyclage ne pouvant pas combler le déficit de matière, il est nécessaire d'économiser la matière le plus possible.

Graphique 3 Usage des terres dans les différents scénarios.



09

Dans tous les scénarios étudiés, l'approvisionnement énergétique repose à plus de 70% sur les énergies renouvelables en 2050. L'électricité est, dans tous les cas, le vecteur énergétique principal (entre 42 et 56% suivant les scénarios), mais sa production décarbonée ne peut pas être un prétexte à son gaspillage, afin de limiter la pression sur les ressources. Le mix varie entre les scénarios, en fonction du niveau de consommation mais aussi des choix techniques, qui s'appuient sur un développement plus ou moins dynamique des EnR et/ou sur le nouveau nucléaire (S3 et S4). Le gaz reste indispensable dans tous les scénarios, avec un niveau d'approvisionnement allant de 148 TWh (S1) à 371 TWh (S4) et un potentiel de décarbonation (biogaz, gaz de synthèse) qui peut être très élevé dans S1, S2 et S3 (environ 85%, contre 51% pour S4).

Tableau 2 Part d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie

	2030	2050
TEND	26%	43%
S1	34%	88%
S2	32%	86%
S3	33%	81 à 87%***
S4	29%	70%
Obj. LTECV*	32%	-
Obj. LEC** 2019	33%	-

* Objectifs inscrits dans la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015.
 ** Objectifs inscrits dans la loi Énergie-Climat (LEC) du 8 novembre 2019.
 *** Valeurs dépendant des choix de politiques industrielles de développement des filières éolien flottant ou nucléaire.

Quatre scénarios systémiques de société et un tendancier

Les quatre scénarios de neutralité carbone sont inspirés des scénarios du GIEC (P1 à P4 du rapport 1.5 °C)³. 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 tendancier et les quatre scénarios sont réalisés à l'échelle de la France métropolitaine. Des exercices spécifiques à l'outre-mer seront réalisés ultérieurement.

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. Nous reprenons donc la traduction qui en est faite dans la Loi Énergie-Climat de 2019. 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 des gaz à effet de serre.

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 technico-économique, avec des hypothèses, secteur par secteur. Chacun des quatre scénarios est ainsi constitué par un corpus d'hypothèses interdépendantes permettant d'assurer une cohérence du système énergie-ressource-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 suivant récapitule les grandes hypothèses démographiques, climatiques et économiques utilisées en arrière-plan des scénarios.

Tableau 3 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*)				
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)				

³ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf

⁴ Les hypothèses de prix du scénario de référence de la Commission sont en page 33 du rapport, qui est public: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219903975>

² Incompatible avec la loi climat et résilience 2021, qui prévoit en 2050 une absence de toute artificialisation nette des sols.

Le scénario tendanciel (TEND) de l'ADEME correspond à une prolongation des grandes tendances actuelles. Il 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, apportent les effets espérés.

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 +131 MtCO₂eq. La neutralité carbone n'est donc pas atteinte dans ce scénario de prolongation des tendances actuelles, 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...),

(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, tous nos scénarios connaissent les mêmes aléas climatiques. Ils produisent cependant des stratégies d'adaptation 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.



REGARD

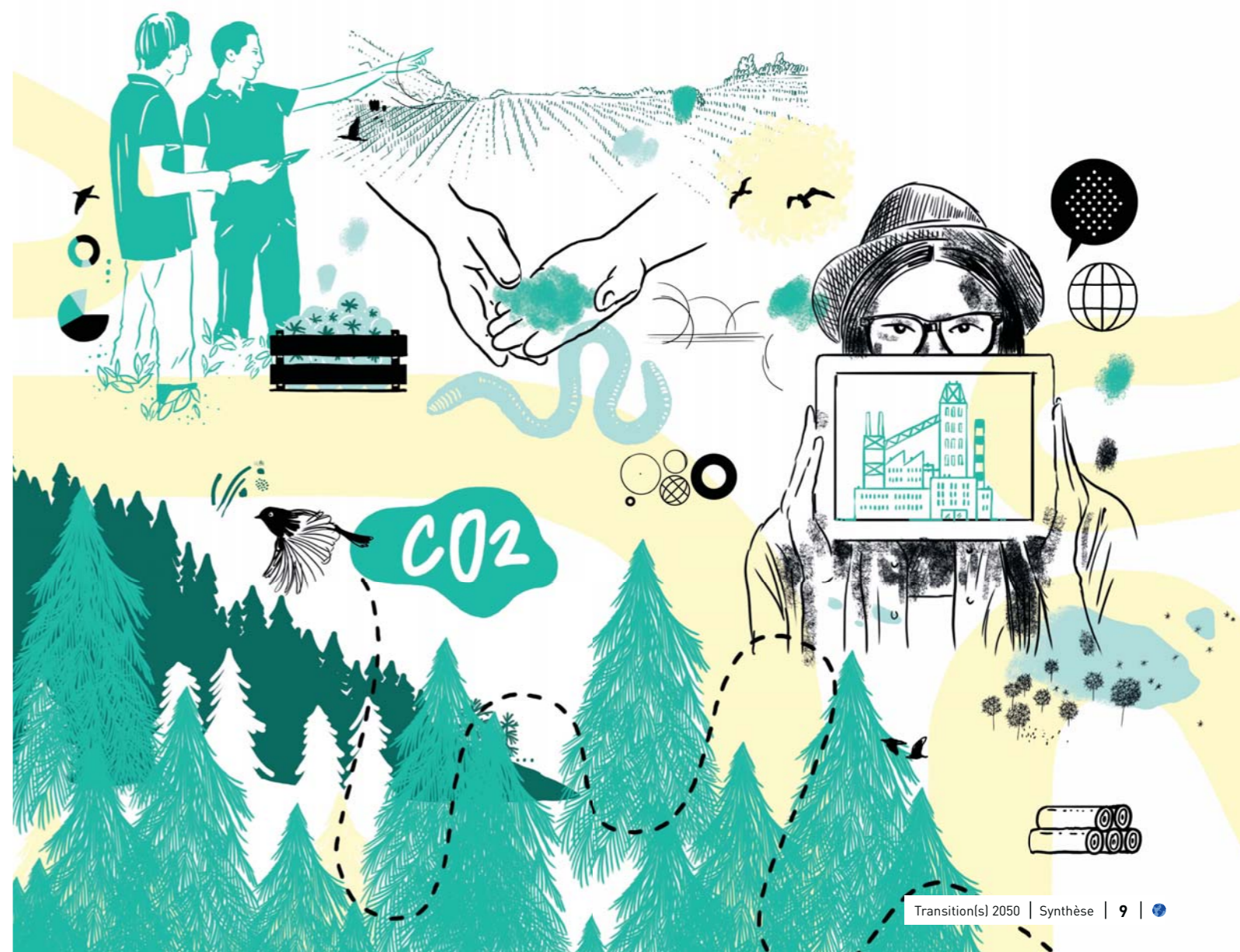
sur les quatre scénarios neutres en carbone

Dans ce chapitre, les quatre scénarios de neutralité carbone produits par l'ADEME sont introduits par le récit qualitatif de ce que serait la société en 2050, suivant différents axes structurants, décrivant les modes de vie, le modèle économique, l'évolution technologique, la gouvernance ou le rôle des territoires. La stratégie d'adaptation au changement climatique est ensuite décrite. Puis sont présentées les principales transformations réalisées dans les quatre grands systèmes qui structurent les modes

de production et de consommation, et qui sont stratégiques pour l'atteinte de la neutralité carbone :

- bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols ;
- aménagement du territoire-bâtimens-mobilité ;
- industrie-matériaux-économie circulaire ;
- systèmes énergétiques décarbonés.

Le bilan des émissions de GES et des absorptions par les puits est enfin dressé.



