



HAL
open science

MatMat: Extensions et développements du modèle de prospective intégrée énergie-matière-économie - Evaluation des empreintes matières et carbone de scénarios de transitions bas-carbone en France

Bruno Fontaine, Antoine Teixeira, Fanny Vicard, Julien Lefevre

► To cite this version:

Bruno Fontaine, Antoine Teixeira, Fanny Vicard, Julien Lefevre. MatMat: Extensions et développements du modèle de prospective intégrée énergie-matière-économie - Evaluation des empreintes matières et carbone de scénarios de transitions bas-carbone en France. ADEME, 20 avenue du Grésillé, 49004 Angers. 2023. hal-04483042

HAL Id: hal-04483042

<https://hal.science/hal-04483042>

Submitted on 28 Feb 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

MatMat

EXTENSIONS ET DEVELOPPEMENTS DU MODELE DE PROSPECTIVE INTEGREE ENERGIE-MATIERE-ECONOMIE

Evaluation des empreintes
matières et carbone de
scénarios de transition bas-
carbone en France.

RAPPORT METHODOLOGIQUE (Actualisation en 2024)



EXPERTISES

Juillet
2023

REMERCIEMENTS

Riyad Abbas (CGDD/SEVS)
Stéphane Barbusse (ADEME)
Manuel Baude (CGDD/SDES)
Jean-Louis Bergey (ADEME-DEPR)
Aurélien Bigo (ADEME)
Antoine Boubault (BRGM)
Philippe Calatayud (CGDD/SDES)
Gaël Callonnec (ADEME -DEPR)
Jean-Yves Courtonne (INRIA)
Olivier De Guibert (CGDD/SEVS)
Rafaëlle Desplats (ADEME-DECD)
Albane Gaspard (ADEME – SB)
Alexandre Godzinski (CGDD/SEVS)
Adrien Hainaut (I4CE)

Gissela Landa (OFCE)
Gaëlle Le Treut (CIRED)
Emmanuelle Pages (CGDD/SDES)
Jean-Louis Pasquier (ADEME)
Anna Pineau (ADEME-DECD)
Gwenaël Podesta (DGEC)
Emmanuel Rauzier (Association Negawatt)
Aurélien Saussay (LSE)
Marie Sauze (ADEME-SRER)
Sylvain Sourisseau (ADEME-SI)
Adrien Toledano (Association Negawatt)
Eric Vidalenc (ADEME)
Jacques Villeneuve (BRGM)

Personnels SMASH ayant apporté leur contribution technique et à la mise en forme du rapport :

Clément DUVENET
Mehdi MIKOU

Corinne MOULIN
Yaël SERFATI

CITATION DU RAPPORT

B. Fontaine, A. Teixeira, F. Vicard et J. Lefèvre. 2023. MatMat : Extensions et développements du modèle de prospective intégrée énergie-matière-économie - Évaluation des empreintes matières et carbone de scénarios de transitions bas- carbone en France. 65 pages.

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'oeuvre 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.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 21ESD0009

Coordination technique - ADEME : VICARD Fanny, économiste
Direction/Service : Direction Exécutive Prospective et Recherche

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
1. CONTEXTE DU PROJET	9
1.1. Orientations politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre en France	9
1.2. La matière, un enjeu de la transition bas carbone à investiguer.....	11
1.3. Vers une modélisation intégrée énergie-matière-économie à l'ADEME	12
2. PRINCIPES DE MODELISATION DU MODELE	14
2.1. Approche top down du calcul des empreintes environnementales.....	14
2.1.1. Structure du modèle MatMat	14
2.1.2. Principes de la modélisation entrée-sortie.....	16
2.1.3. Calibration des coefficients de contenus directs et indirects en GES / matières pour le calcul d'empreinte.....	17
2.2. Construction de chocs pour l'évaluation de scénarios prospectifs	17
2.3. Calcul des indicateurs de pressions et d'impacts environnementaux.....	18
3. DEVELOPPEMENTS D'UNE BASE DE DONNEES DE CALIBRATION HYBRIDE	21
3.1. Présentation des différents développements menés sur la base de données de calibration	21
3.1.1. Distinction entre matières premières vierges et matières issues du recyclage	21
3.1.2. Correction et extension de la comptabilité physique.....	22
3.1.3. Construction d'une matrice d'investissement	27
3.1.4. Désagrégation du secteur de la construction	28
3.2. Résultats pour l'année de calibration – 2015.....	32
3.2.1. Empreinte matières en 2015	32
3.2.2. Empreinte carbone en 2015	35
3.3. Limites méthodologiques et recommandations pour la calibration.....	36
3.3.1. Diagnostic des difficultés de calibration sur la matière première.....	36
3.3.2. Désagréger les partenaires commerciaux de la France	38
3.3.3. Améliorer la matrice d'investissement.....	38
3.3.4. Améliorer la désagrégation de la construction	39
4. EVALUATION DE SCENARIOS DE TRANSITION BAS-CARBONE	41
4.1. Revue de littérature.....	41
4.1.1. Scénarisation de la demande des ménages et des consommations intermédiaires.	42
4.1.2. Scénarisation des investissements.....	45
4.1.3. Modèles de demande de matières et matériaux spécifiques.....	46
4.2. Enseignements de la revue de littérature	47
4.3. Méthode de scénarisation retenue.....	48
4.3.1. Méthode générale : couplage avec le modèle ThreeME.....	48

4.3.2. Cas spécifiques des investissements, des taux d'importation et du bilan énergétique	48
4.3.3. Limites de la méthode de scénarisation retenue.....	50
CONCLUSION	52
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	57
SIGLES ET ACRONYMES	58
5. ANNEXES	59
5.1. Base EU KLEMS.....	59
5.2. Segmentation sectorielle du modèle ThreeME V2	61
5.3. Résultats complémentaires d'empreinte matières pour la France en 2015	63

RÉSUMÉ

Le projet MatMat a pour but de développer un outil de prospective intégrée des enjeux énergie-matière-économie de l'économie française. La littérature a identifié un manque d'outils permettant une description systémique des interactions énergie-matière-économie en prospective. La place de la matière reste en effet trop peu étudiée dans les scénarios de transition bas carbone actuels et dans les modèles macroéconomiques mobilisés pour leur évaluation. Par exemple, la trajectoire officielle de décarbonation française à l'horizon 2050 (la Stratégie Nationale Bas-Carbone, SNBC-2) se limite à un objectif de neutralité carbone à l'échelle territoriale et élude les conséquences de la transition bas carbone sur les empreintes matières et carbone.

MatMat est un modèle de comptabilité environnementale Entrée-Sortie qui permet une analyse prospective robuste de pressions environnementales multiples : émissions territoriales de GES, empreinte carbone, besoins en matériaux transformés et empreinte matières. Le présent rapport reprend les différentes améliorations et développements mis en œuvre depuis la première publication du modèle MatMat par l'ADEME en septembre 2020. Cela concerne notamment (i) l'amélioration de la description en unité physique des flux de matières et d'énergies fossiles ; (ii) la représentation en unité physique des matériaux et la distinction des filières de production primaires et secondaires ; (iii) la désagrégation du vecteur d'investissement en une matrice carrée; (iv) la définition d'une méthode de scénarisation de scénarios bas carbone à partir d'un bouclage avec le modèle macroéconomique ThreeME, complétée par des données sectorielles tirées des scénarios étudiés.

Ces développements ont permis une mise à jour de la base de données de calibration en 2015. Ils ont également contribué à l'évaluation des empreintes matières et carbone des scénarios « Transition(s) 2050 » de l'ADEME.

ABSTRACT

MatMat project aims to develop an integrated prospective model to study energy-materials-economy issues in France. The literature has identified a lack of prospective tools designed to provide a systemic description of economy-energy-materials interactions. In fact, the role of materials remains insufficiently studied in current low-carbon transition scenarios, in particular in macro-economic models used to assess them. For example, the latest official French decarbonization pathway up to 2050 (*Stratégie Nationale Bas-Carbone*, SNBC-2) is limited to the carbon neutrality goal at territorial level. The consequences of the low-carbon transition on material and carbon footprints stand as a blind spot of the current strategy.

