



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME



AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Feuilleton

Évaluation des empreintes carbone et matières



Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.ademe.fr/les-futurs-en-transition

Numéro de contrat: 2021005937

Crédits photo: Grant Durr *via* Unsplash

Conception éditoriale et graphique: bearideas

Rédaction: Fanny Vicard, Antoine Teixeira

Brochure réf. 012109

ISBN: 979-1-02-972122-9

Dépôt légal: © ADEME Éditions, mars 2024

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L. 122- 4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122- 5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L. 122- 10 à L. 122- 12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Rappel des conclusions des premiers travaux

Ce feuilletton s'inscrit dans le travail de prospective énergie ressources « **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » présenté le 30 novembre 2021 qui comprend les travaux initiaux et 17 feuillets dont la publication s'étend de février 2022 à mars 2024. L'ensemble des documents publiés est disponible sur www.ademe.fr/les-futurs-en-transition.

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

Les quatre scénarios aboutissent tous à la neutralité carbone mais avec des voies différentes. Avant tout, ils ont pour objectif de faire prendre conscience à

tout un chacun, quel que soit son niveau de responsabilité et d'implication dans la construction de ce cheminement, de la nature des transformations et des choix à faire.

Ils sont le résultat de plus de 4 ans de travaux mobilisant plus d'une centaine d'experts de l'ADEME ainsi que des partenaires extérieurs de différents milieux professionnels et académiques, mais également un comité scientifique, constitué de membres du conseil scientifique de l'Agence et complété de personnalités qualifiées.

Pour chaque scénario, l'ADEME a construit un récit cohérent, décliné dans chaque secteur technique, économique et social, au travers de variables structurantes. La description des scénarios couvre les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, biocarburants, gaz, hydrogène, chaleur/froid et électricité). Les quatre scénarios et les mots clés qui les caractérisent sont les suivants :

 S1 GÉNÉRATION FRUGALE	 S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	 S3 TECHNOLOGIES VERTES	 S4 PARI RÉPARATEUR
<ul style="list-style-type: none"> • Frugalité contrainte • Villes moyennes et zones rurales • Low-tech • Rénovation massive • Nouveaux indicateurs de prospérité • Localisme • Moins de viande 	<ul style="list-style-type: none"> • Modes de vie soutenables • Économie du partage • Gouvernance ouverte • Mobilité maîtrisée • Fiscalité environnementale • Coopérations entre territoires • Réindustrialisation ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies de décarbonation • Biomasse exploitée • Hydrogène • Consumérisme vert • Régulation minimale • Métropoles • Déconstruction/reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation de masse • Étalement urbain • Technologies incertaines • Économie mondialisée • Intelligence artificielle • Captage du CO₂ dans l'air • Agriculture intensive

Par ailleurs, au-delà des enseignements clés, **ce travail a fait émerger six problématiques à mettre en débat** :

- La sobriété : jusqu'où ?
- Peut-on s'appuyer uniquement sur les puits naturels de carbone pour atteindre la neutralité ?
- Qu'est-ce qu'un régime alimentaire durable ?

- Artificialisation, précarité, rénovation : une autre économie du bâtiment est-elle possible ?
- Vers un nouveau modèle industriel : la sobriété est-elle dommageable pour l'industrie française ?
- L'eau : enjeu majeur d'adaptation au changement climatique

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

HORIZONS

Feuilleton Évaluation des empreintes carbone et matières des scénarios Transition(s) 2050

Dans l'exercice Transition(s) 2050, l'ADEME a proposé quatre scénarios contrastés pour atteindre la neutralité carbone tous gaz à effet de serre (GES) sur le territoire français à horizon 2050. Cet objectif correspond à l'atteinte d'un système économique avec des émissions nettes de GES nulles, soit un équilibre entre, d'une part, les émissions de GES anthropiques sur le territoire et, d'autre part, leur compensation par le déploiement de puits de carbone naturels ou technologiques. À l'échelle d'un pays, l'objectif de neutralité carbone se concentre dès lors sur les émissions territoriales et ne rend donc pas compte des pressions sur le climat qu'un État peut générer en dehors de ses frontières par sa consommation de produits importés [1, 2].

C'est pourquoi, dans ce feuilleton, l'ADEME propose d'étendre l'analyse à l'ensemble des émissions de GES générées par l'économie française, en mettant chacun des scénarios de neutralité carbone en perspective de leur empreinte carbone. Celle-ci permet en effet de dépasser le prisme des émissions territoriales, en considérant également les émissions de GES que l'économie française génère à l'étranger par sa consommation de biens et services importés (émissions indirectes importées).

Dans ce feuilleton, l'ADEME propose également d'éclairer le débat sur l'atteinte de la neutralité carbone en France en quantifiant l'empreinte matières de chacun des scénarios en 2050. En effet, un tiers des émissions indirectes importées de la France sont liées à l'extraction et la transformation des matières premières à l'étranger mobilisées notamment par la production des biens manufacturés importés [3]. L'empreinte matières permet ainsi de rendre compte de cette pression en mesurant la quantité de matières

premières extraites sur le territoire et importées (usages directs) mais aussi celles mobilisées à l'étranger pour produire les biens et services importés (usages indirects). Aussi, l'atteinte de la neutralité carbone n'est pas sans incidence sur la consommation de matières premières (biomasse, matières fossiles, minerais métalliques et non métalliques). Elle induit notamment un recul de l'usage des combustibles fossiles et la transition vers des sources d'énergie décarbonée. Mais elle implique également de compléter ou renouveler les infrastructures et équipements dans les secteurs de la fourniture d'énergie, des transports, de la construction ou de l'industrie pour assurer cette transition et améliorer l'efficacité énergétique. La sortie des énergies fossiles comporte le risque d'accroître la consommation des autres catégories de matières premières, e.g. la biomasse mais aussi les minerais métalliques et non métalliques [4, 5] si aucune mesure de sobriété n'est prise en complément.

Pour estimer les empreintes carbone et matières de la France en 2015 et à horizon 2050 pour chacun des scénarios, l'ADEME a utilisé le modèle de comptabilité environnementale Entrées-Sorties MatMat [6, 7]. La méthodologie de calcul des empreintes relève d'une approche *top down*, qui suit le formalisme de celle utilisée par le Ministère de la Transition écologique [8]. Elle permet de prendre en compte les spécificités des chaînes d'approvisionnement en France et à l'étranger. Elle se distingue des approches *bottom up* qui proposent une représentation détaillée avec différentes technologies par produit, mais souvent mises au service d'analyses à micro (voir méso) échelle¹.

¹ Approche utilisée notamment dans le feuilleton « [Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique](#) » et dans le feuilleton « [Numérique : quels impacts environnementaux dans une France neutre en carbone en 2050 ?](#) ».

En prospective, un bouclage avec le modèle macroéconomique en équilibre général ThreeME est opéré. ThreeME permet de considérer les effets de transferts d'activité et de consommation dans l'économie via une modélisation des comportements des agents économiques. Au-delà des enjeux macroéconomiques, le modèle ThreeME intègre également les transformations des systèmes énergétiques via des modules sectoriels dédiés. Le modèle MatMat concacène quant à lui les expertises sectorielles de l'ADEME sur la matière. Le bouclage entre les deux modèles permet ainsi de proposer une évaluation de scénarios intégrés énergie-matière-économie avec un réalisme technique et une cohérence macroéconomique.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les empreintes carbone et matières des scénarios en 2050

En 2050, l'empreinte carbone tous GES diminue dans tous les scénarios par rapport à son niveau de 2015. Elle s'établit entre 293 MtCO₂eq (S1) et 404 MtCO₂eq (S4), contre 702 MtCO₂eq en 2015 (Tableau 1).

Sur la base d'une population française estimée à 69,7 millions d'habitants en 2050, l'empreinte carbone par habitant est donc comprise entre 4,2 tCO₂eq/hab. (S1) et 5,8 tCO₂eq/hab.

(S4), soit une réduction allant d'un facteur 2 (pour S3 et S4) à un facteur 2,5 (pour S1 et S2) par rapport à 2015 (10,9 tCO₂eq/hab.).

La baisse de l'empreinte carbone provient principalement de la réduction des émissions générées par la combustion d'énergies. Ces dernières diminuent selon les scénarios entre 57 % (S4) et 70 % (S1) par rapport aux émissions de 2015.

Par ailleurs, en 2050, l'empreinte matières de la France est estimée, selon les scénarios, entre 1005 Mt (S1) et 1299 Mt (S4) en 2050, contre 1271 Mt en 2015 (Tableau 2). Trois scénarios (S1, S2 et S3) présentent une empreinte matières inférieure au niveau de 2015. Mais seul S1 permet de diminuer la consommation de matières premières pour chacune des catégories (biomasse, matières fossiles, minerais métalliques et non métalliques). Dans les autres scénarios, mis à part S2 qui permet de réduire significativement les consommations de minerais non métalliques, seul l'usage de matières fossiles diminue par rapport à 2015.

À noter toutefois que, ramenée à la population française de 2050, l'empreinte matières par habitant s'établit dans tous les scénarios en deçà de la consommation moyenne par habitant de 2015. Elle est en effet comprise entre 14,4 (S1) et 18,6 t/hab. (S4), contre 19,7 t/hab. en 2015.

Tableau 1 Empreinte carbone de la France en 2015 et en 2050 pour tous les scénarios

			2050					
	Unité	2015	TEND	S1	S2	S3	S4	
Empreinte carbone	MtCO ₂ eq	702	473	293	310	350	404	
Variation vs 2015		—	-33%	-58%	-56%	-50%	-42%	
En écart au TEND		—	—	-38%	-34%	-26%	-15%	
Empreinte carbone par habitant	tCO ₂ eq/hab.	10,9	6,8	4,2	4,5	5,0	5,8	
Variation vs 2015	%	—	-38%	-61%	-59%	-54%	-47%	
Composition empreinte carbone								
Émissions directes territoriales	Combustion d'énergie	Mt CO ₂ eq	224	84	17	10	8	35
	Procédés et sols	Mt CO ₂ eq	85	99	74	79	89	90
Émissions indirectes importées	Combustion d'énergie	Mt CO ₂ eq	264	179	128	140	163	176
	Procédés et sols	Mt CO ₂ eq	129	111	75	81	90	103

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

Tableau 2 Empreinte matières de la France en 2015 et en 2050 pour tous les scénarios

			2050				
	Unité	2015	TEND	S1	S2	S3	S4
Empreinte matières	Mt	1271	1363	1005	1066	1199	1299
Variation vs 2015	%	—	7%	-21%	-16%	-6%	2%
En écart au TEND	%	—	—	-26%	-22%	-12%	-5%
Empreinte matières par habitant	t/hab.	19,7	19,5	14,4	15,3	17,2	18,6
Variation vs 2015	%	—	-1%	-27%	-22%	-13%	-5%
Composition empreinte matières par catégorie de matières²							
Biomasse	Mt	329	406	289	331	345	369
Matières fossiles	Mt	210	113	68	68	75	90
Minerais métalliques	Mt	112	144	112	118	135	155
Minerais non métalliques	Mt	621	700	536	549	644	685

Note de lecture : l'empreinte matières, selon la convention internationale, additionne les masses des différentes matières premières consommées par l'économie française.

² Les écarts potentiels avec l'empreinte totale sont dus aux arrondis.

Atteindre la neutralité carbone au niveau national participe à réduire l'empreinte carbone de la France en 2050

Les résultats de cette étude montrent que le prolongement des politiques existantes en France et à l'étranger (scénario tendanciel - TEND) permet déjà de réduire les émissions de GES en empreinte par rapport à 2015. L'empreinte carbone du TEND est évaluée à 473 MtCO₂éq, soit une baisse de 33 % comparativement à son niveau de 2015 (Tableau 1). Ramenée à la population française en 2050, l'empreinte carbone par habitant s'établit à 6,8 tCO₂éq/hab. Cette diminution provient principalement de la baisse des émissions directes et indirectes de la combustion (46 % plus faibles que celles de 2015), en lien avec les engagements actés en France et à l'international pour décarboner la production énergétique et industrielle, ainsi que les usages d'énergie dans les transports et les bâtiments.

Les actions supplémentaires mises en œuvre dans les scénarios pour atteindre la neutralité carbone permettent de réduire davantage l'empreinte carbone de la France.

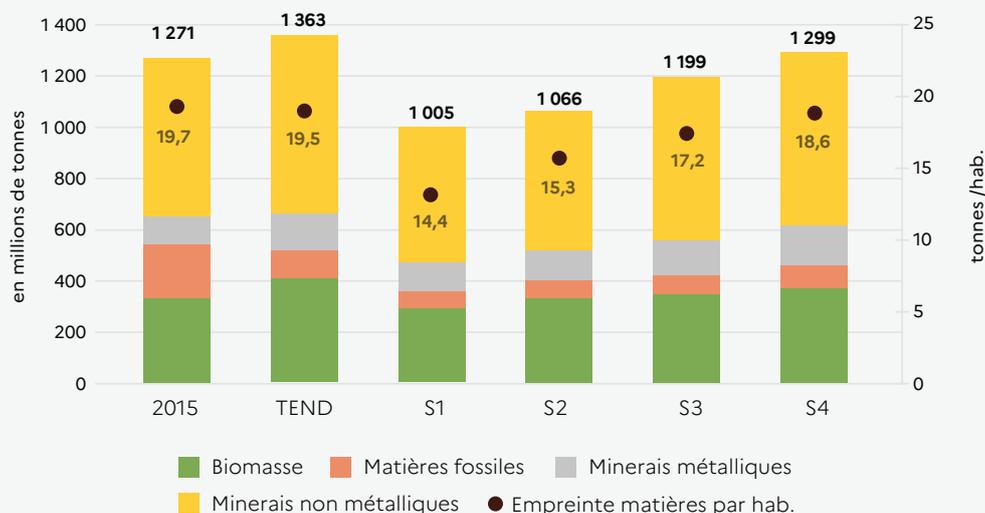
Comme ces scénarios atteignent tous la neutralité carbone au niveau national en 2050, leurs différences résident surtout dans leur faculté d'abattre en complément les

émissions indirectes importées. Celles liées à la combustion diminuent moins fortement que ce qui est observé sur les émissions directes territoriales puisque, par hypothèse dans tous les scénarios, les partenaires commerciaux de la France suivent seulement un rythme tendanciel de décarbonation de la demande énergétique. Les écarts entre scénarios proviennent donc des volumes d'importations supposés. Dès lors, S1 et S2 qui, par construction, conjuguent sobriété de la demande et moindre ouverture de l'économie, permettent d'abattre plus efficacement les émissions de GES importées, que ce soit celles de la combustion ou celles des procédés et sols.

La neutralité carbone en 2050 permet également de réduire l'empreinte matières de la France comparativement à une évolution tendancielle de l'économie française

La présente évaluation montre que le prolongement des tendances actuelles induit une croissance de la consommation de matières premières par rapport à 2015. Ainsi, l'empreinte matières du scénario TEND en 2050 s'établit à 1363 Mt, soit 7 % de plus que le niveau de 2015 (Graphique 1 et Tableau 2). Néanmoins, ramenée à la population en 2050, la consommation moyenne de matières premières par habitant dans le TEND est comparable à celle de 2015 (19,5 t/hab. contre 19,7 t/hab. en 2015).

Graphique 1 Empreinte matières de la France en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios



Les actions supplémentaires introduites pour atteindre la neutralité carbone à l'échelle du territoire français permettent de réduire l'empreinte matières par rapport au TEND. L'empreinte matières diminue de respectivement 26 % et 22 % pour S1 et S2 par rapport à celle du TEND et de respectivement 12 % et 5 % pour S3 et S4. En 2050, les importations de matières premières baissent fortement dans tous les scénarios, en lien notamment avec la moindre consommation des énergies fossiles.

Les scénarios de neutralité carbone induisent un fort recul de la consommation des matières fossiles, qui chute de 20 % dans S4

par rapport au TEND, 34 % dans S3 et pratiquement 40 % dans S1 et S2. **Mais ils n'entraînent pas de hausse de la consommation des autres catégories de matières comparativement au TEND, sauf dans S4 pour les minerais métalliques.**

En 2050, la consommation de biomasse est en effet plus faible dans tous les scénarios comparativement au TEND. Dans S1, scénario dans lequel les régimes alimentaires sont profondément revisités et la forêt préservée, les besoins en biomasse sont inférieurs de 29 %. Pour les autres scénarios, la consommation de biomasse se contracte de 9 % (S4) à 18 % (S2) par rapport au TEND.

Un fort recul de la consommation de minerais métalliques et non métalliques est également observé dans S1 et S2. Cette contraction est toutefois moins marquée dans S3 et S4 qui misent davantage sur les technologies de décarbonation que sur les leviers de sobriété.

S1 et S2 permettent de réduire plus efficacement les empreintes en 2050

Comparativement à S3 et S4, S1 et S2 réduisent plus efficacement les émissions de GES en empreinte au moyen de 3 facteurs concomitants :

- la baisse de la demande, induite par la sobriété des modes de vie et de consommation, permet de diminuer plus fortement les émissions de GES, notamment les émissions indirectes importées grâce à la baisse des importations de biens manufacturés ;
- le plus faible degré d'ouverture au commerce international (priorité au « *made in France* » et à la demande intérieure par rapport aux exports) permet d'orienter la demande vers des biens et services dont la production en France est moins carbonée ;
- l'incorporation de matières premières issues du recyclage (MPR), plus poussée dans ces scénarios, permet d'orienter la demande vers une production intérieure à plus faible intensité carbone que celle des produits importés.