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...), qui doivent faire l'objet de débats pour faciliter leur compréhension et leur appropriation. La sobriété se fait par la réduction volontaire de la demande en énergie, matières et ressources grâce à une consommation des biens et services au plus près des besoins : évolution de l'assiette, limites de vitesse sur route et limitation des vols intérieurs, 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 voire violents au sein de la société. Par conséquent, les mesures sont autant que possible adoptées en priorisant une vision égalitaire 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 elle contribue aux capacités de résilience climatique : nature en ville et ré-en-sauvagement 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 au *high-tech*) et 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 des produits et services permet de mieux absorber des aléas climatiques directs ou leurs impacts socio-économiques.

02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

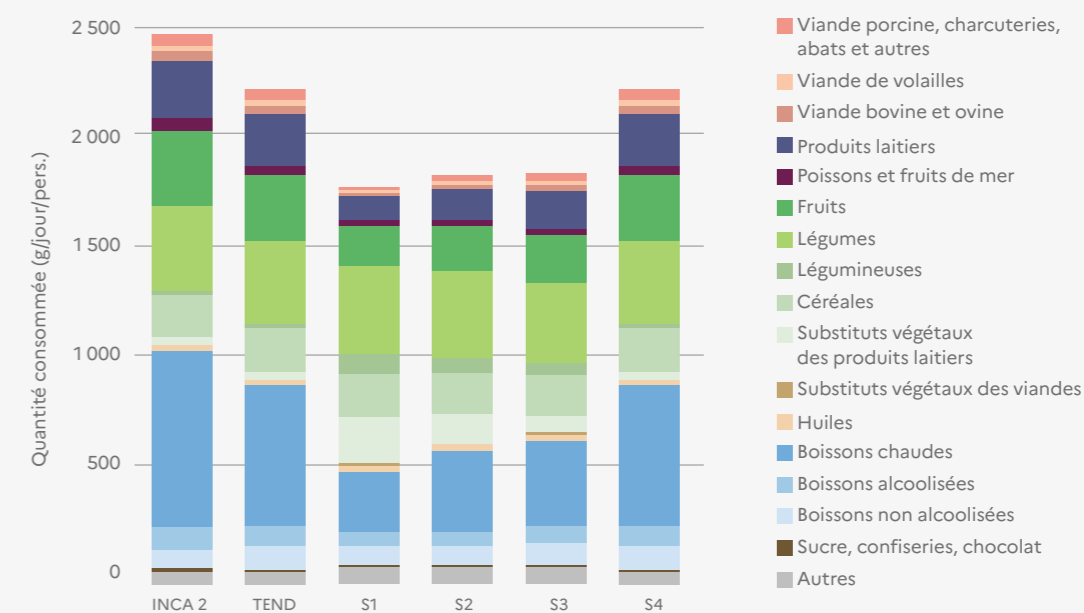
Profonde transformation des habitudes alimentaires et mobilisation raisonnée de la ressource forestière

L'évolution des systèmes agricoles (70% de production à très bas niveau d'intrants) suit celle des régimes alimentaires, à savoir une division par 3 des quantités de viande avec des cheptels plus extensifs mais moins nombreux (*Graphique 4*). 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 matières du bois (sciage, panneaux et bâtiments) permet de satisfaire les besoins avec une collecte de bois en forêt qui est restée constante.

Enfin, la logique de préservation maximale des espaces naturels induit, de manière indirecte, un fort développement et une meilleure pérennisation des puits biologiques de carbone sous forme de forêts.

Graphique 4 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, 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 tendanciel, 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). Les grandes villes sont délaissées au profit 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) 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, 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 poussent à une baisse de 45% des trafics de marchandises nationaux. Les émissions directes de GES du secteur des mobilités baissent ainsi de 91%.

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.

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



05. Systèmes énergétiques décarbonés

Baisse de la demande énergétique globale mais 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 cultures énergétiques dédiées.

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 CO₂ 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 finale⁵ est composé de 301 TWh d'électricité, 265 TWh de chaleur, 110 TWh de gaz et 70 TWh de combustibles liquides.

⁵ 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.

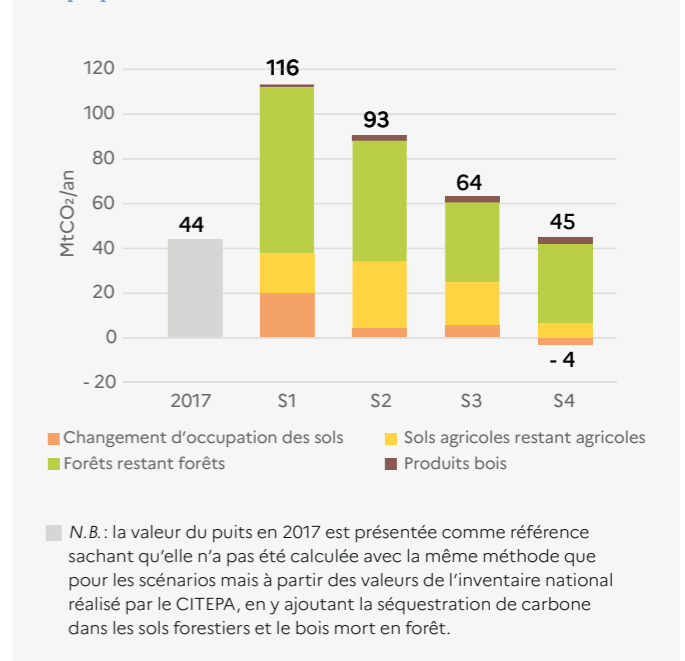
06. GES et puits de carbone

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). Ceux-ci sont significativement plus développés qu'aujourd'hui (de l'ordre de 80 MtCO₂eq / an pour la seule forêt et 116 MtCO₂eq au total contre 44 MtCO₂eq 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 5).

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, voire d'avoir un stockage positif assurantiel en cas d'impacts négatifs du changement climatique. Le bilan net des émissions est de - 42MtCO₂eq.

Graphique 5 Puits naturels de carbone en 2050 dans la biomasse et les sols



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. 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.

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 des pratiques culturales favorables.

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, évolutions graduelles mais profondes des modes de vie

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.

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 m² par habitant).

La rénovation énergétique accélère très sérieusement : 80% des logements sont rénovés à un niveau au moins BBC (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, vélomobiles, 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.

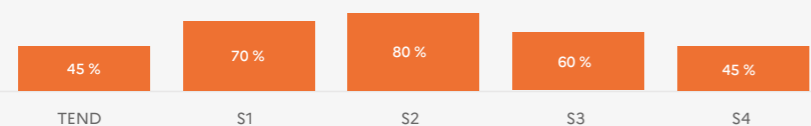
Le recyclage est très développé (Graphique 6), mais les quantités totales à recycler sont réduites du fait de l'efficacité des actions d'économie circulaire. Les demandes en matières premières de récupération et en énergie parviennent cependant à un équilibre, ce qui entraîne un fort taux de valorisation (95%) et une quasi-disparition des centres de stockage.

En outre, un important effort de réindustrialisation (amélioration des soldes commerciaux en volume physique) est mené dans des secteurs ciblés dont la production est décarbonée. Néanmoins, la production en volume physique recule dans la plupart des secteurs en raison des évolutions de la demande.

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

Graphique 6 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)



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.

Le mix énergétique reste dominé par la biomasse et l'électricité essentiellement décarbonée.

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 finale⁶ est composé de 343 TWh d'électricité, 260 TWh de chaleur, 126 TWh de gaz et 42 TWh de combustibles liquides.

⁶ 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 CO₂ (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 MtCO₂.

Le captage et le stockage de CO₂ est déployé sur quelques procédés aux émissions incompressibles comme les cimenteries du Nord-Est de la France afin de les capter et les stocker en Mer du Nord, à hauteur de 3 MtCO₂ en 2050.

Les émissions totales de GES de 68 MtCO₂eq sont ainsi réduites en bilan net à - 28 MtCO₂eq, ce qui constitue une assurance si le changement climatique impacte négativement les forêts et les sols.