MatMat model is an Input-Output environmental accounting model that enables robust prospective analysis of multiple environmental pressures such as territorial GHG emissions, carbon footprint, base material requirements, and raw material footprint. This report covers the various improvements and developments implemented since ADEME first publication of the model in September 2020. These include (i) an improved description in physical units of raw materials and energy products flows; (ii) the representation in physical units of base materials with the distinction between primary and secondary productions; (iii) the disaggregation of investment vector in a square matrix; (iv) the definition of a low-carbon scenario-building method based on ThreeME macroeconomic model, supplemented by sectoral data drawn from the scenarios studied.

These developments enabled us to update the calibration database in 2015. They also contributed to the assessment of the material and carbon footprints by 2050 of ADEME's "Transition(s) 2050" scenarios.

INTRODUCTION

Réaliser la transition bas carbone nécessite de renouveler en quelques décennies la plupart des infrastructures et équipements existants pour leur substituer un capital physique décarboné dans tous les secteurs d'activité : production d'énergie, bâtiments résidentiels et commerciaux, transports, agriculture, production industrielle, etc. Cependant, le déploiement des équipements bas-carbone pourrait accroître la demande générale en matériaux à fort contenu carbone (acier, aluminium, ciment, verre, etc.), impactant par ricochet les besoins en matières premières, et finalement menacer les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'industrie dont les potentiels technologiques de décarbonation restent incertains. Or la place de la « matière » dans la transition bas carbone et les effets retours sur les émissions industrielles liées à la demande de matériaux sont encore actuellement insuffisamment évalués dans la littérature et dans les scénarios prospectifs existants.

Par ailleurs, les conséquences macroéconomiques de la transition bas carbone (niveaux du produit intérieur brut (PIB) et des importations, consommation des ménages, etc.) ainsi que les changements structurels de l'économie associées à ces profondes mutations (poids relatifs de l'industrie et des services dans le PIB, etc.) peuvent avoir d'importants effets sur les volumes de matière nécessaires au fonctionnement de l'économie. Ces matières peuvent être produites localement comme importées ou bien contenues de façon indirecte dans les importations françaises. Le raisonnement en termes d'empreinte est donc clef pour analyser sur les pressions environnementales exercées par l'activité économique nationale et les responsabilités des différents acteurs, tout en tenant compte de la place de la France dans les chaînes de valeur internationales.

La vision aujourd'hui incomplète du rôle de la matière dans la transition écologique provient en partie de verrous méthodologiques. En effet, les travaux issus d'outils de prospective énergie-économie sur la transition bas carbone ou bien d'outils d'évaluation d'impacts énergie-environnement-matière en écologie industrielle restent encore largement cloisonnés, chacun d'entre eux n'offrant qu'une vision partielle du futur des interactions énergie-matière-économie (Koning 2018) :

- Les premiers représentent une littérature abondante projetant des trajectoires technico-économiques à l'aide de modèles intégrés énergie-économie (« *Integrated Assessment Models* » (IAM) comme Imacim et ThreeME). La plupart du temps, ces premiers modèles ne prennent pas en compte les variations de demande induites et les contraintes associées aux transformations du système énergétique sur la matière première et les matériaux transformés.
- Les seconds reposent au contraire sur des approches à une échelle 'micro' telles que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV, « *Life Cycle Analysis* » ou LCA) et l'Analyse des Flux de Matières (AFM, « *Material Flow Analysis* » ou MFA), ou bien sur des approches 'mésos' ou 'macro' basées sur l'analyse entrées-sorties avec extensions environnementales EEIO (« *Environmentally Extended Input-Output* »). Mais ces approches ne proposent soit qu'une vision restreinte des relations énergie-matières en se concentrant sur des technologies et procédés particuliers (approches à "micro" échelle), soit n'offrent qu'une vision systémique statique (généralement) sans pouvoir directement projeter de profondes transformations du système technico-économique dans le futur (approches à "mésos"/"macro" échelle).

C'est pourquoi il existe un véritable enjeu méthodologique à développer de nouveaux outils combinant les approches prospectives énergie-économie et les outils d'écologie industrielle récemment identifiés dans la littérature (Pauliuk, et al. 2017), pour être en mesure de produire une nécessaire prospective intégrée et systémique des interactions énergie-matière-économie.

NOTATIONS

Le terme **matières** fait ici référence aux **matières premières et aux matériaux**.

On entend par le terme "**matériaux**" toute matière qui a subi une transformation pour pouvoir être utilisée dans la fabrication de produits finis (comme l'acier, le ciment, etc.).

Le projet MatMat (Matrices-Matières) vise à contribuer à de telles avancées méthodologiques en développant un modèle de prospective intégrée énergie-matière-économie (A. Teixeira, et al. 2020). MatMat est un modèle Entrées-Sorties en unités mixtes, à 200 produits. Les objectifs scientifiques poursuivis dans le projet sont de :

1. Disposer d'un outil d'analyse robuste des pressions environnementales en suivant des dimensions multiples : énergie, matières premières, matériaux transformés et émissions de GES ;
2. Développer une méthode standardisée d'évaluation en prospective des empreintes matières et carbone de scénarios de transition bas-carbone (comme la stratégie nationale bas carbone (SNBC) ou les scénarios Transition(s) 2050 développés par l'ADEME), permettant de tenir compte des effets retours de la transition bas carbone sur le système matière et la production industrielle ;

Le présent rapport débute par une description générale du contexte du projet et des enjeux matières de la transition bas-carbone en France et dans le monde afin d'introduire les motivations liées aux développements et à l'extension du modèle MatMat ces dernières années. Il fournit ensuite une description détaillée du modèle (section 2), en explicitant les principaux aspects du fonctionnement du modèle MatMat et de la méthodologie de calcul d'empreinte mise en œuvre. Sont ensuite détaillés dans la section 3 les développements engagés sur la calibration du modèle dans le cadre des conventions de recherche successives établies depuis 2020 entre l'ADEME, la SMASH et le CIRED. L'utilisation en prospective du modèle est détaillée dans la section 4. Les sections 4.1 et 4.2 présentent l'état de l'art de la recherche sur le couplage de modèles IO avec des scénarios de transition bas carbone. La section 4.3 reprend les développements effectués pour la traduction d'un scénario bas carbone dans MatMat et utilisés par l'ADEME dans l'évaluation environnementale des scénarios Transition(s) 2050 (Vicard et Teixeira 2023). Cette application a permis d'identifier les principales limites de la modélisation MatMat et les perspectives de développements envisagées à court/ moyen terme.

Le lecteur trouvera en fin de rapport un tableau récapitulatif des acronymes et sigles utilisés, ainsi que des informations complémentaires en annexes sur les niveaux de détails sectoriels des modèles mobilisés et sur les résultats d'empreintes.

1. Contexte du projet

1.1. Orientations politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre en France

En 2015, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) a instauré la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), qui définit la feuille de route de la France pour cadrer les politiques de réduction d'émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) et suivre leurs réalisations. La SNBC a été révisée en 2018-2019 et a fixé comme objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle du territoire français à l'horizon 2050. Cet objectif de « zéro émissions nettes » induit une compensation entre les émissions anthropiques résiduelles de GES et leurs absorptions par les milieux naturels ou certains procédés industriels (comme les techniques de capture et stockage du carbone). Traduction du Plan Climat de 2017, cette stratégie satisfait les engagements internationaux de la France dont l'Accord de Paris, qui vise à limiter l'élévation de la température moyenne du globe à 2°C au-dessus du niveau préindustriel sur la base d'engagements volontaires des états signataires sur le volume de réduction de leurs émissions. Elle programme une diminution massive des émissions territoriales de 450 mégatonnes d'équivalent CO₂ (MtCO₂eq) en 2015 à 85 MtCO₂eq en 2050 (Figure 1 et Figure 2).