S1 et S2 sont aussi plus économes en matières premières :

- les stratégies de sobriété déployées dans ces scénarios sur la demande alimentaire, la construction et les biens de consommation finale des ménages (textiles, équipements électroménagers, produits ménagers) permettent de réduire plus fortement la consommation directe et indirecte de matières premières ;

- les taux d'incorporation de MPR, plus ambitieux dans ces scénarios, permettent de diminuer à la fois les importations de matières premières vierges (notamment de minerais métalliques) et les usages indirects de matières (notamment de matières fossiles en lien avec des processus de production de MPR moins carbonés que ceux des matières premières vierges à l'étranger).

Un découplage possible entre PIB et empreintes...

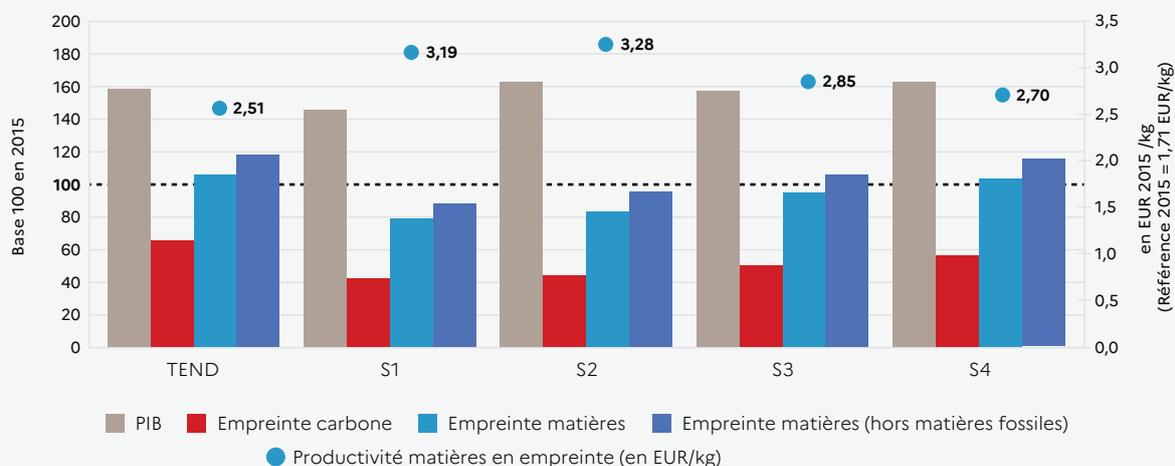
La notion de découplage permet de mettre en perspective l'évolution d'une pression environnementale (ici l'empreinte carbone ou l'empreinte matières) de la croissance de l'activité économique (mesurée par le produit intérieur brut). Le découplage est qualifié d'absolu si la pression sur l'environnement demeure stable ou décroît tandis que le PIB augmente. Le découplage est dit « relatif » lorsque la pression sur l'environnement augmente mais à un taux de croissance moindre que celui du PIB.

L'analyse des effets macroéconomiques des scénarios³ a montré que tous génèrent en 2050 une croissance de l'activité économique par rapport à 2015 (Graphique 2).

Comme une diminution des GES (émissions importées incluses) est aussi observée dans tous les scénarios par rapport à leur niveau de 2015, il y a un découplage absolu entre empreinte carbone et PIB pour tous les scénarios (Graphique 2).

Pour les flux de matières, un découplage absolu apparaît aussi possible pour trois scénarios (S1, S2, S3). Dans ces scénarios, alors que la richesse créée augmente, la consommation de matières premières diminue par rapport à son niveau de 2015 sous l'effet d'une amélioration de la productivité matières⁴ (en empreinte). Pour S4, ce n'est qu'un découplage relatif qui est observé. Malgré une diminution de la consommation de matières fossiles par un facteur 2, l'empreinte matières augmente dans ce scénario (2 %) mais toutefois moins que le taux de croissance de l'activité économique.

Graphique 2 Évolutions par rapport à 2015 de l'activité économique (PIB), des empreintes carbone et matières, ainsi que de la productivité matières selon les scénarios



³ Voir le feuillet « Les effets macroéconomiques ».

⁴ Soit la valeur économique générée (en EUR) par unité de matières premières consommées (en kg).

Toutefois, lorsque les matières fossiles sont exclues du calcul, on constate que les consommations de matières diminuent entre 2015 et 2050 seulement dans S1 et S2, confirmant un découplage absolu entre croissance du PIB et empreinte matières uniquement pour ces deux scénarios (*Graphique 2*).

...mais des réductions qui restent insuffisantes au regard des enjeux globaux de diminution des pressions environnementales

Si les quatre scénarios proposés permettent de limiter les émissions territoriales de GES en 2050 autour de 1 à 2 tCO₂eq/hab. selon les scénarios (hors captage du carbone), les émissions en empreinte s'établissent entre 4,2 et 5,8 tCO₂eq/hab. Ces niveaux d'émissions restent bien au-delà des limites biophysiques proposées par le GIEC pour limiter le réchauffement de la planète [9], à savoir entre 1 tCO₂eq (pour une trajectoire +1,5 °C) et 2 tCO₂eq (pour une trajectoire +2 °C) en moyenne par habitant au niveau mondial.

De même, l'empreinte matières par habitant, qui s'établit selon les scénarios entre 14,4 et 18,6 t/hab. en 2050, est bien supérieure aux 5 t/hab. qui, d'après la littérature [10, 11], permettraient d'inscrire la consommation mondiale de matières premières dans une trajectoire compatible avec une trajectoire de réchauffement de la planète en dessous de + 2 °C.

In fine, l'analyse en empreinte proposée dans ce feuilleton permet de pointer d'autres leviers d'action pour réduire les émissions de GES et les besoins matières. Elle souligne par exemple le poids de la coopération internationale pour réduire les empreintes carbone et matières de la consommation française. Elle met aussi en évidence le besoin d'aller plus loin dans les actions de sobriété et d'économie circulaire pour diminuer davantage les empreintes, notamment matières. En effet, des actions supplémentaires apparaissent notamment nécessaires pour réduire le contenu carbone et matières des services et des biens manufacturés dont les chaînes d'approvisionnement sont complexes et largement mondialisées.

SOMMAIRE

Rappel des conclusions
des premiers travaux

3

Résumé exécutif

4

1. Contexte
de l'évaluation

10

2. Méthode de l'analyse
prospective

14

3. Empreinte carbone
des scénarios en 2050

20

4. Empreinte matières
des scénarios en 2050

25

5. Mise en perspective
et enseignements

32

6. Bibliographie

36

1. Contexte de l'évaluation

Dans le cadre de l'Accord de Paris, 195 pays se sont engagés à réduire leurs contributions nationales (NDC - *Nationally Determined Contributions*) pour limiter d'ici 2100 le réchauffement de la planète à + 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle. D'après les travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), cela nécessiterait d'atteindre la neutralité carbone tous gaz à effet de serre⁵ (GES) à l'échelle mondiale d'ici 2070 [9]. Avec le *Green Deal* (2019) et le paquet législatif « *Fit for 55* » (2021), l'Union européenne et ses États membres se sont engagés à atteindre cet objectif d'ici 2050.

Dans ce contexte, l'ADEME a proposé quatre scénarios contrastés pour atteindre la neutralité carbone tous GES sur le territoire métropolitain à horizon 2050. Cet objectif correspond à l'atteinte d'un système économique avec des émissions nettes de GES nulles, soit un équilibre entre d'une part les émissions de GES anthropiques, et d'autre part leur compensation par le déploiement de puits de carbone naturels ou technologiques permettant leurs absorptions. À l'échelle d'un pays, l'objectif de neutralité carbone se concentre dès lors sur les émissions territoriales et ne rend pas compte des pressions sur le climat qu'un État peut générer en dehors de ses frontières par sa consommation de produits importés [1, 2].

1.1. De l'inventaire national à une analyse en empreinte carbone

Le droit international retient une approche basée sur des inventaires nationaux, répertoriant les émissions qui ont physiquement lieu à l'intérieur des frontières de chaque pays (dites « émissions territoriales »). Cette approche est cohérente avec l'idée que les États sont responsables du territoire sous leur juridiction. Néanmoins, une telle approche ne considère pas le commerce international, contrairement à une approche en empreinte. **L'empreinte carbone permet en effet de mesurer l'ensemble des émissions de GES associées à la consommation des résidents d'un pays, indépendamment du lieu de fabrication des biens et services consommés.**

Croiser une approche basée sur un inventaire national avec une approche en empreinte est riche d'enseignements. Les émissions mondiales de GES s'élevaient en 2018 à 46,8 milliards de tonnes

d'équivalent CO₂ (GtCO₂eq), soit 6,1 tCO₂eq par habitant [12]. Elles ont été multipliées par 2 entre 2000 et 2018. Sur la même période, l'empreinte carbone de la France a diminué de 7 % selon le Ministère de la Transition écologique (MTE), pour s'établir autour de 9,3 tCO₂eq par habitant en 2018 [13].

En France, les émissions directes territoriales ont été réduites de 24 % entre 2000 et 2018, grâce notamment à l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'accélération de la transition vers les énergies renouvelables et la désindustrialisation progressive de l'économie française. Dans le même temps, les émissions indirectes importées, c'est-à-dire celles générées à l'étranger pour produire les biens et services importés par l'économie française, se sont accrues de 19 %, suivant notamment l'évolution des délocalisations industrielles sur cette période [14].

La France, comme tous les pays développés, a une empreinte carbone plus élevée que son inventaire. Plus de la moitié des émissions de GES en empreinte de la France est aujourd'hui associée à ses importations. La proportion des émissions indirectes importées dans l'empreinte carbone varie selon les pays. Elle dépend :

- d'une part, du degré d'ouverture du pays au commerce international : plus un pays importe de biens et services, plus il importe les GES qui ont été nécessaires à leur production. La France présente une balance commerciale négative, elle importe donc davantage qu'elle n'exporte (INSEE).
- d'autre part, du type de produits importés et de leur intensité en GES comparativement à ceux qui sont produits sur le territoire national. Par exemple, les deux principaux pays fournisseurs de la France, à savoir l'Allemagne et la Chine, ont une production d'énergie (en particulier d'électricité) plus intensive en GES que la France.

L'analyse des émissions indirectes de la France montre qu'elles proviennent à hauteur d'un tiers de l'extraction et de la transformation des matières premières à l'étranger, mobilisées notamment par la production des biens manufacturés importés [3, 15]. Or l'atteinte de la neutralité carbone implique, entre autres, de renouveler les infrastructures et équipements dans les secteurs de la fourniture d'énergie, des transports et de la construction. Et comme le potentiel de décarbonation de la

5 Les six principaux gaz à effet de serre suivis dans le cadre du protocole de Kyoto sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC).

production de matériaux, majoritairement produits dans les économies émergentes, est encore incertain à l'échelle mondiale⁶, cela pourrait avoir une incidence sur l'évolution des émissions indirectes importées [17, 18].

1.2. La nécessité d'élargir l'analyse aux besoins matières de l'économie

L'empreinte matières permet de suivre l'utilisation des matières premières d'un pays et de sa productivité dans un contexte mondial [19]. C'est un des indicateurs de suivi des Objectifs de développement durable (ODD) définis par l'ONU pour qualifier la consommation et la production responsable [20]. Elle permet de mesurer les pressions exercées sur l'environnement par l'activité économique d'un pays et la satisfaction des besoins matériels des individus, en mettant en perspective les chaînes d'approvisionnement mondiales et la responsabilité partagée des impacts de l'extraction, de la transformation et de la consommation des matières premières [21].

Concrètement, l'empreinte matières comptabilise l'ensemble des matières premières, renouvelables (biomasse, ressources halieutiques) ou non renouvelables (matières fossiles, minerais métalliques et non métalliques⁷), qui sont à la fois extraites sur le territoire national, importées et mobilisées indirectement à l'étranger (exprimées en équivalent matières premières - RME) pour produire et transporter les produits importés.

Au niveau mondial, le taux d'exploitation des matières premières s'est accéléré depuis 2000, notamment celui des minerais métalliques et non métalliques. La consommation de matières était ainsi de 92 gigatonnes (Gt) en 2017, soit une augmentation de 70 % depuis 2000 [20]. Cette dynamique est soutenue par la construction de nouvelles infrastructures dans les économies émergentes et le maintien d'un haut niveau de consommation dans les pays à revenus élevés⁸. Elle est aussi accentuée par la délocalisation des productions intensives en matières et en énergie des pays du Nord vers les pays du Sud, qui présentent des procédés de production avec des efficacités énergétiques et matières moindres.

D'après l'OCDE [22], l'expansion de l'économie mondiale et l'élévation des niveaux de vie devraient conduire à une consommation mondiale de matières premières de 160 Gt en 2060. Cela pourrait augmenter la vulnérabilité des économies et les risques géopolitiques, les matières premières (notamment les minerais métalliques) étant inégalement réparties sur la planète. De même, cela pourrait compromettre l'atteinte des objectifs climatiques internationaux. Les émissions de GES provenant de la production de matières premières et de matériaux ont notamment plus que doublé entre 1995 et 2015 à l'échelle mondiale, passant de 15 % à 23 % [23].

L'empreinte matières de la France, comme celle de tous les pays occidentaux, se compose aujourd'hui en majorité de matières premières mobilisées indirectement à l'étranger. Ainsi, bien que la productivité matières⁹ française, définie comme la valeur économique créée par unité de matière première consommée sur le territoire (i.e. hors flux indirects de matières premières), se soit améliorée de 12 % entre 2010 et 2018 [24], l'empreinte matières de la France est restée relativement stable sur cette période [25, 26].

Atteindre la neutralité carbone en 2050 n'est pas sans incidence sur la consommation de matières premières. Elle induit notamment un recul de l'usage des combustibles fossiles et la transition vers des sources d'énergie décarbonées. Elle implique aussi l'amélioration et le remplacement des infrastructures et équipements existants pour assurer cette transition et améliorer leur efficacité énergétique. D'après les modélisations de l'Agence Internationale de l'Énergie [27], les technologies de décarbonation des systèmes énergétiques induiraient par exemple une augmentation significative de la demande en minerais métalliques. Le risque est donc que la sortie des énergies fossiles conduise à accroître la consommation des autres catégories de matières premières, e.g. la biomasse mais aussi les minerais métalliques et non métalliques [4, 5] si aucune mesure de sobriété n'est prise en complément. Croiser une analyse de l'empreinte carbone avec une analyse de l'empreinte matières permet d'évaluer ce potentiel report de dépendance.

⁶ La décarbonation de la production des matériaux repose notamment sur des technologies de captage et stockage du carbone (CCS), technologies complexes dont l'industrialisation à un coût raisonnable reste à démontrer [16].

⁷ Minerais non métalliques : sable, roches, argiles mais aussi des éléments comme le sel, le phosphore, le graphite, etc.

⁸ Par convention, dans la suite du feuillet, le terme « pays du Nord » sera utilisé comme le proxy de pays à « niveau de revenu moyen élevé » et « pays du Sud » comme le proxy de « niveau de revenu moyen faible ou économie émergente ».

⁹ La productivité matières est en principe calculée en rapportant le produit intérieur brut (PIB) à la consommation intérieure de matières (DMC). La DMC comptabilise, en tonnes, les matières extraites sur le territoire national et les importations de matières premières, déduction faite des matières premières exportées. Contrairement à l'empreinte matières, elle n'intègre pas les flux de matières premières mobilisées lors des processus de production à l'étranger et du transport jusqu'aux frontières.

1.3. Quels objectifs de réduction en empreinte ?

1.3.1. Objectif de réduction des émissions de GES

À ce jour, il n'existe pas d'objectif légal ou gouvernemental de niveau d'émissions de GES par habitant.

La Stratégie Nationale Bas-Carbone [28] a proposé un budget carbone de CO₂ par habitant, estimé à partir des données du rapport spécial du GIEC « *Global Warming of 1.5C* » [29]. Ainsi « en tenant compte de l'évolution de la population mondiale d'ici 2100 et en respectant une répartition strictement égalitaire (entre tous les pays) de la quantité de CO₂ qu'il resterait à émettre, le « budget » CO₂ de chaque Terrien devrait être compris entre 1,6 t (hypothèse basse) et 2,8 t (hypothèse haute) de CO₂ par an entre aujourd'hui et 2100 » pour rester sur une trajectoire limitant le réchauffement moyen à + 2 °C en 2100. Le GIEC a depuis, dans le cadre de son 6^e cycle d'évaluation [9], fortement révisé à la baisse les chiffres sur lesquels ces fourchettes ont été calculées, rendant ces hypothèses très optimistes.

En effet, d'après les dernières modélisations du GIEC [9], les trajectoires qui permettraient de limiter la température moyenne mondiale à + 1,5 °C au-dessus de la période préindustrielle d'ici 2100 (avec une probabilité de 50 % ou plus¹⁰) convergent vers un niveau d'émissions mondiales de GES de 9 GtCO₂eq en 2050 (sur la base d'une action immédiate à partir de 2020). Les projections limitant l'élévation de la température moyenne de la planète à + 2 °C aboutissent à un niveau d'émissions mondiales de GES autour de 20 GtCO₂eq en 2050 (cf. Figure SPM.4 / Table SMP.2 du rapport du GIEC [9]). Dans les deux cas, il s'agit des émissions brutes, le potentiel d'absorption des émissions (puits) n'étant pas considéré ici.