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 comportement vers plus de sobriété. De fait, les manières d'habiter, de se déplacer ou de travailler ressemblent beaucoup à celles d'aujourd'hui avec cependant quelques différences. Par exemple, l'alimentation est un peu moins carnée et plus équilibrée. La mobilité individuelle est prédominante mais avec des véhicules plus légers et électrifiés. L'industrie produit un peu moins en volume mais est très décarbonée.

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 CO₂ pour le stocker en sous-sol.

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...).



02. Bioéconomie-alimentation-agriculture-forêt-sols

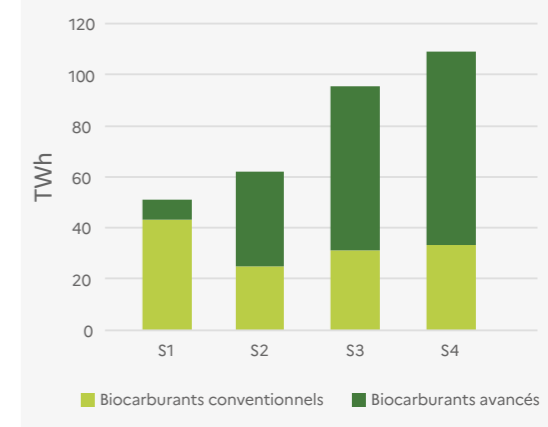
Une consommation de biomasse maximale pour des usages multiples

Les régimes alimentaires évoluent significativement 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'électrocarburants⁷, 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 7).

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 7 Production de biocarburants conventionnels et avancés dans chaque scénario en 2050



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

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 8) qui entraîne une demande de transport importante. 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.

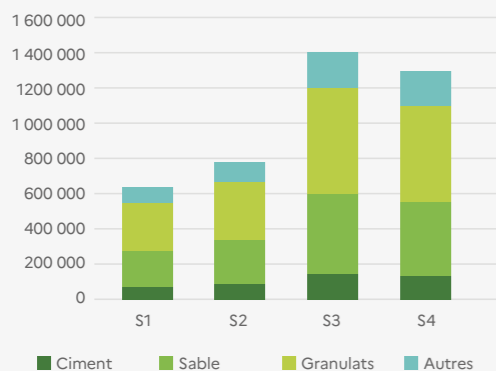
L'innovation technique permet une meilleure efficacité des équipements. Les rénovations touchent l'ensemble des postes de travaux mais sans s'inscrire dans une trajectoire Bâtiment Basse Consommation (BBC) (rénovation par geste plutôt que globale). Dans le tertiaire, la rénovation énergétique du parc 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 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 8 Consommation de matériaux pour la construction neuve (résidentiel, EPHAD, commerce, hôtel, enseignement et bureau) Milliers de tonnes cumulées entre 2015 et 2050



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

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.

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 géologiquement en 2050 (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, 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 (Graphique 9). 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.

Le mix de la consommation d'énergie finale⁸ est composé de 517 TWh d'électricité, 290 TWh de chaleur, 161 TWh de gaz et 36 TWh de combustibles liquides.

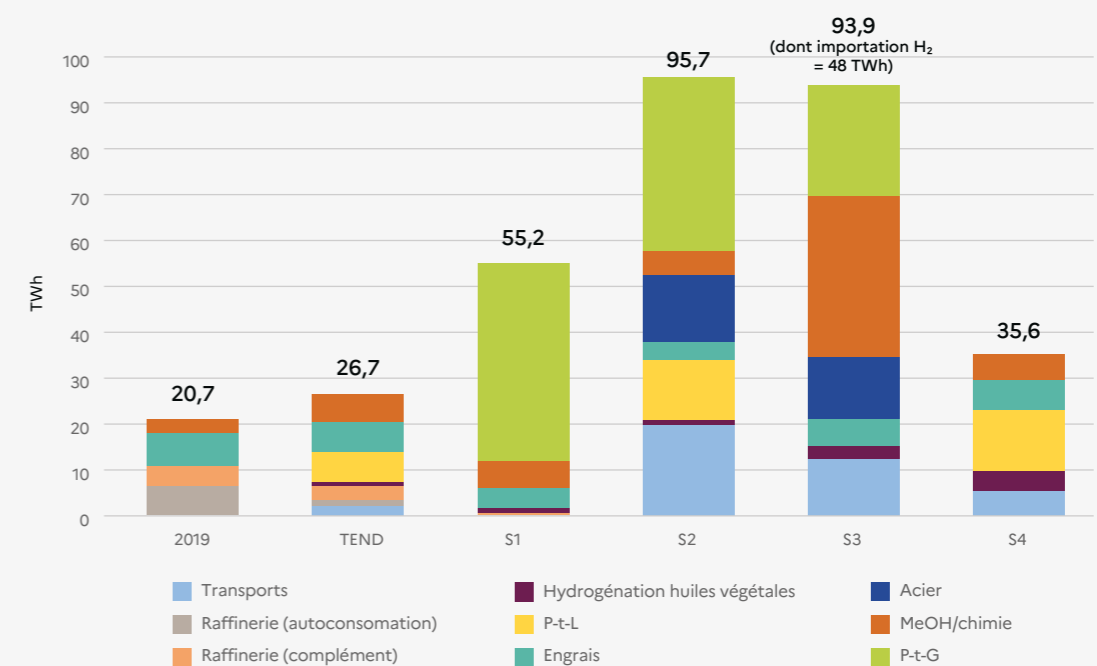
06. GES et puits de carbone

Recours au captage et au stockage de CO₂ (CCS) sur des unités fonctionnant à la biomasse

Les émissions de GES s'élèvent à 85 MtCO₂. 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 MtCO₂/an et le recours au CCS sur les unités industrielles et les UIOM (11 MtCO₂/an) ne suffisent pas.

Ce scénario 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. 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 CO₂, permet de compenser 21 MtCO₂/an.

Graphique 9 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.

8 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.

SCÉNARIO 4

Pari réparateur

LA SOCIÉTÉ EN 2050

Les modes de vie du début du XXI^e siècle sont sauvegardés. 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 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 et du stockage du CO₂ dans l'air ambiant qui sont à un stade expérimental en 2021 et pour lesquels aucune étude ne permet de savoir s'ils seront déployables 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

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 les hommes devient un objectif de résilience. Les défis écologiques sont gérés par des solutions ciblées et technocentrées. 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

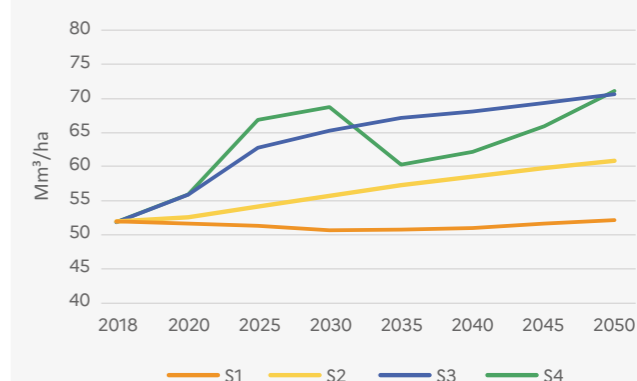
Des leviers technologiques au service de filières productives et spécialisées

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 10*).

Graphique 10 Récolte de bois en forêt dans les différents scénarios



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 et de sécurité. 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 (Bâtiment Basse Consommation 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 m² par habitant contre 15 m² 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 aérien 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 CO₂, 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 CO₂ (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.

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.

Le scénario 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 (44TWh de gaz renouvelable ou décarboné) et de porter à 51% le niveau global de décarbonation du gaz.

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 CO₂ (CCS) dans la chimie et dans l'air ambiant (DACCS) en défaveur du *power-to-methane*.

Le mix de la consommation d'énergie finale⁹ est composé de 709 TWh d'électricité, 271 TWh de chaleur, 270 TWh de gaz et 73 TWh de combustibles liquides.