Les cibles de la SNBC sont basées sur une approche inventaire des émissions de GES, c'est-à-dire sur la comptabilisation de toutes les sources d'émissions territoriales, excluant les émissions indirectes importées réalisées à l'étranger pour produire les biens importés et consommés en France. L'empreinte carbone recense quant à elle toutes les émissions imputables à la consommation intérieure française, excluant les exportations. En 2014, l'empreinte carbone française s'élevait à 617 MtCO₂eq (importés pour moitié), soit un peu plus de 9 tonnes par habitant¹. Limiter le réchauffement climatique mondial sous les 2°C par rapport à l'ère préindustrielle impliquerait d'amener ce chiffre sous les 2 tCO₂eq par habitant à l'horizon 2050 (MTES 2020).

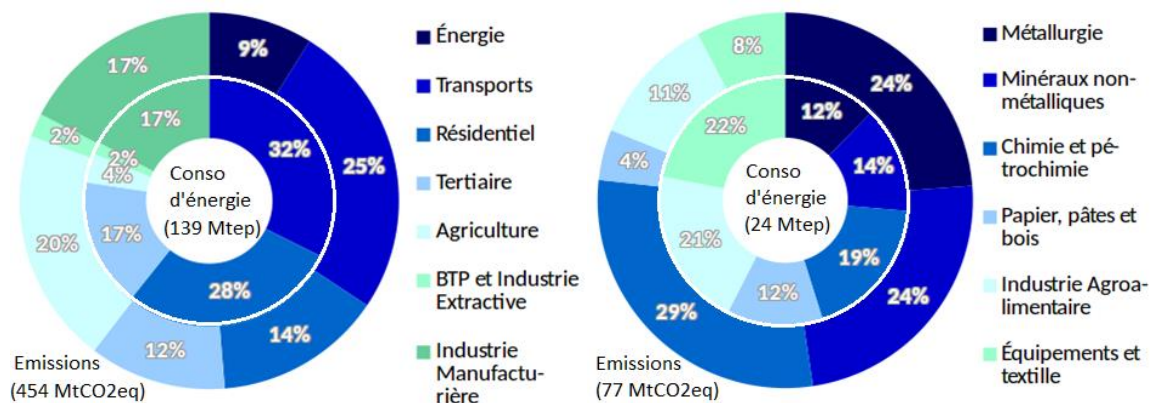


Figure 1 : Composition sectorielle de la consommation finale d'énergie et des émissions de GES pour l'économie française en 2015 (à gauche) et pour l'industrie manufacturière en France en 2015 (à droite). Adapté d'Eurostat par (A. Teixeira, et al. 2020).

La SNBC-2 (MTES 2020) donne des orientations de politiques publiques pour réaliser la transition vers une économie peu consommatrice de ressources fossiles carbonées et affiche également des ambitions pour tendre vers une plus grande sobriété des besoins en matières. Elle vise à l'horizon 2050 une élimination quasi-totale des émissions de GES dans les secteurs des transports, des bâtiments et de la production d'énergie ainsi qu'une réduction substantielle des émissions dans l'agriculture (-46 %), l'industrie (-81 %) et le traitement des déchets (-66 %) par rapport à 2015 (Figure 2). Par ailleurs, l'agriculture, responsable de 20 % émissions françaises, doit évoluer vers de nouvelles pratiques et vers une réduction de l'usage des engrais minéraux. Pour satisfaire ces objectifs, le scénario AMS (avec mesures supplémentaires) est désormais le scénario de référence de la France pour cadrer la trajectoire de réduction d'émissions vers la neutralité carbone. Le respect de ces objectifs de décarbonation nécessite des investissements massifs, en premier lieu dans :

¹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/estimation-de-lempreinte-carbone-de-1995-2020>

- La rénovation thermique des bâtiments existants, la construction de bâtiments neufs basse consommation et l'adoption d'équipements domestiques à faible intensité énergétique pour tous les usages ;
- La décarbonation des transports de personnes et de marchandises (notamment l'électrification massive du parc automobile particulier et le déploiement de motorisation bas-carbone pour les transports routiers, la route représentant 95 % des émissions du transport) ;
- Le développement des énergies renouvelables comme l'éolien et le photovoltaïque dans le mix électrique, ainsi que l'essor de l'utilisation de la biomasse et de la chaleur renouvelable ou de récupération.

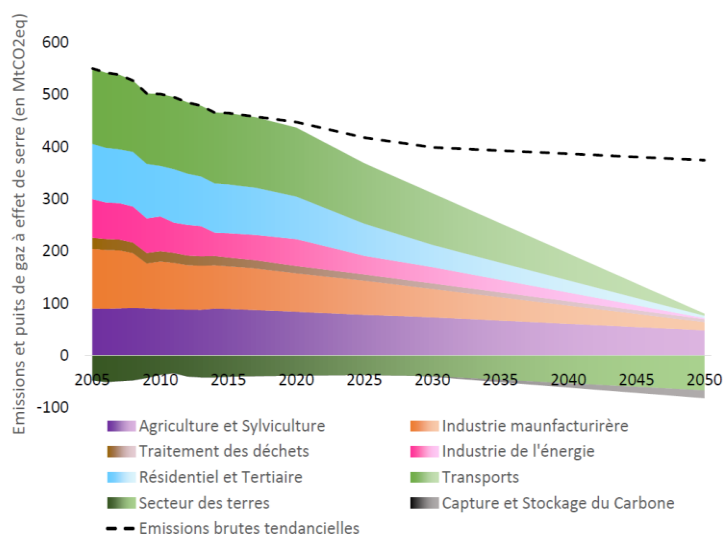


Figure 2 : Trajectoire des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 dans le scénario AMS. Tiré de (MTES 2020).

Enfin la SNBC-2 vise la maîtrise des émissions du secteur de l'industrie manufacturière (17% des émissions territoriales françaises en 2015, détail Figure 1, dues à la combustion de produits énergétiques fossiles pour alimenter des procédés industriels très énergivores (comme l'industrie papetière) et aux émissions intrinsèquement liées à la chimie des procédés existants. Sur ce deuxième point, on évoquera entre autres : le raffinage des produits pétroliers, le vapocraquage du méthane pour la production d'hydrogène (un réactif essentiel pour la synthèse de l'ammoniac), la clinkérisation pour la production de ciment, ou encore la réduction du minerai de fer par le monoxyde de carbone dans les hauts fourneaux pour la production d'acier. Les Industries Grandes Consommatrices d'Énergie (ou IGCE) – qui regroupent ainsi l'industrie de l'aluminium, la sidérurgie, la production de verre, de ciment, la synthèse du chlore, de l'éthylène et de l'ammoniac, l'industrie papetière et l'industrie sucrière – représentaient en 2015 près de 50 % de la demande en énergie et 60 % des émissions de l'industrie. La SNBC-2 prévoit l'atteinte des objectifs de décarbonation de l'industrie grâce à des gains importants d'efficacité énergétique, l'électrification massive des procédés industriels (autour de 50 % pour les IGCE voire 100 % pour certains secteurs comme l'aluminium ; de 60 % à 90 % pour les industries diffuses) et l'amélioration des procédés pour réduire les émissions non-énergétiques du secteur, sans faire l'hypothèse d'une pénétration forte de technologies de rupture en 2050 (comme la réduction des émissions par l'hydrogène ou par électrolyse dans la sidérurgie et la chimie).

La SNBC-2 présente toutefois quelques limites. D'abord, la cohérence globale des expertises sectorielles sur l'industrie semble mise à mal par le fait que les estimations prospectives des niveaux de productions industrielles n'ont pas été modifiées pour tenir compte du surplus d'investissement nécessaire dans le scénario AMS, par rapport au scénario initial AME (« avec mesures existantes/supplémentaires » qui ne permettait pas d'atteindre les cibles de réduction d'émissions de GES)². Également, les effets macroéconomiques de la transition bas carbone française (commerce extérieur, surplus de

² Constat valable pour les 9 IGCE ainsi que pour les autres composantes de l'industrie (dénommées « industries diffuses » et catégorisées en métaux primaires, minéraux non-métalliques, chimie, industrie agro-alimentaire, équipements, autres industries (textiles, etc.)).

consommation des ménages, etc.) sur les empreintes matières et carbone ne semblent pas avoir été considérés dans la construction de la SNBC-2. Enfin, le périmètre territorial retenu pour la mesure des émissions de GES n'autorise pas non plus de constater des impacts de la transition bas carbone nationale sur les empreintes environnementales françaises dans leur totalité (émissions domestiques et importées). Ces limites de l'exercice prospectif plaident en faveur d'une analyse des pressions environnementales de la transition qui soit appuyée sur une logique d'empreinte, grâce à des outils capables d'intégrer les effets systémiques « macro » de la transition bas carbone.