Dès lors, sur la base d'une population mondiale estimée à 9,7 milliards d'habitants en 2050 (scénario médian des Nations unies [30]), lorsqu'une répartition strictement égalitaire entre les pays est appliquée, les émissions moyennes de GES par habitant devraient être comprises en 2050 entre 1 tCO₂eq/hab. (pour tenir une trajectoire + 1,5 °C) et 2,1 tCO₂eq/hab. (pour tenir une trajectoire + 2 °C). Il s'agit là encore de valeurs indicatives, moyennées à l'échelle mondiale, qui ne tiennent compte ni des capacités propres de chaque pays à réduire ses émissions, ni des considérations d'équité pour permettre à tous les habitants de la planète

d'atteindre un niveau de vie décent, ni de l'attribution des émissions selon le lieu de fabrication ou de consommation.

1.3.2. Objectif de réduction des consommations de matières premières

S'il n'existe pas d'objectif gouvernemental ou international sur un niveau soutenable de consommation de matières, différents travaux proposent des valeurs cibles mondiales à l'horizon 2050 qui s'avèrent être concordantes.

Ainsi, l'UNEP [11] a proposé une cible de 5,5 tonnes/hab. en 2050. Cet objectif, qui permet de rester sur une trajectoire de réchauffement de la planète en dessous de + 2 °C, est basé sur une consommation mondiale de matières premières de 50 Gt en 2050 (soit le niveau de l'année 2000) et sur un scénario médian de croissance de la population mondiale (9 Md d'habitants en 2050). Il induit une réduction d'un facteur 3 à 5 de la consommation de matières actuelle des pays à haut niveau de revenu et un rattrapage « sous contrainte » des économies émergentes. Ceci signifie que certains pays du Sud devraient également diminuer leur consommation par habitant.

Dittrich et al. (2012) [10] définissent un objectif similaire, avec une consommation de matières premières moyenne de 5 tonnes par habitant en 2050. Leur modélisation est basée sur une réduction de la consommation mondiale de matières premières afin de retrouver en 2050 son niveau de 1992 (année de signature du premier traité international sur le changement climatique) et sur un scénario élevé de croissance de la population mondiale (10 Md d'habitants en 2050).

À partir d'une méta-analyse, Bringezu (2015) [31] conclut que pour inscrire la consommation mondiale de matières premières à un niveau soutenable, celle-ci devrait s'établir entre 3 à 6 tonnes en moyenne par habitant à l'horizon 2050 (pour une population mondiale entre 9 et 11 milliards d'individus).

Ces objectifs s'inscrivent dans une logique de limitation des pressions environnementales. À noter que l'UNEP [11] et Dittrich et al. (2012) [10] ont également proposé des cibles de réduction des consommations de matières selon une logique d'équité. Ainsi, dans la perspective où tous les pays pourraient atteindre un niveau de développement élevé, en considérant les meilleures pratiques actuelles et sans que la réduction de la consumma-

¹⁰ Les incertitudes concernant les niveaux d'émissions de GES compatibles avec une limitation du réchauffement planétaire à + 1,5 °C sont importantes. Elles ont trait notamment à la réponse du climat aux émissions historiques et futures, par exemple le dégagement potentiel de carbone supplémentaire par suite du dégel futur du pergélisol ou celui de méthane provenant des terres humides, etc. [9].

tion d'une catégorie de matières (e.g. les fossiles) ne nécessite une consommation plus élevée d'autres matières, les auteurs estiment que la consommation moyenne de matières premières par habitant en 2050 serait plutôt comprise entre 8 et 10 tonnes/hab.

1.4. Les objectifs de l'étude

Dans ce feuilleton, l'ADEME souhaite éclairer le débat sur l'atteinte de la neutralité carbone en France en élargissant l'analyse à :

- **l'ensemble des émissions de GES générées par l'économie française en 2050**, aussi bien les émissions directes territoriales qu'indirectes importées, *via* la mesure de l'empreinte carbone de chaque scénario ;
- **la quantité de matières premières nécessaires au fonctionnement de l'économie française en 2050**, consommée directement ou indirectement, *via* la mesure de l'empreinte matières des scénarios.

Ces analyses en empreintes permettront de mesurer les effets de transferts :

- entre émissions territoriales (correspondant au périmètre de la neutralité carbone) et émissions indirectes importées ;
- entre matières (matières fossiles, biomasse, minerais métalliques et non métalliques) au regard de chaînes d'approvisionnement mondialisées ;
- entre émissions de GES et satisfaction des besoins matériels de l'économie.

Plus largement, **l'efficacité comparée de chaque scénario de neutralité carbone à réduire chacune des empreintes sera analysée**. Les résultats seront mis en perspective avec la croissance de l'activité économique dans chaque scénario et des pistes d'amélioration pour tendre vers des cibles de réduction ambitieuses en empreinte seront discutées.

Toutefois, la présente étude ne traitera pas de la vulnérabilité des approvisionnements en matières premières de l'économie française, ni de la criticité des matières premières de la transition énergétique. Un feuilleton dédié à l'analyse des besoins en métaux et principaux matériaux des technologies à fort potentiel de déploiement dans le cadre de la transition énergétique a été publié par l'ADEME en 2022¹¹.

¹¹ Feuilleton « [Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique](#) ».

2. Méthode de l'analyse prospective

L'estimation des empreintes carbone et matières de la France en 2015 et en 2050 pour chacun des scénarios a été réalisée avec le modèle de comptabilité environnementale MatMat (Matrice Matières). Ce dernier est développé depuis 2019 par l'ADEME, en partenariat avec le CIRED et la SMASH [6].

La **section 2.1** décrit l'approche d'évaluation des empreintes matières et carbone utilisée au sein du modèle MatMat en lien avec les approches existantes dans la littérature académique et celle du MTE. La **section 2.2** répertorie les principales caractéristiques du modèle pour l'évaluation environnementale de l'économie actuelle et en prospective. La **section 2.3** décrit les principes de scénarisation et de paramétrisation appliqués aux scénarios Transition(s) 2050. Au-delà, une présentation plus détaillée du modèle, de la construction des données de calibration et des principes de scénarisation est fournie dans un article de recherche [3] et un rapport méthodologique dédiée [7]. La **section 2.4** donne des préconisations pour la lecture des résultats.

2.1. Approche et périmètre de comptabilité environnementale

Une approche « top down »

La comptabilité environnementale du modèle MatMat est construite sur le formalisme d'une approche Entrées-Sorties étendue à l'environnement, dite « top-down ». Elle permet d'évaluer des pressions environnementales à l'échelle d'un ensemble de secteurs d'activité sur la base de la comptabilité nationale. Elle est particulièrement adaptée à l'évaluation des empreintes à l'échelle d'une économie nationale car elle propose un cadre de comptabilité permettant une couverture complète de l'économie et des processus tout en évitant les doubles comptes. Elle permet aussi de prendre en compte les spécificités des chaînes d'approvisionnement mondialisées, en détaillant l'ensemble des chaînes de valeur, en France et à l'étranger, de l'extraction des matières premières jusqu'au consommateur final français. Elle propose cependant un niveau de détail relativement agrégé des secteurs d'activité en associant à chacun une technologie de production moyenne et une couverture modérée des enjeux environnementaux.

L'approche Entrées-Sorties se distingue des approches en analyse de cycle de vie (ACV), dite

« bottom up ». L'ACV permet de mesurer les impacts environnementaux d'un système composé d'un ensemble de produits et de technologies par l'application de données d'inventaire de cycle de vie (ICV). Au service d'analyses plutôt à micro (voir méso) échelle, l'ACV propose un niveau de détails très fin sur la représentation de différentes technologies par produits¹². Elle nécessite toutefois une quantité importante de données pour prendre en compte les spécificités des chaînes d'approvisionnement mondialisées. Aussi, leurs mises en cohérence pour décrire un système composé d'un ensemble de produits multifonctionnels à l'échelle d'un pays posent de potentiels enjeux de troncature et/ou de double comptes du fait de la couverture économique incomplète.

Si les approches ACV et Entrées-Sorties se complètent, les différences dans les résultats produits résident principalement dans la définition des limites du système, des sources de données mobilisées ou encore de l'échelle d'étude [32], rendant les résultats non directement comparables.

Méthodologie d'estimation des contenus matières et carbone des importations

Pour l'évaluation des empreintes matières et carbone à l'échelle d'un pays comme la France, le principal défi d'une approche Entrées-Sorties comme MatMat réside dans l'estimation du contenu indirect, matières et carbone, des importations. Plusieurs méthodes ont été identifiées dans la littérature [33].

- **Les méthodes « unilatérales »** passent par l'approximation de coefficients d'émissions ou de ressources incorporées dans les importations. Elles reposent sur (i) l'utilisation d'hypothèse de technologie domestique (*Domestic Technology Assumption* - DTA) directe ou corrigée pour prendre en compte les spécificités des partenaires commerciaux ; (ii) l'application de coefficients spécifiques aux partenaires commerciaux *via* des données nationales Entrées-Sorties. Ces méthodes sont actuellement largement utilisées de manière complémentaire par le MTE [8] et permettent de décliner le contenu en émissions ou ressources des importations par grands pays importateurs. Néanmoins, elles ne permettent pas toujours une évaluation représentative de l'ensemble des chaînes d'approvisionnement à l'étranger, qui ne sont pas représentées explicitement. En particulier, ces coefficients ne décrivent pas les relations

¹² Approche utilisée notamment dans le feuilleton « [Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique](#) » et dans le feuilleton « [Numérique : quels impacts environnementaux dans une France neutre en carbone en 2050 ?](#) ».

interindustrielles et commerciales mondiales en dehors des échanges bilatéraux avec les partenaires commerciaux de la France.

- **Les bases de données Entrées-Sorties mondiales multirégionales** (*Global Multi-Regional Input-output - GMRIO*) permettent de suivre explicitement des pressions environnementales le long des chaînes d’approvisionnement avec des niveaux de détail de plus en plus élevés des secteurs d’activités, des produits et des pays. Ces méthodes reposent sur un cadre de comptabilité environnementale très largement standardisé et théorisé [34–37]. Les applications dans le domaine de l’écologie industrielle se sont multipliées à la suite des récents développements des bases de données GMRIO, notamment EXIOBASE [38]. Ces bases de données visent à atteindre une cohérence mondiale. Cependant elles peuvent introduire des divergences par rapport aux statistiques des instituts nationaux (SIN), notamment en ce qui

concerne leur réconciliation et la prise en compte des réexportations [39].

- **Les méthodes SNAC « Single Country National Accounts Consistent footprints »** proposent de coupler un GMRIO avec des SIN spécifiques et constituent donc un intermédiaire entre les deux précédentes méthodes.

Le modèle MatMat est construit selon une méthode SNAC simplifiée telle que décrite par Tukker et al. [33], formalisée autour d’un cadre birégional unilatéral d’Entrées-Sorties. D’une part, les comptes nationaux sont construits en réconciliant les flux domestiques de la base de données GMRIO EXIOBASE avec des SIN spécifiques (**Tableau 3**). D’autre part, la structure et la composition des chaînes de valeur étrangères, au-delà des importations, sont estimées à partir du modèle GMRIO complet.

Tableau 3 Détail sectoriel du modèle MatMat

Category	Sub-category	Number of sectors	Units
Agriculture	Primary crops	8	k.tonnes
	Farm animals	9	M.EUR
	Forestry	1	k.tonnes
	Fishing	1	k.tonnes
Extractive industry	Fossil fuels	12	k.tonnes
	Metal ores	8	k.tonnes
	Non metallic minerals	3	k.tonnes
Food industry	Animal products	5	M.EUR
	Dairy products	1	M.EUR
	Vegetable products	6	M.EUR
Manufacturing industry	Clothing industry	3	M.EUR
	Primary & secondary materials	28	k.tonnes
	Chemicals & fertilizers	3	M.EUR
	Transport equipment	2	M.EUR
	Other manufacturing products	11	M.EUR
Energy industry	Coal	4	k.toe
	Fuels	19	k.toe
	Gas	4	k.toe
	Bioenergy	4	k.toe
	Nuclear fuel	1	k.toe
	Electricity	12	k.toe
	Heat	1	k.toe
Construction	Construction	1	M.EUR
Transport Services	Land transport	3	M.EUR
	Water transport	2	M.EUR
	Air transport	1	M.EUR
Services	Business services	24	M.EUR
	Water / Waste treatment	20	M.EUR
	Public services	3	M.EUR

* Données EXIOBASE v3.8.2 au format EE-IO. Données additionnelles : Eurostat (Energy balance, EW-MFA, ComExt), bilan national du recyclage (BNR)

Le calcul des empreintes dans MatMat est similaire à celui des travaux du MTE¹³ [8]. À chacun des biens et services consommés par la demande finale¹⁴ française est associé l'ensemble des GES émis (et respectivement l'ensemble des matières premières extraites) pour sa production, en détaillant la totalité des chaînes de valeur, en France et à l'étranger, de l'extraction des matières premières jusqu'au consommateur final français.

2.2. Principales caractéristiques pour l'analyse prospective

Le modèle MatMat propose une interface de paramétrisation spécialement conçue pour intégrer et réconcilier des expertises contrastées sur l'évolution des secteurs d'activité et de l'économie dans son ensemble. Cette interface permet de construire et traduire des scénarios prospectifs intégrant l'énergie, les matières et l'économie avec un réalisme technique et une cohérence macroéconomique. Ainsi, peuvent être paramétrées :

- l'évolution des intensités matières, matériaux et énergétiques de l'appareil productif français ;
- l'évolution de la consommation finale des ménages, des institutions publiques et des biens d'investissement des différents secteurs d'activités ;
- l'évolution des échanges extérieurs ;
- l'intensité énergétique et carbone des importations.

Cela est permis par un ensemble de spécificités du modèle :

- **une approche multisectorielle dite de « méso-échelle »** permet d'intégrer et de concilier des expertises d'échelles contrastées : approches sectorielles (dites de « micro-échelle ») et approches macroéconomiques (dites de « macro-échelle »). Elle est développée à partir de la base de données GMRIO EXIOBASE (v3.8.2) à 200 produits [38] au format EE-IO « *Environmentally-Extended Input-Output* » ;
- le caractère hybride du modèle offre **une représentation physique** des émissions de GES, des usages énergétiques, des matières premières et des matériaux, avec la distinction entre filières de production primaire et secondaire¹⁵. Cette représentation ancrée sur des statistiques des instituts nationaux (voir **Tableau 3**) permet aux

experts sectoriels de plus facilement s'identifier aux différents flux représentés et de faciliter l'intégration de leurs résultats ;

- MatMat propose également une désagrégation du vecteur d'investissement en une matrice carrée à 200 produits sur la base des données KLEMS [40]. Cette **matrice de flux d'investissements** permet d'associer, à chacun des secteurs d'activité, une demande d'investissement propre à chacun des biens d'investissement. En projection, il est alors possible d'informer des évolutions contrastées de la demande d'investissement pour chacun des secteurs productifs à partir des expertises macroéconomiques et/ou sectorielles. Cela permet notamment de reproduire le besoin croissant d'investissements dans les secteurs clés de la transition vers une économie à faibles émissions de carbone ;
- le **caractère birégional** du modèle permet de décliner les différentes caractéristiques précédemment décrites aux échanges inter-industriels français, mais aussi à ceux des partenaires commerciaux de la France. Ces derniers sont agrégés au sein d'une région unique – le Reste du Monde – à partir des données d'EXIOBASE qui détaille les échanges entre 49 régions du monde.

2.3. Mise en œuvre dans le cadre de Transition(s) 2050

L'innovation méthodologique du présent travail est concentrée dans la traduction de l'information quantitative des scénarios prospectifs de Transition(s) 2050 en paramètres d'entrée pour le modèle MatMat. Cette traduction repose sur un ensemble d'expertises complémentaires sur l'énergie, la matière et l'économie.

- D'une part, **le modèle macroéconomique en équilibre général ThreeME [41]** permet de modéliser de façon dynamique les comportements de production et de consommation, les transferts d'activité et les financements associés, en tenant compte explicitement de l'ajustement lent des prix et des quantités (facteurs de production, consommation). ThreeME est un modèle multisectoriel à 37 secteurs, qui offre notamment une représentation détaillée des secteurs producteurs d'énergie (17 secteurs) et des secteurs de transports (5 secteurs). Il comprend également un bloc hybride, qui permet d'endogénéiser les

¹³ À noter que des écarts en niveau peuvent être observés entre les estimations du MTE et celles issues du modèle MatMat. Les estimations du SDES sont en effet basées sur une méthode d'évaluation des contenus indirects des importations et des sources de données (TES symétriques et comptes d'émissions (NAMEA d'EUROSTAT notamment) différentes de celles utilisées dans le modèle MatMat (approche SNAC simplifiée fondée sur le GMRIO EXIOBASE et des SIN spécifiques). Les divergences entre les approches à macro-échelle ont notamment été documentées par le SDES [13].

¹⁴ C'est-à-dire les consommations des ménages, des administrations publiques et les investissements.

¹⁵ Les filières de production primaires mobilisent exclusivement des matières premières vierges alors que les filières secondaires utilisent également des matières premières issues du recyclage (MPR).

mécanismes d'efficacité énergétique dans les dépenses des ménages (en matière de logement et de transport), ainsi que la substitution entre capital et énergie dans les fonctions de production des entreprises (notamment l'industrie).