06. GES et puits de carbone

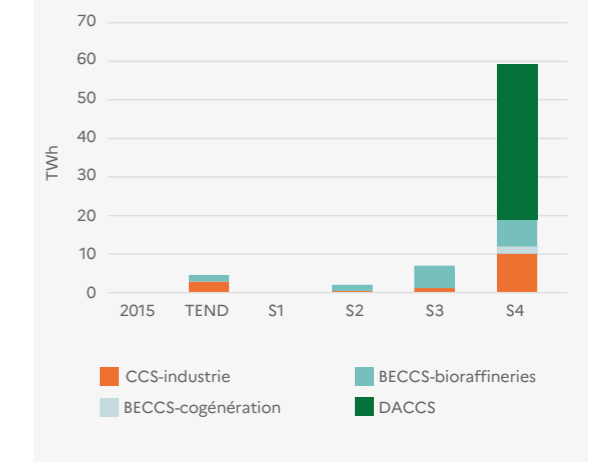
Nécessaire développement des puits technologiques

Ce scénario présente le niveau d'émissions le plus élevé (135 MtCO₂/an) et le puits naturel le plus faible (41 MtCO₂/an). Le rythme d'artificialisation est maintenu par rapport à l'actuel, la tendance au retournement des prairies au profit des céréales se poursuit.

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

- fort développement du CCS dans l'industrie (41 MtCO₂/an) sur tout le territoire grâce au développement des infrastructures nécessaires : canalisations de transport et sites de stockage géologique de CO₂ 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 CO₂ (BECCS) (29 MtCO₂/an);
- mise en œuvre du captage et du stockage de CO₂ dans l'air ambiant (DACCS) à hauteur de 27 MtCO₂/an. Cela se traduit par une très forte consommation énergétique de 59 TWh/an soit 6% de la consommation d'électricité (Graphique 11).

Graphique 11 Consommation d'électricité associée au CCS et aux puits de carbone en 2050 selon les scénarios



⁹ 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.



S1 GÉNÉRATION FRUGALE








S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES



S3 TECHNOLOGIES VERTES






S4 PARI RÉPARATEUR

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

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

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

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

comparé des 4 scénarios

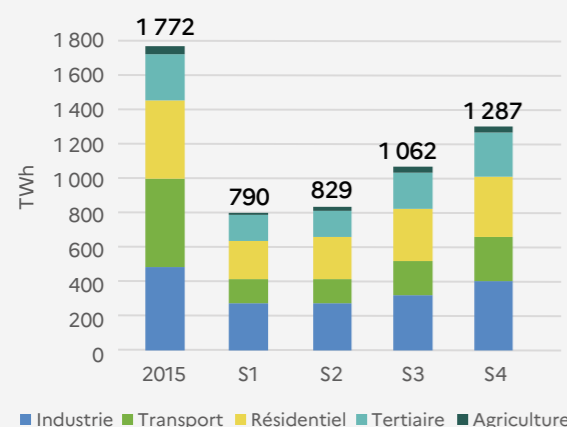
S1 Génération frugale | S2 Coopérations territoriales | S3 Technologies vertes | S4 Pari réparateur

ÉNERGIE

4 mix énergétiques variés pour 2050

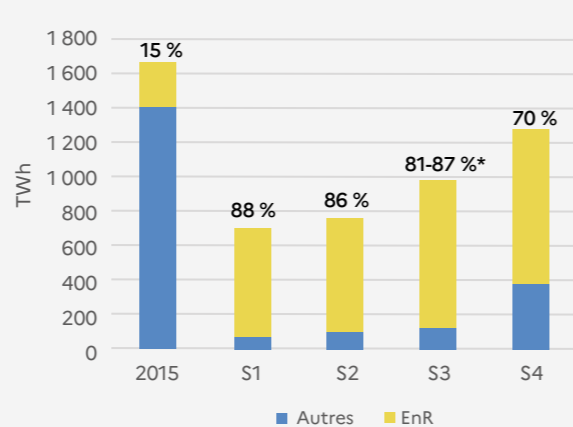
UNE DEMANDE D'ÉNERGIE À LA BAISSÉ

Consommation finale d'énergie par secteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)



PLUS DE 70% D'ENR DANS TOUS LES SCÉNARIOS

Consommation d'énergie et part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2015 et 2050



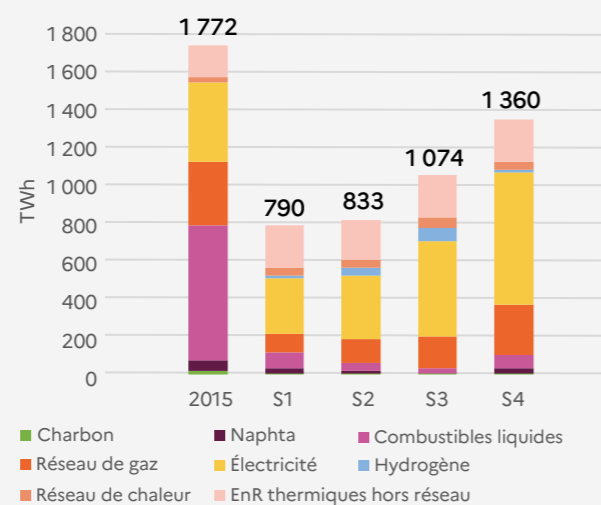
* Valeurs dépendant des choix de politiques industrielles de développement de l'éolien flottant ou du nucléaire.

UNE PART CROISSANTE DE L'ÉLECTRICITÉ

QUASI DISPARITION DES ÉNERGIES FOSSILES

UN VECTEUR GAZ QUI CONSERVE UN TALON DE CONSOMMATION

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



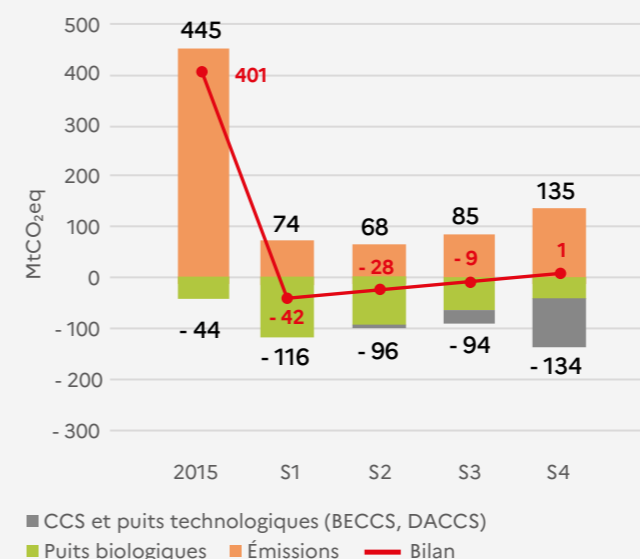
N.B. : la consommation d'énergie finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques ou non énergétique comme l'hydrogène. À titre d'illustration, la consommation d'électricité (non représentée sur ce graphique) utilisée pour fabriquer 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.

CLIMAT

Le rôle majeur des puits biologiques pour l'atteinte de la neutralité en 2050

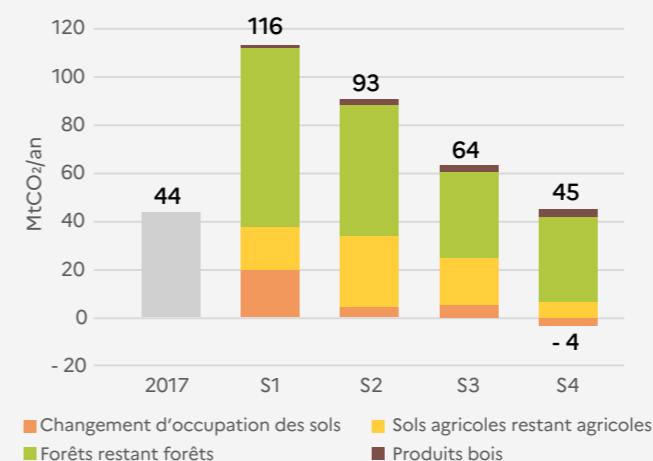
QUATRE SCÉNARIOS NEUTRES EN 2050, AVEC UN RECOURS PLUS OU MOINS IMPORTANT AUX PUIITS DE CARBONE

Bilan des émissions et des puits de CO₂ en 2015 et 2050



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

Puits naturels de carbone dans la biomasse et les sols en 2017 et 2050



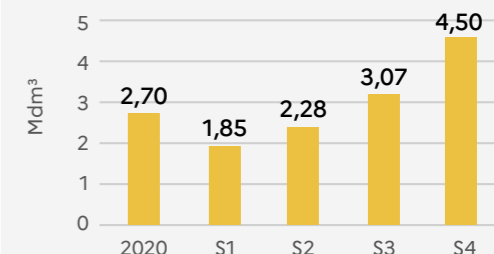
N.B. : la valeur du puits en 2017 est présentée comme référence sachant qu'elle n'a pas été calculée avec la même méthode que pour les scénarios mais à partir des valeurs de l'inventaire national réalisé par le CITEPA, en y ajoutant la séquestration de carbone dans les sols forestiers et le bois mort en forêt.