1.2. La matière, un enjeu de la transition bas carbone à investiguer

Les enjeux autour de la mesure de l'impact des activités économiques sur les flux de matières, et particulièrement l'impact de scénarios bas carbone, sont essentiels à considérer. Le déploiement d'infrastructures et de technologies bas-carbone ou le changement des habitudes de consommation des ménages peuvent impacter la demande en matériaux et en matières premières, qui constitue à la fois une pression environnementale à part entière et une contrainte sur les processus économiques (localisation, accessibilité, rareté et prix des ressources). Par ricochet, la demande de biens matériels peut même entraîner un rebond des émissions de GES de l'industrie manufacturière et compromettre l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions du secteur si la cohérence d'ensemble du scénario n'a pas été pensée à sa conception.

Les technologies proposées comme partie de la solution à la décarbonation des économies pourraient mettre sous tension l'approvisionnement en minerais métalliques communs (cuivre, nickel, zinc, etc.) de même qu'en certains métaux spécifiques, tels que cobalt, lithium et terres rares (IEA 2021). Une littérature abondante se concentre déjà sur l'étude de la criticité des matières premières emblématiques de la transition bas carbone. Leur criticité est déterminée par l'évaluation comparée des besoins avec les ressources disponibles, encadrées dans les rapports géopolitiques mondiaux. Leur exploitation peut aussi souffrir des aléas météorologiques causés par le changement climatique et est parfois source de pollution à grande échelle³. Un autre enjeu majeur de la transition bas carbone concerne l'approvisionnement en matériaux. Les investissements mobilisent en effet des matériaux dont la fabrication est intensive en énergie ou en GES : plastiques et métaux primaires pour les véhicules, matériaux de construction pour les bâtiments et les infrastructures de transports collectifs (ciment, verre, métaux, bois, isolants), structures métalliques et matériaux composites pour les énergies renouvelables (EnR). Les émissions de gaz à effet de serre dans le monde imputables à la production de matériaux par les IGCE⁴ ont plus que doublé de 1995 à 2015, passant de 5 GtCO₂eq à plus de 11 GtCO₂eq⁵, en raison de l'augmentation de la production de matériaux vierges. Plus de la moitié de l'empreinte carbone de la production de matériaux est constituée d'émissions directes provenant des processus même de production des matériaux. La part des émissions mondiales de gaz à effet de serre imputable aux matériaux est ainsi passée de 15 à 23 % au cours de cette période (IRP 2020), principalement tirée par la demande d'investissements (Hertwich 2021).

Les préoccupations concernant les besoins en matériaux et les émissions de GES causées par l'investissement sont nombreuses. Notamment, les consommations indirectes d'énergie et de matériaux induites par des investissements dans le secteur de la construction doivent faire l'objet d'une plus grande attention par leur intense consommation de ressources (Ji, Zou et Tian 2019). Globalement, les technologies bas carbone, notamment pour la production d'électricité, permettent de réduire les émissions GES, même incluant les émissions indirectes survenant tout au long des chaînes de production de ces technologies (cf. (Hertwich, Gibon, et al. 2015) ou (Wolfram, Wiedmann et Diesendorf 2016)). La transition bas carbone réduirait la dépendance de l'Europe aux produits pétroliers importés mais les besoins en métaux augmenteraient du fait des investissements dans les technologies d'énergies renouvelables et nucléaires, mais aussi du fait de la production et de l'exportation importante de ces technologies par certains pays de l'Union Européenne (Wiebe, et al. 2018). Les impacts de l'investissement varient cependant beaucoup selon les pays (Södersten, Wood et Hertwich 2018a) : l'empreinte carbone de la FBCF⁶ dans les pays en développement est plus élevée que dans les pays développés, car ceux-ci

³ Cf. le portail [Minéral Info](#) ainsi que l'ouvrage de Guillaume Pitron « La Guerre des métaux rares » qui détaille ces enjeux multiples.

⁴ Dans l'étude de Hertwich (2021) citée : Plastique et caoutchouc, bois, verre, ciment, autres minéraux, aciérie et sidérurgie, aluminium, autres métaux.

⁵ Il s'agit d'un indicateur d'« empreinte carbone » des matériaux, incluant à la fois les émissions directes de la production et celles survenues en amont et en aval dans la chaîne de valeur, basé sur la méthode d'extraction hypothétique (ou HEM pour « *hypothetic extraction method* »).

⁶ Formation brute de capital fixe (FBCF, aussi notée GFCF par la suite): dénomination de l'investissement dans la comptabilité nationale.

investissent à la fois plus massivement dans des infrastructures dont la production est très carbonée et que les processus de production sont plus émetteurs de GES dans ces pays que dans les pays développés.

La transition bas carbone et ses effets macroéconomiques influent également sur les besoins en matière via la consommation des ménages : achats de biens d'équipements domestiques, véhicules, services de transports, alimentation, etc. En réattribuant les empreintes environnementales à chaque composante de la demande finale (Ivanova, et al. 2016) établissent que la consommation des ménages représente 51 % de l'empreinte matières au niveau mondial en 2007, et l'investissement 37 %. Quant à l'empreinte carbone, elle est imputable à 61 % à la consommation des ménages, et à 24 % à la FBCF (chiffre estimé à 18 % par (Hertwich and Peters 2009) et citée par (Wolfram, Wiedmann et Diesendorf 2016)). En comparaison, notons que la FBCF représente en moyenne un quart de la demande finale totale en valeur dans le monde. De 1995 à 2017, le déterminant principal de l'évolution de l'empreinte matières en France a été le niveau de demande finale, loin devant les effets du changement de structure de la demande adressée au système productif (tertiairisation de l'économie et moins d'investissements « matériels »), les effets de la délocalisation de la production dans le reste du monde (qui a tendance à faire augmenter l'empreinte matières des pays développés dont les processus de production sont en moyenne plus efficaces que ceux du reste du monde) et les effets liés aux changements technologiques dans les méthodes de production (gains d'efficacité matière notamment) (Pothen 2017). Au niveau mondial, les projections de l'OCDE à l'horizon 2060 établissent que la demande finale devrait être responsable d'une augmentation de 350 % de la consommation de matières premières par rapport à 2011 (80 Gt), volume *in fine* réduit de moitié par le changement structurel de la demande et les évolutions technologiques des processus de production (OCDE 2019). La croissance impacte aussi considérablement les besoins en matériaux : (de Koning, Kleijn, et al. 2018) évaluent que les émissions de carbone (CO₂) issues des productions de ciment et d'acier vont devenir dominants au niveau mondial à l'horizon 2050 ; les secteurs cimentier et sidérurgique pourraient alors représenter près de 60 % des émissions de l'industrie manufacturière. Les auteurs estiment ainsi qu'une réduction de la croissance est très probablement nécessaire pour respecter les objectifs de limitation du réchauffement climatique à +2° C.

Outre la réduction substantielle de la consommation d'énergies fossiles par décarbonation du mix énergétique ou par des économies d'énergie, la demande finale apparaît également comme un levier essentiel de réduction des émissions de GES liées au cycle de vie des produits⁷. Dans une moindre mesure, les substitutions vers des matières moins polluantes, l'extension du recyclage ou bien l'usage plus économe de la matière dans les processus de fabrication permettraient de réduire ces émissions (IRP 2020). Par exemple, pour les bâtiments résidentiels dans les pays du G7, l'utilisation plus intensive des habitations afin de diminuer la demande de nouvelles constructions pourrait permettre de réduire sur la période 2016-2060 jusqu'à 80% des émissions potentielles de GES liées à la production et à l'usage de matériaux. De même, pour les véhicules, les réductions les plus importantes des émissions sur le cycle de vie des véhicules particuliers (après la décarbonation des énergies de propulsion) pourraient provenir d'un changement des modes d'utilisation (covoiturage, autopartage) et d'une évolution vers des voitures plus compactes ou d'une taille adaptée aux trajets (85% des économies potentielles de GES sur la période 2016-2050). Ces réductions des émissions proviennent à la fois d'une diminution de la demande de matériaux dans la phase de production et de co-bénéfices entre cette moindre consommation de matière et la consommation d'énergie opérationnelle, c'est-à-dire celle intervenant lors de l'usage du bien (par exemple : une voiture plus légère ou un logement plus petit consomment moins d'énergie fossile pour la propulsion ou le chauffage).