- D'autre part, **un ensemble d'expertises sectorielles de l'ADEME** permet d'informer dans MatMat des transformations des systèmes énergétiques et matériels absentes du cadre de modélisation macroéconomique ThreeME plus agrégé.

Les différentes étapes de la traduction des scénarios dans MatMat sont détaillées ci-après.

Étape 1 : intégration des expertises sectorielles dans MatMat

La première étape a consisté à traduire un ensemble d'hypothèses sectorielles sous la forme de chocs exogènes dans l'interface de paramétrisation du modèle MatMat. Il s'agit notamment :

- de l'évolution des régimes alimentaires et des gains d'efficacité matières dans l'agriculture et l'alimentation, avec l'évolution des pertes et gaspillages alimentaires aux différentes étapes de la production à la consommation, l'évolution des rendements agricoles (lait, élevage) et l'évolution de la demande d'engrais azotés ;
- de l'évolution de la demande en biomasse non alimentaire (produits énergétiques et matériaux) ;
- de l'évolution de la masse moyenne des véhicules et de l'évolution de leur composition (suite à des substitutions entre matériaux, comme le remplacement de l'acier par du plastique, ou à des gains d'efficacité matières, notamment sur les batteries) ;
- de gains d'efficacité matières et énergétiques dans l'industrie avec l'évolution des taux d'incorporation de matières premières issues du recyclage (MPR) pour l'acier, l'aluminium, les plastiques, le papier-carton et le verre ;
- de la suppression des emballages plastiques à usage unique et leur substitution (ou non) par des emballages d'autres natures (verre, papier-carton) ;
- de l'évolution des dépenses en produits textiles des ménages ;
- de l'évolution de la demande des ménages en produits chimiques, tels que les produits ménagers, peintures, produits phytosanitaires chimiques (dont l'usage est interdit depuis 2022).

Étape 2 : bouclage avec le modèle macroéconomique ThreeME

Si le modèle MatMat offre le niveau de détail sectoriel requis pour intégrer des expertises sectorielles détaillées, cela se fait sous forme de chocs exogènes, sans prendre en compte les effets de transfert induit par une modification des comportements des agents économiques. Un bouclage en deux temps a donc été mis en place avec le modèle ThreeME, afin de prendre en compte les effets induits par la modélisation dynamique dans ThreeME des comportements des agents économiques.

Ainsi, dans un premier temps, le modèle MatMat informe le modèle ThreeME. Les chocs exogènes paramétrés à partir des expertises sectorielles (étape 1) sont concaténés par MatMat au format Entrées-Sorties, puis agrégés au niveau de détail sectoriel du modèle ThreeME. Ces données complémentaires permettent d'informer ThreeME de certains changements technologiques et d'évolutions de la demande finale non perceptibles au niveau de sa segmentation sectorielle.

Dans un second temps, la modélisation ThreeME, intégrant les transformations plus fines décrites précédemment, informe en retour le modèle MatMat. Les sorties de ThreeME¹⁶ permettent de traduire dans MatMat les évolutions de la demande finale dans son ensemble et les évolutions du commerce extérieur, en tenant compte des effets de transfert d'activité et de consommation dans l'économie modélisés par le bouclage macroéconomique dynamique. ThreeME informe par ailleurs MatMat des gains d'efficacité et des substitutions sur l'énergie propres à chaque scénario. Ces évolutions sont mises en cohérence avec les chocs exogènes précédemment décrits¹⁷. Concrètement, ce deuxième temps du bouclage permet de traduire dans MatMat les hypothèses et évolutions suivantes :

- pour le bâtiment, l'évolution de la demande d'investissement calibré dans ThreeME pour atteindre les cibles d'évolution du parc immobilier (m^2 /habitant et m^2 /salarié, taux de destruction / reconversion des bâtiments, nombre de constructions neuves/rénovations), de consommations et mix énergétiques considérés dans chaque scénario en 2050 ;
- pour les modes de transports, les évolutions de la demande des ménages, des investissements et des échanges extérieurs calibrés pour atteindre les cibles d'évolution du trafic (km/passager), des parts modales des différents modes de dépla-

¹⁶ Voir feuilleton « Les effets macroéconomiques ».

¹⁷ Pour les secteurs plus désagrégés dans MatMat que dans ThreeME, les projections sont ventilées à partir des données issues des expertises sectorielles évoquées à l'étape 1, tout en veillant à conserver la cohérence économique d'ensemble.

cement, du parc automobile (nombre de véhicules particuliers, rendement énergétique), des consommations et mix énergétiques envisagés dans chaque scénario en 2050 ;

- pour l'industrie, l'évolution de la demande, des investissements et des échanges extérieurs calibrés pour atteindre les cibles de production, de consommation et mix énergétiques estimés dans chaque scénario en 2050 ;
- pour l'énergie, les évolutions de la demande, des investissements et des échanges extérieurs calibrés dans ThreeME pour atteindre les cibles de consommation et de production d'énergie par vecteur et par usage de chaque scénario en 2050 ;
- pour tous les secteurs, les effets de croissance et de transferts de demande, en réponse à l'accroissement de la population, des gains de productivité du travail et des mesures de politiques publiques simulées.

Étape 3 : scénarisation des intensités énergétiques et carbone des importations

Le rythme de décarbonation des partenaires commerciaux de la France est une hypothèse structurante des résultats en empreinte. Dans la présente étude, il est supposé différent de celui de la France dans les scénarios et suit une évolution tendancielle sur la base du scénario « *Stated Policies Scenario* » (STEPS) de l'AIE [42]. Ce scénario est comparable au scénario tendanciel (TEND) construit dans le cadre de Transition(s) 2050 pour la France. Il est basé sur les politiques énoncées à ce jour, qui mènent à un système énergétique plus efficace et moins dépendant de la combustion des produits fossiles (programmes d'électrification), mais sans tenir pour acquis que les gouvernements atteindront tous les récents objectifs annoncés, notamment en matière de neutralité carbone. Ce choix de scénarisation permet d'inscrire l'analyse dans un contexte mondial plus réaliste et d'isoler l'impact des scénarios Transition(s) 2050 sur les empreintes, indépendamment de l'action du reste du monde.

En dehors de cela, aucune autre hypothèse n'a été introduite sur l'évolution des partenaires commerciaux de la France, en particulier au regard de gains d'efficacité matière dans les processus de produc-

tion à l'étranger (e.g. limitations des pertes et gaspillages, substitution par des matières premières issues du recyclage, etc.).

2.4. Préconisations pour la lecture et l'interprétation des résultats

Dans cette étude, les projections ne sont réalisées que pour l'année 2050. Les empreintes carbone et matières obtenues sont donc une photographie de l'année 2050 et ne permettent pas de discuter notamment des émissions de GES et des besoins matières cumulés sur toute la période de transition vers la neutralité carbone.

Les résultats d'empreintes obtenus pour chaque scénario seront discutés en comparaison au scénario TEND, qui est le prolongement des tendances existantes de l'économie. Cette analyse en différence permet de comparer, toute chose égale par ailleurs, l'efficacité des leviers d'action mobilisés dans les différents scénarios à réduire les empreintes carbone et matières. Lorsque c'est pertinent, une comparaison avec l'année de référence (2015) sera effectuée.

Une décomposition des empreintes par produit de demande finale sera proposée afin de mieux identifier les leviers d'action pour réduire les empreintes et les marges de progrès. Cette approche revient à associer à chaque bien et service consommé par la demande finale intérieure (i.e. les ménages résidant en France, les administrations publiques (APU) et les investissements¹⁸) toutes les matières premières extraites et les GES émis sur l'ensemble des chaînes de production situées en « amont », qu'elles soient localisées en France ou à l'étranger.

Les 200 produits représentés dans le modèle MatMat suivent la structure des nomenclatures d'activités et de produits de la NAF/NACE¹⁹. Ils sont regroupés, pour l'analyse des résultats, en six grandes catégories :

- **Énergie finale** : cette catégorie décrit les usages énergétiques finaux associés aux bâtiments résidentiels (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, cuisson, etc.) et aux véhicules particuliers (carburant) ;

¹⁸ En comptabilité nationale, est entendue comme consommation finale des APU celle dont le bénéfice ultime revient aux ménages (éducation, santé, justice, police, etc.). L'investissement correspond aux « actifs fixes, corporels ou incorporels, utilisés dans un processus de production pendant au moins un an », ainsi qu'aux investissements des ménages dans les bâtiments résidentiels et ceux des APU dans les bâtiments non résidentiels (bureaux, lycées, hôpitaux, etc.) et ouvrages de génie civil.

¹⁹ Respectivement nomenclature d'activités française (NAF) et nomenclature statistique des activités économiques dans la communauté européenne (NACE).

- **Agriculture et alimentation** : cette catégorie regroupe l'ensemble des produits agricoles et agroalimentaires²⁰ consommés par les ménages et les administrations publiques. Sont comptabilisés aussi bien ici la biomasse contenue dans les produits agricoles non transformés (bois, légumes frais, etc.), la biomasse mobilisée pour produire des produits agroalimentaires transformés (viande, boissons, laitages, etc.), que l'ensemble des pressions environnementales générées lors de la production de ces produits (les usages de fertilisants et pesticides, les carburants utilisés par les engins agricoles, etc.).
- **Construction** : cette catégorie comprend les activités de construction et de rénovation à la fois des bâtiments (résidentiels et non résidentiels) et des ouvrages de génie civil (routes, voies ferrées, ponts et tunnels, réseaux d'électricité et de télécommunications, etc.)²¹. Elle comprend aussi les matériaux directement consommés par les ménages et les APU, que ce soit à des fins de travaux (ciment, plâtre, céramiques, bois, laines minérales, etc.) ou autres (e.g. les consommations de papier-cartons et plastiques des APU).
- **Les équipements de transport** : cette catégorie comprend la fabrication des véhicules particuliers et des autres équipements de transport (camion, voiture de service, utilitaire, taxi, rame de métro, train, avion, etc.).
- **Biens finaux** : cette catégorie comprend l'ensemble des biens manufacturés non décrits précédemment, qui sont directement consommés par la demande finale comme le textile, le mobilier, les équipements électroménagers, les ordinateurs, téléviseurs, téléphones, les produits pharmaceutiques et chimiques (peintures, produits d'entretien et d'hygiène, etc.).
- **Les services finaux** : cette catégorie regroupe les services publics, les services de transport et les autres services marchands (commerces, hébergements et restauration, services financiers, services immobiliers, etc.).

²⁰ Cela correspond, en comptabilité nationale, aux produits de « l'agriculture, la sylviculture et la pêche » (section A de la NAF) et des « Industries Alimentaires » (C.10 de la NAF).

²¹ Cela correspond, en comptabilité nationale, aux « activités de construction générale et de construction spécialisée pour les bâtiments et le génie civil » (section F de la NAF).

3. Empreinte carbone des scénarios en 2050

3.1. Composition de l'empreinte carbone et évolution selon les scénarios en 2050

Selon la méthodologie développée dans le modèle MatMat, l'empreinte carbone de la demande finale française est estimée à 702 MtCO₂eq pour l'année 2015, soit 10,9 tCO₂eq/hab. (France métropolitaine).

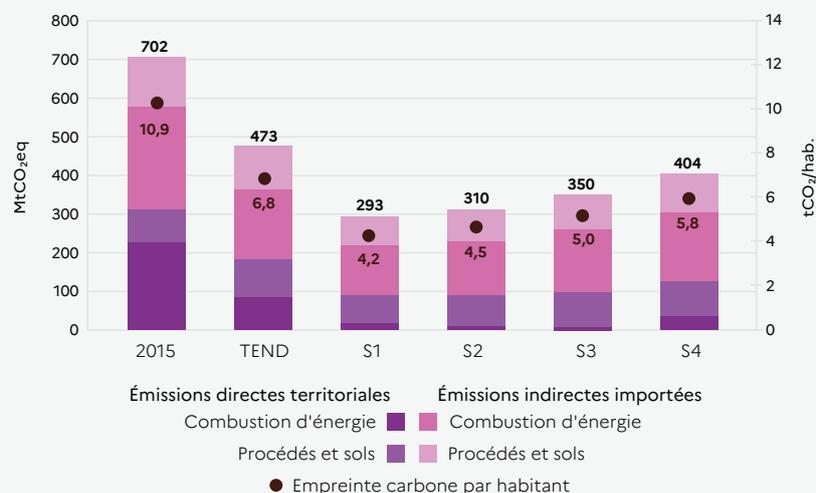
Le **Graphique 3** présente la composition de l'empreinte carbone en 2015 (tous GES) ainsi que sa projection en 2050 selon un scénario TEND et pour chacun des scénarios de neutralité carbone.

D'une part, l'empreinte carbone se compose des **émissions directes territoriales**, c'est-à-dire les émissions qui ont physiquement lieu sur le territoire français, desquelles sont retranchées les émissions liées à la production des biens et services exportés. Dès lors, la composante territoriale de l'empreinte carbone est inférieure au total des émissions directes territoriales considérées pour le calcul de la neutralité carbone. En 2015, 32 % de l'empreinte carbone correspondaient à des GES émis par la combustion d'énergies fossiles sur le territoire national, principalement du CO₂ (**Graphique 3**). Il s'agit notamment de la combustion de carburants pour le transport, de la combustion d'énergies fossiles pour le chauffage des bâtiments et pour les activités de production française de biens et de services. Les émissions

directes territoriales associées aux procédés industriels (comme le CO₂ dans la production de ciment ou les gaz fluorés dans la fabrication de composants électroniques), à l'agriculture (comme le méthane (CH₄) par les activités d'élevage et le protoxyde d'azote (N₂O) avec l'utilisation d'engrais) ou aux traitements des déchets (comme le CH₄ dans les centres de stockage ou le N₂O lié au traitement des eaux usées) représentaient 12 % de l'empreinte carbone (**Graphique 3**). Par la suite, on parlera d'émissions des « procédés et sols ». Au total, **les émissions directes territoriales représentaient 44 % de l'empreinte carbone de la France en 2015.**

D'autre part, l'empreinte carbone se compose des **émissions indirectes importées**. Elles comprennent les GES émis tout au long des chaînes de valeur à l'étranger, autant pour produire des biens et services importés à destination de la demande finale qu'employés par le système productif français comme consommations intermédiaires. En 2015, 38 % de l'empreinte carbone correspondaient à des émissions indirectes issues de la combustion d'énergie fossiles à l'étranger. Les autres émissions indirectes (procédés industriels et usages des sols notamment) représentaient 18 % de l'empreinte carbone. Dès lors, **les émissions indirectes importées représentaient 56 % de l'empreinte carbone de la France en 2015.**

Graphique 3 Composition de l'empreinte carbone en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios



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

Évolution tendancielle de l’empreinte carbone en 2050

En 2050, le prolongement des politiques existantes permet déjà de réduire les émissions de GES en empreinte. En effet, l’empreinte carbone du scénario TEND est évaluée à 473 MtCO₂eq, soit une baisse de 33 % comparativement à son niveau de 2015 (Tableau 4). Ramenée à la population française en 2050, l’empreinte carbone par habitant est de 6,8 tCO₂eq/hab., soit une réduction de 38 % par rapport à son niveau de 2015.

Cette diminution provient principalement de la baisse des émissions directes et indirectes de la combustion (46 % plus faibles que celles de 2015), en lien avec les engagements actés en France et à l’international pour décarboner la production énergétique et industrielle, ainsi que les usages d’énergie dans les transports et les bâtiments. Dès lors, les émissions de la combustion ne représentent plus que 56 % de l’empreinte carbone en 2050 dans le scénario TEND, contre 70 % en 2015.

Tableau 4 Empreinte carbone de la France et composition en 2015 et en 2050 pour tous les scénarios

		Unité	2015	2050				
			TEND	S1	S2	S3	S4	
Empreinte carbone		MtCO ₂ eq	702	473	293	310	350	404
Variation vs 2015			–	- 33 %	- 58 %	- 56 %	- 50 %	- 42 %
En écart au TEND			–	–	- 38 %	- 34 %	- 26 %	- 15 %
Empreinte carbone par habitant		tCO ₂ eq/hab.	10,9	6,8	4,2	4,5	5,0	5,8
Variation vs 2015		%	–	- 38 %	- 61 %	- 59 %	- 54 %	- 47 %
Composition empreinte carbone								
Émissions directes territoriales	Combustion d'énergie	MtCO ₂ eq	224	84	17	10	8	35
	Procédés et sols	MtCO ₂ eq	85	99	74	79	89	90
Émissions indirectes importées	Combustion d'énergie	MtCO ₂ eq	264	179	128	140	163	176
	Procédés et sols	MtCO ₂ eq	129	111	75	81	90	103

Efficacité comparée des scénarios à réduire l’empreinte carbone en 2050

Les actions d’abattement supplémentaires introduites dans les scénarios pour atteindre la neutralité carbone permettent de réduire davantage l’empreinte carbone de la France. Selon les scénarios, l’empreinte carbone de la France en 2050 baisse entre 15 % et 38 % par rapport au TEND²².