RESSOURCES

Une pression sur les ressources contrastée

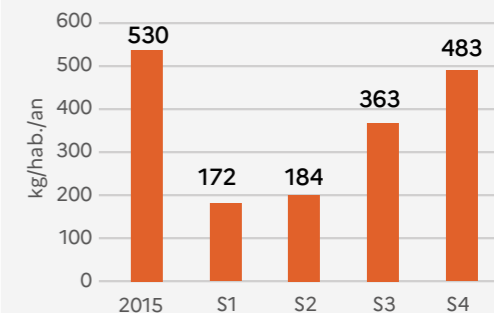
2 SCÉNARIOS LIMITENT LE RECOURS À L'IRRIGATION

Besoin en eau pour l'irrigation en 2020 et 2050



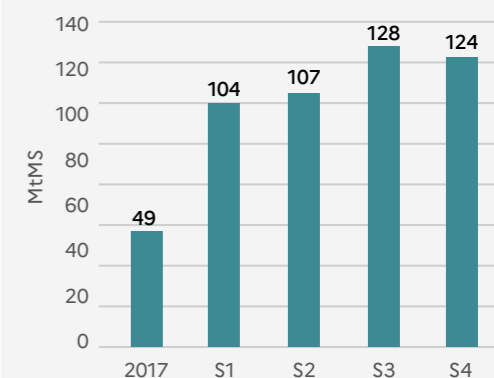
MOINS DE DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS

Déchets ménagers et assimilés collectés en 2015 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



Principaux indicateurs

Tableau 4 Valeurs de quelques indicateurs en 2015 et en 2050

	Indicateurs	2015	S1	S2	S3	S4
ÉNERGIE	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 %
CLIMAT	Quantités de GES émis Métropole hors UTCATF* (MtCO ₂ 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 ₂ eq)	- 44	- 116	- 93	- 64	- 41
	Quantités de GES stockés par les CCS sur unités industrielles (MtCO ₂ eq)	0	0	- 2	- 9	- 37
	Quantités de GES stockés par BECCS (MtCO ₂ eq)	0	0	- 1	- 21	- 29
	Quantités de GES stockés par DACCS (MtCO ₂ eq)	0	0	0	0	- 27
	Bilan net de GES** (MtCO ₂ eq)	401	- 42	- 28	- 9	1
RESSOURCES	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 ³)	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
	Surface artificialisée (Milliers ha) ¹⁰	5 263 (2020)	5 061	5 567	6 073	7 085
	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

* 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 MtCO₂eq) qui s'ajoute à l'inventaire officiel du secteur UTCATF pour la France (- 35 MtCO₂eq).

*** Millions de tonnes de matière sèche.

¹⁰ Indicateur issu des travaux de modélisation de la production agricole; données de base: surfaces issues de l'enquête TERUTI-LUCAS. Il sera complété pour les domaines du logement, des services publics, des activités industrielles, commerciales, tertiaires, logistiques et agricoles, des infrastructures de mobilité et de la production d'énergie dans le feuillet dédié à l'usage des terres et la qualité des sols qui paraîtra au premier trimestre 2022.

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 finale, celle-ci est inférieure de 23% (dans S4) à 55% (dans S1) par rapport à 2015, avec usages non énergétiques et hors soutes internationales. 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 sont supérieures à 45% dans S1 et S2 alors qu'elles sont d'environ 16% seulement dans S4 (Graphique 12).

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);
- les énergies renouvelables distribuées hors réseau (bois énergie, biocarburant, chaleur renouvelable issues 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 par rapport à aujourd'hui (27%): elle représente entre 42% (S1) et 56% (S4) de la consommation finale des

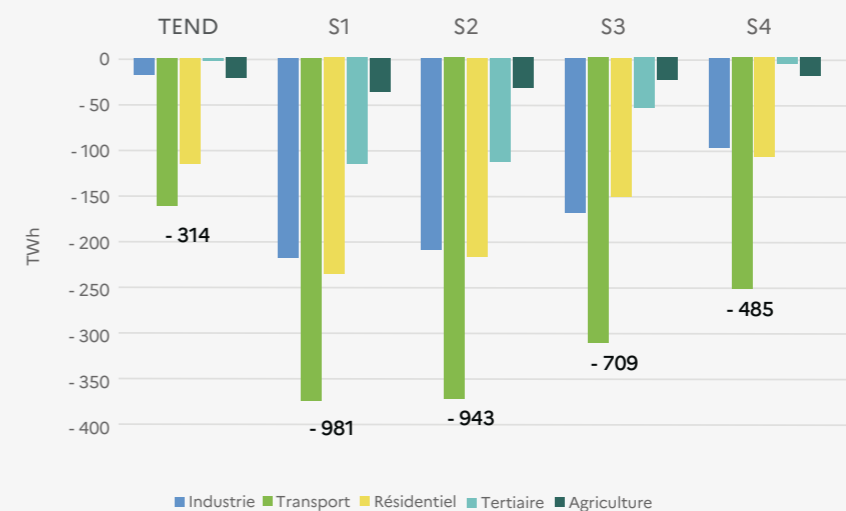
usages énergétiques en 2050. Mais cette augmentation de la part relative n'aboutit pas nécessairement à une hausse de la consommation totale d'électricité en valeur absolue en 2050, y compris en tenant compte de l'électricité utilisée pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques finaux comme l'hydrogène. 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%), augmente de près de 30% dans S3 et de 65% dans S4.

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 couvrent de 70% (S4) à 88% (S1) en 2050.

Graphique 12 Différence de consommation finale d'énergie des secteurs en 2050 par rapport à 2015 (avec usages non énergétiques hors consommation des puits technologiques et hors soutes internationales)