1.3. Vers une modélisation intégrée énergie-matière-économie à l'ADEME

Au sein d'un partenariat de recherche avec l'ADEME, le CIRED et la SMASH ont développé ensemble un nouvel outil de prospective intégrée et systémique des interactions énergie-matière-économie et environnement pour l'économie française : le modèle MatMat (Matrices Matières). Cet outil repose sur une comptabilité Entrée-Sortie (ou IO pour Input-Output) à 200 produits en unités mixtes, s'appuyant sur la base de données Exiobase au format EEIO (formalisme IO avec extensions environnementales). Dans sa version initiale (A. Teixeira, et al. 2020), le modèle MatMat permettait de mesurer l'empreinte matières de l'économie française par vecteur et produit de la demande finale pour une année de référence mais aussi en projection dans le cadre de l'évaluation de scénarios prospectifs. Dans le cadre du présent projet, des

⁷ incluant les émissions liées à la transformation de la matière et celles liées à l'usage des produits (la consommation d'énergie "opérationnelle").

développements ont été menés pour améliorer la mesure de l’empreinte matières, mais aussi pour étendre son périmètre à l’évaluation des besoins en matériaux transformés et à l’empreinte carbone.

Le formalisme IO de MatMat permet de décrire l’économie à un niveau de désagrégation intermédiaire entre les modèles macro-économiques et les analyses plus fines comme l’inventaire de cycle de vie (ICV). Il permet d’englober l’ensemble des chaînes de valeur et de transformation de la matière pour l’ensemble des biens et services de l’économie. Le niveau de désagrégation sectorielle des bases de données IO est généralement bien supérieur à celui des modèles macro-économiques utilisés pour simuler les scénarios bas carbone. Appliquée aux résultats de modèles macro-économiques comme ThreeME, l’analyse IO étoffe considérablement la mesure de l’impact matière des changements économiques et technologiques modélisés. La première version de MatMat fournissait au modèle macro-économique ThreeME un compte satellite sur la matière pour évaluer en projection l’empreinte matières de scénarios de transition énergétique. Néanmoins, cette approche reste limitée par le niveau de détail de la modélisation macroéconomique, entraînant des biais d’agrégation dans la mesure des besoins matières (A. Teixeira, et al. 2020), mais aussi par l’incapacité de mettre en cohérence le bouclage macroéconomique avec un réalisme technique plus fin sur l’évolution des besoins en matières. Pour ces raisons, la nouvelle version du modèle MatMat décrite ci-après intègre directement dans ses interfaces de paramétrisation les sorties de modélisation de ThreeME. Elle offre en parallèle une interface de paramétrisation supplémentaire pour intégrer des expertises plus fines sur l’évolution des besoins matières par produit. Ainsi, cette nouvelle version de MatMat produit une analyse environnementale des scénarios de transition bas carbone à une échelle « méso » par mise en cohérence d’approches micro et macro.

L’ADEME a également engagé d’autres projets d’évaluation des besoins en matériaux pour la transition bas carbone. Conduit en partenariat par l’institut NégaWatt, Enertech et Solagro, le projet Pepito/MODEIRE a conduit au développement d’un outil de modélisation prospective de la demande en matériaux IGCE en 2050, qui permet de modéliser les grands déterminants des besoins directs territoriaux en matériaux : cartographie des flux de matières entre secteurs, modélisation de la future demande, évolution des niveaux d’importation et d’exportations, et joue sur une large gamme de paramètres (recyclage, substitution, déploiement des EnR, sobriété et mode de consommation, démographie, etc.).

MatMat propose une approche complémentaire à ces outils. Il permet de décrire l’économie à une échelle intermédiaire (« méso ») en intégrant ensemble la modélisation de l’énergie et de la matière, en considérant les effets directs et indirects des relations intersectorielles via l’approche IO ainsi que les rétroactions macroéconomiques. Il prend aussi en compte les émissions des GES et l’extraction de matières premières indirectes importées permettant la mesure des empreintes matières et carbone de scénarios prospectifs.

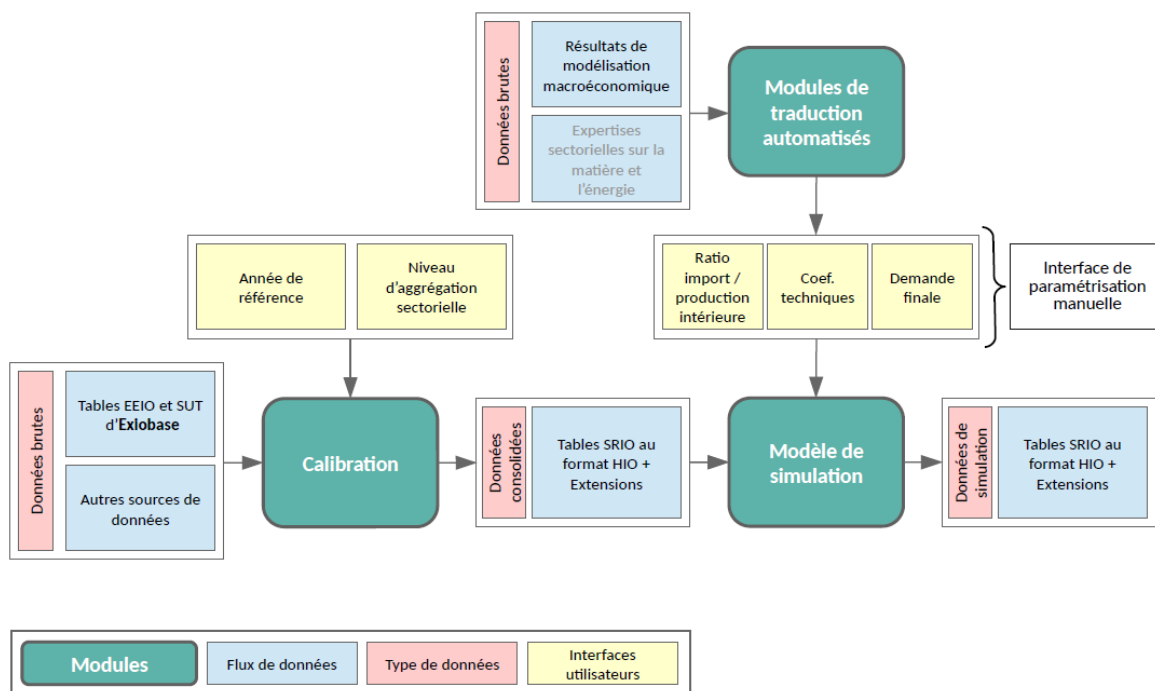
2. Principes de modélisation du modèle

Dans cette section, nous rappelons les principes de modélisation sous-jacents à l'ensemble des versions du modèle MatMat et la méthodologie de calcul d'empreinte mise en œuvre.

2.1. Approche top down du calcul des empreintes environnementales

2.1.1. Structure du modèle MatMat

MatMat repose sur une comptabilité Entrée-Sortie à 200 produits en unités mixtes, construite à partir de la base de données Exiobase au format EEIO (Environmentally-extended input-output) (Stadler, et al. 2018). Dans le cadre EEIO, la base de données des flux économiques en unité monétaire est complétée par des extensions en unité physique, notamment sur les usages énergétiques, l'extraction de matières premières et les émissions des principaux Gaz à Effet de Serre (GES) par usages énergétiques et par processus de production. La base de données Exiobase a été retenue car elle propose un niveau de détail fin des flux énergétiques et matières. Cela permet de faciliter l'articulation et la mise en cohérence des différentes expertises conduites à l'ADEME sur l'évolution conjointe des systèmes énergétiques et des besoins matières (cf. (A. Teixeira, et al. 2020)). Dans MatMat, les flux associés aux 33 secteurs extracteurs de matières premières disponibles ont été exprimés en tonnes (10 matières biomasse, 12 combustibles fossiles, 8 minéraux métalliques et 3 minéraux non-métalliques) et ceux des 45 produits énergétiques en ktep ("kilotonne équivalent pétrole").