S1 et S2 présentent les niveaux d’abattement les plus élevés (respectivement - 38 % et - 34 % par rapport au TEND, cf. Tableau 4), avec une empreinte carbone de 293 MtCO₂eq (4,2 tCO₂eq/hab.) pour S1 et 310 MtCO₂eq (4,5 tCO₂eq/hab.) pour S2 en 2050. S3 se caractérise par une réduction de 26 % de l’empreinte carbone par rapport au TEND avec 350 MtCO₂eq (5 tCO₂eq/hab.) en 2050. S4 est le scénario qui présente le potentiel d’abattement le plus faible (- 15 % par rapport au TEND), avec une empreinte carbone estimée à 404 MtCO₂eq (5,8 tCO₂eq/hab.) en 2050.

Condition *sine qua non* de l’atteinte de la neutralité carbone à l’échelle territoriale, ces scénarios présentent une réduction importante des émissions directes territoriales. La baisse de la demande

énergétique couplée à un mix énergétique décarboné permet d’abattre fortement les émissions directes territoriales liées à la combustion d’énergie. Celles-ci baissent selon les scénarios entre 58 % (S4) et 90 % (S3) par rapport au TEND. Elles ne représentent dès lors plus que 9 % de l’empreinte carbone dans S4 en 2050, 6 % dans S1, 3 % dans S2 et 2 % dans S3 (contre 18 % dans le TEND). Les émissions directes des procédés et sols diminuent également, mais moins fortement que les émissions directes de la combustion. Par conséquent, leur poids dans l’empreinte carbone s’accroît. Elles représentent entre 22 % (S4) et 25 % (pour les autres scénarios) de l’empreinte carbone en 2050, contre 21 % dans le TEND (12 % en 2015).

Les résultats de la présente étude montrent que **ces scénarios permettent aussi de baisser les émissions indirectes importées**. À noter néanmoins que les émissions indirectes, en particulier les émissions de la combustion, baissent à un rythme moins soutenu que les émissions directes territoriales. Cela s’explique notamment par le fait que, par hypothèse dans la scénarisation, les partenaires commerciaux de la France suivent un rythme tendanciel de décarbonation de la demande énergétique, ce qui ne leur permet pas d’atteindre la neutralité carbone en 2050. Dès lors, mécaniquement, la part des émissions indirectes

²² Comme explicitée dans la section 2.4, l’analyse de l’efficacité comparée des scénarios se fait en comparaison au scénario TEND (pris comme contrefactuel), ce qui permet de contrôler les biais de prospective dans l’analyse.

importées dans l’empreinte carbone de la France s’accroît dans les différents scénarios. Les émissions indirectes de la combustion représentent selon les scénarios entre 43 % (S4) et 47 % (S3) de l’empreinte carbone en 2050 (contre 38 % dans le TEND). Celles des procédés et sols représentent entre 25 % (S1 et S4) et 26 % (S2 et S3) de l’empreinte carbone (contre 24 % dans le TEND).

Des différences dans les niveaux d’émissions indirectes importées s’observent entre les scénarios.

S1 et S2 permettent de réduire plus efficacement les émissions de GES importées. Celles-ci baissent respectivement de 30 % et 24 % par rapport au TEND, contre 13 % et 4 % dans S3 et S4. Cette plus forte capacité d’abattement provient de trois leviers concomitants :

- la baisse de la demande, induite par la sobriété des modes de vie et de consommation, permet de diminuer plus fortement les émissions indirectes importées ;
- le plus faible degré d’ouverture au commerce international (priorité au « *made in France* » et à la demande intérieure par rapport aux exports) permet d’orienter la demande vers des produits dont la production en France est moins carbonée (e.g. matériaux, équipements de transport, alimentation) ;
- l’incorporation de matières premières issues du recyclage (MPR), plus poussée dans ces scénarios, permet d’orienter la demande vers une production intérieure à plus faible intensité carbone que celle des produits importés.

3.2. Empreinte carbone par produit de la demande finale

Le **Graphique 4** présente la décomposition de l’empreinte carbone par produit de la demande finale en 2015 et à horizon 2050 selon les scénarios. Pour chaque catégorie de produits consommés, sont détaillées la nature (combustion vs. procédés et sols) et l’origine des émissions.

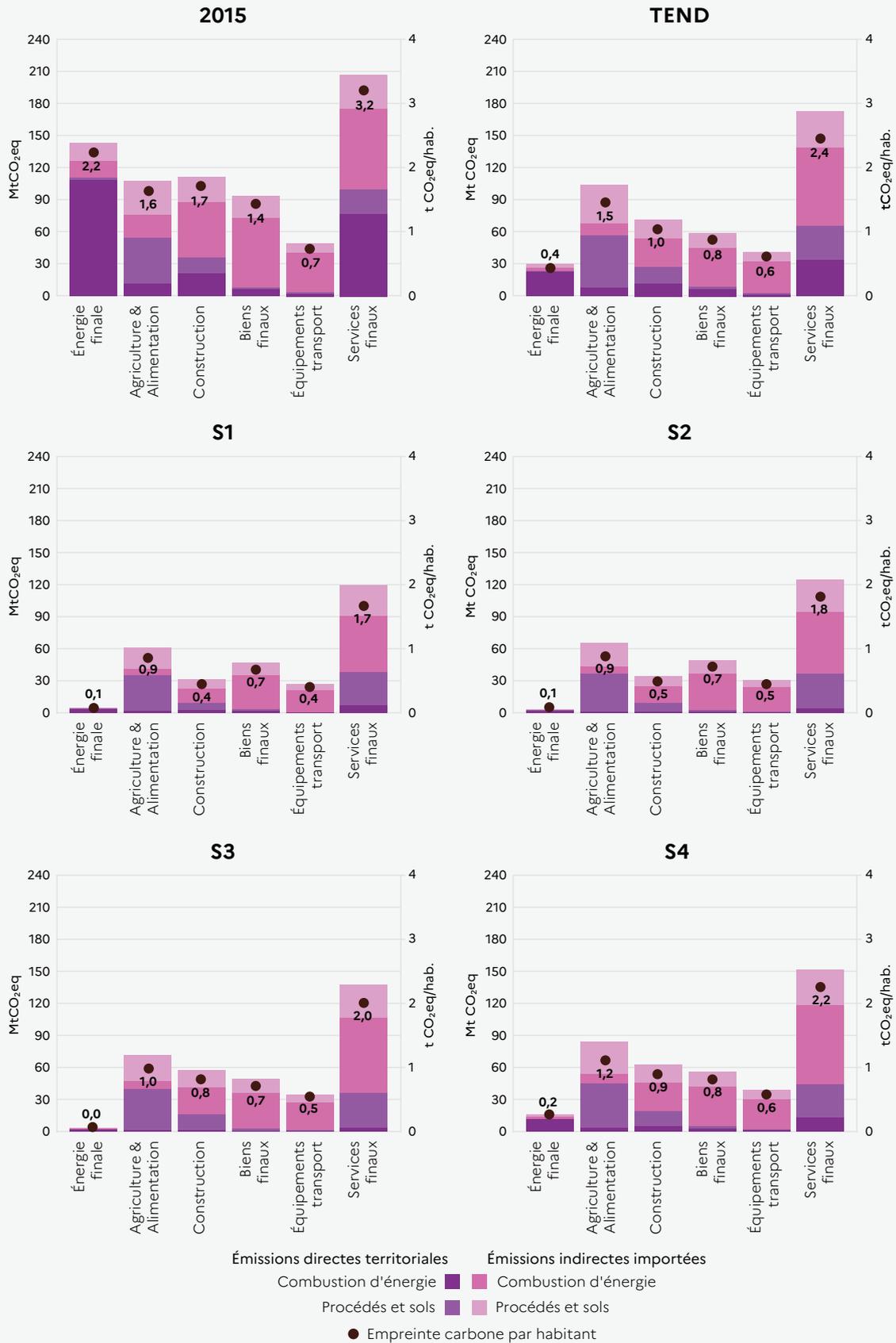
Comme décrit en **section 2.4**, l’approche par produit de la demande finale revient à associer à chaque produit les émissions générées sur toute la chaîne de valeur du produit, de l’extraction de matières premières jusqu’à son achat par le consommateur final.

En 2015, la décomposition de l’empreinte carbone était la suivante :

- 29 % des émissions étaient dues à la catégorie des services (3,2 tCO₂eq/hab.), qui comprend les services publics, les services de transport et les autres services marchands (commerces, hébergements et restauration, services financiers, services immobiliers, etc.) ;
- 20 % à la consommation d’énergie finale pour l’usage des bâtiments résidentiels et les véhicules particuliers (2,2 tCO₂eq/hab.) ;
- 16 % à la catégorie « construction » (1,7 tCO₂eq/hab.), qui comprend la construction de bâtiments, d’ouvrage de génie civil ainsi que la consommation finale de matériaux par les ménages et administrations publiques (matériaux de construction, papier-cartons, plastiques, etc.) ;
- 15 % à la catégorie « agriculture et alimentation » (1,6 tCO₂eq/hab.) ;
- 7 % aux équipements de transport (0,7 tCO₂eq/hab.), soit les émissions liées à la fabrication des véhicules particuliers et des autres équipements de transport ;
- 13 % à la catégorie « biens finaux » (1,4 tCO₂eq/hab.), qui regroupe les biens manufacturés tels que les textiles, les appareils électroménagers, les produits pharmaceutiques et chimiques notamment.

Comme l’illustre le **Graphique 4**, la part des émissions indirectes importées dans l’empreinte varie selon les produits. Les émissions importées représentent par exemple plus de 90 % de l’empreinte carbone des équipements de transport et des autres biens manufacturés. Elles dominent également l’empreinte carbone de la catégorie « construction », en lien avec les émissions de la production et de la transformation des matières premières à l’étranger (e.g. acier, aluminium, cuivre, plastiques, verre, etc. importés pour répondre aux besoins en matériaux de l’économie française).

Graphique 4 Empreinte carbone par produit de la demande finale en 2015 et en 2050 selon les différents scénarios



Note de lecture : dans ce graphique, les émissions associées à la catégorie « énergie finale » correspondent principalement aux émissions générées par les consommations d'énergie des bâtiments résidentiels (chauffage, eau chaude sanitaire, etc.) et des véhicules particuliers (carburants). Les émissions associées à la catégorie « équipements de transport » sont celles générées par la fabrication des véhicules particuliers et des autres équipements de transport (camion, rame de métro, train, avion, etc.). À noter que les émissions associées à la construction des infrastructures de transport (routes, ponts, tunnels, etc.) sont en revanche comptabilisées dans la catégorie « construction ». Pour plus de détails, se référer à la [section 2.4](#).

Évolution tendancielle de l’empreinte carbone par produit de la demande finale

L’amélioration tendancielle de l’efficacité énergétique et de la décarbonation des systèmes énergétiques permet de diminuer fortement les émissions liées à la combustion des énergies fossiles dans toutes les catégories de produits.

Notamment, la catégorie « énergie finale », qui était le deuxième contributeur à l’empreinte carbone en 2015, ne représente plus que 6 % de l’empreinte carbone en 2050 dans le scénario TEND. Les émissions associées sont de 0,4 tCO₂eq/hab. en lien avec l’électrification progressive du parc automobile, les gains d’efficacité énergétique et les changements de vecteur énergétique dans les bâtiments résidentiels supposés dans le scénario TEND.

Efficacité comparée des scénarios à réduire l’empreinte carbone par produit de la demande finale en 2050

Les scénarios de neutralité carbone permettent de réduire les émissions de GES en empreinte dans toutes les catégories de produit par rapport au TEND, mais avec des performances contrastées sur certains produits.

Tous les scénarios vont plus loin que le TEND dans la décarbonation du mix énergétique français et dans la réduction de la demande énergétique (entre 7 % pour S4 et 46 % pour S1). Ainsi, quel que soit le produit considéré, les émissions territoriales liées à la combustion d’énergie sont proches de zéro dans trois des scénarios (S1, S2 et S3). La baisse de ces émissions est toutefois un peu moindre dans S4, où les importations de gaz naturel, notamment, restent soutenues pour répondre à une demande énergétique nettement plus élevée que dans les autres scénarios.

De même, l’empreinte carbone de la catégorie « **agriculture et alimentation** » diminue dans

tous les scénarios comparativement au TEND, sous l’effet de la réduction des pertes et gaspillages à chaque maillon de la chaîne alimentaire. Dans S1, S2 et S3, l’évolution des régimes alimentaires vers des régimes moins carnés permet de réduire davantage l’empreinte carbone de l’alimentation. Elle s’établit en effet dans S1 et S2 à 0,9 tCO₂eq/hab. et à 1 tCO₂eq/hab. dans S3, contre 1,2 tCO₂eq/hab. dans S4 (et 1,5 tCO₂eq/hab. dans le TEND).

L’empreinte carbone de la catégorie « **construction** » diminue également, mais elle est pratiquement deux fois plus faible dans S1 et S2 que dans S3 et S4. En effet, S1 et S2 misent notamment sur la limitation du nombre de constructions neuves, au profit de la rénovation des logements, moins consommatrice de matières et matériaux, couplée à des stratégies de limitation des surfaces et d’optimisation des usages (particulièrement poussées dans S1). De tels scénarios contrastent par exemple avec la stratégie massive de construction/déconstruction adoptée dans S3. S1 et S2 présentent également des taux de réincorporation de MPR plus ambitieux sur les matériaux que S3 et S4, permettant d’orienter la demande en matériaux vers une production nationale à plus faible intensité carbone.

Pour les « **équipements de transport** » et les « **biens finaux** », l’empreinte carbone est principalement composée d’émissions indirectes importées. Les différents scénarios n’ont qu’un impact marginal sur ce poste d’émissions. Les émissions importées de la combustion sont réduites en 2050 selon un rythme tendanciel de décarbonation de la demande énergétique des partenaires commerciaux de la France, identique par hypothèse pour tous les scénarios.

Pour les « **services** », au-delà de la réduction des émissions territoriales de la combustion d’énergie dans les bâtiments tertiaires, les scénarios n’ont que peu d’impact sur les autres émissions.

4. Empreinte matières des scénarios en 2050

L'empreinte matières additionne la masse des matières nécessaires à la production de l'ensemble des biens et services consommés par l'économie française. Dans le calcul de l'empreinte, les matières extraites inutilisées ne sont pas comptabilisées. Il s'agit par exemple des résidus de récoltes laissés sur place, des terres déplacées lors de construction ou de la matière inutilisée issue de l'extraction et de l'exploitation minière. Dès lors, **l'analyse des flux de matières proposée dans ce feuilleton permet de mesurer les pressions exercées sur l'environnement par la satisfaction des besoins matériels de l'économie, mais ne tient pas compte des impacts environnementaux associés à l'extraction des matières premières.**

4.1. Composition de l'empreinte matières et évolution selon les scénarios en 2050

En 2015, l'empreinte matières de la France métropolitaine est estimée par le modèle MatMat à

1 271 millions de tonnes (Mt), soit 19,7 tonnes/hab. (**Tableau 5**). L'empreinte matières comptabilise :

- **les usages directs de matières premières**, c'est-à-dire les quantités de matières premières extraites du territoire national, augmentées de la masse des matières premières importées, puis diminuées de la masse des matières mobilisées pour les exportations²³. Les usages directs de matières sont estimés dans notre modélisation à 416 Mt en 2015, dont 335 Mt relevant de l'extraction intérieure (26 % de l'empreinte matières) et 81 Mt relevant des importations de matières premières (6 % de l'empreinte matières) ;
- **les usages indirects de matières**, exprimés en équivalent matières premières (*raw material equivalent*, RME). Il s'agit des matières extraites à l'étranger pour fabriquer les biens et services importés en France. Les usages indirects de matières représentaient 855 Mt en 2015, soit 67 % de l'empreinte matières française²⁴.

Tableau 5 Empreinte matières de la France et composition en 2015 et en 2050 pour tous les scénarios

	Unité	2015	2050				
			TEND	S1	S2	S3	S4
Empreinte matières	Mt	1271	1363	1005	1066	1199	1299
Variation vs 2015	%	—	7%	-21%	-16%	-6%	2%
En écart au TEND	%	—	—	-26%	-22%	-12%	-5%
Empreinte matières par habitant	t/hab.	19,7	19,5	14,4	15,3	17,2	18,6
Variation vs 2015	%	—	-1%	-27%	-22%	-13%	-5%
Composition empreinte matières							
Usage direct - extraction intérieure (hors export)	Mt	335	368	238	281	338	347
Usage direct - importations matières premières	Mt	81	50	23	22	26	36
Usage indirect - contenu matières des biens et services importés	Mt	855	945	745	763	836	916
Composition empreinte matières par catégorie de matières²⁴							
Biomasse	Mt	329	406	289	331	345	369
Matières fossiles	Mt	210	113	68	68	75	90
Minerais métalliques	Mt	112	144	112	118	135	155
Minerais non métalliques	Mt	621	700	536	549	644	685

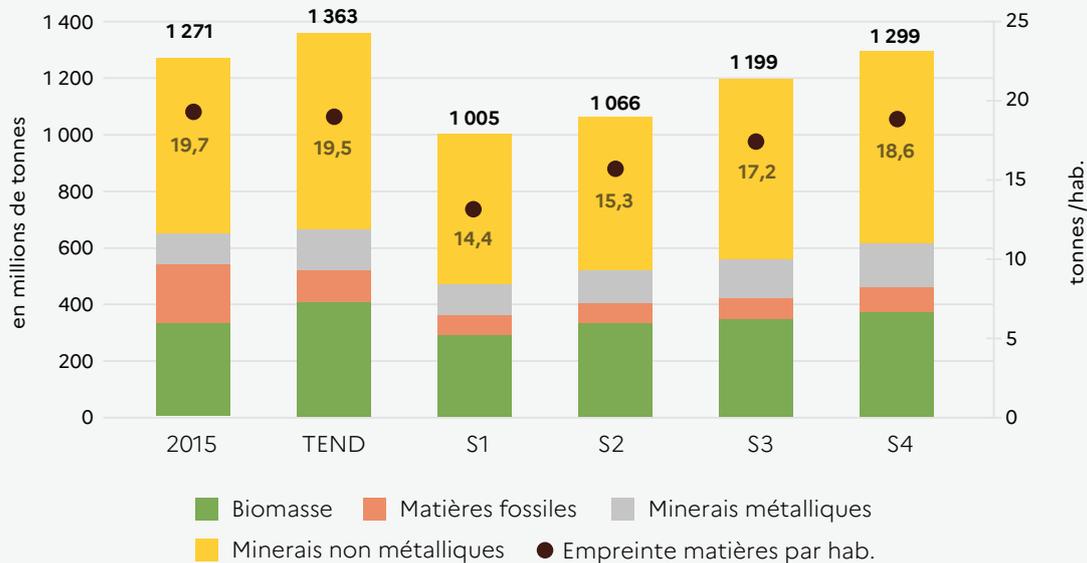
²³ Sont déduites la masse des matières exportées, ainsi que la masse de matières mobilisées pour la production des biens et services exportés. Dès lors, les flux apparents en empreinte divergent de la consommation intérieure apparente de matières (DMC) qui comptabilise la matière mobilisée par la production des biens et services exportés.