Bilan GES

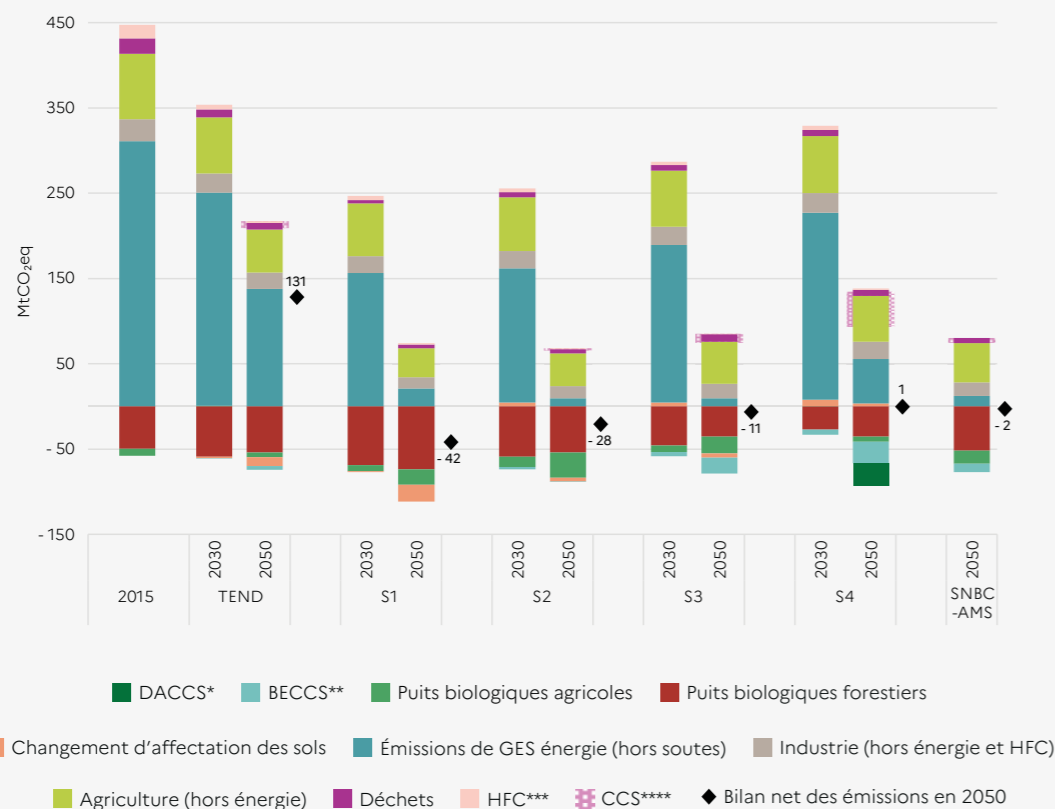
Le bilan des émissions et de la séquestration des GES montre que dans les quatre scénarios, les émissions nettes annuelles sont annulées en 2050 grâce à leur réduction drastique et à une combinaison de puits naturels et de puits technologiques. Tous les scénarios présentent également un talon d'émissions 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).

Les scénarios se distinguent par la composition et le niveau du talon d'émissions résiduelles en 2050, ainsi que par la composition et le niveau des sources de séquestration de GES. 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 MtCO₂ par an. En revanche, la plus

grande exploitation des forêts et la moindre évolution des régimes alimentaires et de la production agricole dans S3 et S4, associées à une forte demande, limitent la capacité des puits biologiques à respectivement ~ 60 et ~ 40 MtCO₂ et nécessitent le développement rapide de solutions technologiques de captage du CO₂:

- dans tous les scénarios sauf S1, via la réduction des émissions industrielles par des technologies de CCS ;
- dans S2 (très faiblement), S3 et S4, via le recours à du CCS sur des unités fonctionnant à la biomasse (bioraffineries ou cogénération bois, BECCS) ;
- dans S4 par le recours nécessaire à du CCS sur air ambiant (DACCS) (*Graphique 13*).

Graphique 13 Bilan des émissions et du captage des GES en 2030 et 2050



Note de lecture : les émissions sont représentées positivement et les puits négativement en dessous de l'axe des abscisses. Mais la contribution des technologies de CCS au bilan est considérée comme une réduction d'émissions et non comme un puits. On la visualise négativement dans la partie supérieure du graphique. Les émissions non énergétiques de l'agriculture sont des émissions de CH₄, N₂O et CO₂. Les autres émissions sont des GES issus des procédés industriels, de l'incinération et du stockage des déchets.

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



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. Ces questionnements, intégrés dans les chapitres sectoriels, exigent cependant que l'on approfondisse encore les connaissances sur les impacts pour rendre compte de la complexité des phénomènes en jeu. Au global,

le changement climatique est intrinsèquement lié à la préservation de la biodiversité. Traiter séparément les deux sujets risque de compromettre notre capacité à stopper avec succès le changement climatique tout en préservant les écosystèmes. Cet enjeu se décline sous différents axes : lutte contre l'artificialisation des sols, gestion de l'eau, aménagement, modes de vie... mais c'est finalement la question de notre rapport à la nature qui est posée.



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. À l'exception du scénario S4, la nature trouve une place sans équivoque au sein de ces scénarios pour

les co-bénéfices 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

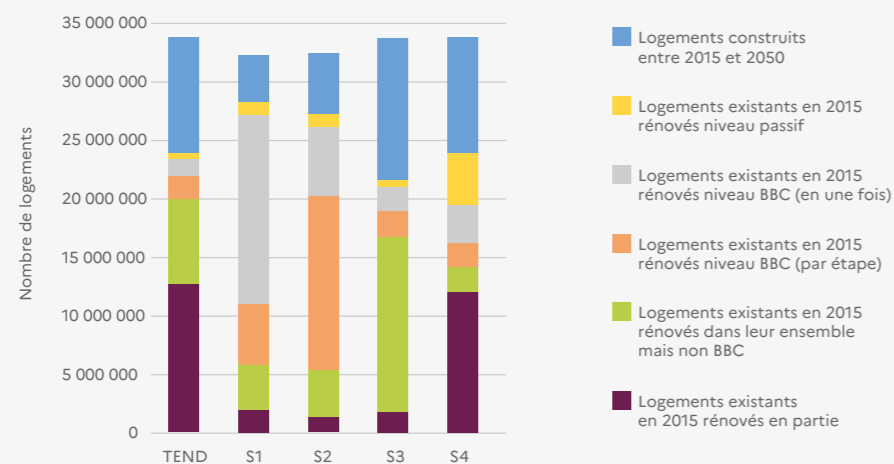
Il est nécessaire d'accélérer dès maintenant la transition des bâtiments. Le scénario S1 table sur une rénovation thermique d'envergure et des usages sobres des bâtiments pour réduire leur empreinte climat. Les scénarios S2 et S3 conduisent à des émissions similaires, mais avec deux stratégies différentes : 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, les scénarios 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 CO₂ pour S4).

Il est nécessaire d'accélérer dès maintenant la transition des bâtiments. Le scénario S1 table sur une rénovation thermique d'envergure et des usages sobres des bâtiments pour réduire leur empreinte climat. Les scénarios 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, les scénarios 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 CO₂ 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 réno-

Les scénarios S3 et S4 génèrent les plus grandes consommations de matériaux : entre 1 300 et 1 400 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.

Graphique 14 Parc de résidences principales en 2050 – répartition par niveau de performance énergétique dans tous les scénarios (nombre de logements)



Mobilité des voyageurs et transport de marchandises

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 davantage 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.

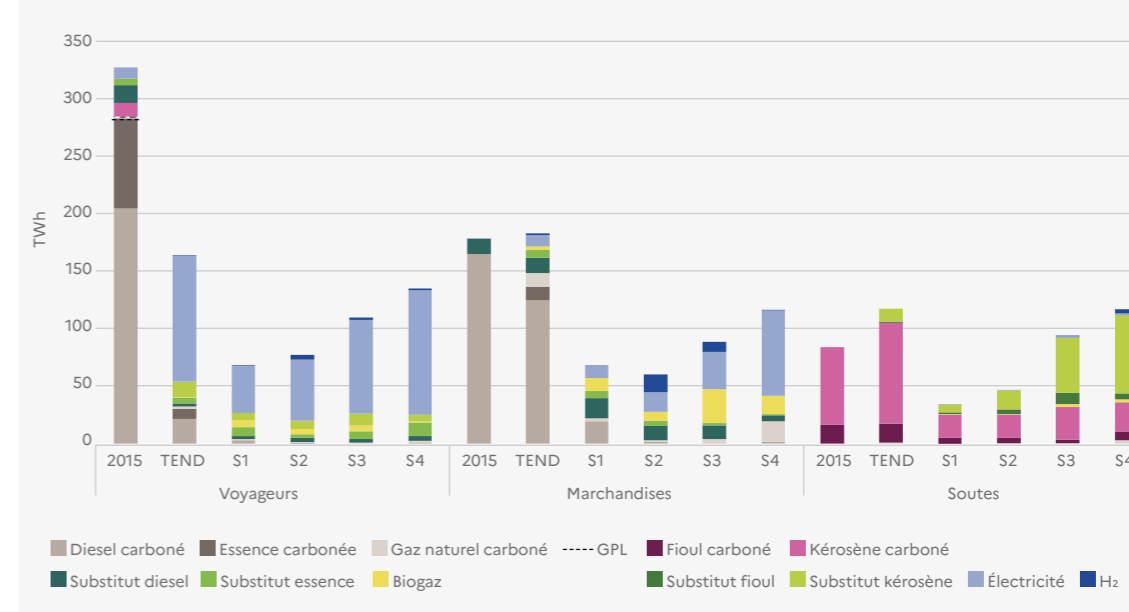
Les leviers de sobriété permettent de diviser par plus de deux les besoins énergétiques par rapport au scénario tendanciel et de réduire plusieurs pressions environnementales liées aux mobilités. Les leviers d'efficacité et de décarbonation sont indispensables dans tous les scénarios. En particulier, l'électrification

est incontournable pour les véhicules routiers légers. La biomasse (biocarburants et biogaz) complète le mix des modes des poids lourds, du maritime ou de l'aérien, plus difficiles à décarboner. L'hydrogène est sollicité en complément dans certains scénarios (Graphique 15).