NB : L'intégration automatisée des expertises sectorielles dans les scénarios de simulation est grisée sur la figure car en cours de développement.

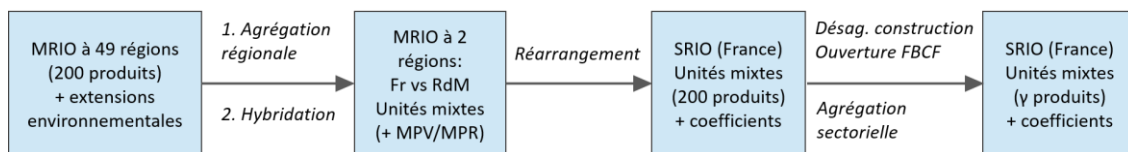
Figure 3 : Structure schématique du modèle MatMat. Extrait et mise à jour à partir de (A. Teixeira, et al. 2020).

La structure générale du modèle MatMat est présentée Figure 3. Le modèle est décomposé en différents modules :

1. **Un module de calibration** permet d'obtenir, à la suite d'une procédure décrite synthétiquement en Figure 4, les données au format IO (comme décrite dans la Figure 5) selon le niveau d'agrégation sectorielle défini par l'utilisateur. Les avancées apportées sur la calibration sont détaillées en section 0.

2. **Le module de traduction** permet d'automatiser la construction de scénarios prospectifs à partir des sorties de la modélisation macro-économique ThreeME, complétées éventuellement par des expertises sectorielles.
3. **Le module de simulation** permet d'appliquer au système de référence des chocs exogènes (évolution de la demande finale, des coefficients techniques et de l'origine des approvisionnements via les taux d'importation) qui ont été définis dans le module précédent. Aussi, il calcule les impacts environnementaux associés au système de référence et aux scénarios prospectifs simulés : empreinte matières, mais aussi désormais empreinte carbone, besoins en matériaux transformés. La méthode de simulation des scénarios dans le modèle est décrite en section 2.2.

Le fonctionnement du module de calibration est schématisé en Figure 4. Dans le format MRIO (Multi-Regional Input-Output) de la base de données EXIOBASE, le monde est découpé en plusieurs régions interconnectées. Cette structure rend visible l'ensemble des chaînes de transformation de la matière à l'échelle internationale. Dans MatMat, le MRIO à 49 régions est d'abord agrégé à 2 régions, puis restructuré sous un format SRIO (Single-Region Input-Output) centré sur la France. L'utilisation du format SRIO permet d'économiser considérablement du temps de calcul et d'alléger la structure des données. Si le format SRIO est plus compact, il rend toutefois impossible la visualisation des flux économiques et physiques à l'étranger. Le reste du monde (RdM, noté aussi RoW pour « Rest of the World ») est donc pris en compte par une approche par coefficients⁸ : pour chaque bien importé pour la consommation finale, le modèle calcul une série de coefficients de contenu matière à partir du modèle MRIO à deux régions France vs RdM. Ils fournissent une information agrégée des flux / émissions indirectes, c'est-à-dire ceux mobilisés / celles générées par la production à l'étranger des biens importés en France.



Note : Les extensions environnementales d'Exiobase permettent d'exprimer les flux de matières premières et de produits énergétiques en unités physiques selon la procédure d'hybridation décrite en Figure 6 et au Tableau 1. Le modèle MRIO à deux régions permet ensuite de calculer un jeu de coefficients de contenu matière et carbone des importations (cf. section 2.1.3)

Figure 4 : Procédure de traitements des données d'Exiobase pour la construction de la base de données de calibration de MatMat.

La structure des données obtenues après calibration (format SRIO) est présentée dans la Figure 5.

⁸ Cf. section 3.3 du rapport (A. Teixeira, et al. 2020)

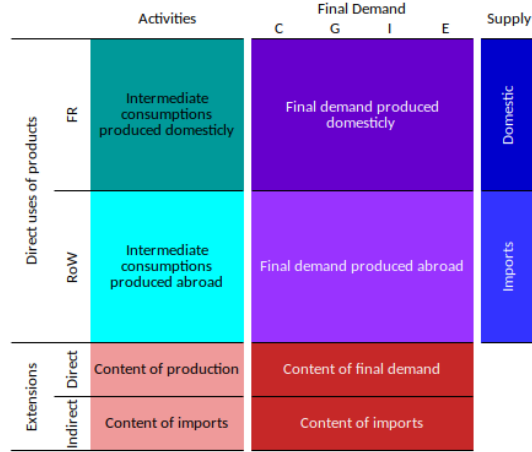


Figure 5 : Structure schématique des données après calibration (format SRIO). Adapté de (A. Teixeira, et al. 2020).

2.1.2. Principes de la modélisation entrée-sortie

Une structure « Input-Output » permet de décrire les flux économiques territoriaux et les échanges directs avec le reste du monde. Dans un modèle input-output à N secteurs, les consommations intermédiaires (C.I.) territoriales sont représentées sous forme d'une matrice des consommations inter-industrielles Z :

$$\begin{bmatrix} z^{11} & \dots & z^{1j} & \dots & z^{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z^{i1} & \dots & z^{ij} & \dots & z^{iN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z^{N1} & \dots & z^{Nj} & \dots & z^{NN} \end{bmatrix}$$

On renverra le lecteur vers (Miller et Blair 2009) pour comprendre comment cette matrice IO carrée est obtenue à partir des composantes du Tableau Entrée-Sortie (TES) établi par la comptabilité nationale. Ces données doivent en général être réarrangées en réattribuant les co-produits entre secteurs afin que chaque secteur ne produise qu'un seul bien.

Le terme z^{ij} correspond à la quantité de produit du secteur i consommée par le secteur j pour produire le bien j (quantité physique ou monétaire, mais unité identique pour tous les z^{sj} ($1 \leq j \leq N$) relatifs à un produit s donné). Dans le cadre de modélisation SRIO de MatMat, on distingue pour la France les consommations finales de biens produits sur le territoire Y_{FR} de celles de biens importés Y_{RoW} . La demande finale (F.D.) se décompose entre consommations des ménages (C) et du gouvernement (G), formation brute de capital fixe (I) et exportations (E). La production d'un secteur j peut nécessiter des intrants produits domestiquement (matrice $Z_{FR} = \{z_{FR}^{ij}\}$) ou importés (matrice $Z_{RoW} = \{z_{RoW}^{ij}\}$).

Le niveau de production domestique x_{FR}^i en bien i (produit sur le territoire) vérifie l'égalité :

$$x_{FR}^i = z_{FR}^{i1} + \dots + z_{FR}^{iN} + \underbrace{C_{FR}^i + G_{FR}^i + I_{FR}^i + E_{FR}^i}_{Y_{FR}^i}$$

Les importations du bien i (x_{RoW}^i) correspondent par ailleurs à :

$$x_{RoW}^i = z_{RoW}^{i1} + \dots + z_{RoW}^{iN} + \underbrace{C_{RoW}^i + G_{RoW}^i + I_{RoW}^i}_{Y_{RoW}^i}$$

On fait l'hypothèse que $E_{RoW}^i = 0$, c'est-à-dire qu'aucun bien importé n'est réexporté directement.