²⁴ Les écarts potentiels avec l'empreinte totale sont dus aux arrondis.

En 2015, l’empreinte matières de la France était composée à 49 % de minerais non métalliques, 26 % de biomasse, 16 % de matières fossiles et 9 % de

minerais métalliques (*Graphique 5*). Ces deux dernières catégories sont très faiblement extraites du territoire national (0,2 %).

Graphique 5 Empreinte matières de la France en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios



En 2015, seulement 9 % des matières extraites à l’étranger pour répondre à la consommation française avaient réellement traversé la frontière sous une forme brute (usage direct). Il s’agit essentiellement d’importations de matières fossiles, comme le *Graphique 6* le montre (en bleu clair).

Évolution tendancielle des composantes de l’empreinte matières en 2050

En 2050, le prolongement des tendances actuelles induit une croissance de la consommation de matières premières. L’empreinte matières du scénario TEND est estimée à 1 363 Mt, soit 7 % de plus que le niveau de 2015 (*Tableau 5*). Néanmoins, ramenée à la population française en 2050, la consommation de matières moyenne par habitant dans le TEND est comparable à celle de 2015 (19,5 t/hab. contre 19,7 t/hab. en 2015).

La décarbonation tendancielle de l’économie française conduit à une baisse de la consommation de matières fossiles, qui passe de 3,3 t/hab. en 2015 à 1,6 t/hab. en 2050 dans le TEND (*Graphique 6*).

Mais, dans le tendanciel, la réduction de la consommation de matières fossiles (qui ne représentent plus

que 8 % de l’empreinte matières en 2050) s’accompagne d’une hausse de la consommation des autres catégories de matières.

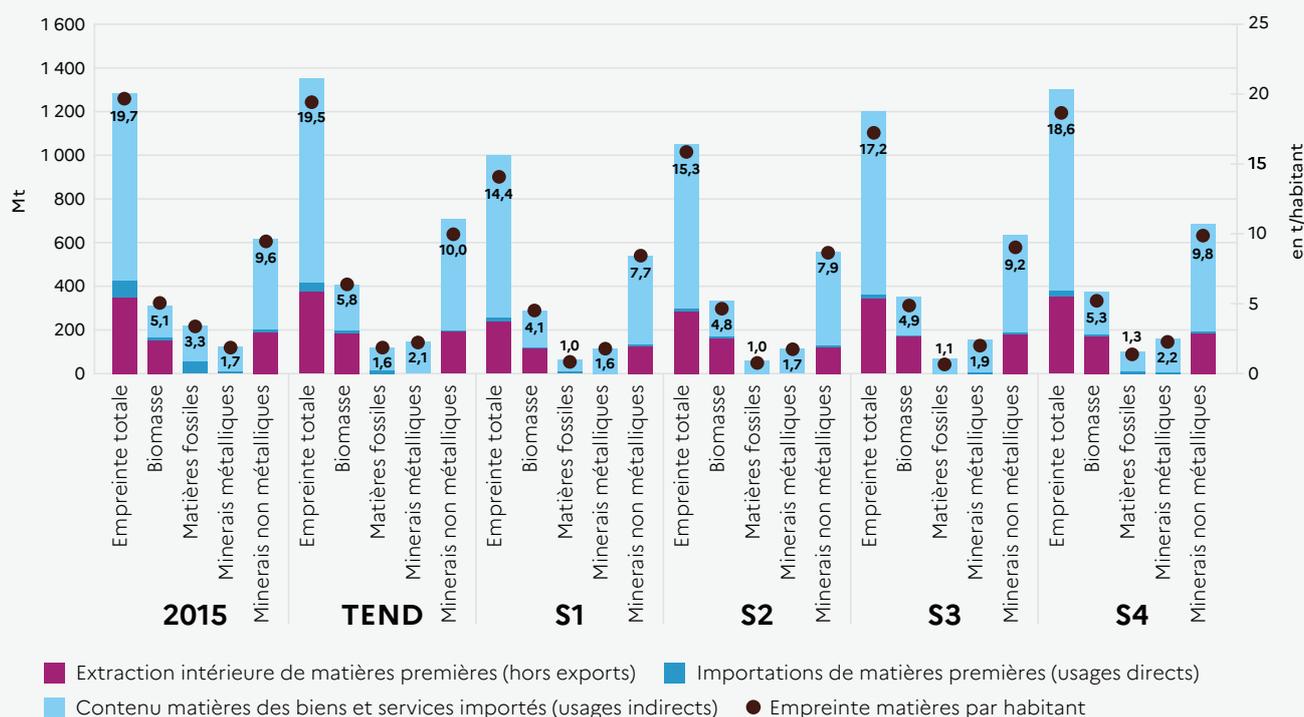
La consommation de biomasse par habitant augmente de 14 % par rapport à 2015, pour s’établir à 5,8 t/hab. en 2050. Elle représente alors 30 % de l’empreinte matières dans le TEND.

Dans le même temps, la demande en minerais non métalliques s’accroît de 4 % avec une empreinte moyenne à 10 t/hab. en 2050, soit 51 % de l’empreinte matières du TEND.

La plus forte augmentation concerne les minerais métalliques, dont la consommation par habitant est estimée à 2,1 t/hab. en 2050, soit une hausse de 19 % par rapport à 2015. Dès lors, les minerais métalliques représentent 11 % de l’empreinte matières en 2050 dans le TEND.

Dans le TEND, ce sont principalement les usages indirects de matières qui tirent la croissance des flux, en lien avec l’accroissement des importations de biens et services dans ce scénario par rapport à 2015.

Graphique 6 Composition de l’empreinte matières en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios



Efficacité comparée des scénarios de neutralité carbone à réduire l’empreinte matières en 2050

L’introduction dans les scénarios de mesures supplémentaires pour atteindre la neutralité carbone permet de réduire l’empreinte matières par rapport au scénario TEND²⁵. Selon les scénarios considérés, l’empreinte matières en 2050 diminue entre 5 % (S4) et 26 % (S1) par rapport au scénario TEND (Tableau 5).

Comme attendu, S1 présente l’empreinte matières la plus faible avec 14,4 t/hab. en 2050, soit une réduction de 26 % par rapport au scénario TEND. Il est suivi par S2, qui active les mêmes leviers que S1 mais de façon moins ambitieuse sur la sobriété. L’empreinte matières de S2 est évaluée à 15,3 t/hab. en 2050, soit + 1 t/hab. par rapport à S1. S3, qui s’inscrit dans un consumérisme vert avec un fort recours à la technologie pour optimiser les usages, affiche une empreinte matières moyenne de 17,2 t/hab. Enfin, S4, qui vise à poursuivre les modes de vie actuels, a une empreinte matières de 18,6 t/hab. en 2050, soit un niveau légèrement en deçà du TEND (- 5 %).

Les actions mises en œuvre pour décarboner l’économie dans ces scénarios induisent un fort recul de la consommation directe et indirecte des matières fossiles. Elle chute de 40 % dans S1 et S2 par rapport au TEND, pour s’établir à 1 t/hab. en 2050. Elle dimi-

nue de 34 % dans S3 comparativement au TEND et de 20 % dans S4.

Sous l’effet notamment de la forte décarbonation du mix énergétique français dans les scénarios, les importations de matières fossiles sont pratiquement nulles en 2050 (Graphique 6). Seul S4 maintient des importations de gaz naturel pour répondre à une demande énergétique plus élevée que dans les autres scénarios. Les usages indirects diminuent également, du fait notamment de la baisse de la consommation de combustibles fossiles à l’étranger pour le raffinage des combustibles importés.

La baisse de la consommation des matières fossiles se fait sans hausse de la consommation des autres catégories de matières par rapport au TEND, sauf pour les minerais métalliques dans S4.

Dans tous les scénarios, la consommation de biomasse est plus faible que dans le scénario TEND, en lien notamment avec la réduction de 50 % des pertes et gaspillages alimentaires par rapport à 2015 supposée dans ces scénarios. Elle est ainsi 9 % plus faible dans S4 que dans le TEND. Dans S2 et S3, l’évolution notamment des régimes alimentaires vers des régimes moins carnés permet de réduire davantage la consommation de biomasse par rapport au TEND, avec respectivement une diminution de 18 % et 15 % de l’empreinte biomasse. Dans S2, la

²⁵ Comme explicitée dans la section 2.4, pour contrôler les biais de prospective, l’analyse de l’efficacité comparée des scénarios se fait en comparaison au scénario TEND (pris comme contrefactuel).

part de l'extraction intérieure augmente légèrement (47 % de l'empreinte biomasse, contre 45 % dans le TEND), en lien notamment avec la hausse de la consommation de produits locaux peu transformés supposée dans ce scénario.

S1 est le scénario qui présente la consommation en biomasse la plus faible. Dans ce scénario où la forêt est préservée et les régimes alimentaires profondément revisités²⁶, les besoins de l'économie française en biomasse sont estimés à 4,1 t/hab. en 2050 (soit - 29 % par rapport au TEND).

À noter que dans S3 et S4, et contrairement aux autres catégories de biomasse considérées dans la modélisation, l'extraction intérieure de bois augmente par rapport au TEND (+ 39 % dans S3, + 11 % dans S4). Mais la réduction des pertes et gaspillages alimentaires, couplée dans S3 à des régimes alimentaires plus sobres, permet toutefois de contenir la consommation de l'ensemble des biomasses en deçà de celle du TEND.

Concernant les minerais métalliques et non métalliques, un fort recul de la consommation est observé dans S1 et S2. Les minerais métalliques diminuent de 22 % dans S1 par rapport au TEND et de 18 % dans S2. Les consommations sont estimées respectivement à 1,6 t/hab. et 1,7 t/hab., soit des niveaux proches de celui de 2015. Pour les minerais non métalliques, la consommation baisse de 23 % dans S1 et 21 % dans S2 par rapport au TEND. La consommation moyenne est estimée à 7,7 t/hab. dans S1 et 7,9 t/hab. dans S2 (soit pratiquement 2 t/hab. de moins que la consommation moyenne de 2015).

La contraction de la consommation des minerais métalliques et non métalliques est moins marquée dans les deux autres scénarios. Dans S3, la consommation en empreinte est évaluée à 1,9 t/hab. de minerais métalliques et 9,2 t/hab. de minerais non métalliques en 2050, soit une baisse de respectivement 6 % et 8 % par rapport au TEND. S4 présente des niveaux de consommation proches de ceux du TEND.

La décomposition de l'empreinte matières par produit de demande finale, proposée dans la **section 4.2**, permet de mieux appréhender les déterminants sous-jacents à ces évolutions et d'explicitier les écarts entre les scénarios.

4.2. Empreinte matières par produit de la demande finale

Le **Graphique 7** présente la décomposition en 2015 de l'empreinte matières par produit de la demande finale et son évolution en 2050 selon les différents scénarios.

Sont détaillés, pour chaque catégorie de produits consommés, le type de matières consommées (biomasse, matières fossiles, minerais métalliques et non métalliques) ainsi que la part des usages directs et indirects de chaque matière. Les différentes catégories de produits sont décrites dans la **section 2.4**.

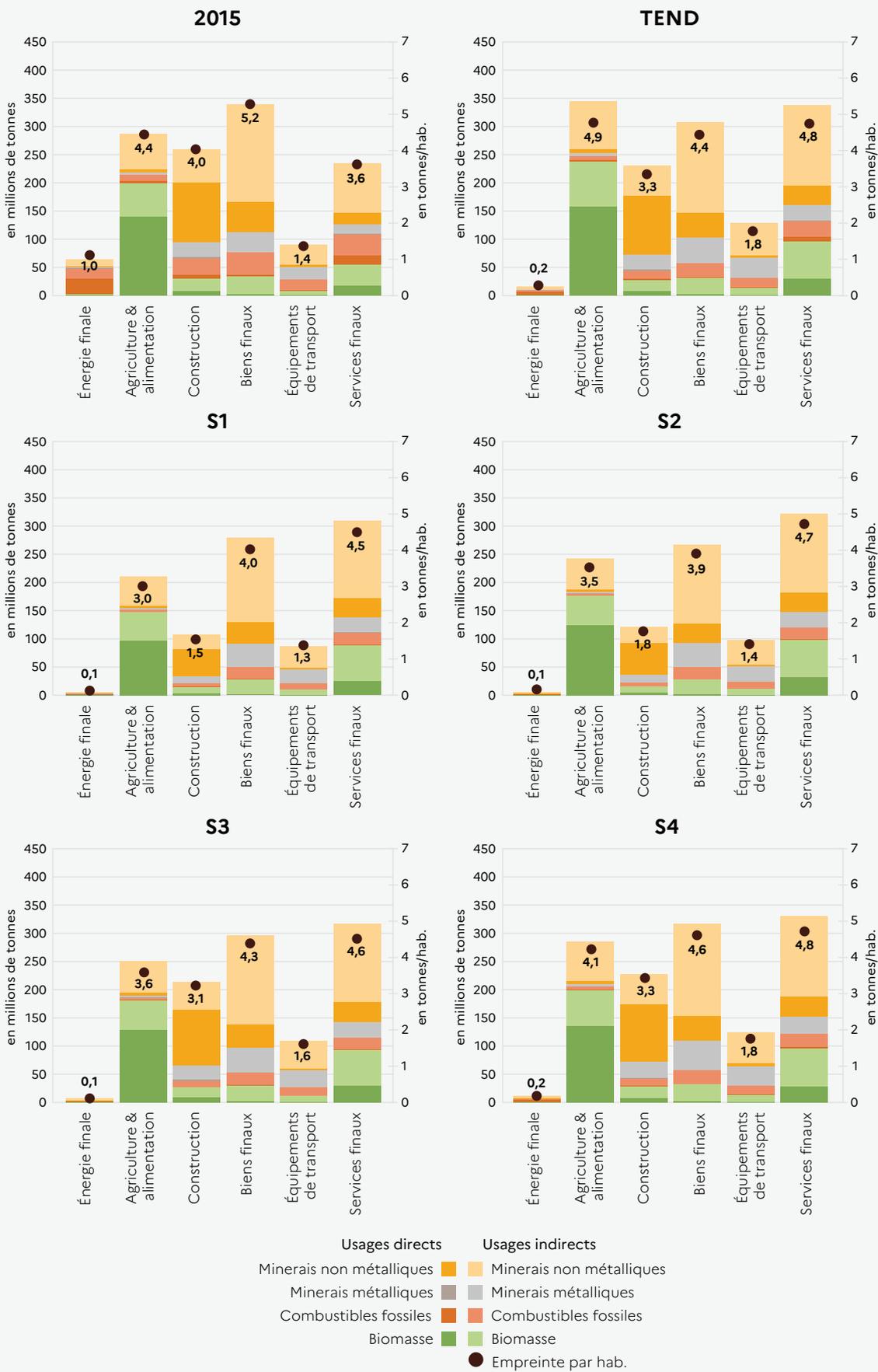
En 2015, la décomposition de l'empreinte matières était la suivante :

- 27 % était liée aux « biens finaux » (5,2 t/hab.), soit les biens manufacturés directement consommés par la demande finale comme le textile, les équipements électroménagers, les produits pharmaceutiques et chimiques ;
- 23 % à la catégorie « agriculture et alimentation » (4,4 t/hab.) ;
- 20 % à la catégorie « construction » (4 t/hab.), qui agrège notamment la construction des bâtiments, des infrastructures de transport ainsi que les consommations de matériaux des ménages et administrations publiques (type papier-carton, plastiques, matériaux de construction) ;
- 18 % à la catégorie « services » (3,6 t/hab.), qui comprennent les services publics, les services de transport et les autres services marchands (commerces, hébergements et restauration, services financiers, services immobiliers, etc.) ;
- 7 % à la catégorie « équipements de transport » (1,4 t/hab.) ;
- 5 % à l'énergie finale consommée par les bâtiments résidentiels et les véhicules particuliers (carburant) principalement (1 t/hab.).