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);
- 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 de 65 à 91 % de la demande énergétique en 2050.

Graphique 15 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 gagnant-gagnant 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), 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 un rôle social d'une alimentation saine

et durable renforcé. S3 et plus encore S4 misent davantage sur l'innovation technologique. Les gains d'efficacité sont pilotés notamment par l'intelligence artificielle ou le numérique, avec un effet moindre sur la modification des régimes et la qualité environnementale des produits, ce qui nécessite un report des efforts sur d'autres secteurs. Ces deux derniers scénarios bénéficient 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'émission 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.



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.

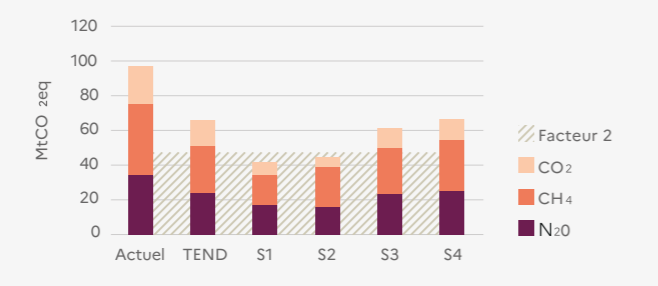
Les simulations réalisées montrent que diviser par deux les émissions de GES du secteur agricole n'est possible que dans S1 et S2 par davantage de sobriété et une meilleure prise en compte du rôle essentiel du monde vivant dans le maintien de nos capacités de production (Graphique 16). L'ensemble des acteurs de la filière doivent effectuer une transition, en par-

ticulier 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.

Graphique 16 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 Mm³/an dans S2 et + 19 Mm³/an dans S3 et S4 par rapport à aujourd'hui.

Dans tous les cas, il est essentiel de cesser le défrièvement des forêts, de les gérer de façon durable et de reconstituer les peuplements sinistrés, de 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 cascade¹¹ constitue également un levier d'atténuation efficace.

¹¹ 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

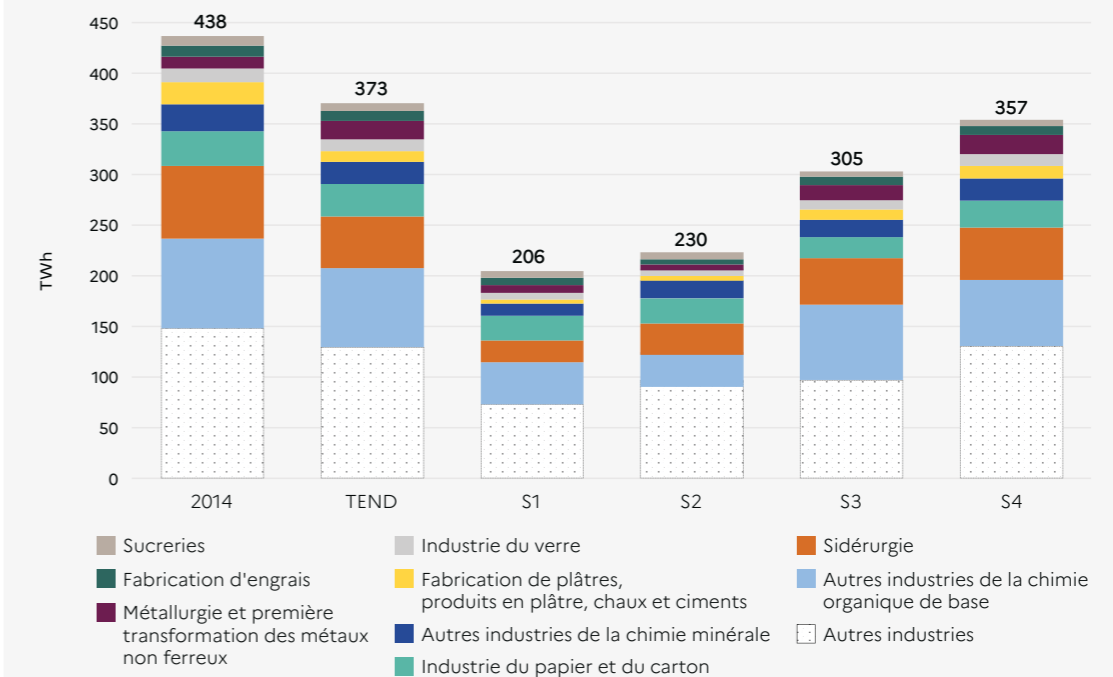
Les scénarios S2 et S3 permettent d'atteindre une forte réduction des émissions industrielles : respectivement de 84 et 86% (incluant le CCS). Dans S2, c'est essentiellement par d'importants efforts de sobriété et d'efficacité couplés à une forte réindustrialisation et dans S3, grâce à une forte décarbonation 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. Les scénarios 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 primaires¹² 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 CO₂ (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 17).

Graphique 17 Répartition des consommations d'énergie (dont matières premières) en 2014 et en 2050, par scénario et par type d'industrie (IGCE et autres)



¹² 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_{PCI} et 185 TWh_{PCI}, 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 18). La deuxième voie repose sur le couplage de la méthanisation avec le *power-to-methane* qui permet de valoriser le CO₂ 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 décarboné¹³ 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. 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 le scénario 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.



Mix électrique

Les scénarios de mix électriques 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 ou l'éolien flottant.

Quels que soient ces choix technologiques, tous les scénarios impliquent le développement massif des énergies renouvelables (solaire, éolien terrestre et en mer).

Les résultats sur le mix électrique seront détaillés dans une publication ultérieure.



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.