L'approvisionnement total en bien i vaut alors :

$$x_{Total}^i = x_{FR}^i + x_{RoW}^i$$

On définit la matrice des coefficients techniques A comme :

$$A_{reg} = \{A_{reg}^{ij}\} = \begin{cases} z_{reg}^{ij} \\ x_{FR}^j \end{cases} \text{ où } reg \in \{FR, RoW, Total\}$$

Le coefficient A_{reg}^{ij} de A_{reg} indique la proportion d'intrant i de la région reg nécessaire à la production domestique d'une unité de bien j . L'inverse de Leontief L permet de remonter à la production totale nécessaire pour satisfaire la demande finale, en prenant en compte les consommations intermédiaires requises par l'économie pour produire l'ensemble des biens de consommation finale. Il se calcule à partir de l'égalité comptable suivante ($\mathbf{1}_N$ étant la matrice identité de dimension N):

$$\mathbf{x}_{FR} = L_{FR} \mathbf{Y}_{FR} \quad \text{en notant} \quad L_{FR} = (\mathbf{1}_N - A_{FR})^{-1}$$

$$\text{car } \mathbf{x}_{FR} = \underbrace{A_{FR} \mathbf{x}_{FR}}_{\text{C.I.}} + \underbrace{\mathbf{Y}_{FR}}_{\text{F.D.}}$$

Par construction, pour l'année de référence (indiquée par un exposant 0 , on a les égalités suivantes entre les vecteurs d'approvisionnement \mathbf{x}^0 et de demande finale \mathbf{Y}^0 :

$$\mathbf{x}_{FR}^0 = L_{FR}^0 \mathbf{Y}_{FR}^0$$

$$\mathbf{x}_{RoW}^0 = A_{RoW}^0 \mathbf{x}_{FR}^0 + \mathbf{Y}_{RoW}^0$$

$$\mathbf{x}_{Total}^0 = \mathbf{x}_{FR}^0 + \mathbf{x}_{RoW}^0 = A_{Total}^0 \mathbf{x}_{FR}^0 + \mathbf{Y}_{Total}^0$$

2.1.3. Calibration des coefficients de contenus directs et indirects en GES / matières pour le calcul d'empreinte

Le calcul des empreintes carbone ou matières dans MatMat repose sur un jeu de coefficients de contenu en GES/matières à l'année de base au format SRIO : $\text{CoefFR}_Z^{\text{ext}}$, $\text{CoefFR}_Y^{\text{ext}}$ et $\text{CoefRoW}^{\text{ext}}$.

Les coefficients de contenu direct, $\text{CoefFR}_Z^{\text{ext}}$ et $\text{CoefFR}_Y^{\text{ext}}$, permettent de calculer les consommations de matières et les émissions de GES qui ont lieu sur le territoire national. Ils sont définis en fonction de l'origine de l'approvisionnement reg (France ou Reste du Monde) comme suit :

$$\text{CoefFR}_Z^{\text{ext}} = \frac{Z_{reg}^{\text{ext}}}{Z_{reg}} \quad \text{et} \quad \text{CoefFR}_Y^{\text{ext}} = \frac{Y_{reg}^{\text{ext}}}{Y_{reg}}$$

où Z_{reg} et Y_{reg} sont respectivement les consommations intermédiaires et finales du système de référence, satisfaites soit par une production domestique, soit par des importations. Z_{reg} et Y_{reg} sont exprimées en unités mixte (physique ou monétaire). La division se fait terme à terme entre les éléments matriciels.

Les coefficients de contenu indirect, $\text{CoefRoW}^{\text{ext}}$, permettent d'évaluer les consommations de matières ou les émissions générées à l'étranger par la production des importations françaises (cf. (Le Treut 2017) et (A. Teixeira, et al. 2020)). Les coefficients de contenu indirect des importations sont définis comme suit :

$$\text{CoefRoW}^{\text{ext}} = \frac{S_{RoW}^{\text{ext}} \cdot L^{RoW} \cdot x_{RoW}^{\text{mon}}}{x_{RoW}^{\text{mixte}}}$$

où S_{RoW}^{ext} est le vecteur d'impact environnemental par secteur d'activité dans le reste du monde, L^{RoW} la matrice de Leontief du reste du monde calculée à partir des coefficients techniques du reste du monde de manière similaire à la France, et x_{RoW} le vecteur des importations françaises (en unité mixte ou monétaire). Ainsi $L^{RoW} x_{RoW}^{\text{mon}}$ est la quantité d'intrants nécessaire au reste du monde pour produire les exportations destinées à la France.

Pour chaque bien importé, $\text{CoefRoW}^{\text{ext}}$ donne un vecteur d'intensité matière ou carbone, qui est appliqué au volume du bien importé pour déterminer l'empreinte à l'étranger. Les coefficients $\text{CoefRoW}^{\text{ext}}$ peuvent évoluer en projection pour intégrer les effets d'une évolution des intensités carbone et matières (combustibles fossiles essentiellement) de la production dans le reste du monde.

2.2. Construction de chocs pour l'évaluation de scénarios prospectifs

Le modèle MatMat permet de simuler des scénarios en projection en déformant la demande finale, les coefficients techniques et les taux d'importation (x_{RoW}^i / x_{FR}^i) de chaque bien.

Ces chocs (notés respectivement $\delta_C, \delta_G, \delta_I, \delta_E$ pour les composantes de la demande finale, $\{\delta_A^{ij}\}$ pour les coefficients techniques et δ_m pour les taux d'importations) sont exprimés en variation relative par rapport à l'année de référence. A noter qu'à ce stade des développements, on considère que la variation du taux d'importation s'applique identiquement aux consommations finales et intermédiaires d'un même bien.

On a donc, en projection, pour un bien i et une composante de demande finale $y \in \{C, G, I, E\}$:

$$y_{Total}^i = y_{Total}^{i0} \cdot (1 + \delta_y^i)$$

$$y_{FR}^i = \frac{y_{Total}^i}{1 + \frac{y_{RoW}^{i0}}{y_{FR}^{i0}} \cdot (1 + \delta_m^i)}$$

et de la même manière :

$$A_{Total}^{ij} = A_{Total}^{ij0} \cdot (1 + \delta_A^{ij}) \quad \forall j$$

$$A_{FR}^{ij} = \frac{A_{Total}^{ij}}{1 + \frac{A_{RoW}^{ij0}}{A_{FR}^{ij0}} \cdot (1 + \delta_m^i)} \quad \forall j$$

La démonstration de ces égalités est donnée annexe A2-1 du rapport présentant la version initiale de MatMat (A. Teixeira, et al. 2020).

L'inverse de Leontief, recalculé avec ces nouvelles valeurs de coefficients techniques, permet d'accéder aux quantités totales à produire pour satisfaire le choc de demande finale :

$$\mathbf{x}_{FR} = L_{FR} \mathbf{Y}_{FR}$$

Qui entraîne, d'après les équations en section 2.1.2 :

$$\mathbf{x}_{FR} = A_{FR} \mathbf{x}_{FR} + \mathbf{Y}_{FR} = A_{FR} L_{FR} \mathbf{Y}_{FR} + \mathbf{Y}_{FR}$$

et $\mathbf{x}_{RoW} = A_{RoW} \mathbf{x}_{FR} + \mathbf{Y}_{RoW}$

En sommant les deux égalités précédentes, on obtient la décomposition suivante pour le vecteur d'approvisionnement total :

$$\mathbf{x}_{Total} = \underbrace{\overbrace{A_{FR} L_{FR} \mathbf{Y}_{FR}}^{\text{intrants intérieurs}} + \overbrace{\mathbf{Y}_{FR}}^{\text{consos finales prod. intérieure}}}_{\text{production intérieure}} + \underbrace{\overbrace{A_{RoW} L_{FR} \mathbf{Y}_{FR}}^{\text{intrants importés}} + \overbrace{\mathbf{Y}_{RoW}}^{\text{consos finales importées}}}_{\text{importations}}$$

Ces calculs reposent sur les hypothèses suivantes (Perrier et Quirion 2016):

- Il y a homogénéité des produits d'une branche (également nécessaire pour la description statique de l'économie) : chaque secteur ne produit qu'un seul bien ;
- Les rendements d'échelle sont constants (la consommation additionnelle ne modifie pas le système productif au-delà des variations de coefficients techniques scénarisées) ;
- Les effets induits autres que ceux capturés par la matrice de Leontief sont négligeables (pas d'effet prix notamment) ;

Ces hypothèses appellent une certaine prudence dans l'interprétation des résultats, en particulier lors de variations importantes de la demande finale.

2.3. Calcul des indicateurs de pressions et d'impacts environnementaux

Le modèle MatMat permet de réattribuer les besoins en matières premières, en matériaux et les émissions de GES selon une approche production (inventaire) ou selon une approche consommation (empreinte) grâce au calcul des indicateurs D_{pba} , D_{imp} et D_{cba} ⁹ détaillés ci-après.