Comme l'illustre le **Graphique 7**, en 2015, la biomasse est principalement mobilisée pour la production des produits agricoles non transformés et transformés (60 %) ainsi que pour la production des services (17 %), qui comprennent notamment les services de restauration. La consommation des autres catégories de matières est plus diffuse. À noter que plus le produit est transformé (biens manufacturés, services), plus les chaînes d'approvisionnement sont mondialisées et plus la part des usages indirects est importante. Par exemple, les usages indirects de matières représentaient 94 % de l'empreinte matières des équipements de transport, 83 % de l'empreinte matières des biens finaux et 77 % de celle des services en 2015.

²⁶ Dans ce scénario est notamment supposée une baisse des apports caloriques et une division par trois de la consommation de viande par rapport à 2015.

Graphique 7 Empreinte matières par produit de la demande finale en 2015 et en 2050 selon les différents scénarios



Note de lecture : se référer à la section 2.4. pour le détail des catégories.

Évolution tendancielle de l’empreinte matières par produit de la demande finale

En 2050, l’évolution tendancielle de l’économie modifie la décomposition de l’empreinte matières par produit de la demande finale par rapport à celle de 2015.

La catégorie **agriculture et alimentation** devient le premier poste de consommation de matières, avec 4,9 t/hab. en 2050 (+ 11 % par rapport à 2015). Elle représente 25 % de l’empreinte matières de la France en 2050. Tout comme les **services** (25 %), dont la contribution augmente fortement en 2050, en lien avec la poursuite de la tertiarisation de l’économie²⁷. L’empreinte matières des services est en effet estimée à 4,8 t/hab. en 2050 dans le TEND, soit une hausse de 34 % par rapport à 2015.

La consommation de matières associée aux **équipements de transport** augmente aussi fortement (+ 32 % par rapport à 2015). Ils contribuent dès lors à 9 % de l’empreinte matières en 2050 dans le TEND. Cela s’explique par un accroissement des ventes annuelles des véhicules particuliers neufs, sous l’effet de l’électrification progressive du parc automobile. Mais aussi par une augmentation de la taille de ces véhicules par rapport à 2015, qui vient contrebalancer les allègements introduits dans les matériaux qui les composent (par exemple avec la substitution de l’acier par des matériaux plus légers comme l’aluminium et le plastique).

À l’inverse, **l’énergie finale** voit sa contribution diminuer et ne représente dans le TEND plus que 1 % de l’empreinte matières de la France en 2050. Elle mobilisait essentiellement des matières fossiles en 2015, dont la consommation est fortement réduite en 2050 par les gains d’efficacité énergétique et l’électrification des usages dans les bâtiments résidentiels et les véhicules particuliers. La consommation de matières due à l’énergie finale chute donc à 0,2 t/hab. en 2050 dans le TEND.

Les besoins matières de la **construction** se réduisent également (- 18 % par rapport à 2015) du fait d’un ralentissement de la construction neuve, tant dans le résidentiel (sous l’effet du ralentissement du taux de croissance démographique) que dans le tertiaire (avec le développement du télétravail et du e-commerce). L’empreinte matières de la construction est estimée à 3,3 t/hab. en 2050 dans le TEND et ne contribue plus qu’à 17 % de l’empreinte matières de la France en 2050.

La consommation de matières associée aux **biens finaux** diminue également de 16 % par rapport à 2015, en lien notamment avec les baisses supposées dans le TEND sur les dépenses en textiles des ménages et leurs consommations de produits chimiques et phytosanitaires. Elle est estimée à 4,4 t/hab. soit 23 % de l’empreinte matières en 2050.

Efficacité comparée des scénarios à réduire l’empreinte matières par produit de la demande finale en 2050

L’atteinte de la neutralité carbone en 2050 permet de réduire les consommations de matières pour pratiquement tous les produits de la demande finale par rapport au TEND. Des performances différentes s’observent cependant selon les leviers mobilisés dans les scénarios.

Condition *sine qua non* de l’atteinte de la neutralité carbone à l’échelle du territoire français, les flux de matières mobilisées par la consommation **d’énergie finale** par les bâtiments résidentiels et les véhicules particuliers sont réduits dans tous les scénarios par rapport au TEND. Dans S1, S2 et S3, la baisse est de l’ordre d’un facteur 2 par rapport au TEND, avec une consommation de matières qui s’établit à 0,1 t/hab. en 2050. Dans S4, la consommation est réduite de 26 % par rapport au TEND.

L’empreinte matières des **produits agricoles et alimentaires** diminue également dans tous les scénarios grâce à la réduction des pertes et gaspillages alimentaires aux différents maillons de la chaîne alimentaire. Elle est ainsi estimée à 4,1 t/hab. en 2050 dans S4, contre 4,9 t/hab. dans le TEND. Elle baisse encore davantage dans les autres scénarios, sous l’effet notamment de l’évolution des régimes alimentaires et dans S1 d’une limitation de l’exploitation forestière. Dans ce scénario, l’empreinte matières des produits agricoles est réduite à 3 t/hab., soit une réduction des besoins matières de 64 % par rapport au TEND. Dès lors, pour tous les scénarios, les produits agricoles et alimentaires ne représentent plus que le 3^e poste de consommation de matières en empreinte en 2050, derrière les services et les biens finaux.

Pour la catégorie « **construction** », les performances des scénarios sont plus contrastées. S3 et S4 présentent une consommation de matières proche du TEND (respectivement - 7 % et - 1 % par rapport au TEND). S1 et S2 permettent de réduire plus fortement l’empreinte matières de cette catégorie en misant notamment sur des stratégies de limitation de la construction neuve et d’optimisation de

²⁷ Selon la modélisation ThreeME, les services contribuent à 73 % de la valeur ajoutée créée en 2050 dans le TEND, contre 58 % en 2015.

l'occupation des bâtiments, particulièrement dans S1. L'incorporation de matières premières issues du recyclage (MPR) est aussi plus développée dans ces scénarios et permet de réduire les consommations de matières premières vierges associées à la production de matériaux. Les usages directs de minerais métalliques, par exemple, diminuent de 57 % dans S1 par rapport au TEND et de 68 % dans S2, scénario qui présente les taux d'incorporation de MPR les plus élevés.

La même dynamique s'observe sur la catégorie « **biens finaux** » entre les scénarios qui par construction s'appuient en priorité sur des progrès technologiques (S3 et S4) et ceux qui misent aussi sur des leviers de sobriété et une moindre ouverture au commerce international (S1 et S2). En effet, en 2050, l'empreinte matières des biens finaux est évaluée à 4,3 t/hab. dans S3 et à 4,6 t/hab. dans S4. Dans ce dernier scénario, qui vise à maintenir les modes de vie actuels²⁸, le niveau de consommation de matières est même supérieur au TEND (4,4 t/hab.). Comparativement, la consommation de matières associée aux biens finaux est de 4 t/hab. dans S1 et 3,9 t/hab. dans S2 en 2050. Les stratégies de sobriété, particulièrement poussées notamment sur les dépenses en textiles et les produits de la chimie, permettent de diminuer davantage les usages directs et indirects de matières comparativement à tous les autres scénarios (notamment sur les minerais non métalliques).

De même, S1 et S2 permettent de réduire davantage l'empreinte matières des **équipements de transport** que S3 et S4 qui affichent une consommation de matières proche du TEND en 2050. Elle est en effet estimée à 1,3 t/hab. dans S1 en 2050 et à 1,4 t/hab. dans S2, contre 1,6 t/hab. dans S3 et 1,8t/hab. dans S4 et le TEND. Cela s'explique notamment par la diminution du nombre de ventes de véhicules particuliers (en lien avec les changements de comportements - télétravail, covoiturage, sollicitation maximale du report modal - supposés dans S1 et S2), couplée à la vente de véhicules plus petits dans S1 et S2 que dans les autres scénarios.

Enfin, les **services** (marchands et non marchands) deviennent le premier poste de consommation de matières de l'économie dans les scénarios en 2050. L'empreinte matières des services est proche de celle du TEND et peu contrastée. Elle s'établit en effet à 4,5 t/hab. dans S1, 4,7 t/hab. dans S2, 4,6 t/hab. dans S3 et 4,8 dans S4 (comme dans le TEND). Ces résultats sont à mettre en regard de la contribution des services à l'activité économique en 2050 dans chacun des scénarios. Selon la modélisation ThreeME, les services génèrent en effet 75 % de la valeur ajoutée de l'ensemble des branches d'activité dans S4, et respectivement 78 %, 80 % et 85 % de la valeur ajoutée dans S3, S2 et S1 (contre 73 % dans le TEND). Dès lors, c'est le recul de la consommation de matières fossiles, plus marqué dans les scénarios de neutralité carbone, qui explique en grande partie la baisse de l'empreinte matières des services par rapport au TEND en 2050.

²⁸ Contrairement au TEND, il n'y a pas de baisse, par exemple, des dépenses en textiles dans ce scénario.

5. Mise en perspective et enseignements

5.1. Un découplage possible entre activité économique et empreintes, favorisé par la sobriété...

Cette étude montre que l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 à l'échelle de la France métropolitaine permet bien de réduire également l'empreinte carbone de l'économie française par rapport à 2015. En outre, elle met en évidence que l'atteinte de la neutralité carbone présente des co-bénéfices sur l'empreinte matières.

Elle fait également ressortir que les scénarios qui misent plus particulièrement sur la sobriété (S1 et S2) permettent de réduire plus efficacement les émissions de GES en empreinte. Ces scénarios permettent aussi de diminuer les pressions sur l'environnement exercées par la satisfaction des besoins matériels de l'économie française comparativement à l'année 2015 (**Graphique 8**), là où les scénarios S3 et S4 présentent une empreinte matières en niveau proche de celle de 2015.

Le **Graphique 8** permet également d'analyser pour chacun des scénarios la possibilité d'un découplage entre l'évolution des empreintes matières et carbone d'une part et la croissance de l'activité économique (mesurée par le produit intérieur brut) d'autre part. Le découplage sera qualifié d'absolu si la pression sur l'environnement (ici l'empreinte carbone ou l'empreinte matières) demeure stable ou décroît dans le temps tandis que le PIB augmente. Le découplage sera dit « relatif » lorsque la pression sur l'environnement augmente mais à un taux de croissance moindre que celui du PIB sur la période.

L'analyse des effets macroéconomiques des scénarios²⁹ a montré que tous génèrent en 2050 une croissance de l'activité économique par rapport à 2015.

Dès lors, **un découplage absolu s'observe entre l'empreinte carbone et le PIB réel dans tous les scénarios**. Comparativement à 2015, les émissions de GES en empreinte diminuent en 2050 (de 42 % à 58 % selon les scénarios) alors que dans le même temps l'activité économique croît. Ce découplage entre émissions de GES et PIB traduit la baisse de l'intensité carbone

du PIB dans les scénarios : elle passe de 0,32 tCO₂eq /kEUR de richesse créée en 2015 à 0,09 tCO₂eq /kEUR dans S1 et S2, 0,10 tCO₂eq /kEUR dans S3 et 0,12 tCO₂eq /kEUR dans S4.

Dans le même temps, **un découplage absolu entre empreinte matières et PIB apparaît possible pour trois scénarios (S1, S2 et S3)** puisque la consommation de matières premières diminue dans ces scénarios alors que la richesse créée augmente. Pour S4, malgré une diminution de la consommation de matières fossiles par un facteur 2, l'empreinte matières augmente de 2 % par rapport au niveau de 2015, mais à un taux moindre que le taux de croissance de l'activité économique. **Ce n'est donc qu'un découplage relatif qui est observé pour S4.**

La possibilité d'un découplage absolu paraît assez robuste pour S1 et S2, avec une consommation de matières qui décroît en 2050 pour toutes les catégories de matières (S1) ou s'établit *a minima* à des niveaux comparables à 2015 (S2) (**Tableau 5**). La possibilité d'un découplage absolu semble toutefois moins certain pour S3, dont l'empreinte matières diminue de 6 % par rapport à 2015 uniquement du fait de la réduction de la consommation des matières fossiles. En effet, si les matières fossiles sont exclues du calcul, on constate que, pour S3, la consommation de matières augmente entre 2015 et 2050 (**Graphique 8**), remettant en question le découplage absolu avec la croissance du PIB pour ce scénario.

Le découplage entre croissance du PIB et évolution de l'empreinte matières est lié à l'amélioration de la productivité matières. La productivité matières est traditionnellement calculée en rapportant le PIB à la consommation intérieure de matières (DMC), exprimée en euros/kg. C'est un indicateur de l'efficacité de l'utilisation des matières premières suivi par de nombreux États, la Commission européenne³⁰ et les organisations internationales³¹.

En France, la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV – **article 74**) fixe un objectif d'amélioration de la productivité matières de 30 % entre 2010 et 2030 (soit 0,3 % par an), avec une cible à 3,42 EUR/kg en 2030. En 2018, la productivité matières était estimée par le MTE à **3 EUR/kg**. Cependant, ainsi définie, la productivité matières n'intègre pas les flux de

²⁹ Feuilleton « Les effets macroéconomiques ».

³⁰ Comme défini dans le cadre de sa « Feuille de route pour une Europe efficiente ».

³¹ Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) notamment.

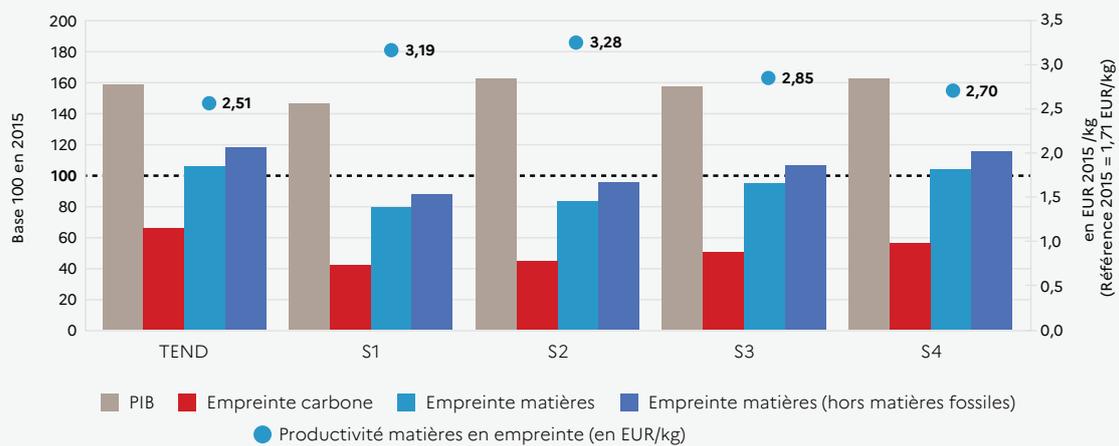
matières premières mobilisées lors des processus de production à l'étranger et du transport jusqu'à nos frontières. Or, 67 % de l'empreinte matières de la France en 2015 était liée au contenu matières des biens et services importés. La productivité matières, basée sur la DMC, ne reflète donc pas l'étendue réelle de la dépendance aux matières premières. Dans ce feuillet, la productivité matières est donc calculée en rapportant le PIB à l'empreinte matières (RMC).

Dans tous les scénarios, une augmentation de la productivité matières en empreinte est observée en 2050 par rapport à son niveau de 2015 (1,71 EUR/kg – cf. **Graphique 8**). Cela provient principalement d'une forte diminution de l'usage des combustibles fossiles dans les mix énergétiques en 2050. Cela s'explique aussi par une réorientation plus forte de la consommation française vers des services pour lesquels la productivité matières est plus élevée.

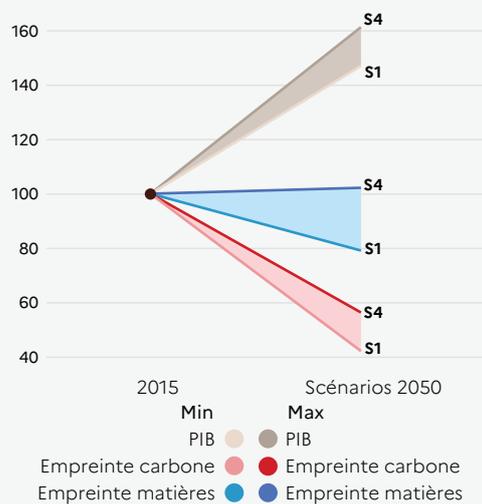
Ainsi, dans S3 et S4, la productivité matières en empreinte s'établit respectivement à 2,85 et 2,70 EUR/kg en 2050, soit un taux d'accroissement annuel moyen autour de 1 % par an entre 2015 et 2050. L'accroissement de la productivité matières est beaucoup plus soutenu dans S1 et S2 (de l'ordre de 2 % par an en moyenne entre 2015 et 2050) avec une productivité matières estimée respectivement à 3,19 et 3,28 EUR/kg en 2050.

In fine, si un découplage semble possible entre l'évolution des empreintes carbone et matières et l'évolution de la croissance de l'activité économique (**Graphique 9**), ces résultats (notamment basés sur des indicateurs de flux pour l'empreinte matières) mériteraient d'être approfondis à l'aune d'autres indicateurs d'impacts environnementaux.