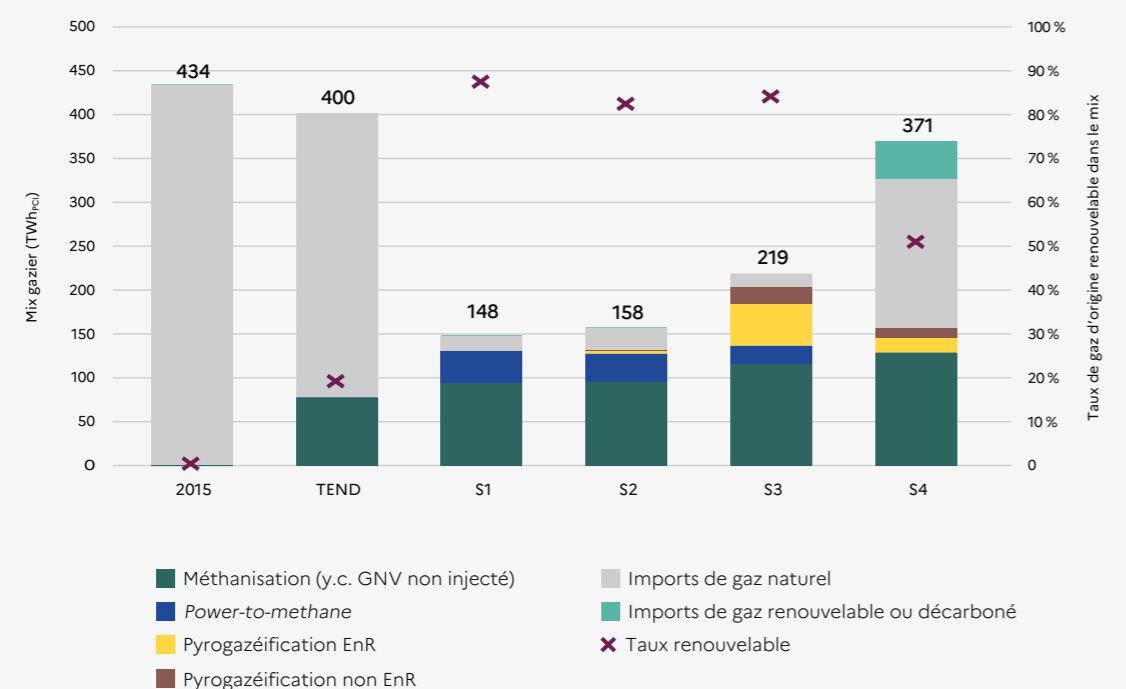
Les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) (biomasse, déchets, chaleur de récupération, biogaz, biocarburant, solaire thermique, pompe à chaleur aérothermique et géothermie) progressent et deviennent majoritaires dans tous les scénarios. Hors réseaux, elles passent de 15 % en 2015 à environ 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.

Graphique 18 Mix gazier en 2015 et en 2050 pour les cinq scénarios ADEME (référence et variante gaz haut)



¹³ 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.

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, son développement 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 des biocarburants avancés 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, les scénarios S3 et S4 mobilisent largement la biomasse, ce qui permet un large développement de la filière, qui varie 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 CO₂), d'où un développement minoritaire des électrocarburants dans S2, S3 et S4.

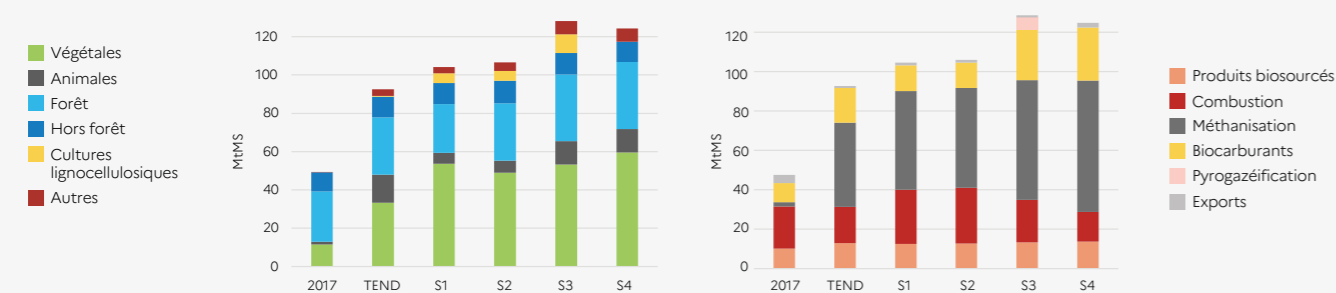
Ressources et usages non alimentaires de la biomasse

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 des ressources mobilisées, tout en respectant les limites physiques tous usages considérés (Graphique 19).

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



Végétales : cultures intermédiaires, résidus de culture, surplus de prairies ;
Animales : effluents d'élevage ;
Hors forêt : bois ;
Cultures lignocellulosiques : taillis à courte rotation, miscanthus ;

Autres : déchets (bois, industries), ordures ménagères (biodéchets), boues, issues de silos, coproduits et sous-produits des industries agroalimentaires.
Produits biosourcés : usages non énergétiques et non alimentaires de la biomasse (ex. : matériaux de construction).

Déchets

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. Les scénarios 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.

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. Le développement d'une séquestration additionnelle 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. Pour les deux premiers scénarios, cette augmentation repose principalement sur les puits naturels (forêts, sols agricoles) tandis qu'elle repose majoritairement sur les puits technologiques (BECCS, DACCS¹⁴) dans les scénarios S3 et S4.

Outre leur valeur propre pour la biodiversité, les écosystèmes naturels sont déjà des stocks et des puits de carbone majeurs. Quels que soient les scénarios, les puits « naturels » jouent un rôle pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 à l'échelle nationale. Un enjeu crucial est donc d'éviter des dégradations quasi-irréversibles à des échelles de temps

humaines (ex. : perte de sol, déforestation ou dégradation des forêts), 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).

¹⁴ BECCS : bioenergy with carbon capture and storage ; DACCS : direct air carbon capture and storage.

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 décidés.
- **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.
- **L'empreinte environnementale**. En accord avec la Stratégie Nationale Bas Carbone, la neutralité ciblée dans cet exercice est définie à l'échelle de la France métropolitaine et sur des émissions directes, ce qui exclut les impacts des produits importés. Deux documents viendront prochainement compléter la présente publication, l'un dédié aux métaux de la transition écologique, l'autre à l'empreinte gaz à effet de serre matières des scénarios.
- **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.
- **Adaptation au changement climatique**. Les impacts du changement climatique sont bien pris en compte dans l'évolution des besoins (par exemple en climatisation). Concernant les enjeux spécifiques

de l'adaptation, une première estimation a été menée dans le cadre de cet exercice, en particulier pour la forêt, mais sur les autres secteurs, les approches sont plus qualitatives, voire inexistantes, en fonction de l'état des connaissances dans chaque secteur.

- **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. Des discussions sont en cours avec l'Office français pour la Biodiversité pour documenter l'évaluation de ces impacts.
- **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 Agences de l'Eau 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.

Les prochaines étapes de ce travail

Ce travail n'est que la première partie d'une série de feuillets qui seront publiés courant 2022. La plupart de ces feuillets seront remis en perspective au cours du [Grand Défi Écologique](#), événement organisé par l'ADEME les 29 et 30 mars 2022 à Angers.

Les sujets de ces feuillets sont les suivants :

Analyse du mix électrique

Matériaux de la transition énergétique

Évaluations macroéconomiques dont l'emploi et les investissements

Analyse des changements des modes de vie, menée à travers l'étude qualitative des regards et perceptions de 31 Français d'horizons différents sur les récits des scénarios

Empreinte matière, gaz à effet de serre, ressources et biens de consommation

Sols

Adaptation au changement climatique

Analyse de l'impact sur quelques filières à enjeux, notamment : « Construction neuve », « Gaz et carburants liquides », « Protéines » et « Logistique des derniers kilomètres »

Robustesse et vulnérabilité à des chocs

Qualité de l'air

Territoires (sous la forme d'un guide d'aide à la prospective pour les territoires)

Numérique

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.

Les secteurs suivants y sont détaillés : ceux qui relèvent de la consommation (l'aménagement du territoire, le bâtiment, la mobilité et l'alimentation) ; ceux qui constituent le système productif (l'agriculture, l'exploitation des forêts et l'industrie), ceux qui forment l'offre d'énergie (le gaz, le froid et la chaleur, la biomasse, les carburants liquides et l'hydrogène) ; ceux qui constituent des ressources (la biomasse et les déchets) et les puits de carbone. Ces secteurs sont également analysés au regard de leurs impacts, lorsque cela a été possible, sur l'eau, les sols, les matériaux et la qualité de l'air.

Cet ouvrage est le résultat d'un travail de plus de deux 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.

Ce document est édité par l'ADEME.

Retrouvez les scénarios ADEME
en ligne sur www.transitions2050.ademe.fr

Crédits photo : ADEME, Getty Images, Unsplash

Illustrations : Stéphane Kiehl

Conception éditoriale et graphique : bearideas

Dépôt légal : © ADEME Éditions, novembre 2021



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