Graphique 8 Évolutions par rapport à 2015 de l'activité économique (PIB), des empreintes carbone et matières, ainsi que de la productivité matières selon les scénarios



Graphique 9 Valeurs minimum et maximum des 4 scénarios pour le PIB et les empreintes matières et carbone en 2050 rapportées à une base 100 en 2015



5.2. ...mais des réductions qui restent insuffisantes au regard des enjeux globaux de diminution des pressions environnementales

À l'échelle de la France comme à l'échelle internationale, il n'existe pas d'objectif légal ou gouvernemental de réduction des émissions de gaz à effet de serre en empreinte. La littérature (voir **section 1.3**) permet toutefois de mettre en perspective les résultats de la présente étude avec des cibles de réduction des émissions de GES au niveau mondial.

Ainsi, sur la base d'une population mondiale estimée à 9,7 milliards d'habitants en 2050, lorsqu'une répartition strictement égalitaire entre les pays est appliquée, les émissions de GES de chaque Terrien devraient être comprises, selon les travaux du GIEC, entre 1 tCO₂eq (pour une trajectoire + 1,5 °C) et

2,1 tCO₂eq (pour une trajectoire + 2 °C) en 2050. Ces valeurs, moyennées à l'échelle mondiale, ne peuvent être considérées en l'état comme une cible à atteindre pour la France car elles ne tiennent pas compte des spécificités des émissions de chaque pays. Mais elles permettent de donner un ordre de grandeur pour situer les réductions des émissions de GES par habitant observées dans chaque scénario par rapport à des limites biophysiques planétaires.

Ainsi, les quatre scénarios proposés dans Transition(s) 2050 permettent bien de limiter les émissions de GES en 2050 sur le territoire français autour de 1 à 2 tCO₂eq/hab., hors captage du carbone. Mais les émissions territoriales ne permettent pas de tenir compte de l'impact réel de l'économie française sur le climat et donc de la responsabilité partagée entre les États. Or, les résultats en empreinte apparaissent bien supérieurs aux limites biophysiques proposées par le GIEC [9], puisqu'ils s'établissent selon les scénarios entre 4,2 et 5,8 tCO₂eq/hab. Des efforts supplémentaires doivent donc être fournis pour réduire les émissions de GES de la France en empreinte.

De la même manière, il n'existe pas d'objectif légal ou gouvernemental de réduction des flux de matières premières extraits du sol. Pour rester sur une trajectoire de réchauffement de la planète en dessous de + 2 °C, la littérature (voir section 1.3) converge vers un objectif d'une consommation moyenne de matières premières autour de 5 tonnes/hab. en 2050 à l'échelle mondiale. Dans une perspective d'équité, où les 10 milliards d'habitants dans le monde en 2050 pourraient tous atteindre un niveau de vie satisfaisant, la consommation de matières premières moyenne par habitant s'établirait plutôt entre 8 et 10 tonnes/hab. en 2050 [10, 11]. Dans le cadre de la présente étude, l'empreinte matières moyenne par habitant en 2050 est estimée entre 14,4 et 18,6 t/hab. selon les scénarios. Dès lors, dans l'état actuel de nos modélisations, l'empreinte matières de l'économie française devrait diminuer selon les scénarios d'un facteur 1,5 à 2 pour se rapprocher des 10 t/hab., et d'un facteur 3 à 4 pour se rapprocher des 5 t/hab. Ces résultats sont toutefois à mettre en perspective des limites de l'exercice de prospective.

In fine, l'analyse en empreinte proposée dans ce feuilleton permet de pointer d'autres leviers d'action pour réduire les émissions de GES et les besoins matières [3].

Elle souligne par exemple le poids de la coopération internationale et la nécessité de penser une transition juste entre pays du Nord et du Sud.

Elle met aussi en évidence le besoin d'aller plus loin dans les actions de sobriété, d'économie circulaire et de relocalisation de certaines activités de pro-

duction pour réduire les empreintes carbone et matières de la consommation française. Des actions supplémentaires à celles considérées dans cet exercice sont nécessaires, notamment pour réduire le contenu carbone et matières des services et des biens manufacturés dont les chaînes d'approvisionnement sont complexes et largement mondialisées.

En effet, les résultats de la présente étude montrent qu'en 2050 les services (marchands et non-marchands) deviennent le premier poste d'émissions de GES et de consommation de matières premières en empreinte. En comptabilisant l'ensemble des matières extraites et transformées en amont de sa consommation, on constate qu'une économie de services reste ancrée à une base matérielle qui dépasse les frontières nationales. L'économie circulaire apparaît toutefois comme un levier d'amélioration de la productivité matières des services, à travers des stratégies d'approvisionnement durable, l'éco-conception ou l'allongement de la durée d'usage des biens qui sont mobilisés dans leurs chaînes de valeur.

De même, les modes de production durable et de consommations responsables sur les biens de consommation des ménages (équipements électroménagers, ordinateurs, téléphones, mobilier, etc.) constituent d'autres leviers à investiguer pour diminuer les empreintes matières et carbone.

5.3. Limites de l'évaluation et perspectives d'amélioration

Les résultats de la présente étude sont à relativiser en fonction de certaines limites de l'évaluation, qui peuvent engendrer des biais de prospective.

La comptabilité en indicateurs de flux développée dans le modèle MatMat ne permet pas de quantifier les liens de causalité entre la demande finale de matières premières et les impacts environnementaux associés. Le problème de l'addition de catégories de matières premières dont la production exerce des impacts environnementaux très différents (bois vs minerais de cuivre par exemple) est un aspect souvent critiqué [21]. Ce problème méthodologique est inhérent à tous les indicateurs de suivi conventionnel des flux de matières à macro-échelle (Empreinte, DMC). En complément des travaux sur l'empreinte matières, l'analyse des impacts environnementaux potentiels de l'extraction et de la transformation des matières premières mériterait donc d'être approfondie. Tout comme celle de la vulnérabilité des approvisionnements en matières premières de l'économie française ou de la criticité des matières premières à un niveau de détail plus désagrégé.

Un certain nombre d'hypothèses seraient également à mieux considérer à l'avenir dans les modélisations et les scénarios pour (i) étendre le périmètre de l'analyse, (ii) explorer des mesures complémentaires pour réduire plus efficacement les empreintes carbone et matières à horizon 2050. Par exemple :

- les effets de la sobriété et du déploiement de l'économie circulaire qui sont à ce stade difficiles à paramétrer dans les modélisations. C'est un domaine de recherche non mature aujourd'hui qu'il est nécessaire d'approfondir [43]. Il est par exemple difficile de quantifier les variations des consommations intermédiaires et finales des produits qu'il faudrait introduire dans le modèle pour traduire les effets de la sobriété dans les modes de production et de consommation (arbitrages quantité/qualité ; *low-tech* et simplicité ; écoconception ; neuf vs reconditionné ; nouveaux modèles économiques ; etc.), et les incidences de l'allongement de la durée d'usage des produits sur la consommation finale (fin de l'obsolescence programmée, réparation, réemploi, remanufacturing). Autant de dimensions qui n'ont, à ce stade, pas pu être prises en compte dans les modélisations ;
- la scénarisation du commerce international et des politiques aux frontières, qui devient un levier important pour réduire le contenu carbone et matières des biens et services importés. Dans cette étude, il a été supposé que la décarbonation des partenaires commerciaux de la France suit une évolution tendancielle sur la base des politiques énoncées à ce jour. Mais aucune hypothèse n'a été introduite sur l'évolution des partenaires commerciaux de la France (e.g. décarbonation plus ambitieuse des partenaires commerciaux actuels, stratégies de relocalisation des approvisionnements vers certains partenaires commerciaux plus vertueux), ni sur des gains d'efficacité matières dans les processus de production à l'étranger au-delà de gains d'efficacité énergétique (e.g. limitations des pertes et gaspillage dans les process, substitution par des matières premières issues du recyclage, etc.).

Par ailleurs, MatMat est un modèle développé depuis 2019, avec plusieurs perspectives de développement telles que :

- **étendre le cadre birégional unilatéral Entrées-Sorties.** Dans la version actuelle du modèle MatMat, le reste du monde est agrégé comme une seule entité, ce qui limite la modélisation plus subtile des partenaires commerciaux et le suivi des émissions/flux de matières le long des chaînes

de valeurs à l'étranger. Des développements en partenariat avec le CIRED³² sont actuellement menés pour permettre une scénarisation plus désagrégée des principaux partenaires de la France et des politiques internationales et affiner les résultats ;

- **améliorer la représentation du recyclage.** Actuellement, dans le modèle, le recyclage est scénarisé comme un substitut parfait et sans coût. L'évolution des taux d'incorporation de MPR est scénarisée sous formes de chocs exogènes, renseignés à partir des hypothèses définies par les expertises sectorielles et sans rebouclage dans le modèle avec le gisement de déchets disponible. Des développements sont actuellement à l'étude pour mieux représenter le recyclage dans le modèle ainsi que les politiques de réduction et gestion des déchets. L'introduction notamment d'une comptabilité déchets dans le modèle permettra de considérer les liens entre production de biens, consommation et évolution du gisement de déchets, et ainsi de reboucler avec le potentiel de MPR disponibles ;
- **améliorer la représentation de certains produits.** Par construction, l'approche Entrées-Sorties propose une représentation agrégée des biens et services, en leur associant une unique technologie de production moyenne. Par exemple, il n'est pas possible de suivre distinctement deux filières de production du blé, une en agriculture conventionnelle et une en agriculture biologique, ou deux modes constructifs différents des bâtiments. Par ailleurs, les structures de production et les chaînes d'approvisionnement pour chaque produit sont le reflet de celles existantes à l'année de référence, qui ne seront pas nécessairement le reflet des structures de production moyennes en 2050. Ce formalisme ne permet pas de bien représenter certaines caractéristiques des scénarios, comme de nouvelles chaînes de valeur pour la production d'énergie à partir de biogaz et la production des véhicules électriques, qui étaient tous deux assez peu développées à l'année de référence (2015). Des réflexions sont en cours pour mieux intégrer à moyen terme dans le modèle MatMat ces changements technologiques et évolutions de la demande pour les secteurs clés de la transition. Des travaux ont notamment été engagés pour désagréger le secteur de la construction, de manière à mieux représenter et isoler à l'avenir en prospective les investissements dans la construction de bâtiments, dans la rénovation et dans le génie civil.

³² Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement.

6. Bibliographie

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

- [1] Harris PG, Symons J. Norm, *Conflict in Climate Governance: Greenhouse Gas Accounting and the Problem of Consumption*. *Global Environmental Politics*, 1^{er} février 2013.
- [2] Pottier A, Combet E, Cayla JM, de Lauretis S, Nadaud F., *Qui émet du CO₂ ? Panorama critique des inégalités écologiques en France*. Revue de l'OFCE, 2020.
- [3] Teixeira A, Lefèvre J., *Low carbon strategies need to tackle the carbon footprint of materials*, AFD research papers-Working paper, 2023.
- [4] Krausmann F, Wiedenhofer D, Haberl H., *Growing stocks of buildings, infrastructures and machinery as key challenge for compliance with climate targets*, *Global Environmental Change*, 1^{er} mars 2020
- [5] Müller DB, Liu G, Løvik AN, Modaresi R, Pauliuk S, Steinhoff FS, et al., *Carbon Emissions of Infrastructure Development*, *Environmental Science & Technology*, 2013
- [6] Teixeira A, Lefèvre J, Saussay A, Vicard F. *Construction de matrices de flux de matières pour une prospective intégrée énergie-matière-économie* : Revue de littérature et cadrage méthodologique pour le développement du modèle MatMat, ADEME, 2020.
- [7] Fontaine B, Teixeira A, Vicard F, Lefèvre J., *Extensions et développements du modèle MatMat de prospective intégrée énergie-matière-économie - Évaluation des empreintes matières et carbone de scénarios de transitions bas-carbone pour la France*, ADEME, 2023.
- [8] Ministère de la transition écologique, *Méthodologie de calcul de l'empreinte carbone de la France*, 2021.
- [9] Shukla PR, Skea J, Slade R, Al Khourdajie A, Van Diemen R, McCollum D, et al. IPCC, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change., Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, IPCC, 2022.
- [10] Dittrich M, Giljum S, Lutter S, Polzin C. *Green economies around the world. Implications of resource use for development and the environment*, 2012.
- [11] UNEP, *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*, UNEP/Earthprint, 2011.
- [12] INSEE, *Un tiers de l'empreinte carbone de l'Union européenne est dû à ses importations*, 2022.
- [13] Ministère de la transition écologique SDES, *L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021*, 2022.
- [14] INSEE, *Les entreprises en France*, 2022.
- [15] Wood R, Neuhoff K, Moran D, Simas M, Grubb M, Stadler K., *The structure, drivers and policy implications of the European carbon footprint*, 22 Avril 2020.
- [16] El Khamlichi A., Gourdon T., Gourdon S., *Le captage et stockage géologique de CO₂ (CSC) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles*, ADEME, 2020.
- [17] Azevedo I, Bataille C, Bistline J, Clarke L, Davis S., *Net-zero emissions energy systems: What we know and do not know*, Energy and Climate Change, 1^{er} décembre 2021.
- [18] Bouckaert S, Fernandez Pales A, McGlade C, Remme U, Wanner B, Varro L, et al., *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA, 2021.
- [19] UNEP, *The use of natural resources in the economy: A Global Manual on Economy Wide Material Flow Accounting*, UNEP Geneva, Switzerland, 2021.
- [20] Nations Unies, *Rapport sur les objectifs de développement durable*. Rapport mondial du Secrétaire général, 2019.
- [21] Wiedmann TO, Schandl H, Lenzen M, Moran D, Suh S, West J, et al., *The material footprint of nations. Proceedings of the national academy of sciences*, 2015.
- [22] OCDE, *Global Material Resources Outlook to 2060*, 2019.
- [23] Hertwich E, Lifset R, Pauliuk S, Heeren N, Ali S, Tu Q, et al., *Resource efficiency and climate change: Material efficiency strategies for a low-carbon future*, 2020.
- [24] Ministère de la transition écologique, SDES, Indicateurs clés pour le suivi de l'économie circulaire - *Productivité matières*, 2021.

- [25] **Ministère de la transition écologique et solidaire**, *L'empreinte matières, un indicateur révélant notre consommation réelle de matières premières*, 2018.
- [26] **INSEE**, *Empreinte matières par principale catégorie*, 2023.
- [27] **IEA**, *The role of critical minerals in clean energy transitions*, OECD Publishing, 2021.
- [28] **Ministère de la transition écologique**, *Stratégie Nationale Bas-Carbone*, 2020.
- [29] **IPCC**, *Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [30] **United Nations**, *World Population Prospects 2022 - Summary of Results*, 2022.
- [31] **Bringezu S.**, *Possible target corridor for sustainable use of global material resources*, 2015.
- [32] **Steubing B, de Koning A, Merciai S, Tukker A.**, *How do carbon footprints from LCA and EEIOA databases compare? A comparison of ecoinvent and EXIOBASE*, Journal of Industrial Ecology, 1^{er} août 2022.
- [33] **Tukker A, Giljum S, Wood R.**, *Recent Progress in Assessment of Resource Efficiency and Environmental Impacts Embodied in Trade: An Introduction to this Special Issue*, Journal of Industrial Ecology, 1^{er} juin 2018.
- [34] **Leontief W.**, *Input-output economics*, Oxford University Press, 1986.
- [35] **Miller RE, Blair PD.**, *Input-output analysis: foundations and extensions*, 2009.
- [36] **Suh S.**, *Handbook of input-output economics in industrial ecology*, Springer Science & Business Media, Vol. 23, 2009.
- [37] **Stadler K. Pymrio**, *A Python Based Multi-Regional Input-Output Analysis Toolbox*, Journal of Open Research Software, 2021.
- [38] **Stadler K, Wood R, Bulavskaya T, Södersten CJ, Simas M, Schmidt S, et al.**, *EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables*, Journal of Industrial Ecology, 1^{er} juin 2018.
- [39] **Edens B, Hoekstra R, Zult D, Lemmers O, Wilting H, Wu R.**, *A method to create carbon footprint estimates consistent with national accounts*, Economic Systems Research, 2 oct 2015.
- [40] **Stehrer R.**, *Growth and Productivity Data*, 2021.
- [41] **Callonnec G, Landa G, Malliet P, Reynès F, Yeddar- Tamsamani Y.**, *A full description of the Three-ME model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy*, 2013.
- [42] **IEA**, *World Energy Outlook 2022*, Paris, 2022.
- [43] **Aguilar- Hernandez GA, Sigüenza-Sanchez CP, Donati F, Rodrigues JFD, Tukker A.**, *Assessing circularity interventions: a review of EEIOA-based studies*, Journal of Economic Structures, 28 juin 2018.

FEUILLETON 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.

Le rapport Transition(s) 2050, première étape de cet exercice, a été publié le 30 novembre 2021. Chaque secteur y est détaillé, à savoir ceux qui relèvent de la consommation, du système productif, de l'offre d'énergie, des ressources et des puits de carbone. Il est complété par des feuillets qui apportent un éclairage supplémentaire, en particulier sur les impacts induits.

C'est l'objet du présent ouvrage qui présente les résultats de l'évaluation de l'empreinte carbone et matières de la France en 2050 pour chacun des scénarios. Ce travail étend les premiers travaux de Transition(s) 2050 sur les émissions de GES, qui n'incluaient pas les émissions associées aux importations, ni les flux de matières mobilisés par l'économie française en 2050.

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



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

012109