Approche « production » : Visualisation des impacts directs de chaque secteur de production et de chaque composante de la demande finale. Elle indique les consommations apparentes de chaque entité et les pressions environnementales associées.

⁹ « pba » = production-based accounting ; « cba » = consumption-based accounting

$$D_{pba} = \begin{bmatrix} D_{pba_{FR}} \\ D_{pba_{RoW}} \\ D_{pba_{Total}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{CoefFR}_{Z_{FR}}^{ext} * Z_{FR} \\ \text{CoefFR}_{Z_{RoW}}^{ext} * Z_{RoW} \\ D_{pba_{Z_{Total}}} = D_{pba_{Z_{FR}}} + D_{pba_{Z_{RoW}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{CoefFR}_{Y_{FR}}^{ext} * [\mathbf{C}_{FR} \mid \mathbf{G}_{FR} \mid \mathbf{I}_{FR} \mid \mathbf{E}_{FR}] \\ \text{CoefFR}_{Y_{RoW}}^{ext} * [\mathbf{C}_{RoW} \mid \mathbf{G}_{RoW} \mid \mathbf{I}_{RoW} \mid \mathbf{E}_{RoW}] \\ D_{pba_{Y_{Total}}} = D_{pba_{Y_{FR}}} + D_{pba_{Y_{RoW}}} \end{bmatrix}$$

Note de lecture: Les variables en gras représentent des vecteurs, les autres des matrices. Une variable notée $\bar{\mathbf{u}}$ correspond à la matrice diagonale construite à partir du vecteur \mathbf{u} . La multiplication matricielle usuelle est notée \cdot tandis que la multiplication terme à terme est notée $*$. Les séparateurs verticaux $|$ indiquent que la multiplication est développée sur toutes les composantes matricielles listées entre crochets $[]$.

En projection, les nouvelles matrices des consommations intermédiaires sont recalculées de la façon suivante :

$$Z_{FR} = A_{FR} \bar{\mathbf{x}}_{FR} = A_{FR} \overline{L_{FR} \cdot Y_{FR}} \text{ et } Z_{RoW} = A_{RoW} \overline{L_{FR} \cdot Y_{FR}}$$

Les coefficients $\text{CoefFR}_{Z_{FR}}^{ext}$ et $\text{CoefFR}_{Y_{FR}}^{ext}$ permettent de calculer les pressions environnementales sur le territoire français (FR) par unité de production de chaque bien, selon un format générique pour toute extension *ext*. Par exemple, pour les matières premières, le jeu de coefficients s'applique uniquement aux flux relatifs à la matière dans la nouvelle matrice des consommations intermédiaires induite par un choc de demande. Une conversion est ensuite effectuée pour que les flux soient exprimés dans la bonne unité (par exemple : les produits énergétiques fossiles sont exprimés en ktep dans le système SRIO mais convertis en kt pour la mesure de l'empreinte matière). Pour déterminer les émissions de GES, le jeu de coefficients (exprimés en MtCO₂eq/kt ou en MtCO₂eq/kttep) s'applique aux consommations de produits énergétiques fossiles ou aux unités de production. Avec ce formalisme, les pressions et impacts directs sont donc étroitement reliés aux volumes de consommations intermédiaires de chaque secteur et aux consommations finales, selon l'usage qui en est fait : produit énergétique fossile utilisé comme combustible, usage non-énergétique de produit pétrolier, autre consommation de matière première, etc.

Approche « consommation » : Réattribution aux composantes de la demande finale des pressions et impacts cumulés le long de toute la chaîne de valeur mobilisée pour la production d'un bien de consommation finale.

En développant la formule de \mathbf{x}_{Total} précédemment explicitée, on construit en premier lieu l'indicateur suivant :

$$D = \begin{bmatrix} \text{CoefFR}_{Z_{FR}}^{ext} * A_{FR} \cdot [\overline{L_{FR} \cdot \mathbf{C}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{G}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{I}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{E}_{FR}}] \\ \text{CoefFR}_{Z_{RoW}}^{ext} * A_{RoW} \cdot [\overline{L_{FR} \cdot \mathbf{C}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{G}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{I}_{FR}} \mid \overline{L_{FR} \cdot \mathbf{E}_{FR}}] \\ D_{Z_{Total}} = D_{Z_{FR}} + D_{Z_{RoW}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{CoefFR}_{Y_{FR}}^{ext} * [\overline{\mathbf{C}_{FR}} \mid \overline{\mathbf{G}_{FR}} \mid \overline{\mathbf{I}_{FR}} \mid \overline{\mathbf{E}_{FR}}] \\ \text{CoefFR}_{Y_{RoW}}^{ext} * [\overline{\mathbf{C}_{RoW}} \mid \overline{\mathbf{G}_{RoW}} \mid \overline{\mathbf{I}_{RoW}} \mid \overline{\mathbf{E}_{RoW}}] \\ D_{Y_{Total}} = D_{Y_{FR}} + D_{Y_{RoW}} \end{bmatrix}$$

La différence entre les indicateurs D_{pba} et D réside dans la méthode de décomposition des chaînes de valeur reliant consommation finale et intrants primaires des processus économiques (énergie, matière, etc.). Dans D_{pba} , on utilisait l'égalité $Z_{FR} = A_{FR} \overline{L_{FR} \cdot Y_{FR}}$ pour retrouver la matrice des consommations intermédiaires après un choc. Dans D , la matrice $\overline{L_{FR} \cdot Y_{FR}}$ correspond aux volumes de production (en ligne) nécessaires pour satisfaire la demande finale française dans chaque bien de l'économie (en colonne). La ventilation $A_{[reg]} \overline{L_{FR} \cdot Y_{FR}}$ donne, pour chaque secteur d'activité, les consommations intermédiaires provenant de la région [reg] nécessaires à la satisfaction de la demande finale française. La formule est développée pour toutes les composantes de demande finale ($\overline{Y_{[reg]}} = \overline{\mathbf{C}_{[reg]}} + \overline{\mathbf{G}_{[reg]}} + \overline{\mathbf{I}_{[reg]}} + \overline{\mathbf{E}_{[reg]}}$).

La troisième ligne de la formule (besoins totaux) s'obtient par sommation terme à terme des deux premières. Cet indicateur D donne ainsi le volume (physique ou monétaire) de biens qui a été nécessaire pour satisfaire les différentes composantes de la demande finale adressées à chacun des secteurs de l'économie, directement (second bloc) et indirectement via les consommations intermédiaires induites par la satisfaction de la demande finale (premier bloc). En revanche, les indicateurs D_{pba} et D ne permettent pas de remonter aux besoins à l'étranger nécessaires à la production des biens importés par la France.

Les pressions et impacts indirects à l'étranger de la demande française sont mesurés par l'indicateur D_{imp} :

$$D_{imp} = \begin{bmatrix} 0 \\ D_{imp_Z}^{RoW} \\ D_{imp_Z}^{Tot} = D_{imp_Z}^{RoW} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{imp_Y}^{RoW} \\ D_{imp_Y}^{Tot} = D_{imp_Y}^{RoW} \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec } D_{imp_Z}^{RoW} = \text{CoefRoW}^{ext} * A_{RoW} \cdot [L_{FR} \cdot \overline{C_{FR}} | L_{FR} \cdot \overline{G_{FR}} | L_{FR} \cdot \overline{I_{FR}} | L_{FR} \cdot \overline{E_{FR}}]$$

$$D_{imp_Y}^{RoW} = \text{CoefRoW}^{ext} * [\overline{C_{RoW}} | \overline{G_{RoW}} | \overline{I_{RoW}} | \overline{E_{RoW}}]$$

La matrice de coefficients **CoefRoW** est ainsi appliquée aux consommations importées pour évaluer les besoins nécessaires à l'économie du reste du monde pour produire les biens importés par la France.

L'ensemble des pressions et impacts de la consommation finale sont obtenus de la façon suivante :

$$D_{cba} = D + D_{imp}$$

Ils peuvent être ventilés (i) par vecteur de demande finale (C, G, I, E), (ii) par produits de demande finale et (iii) par origine d'approvisionnement (France ou reste du monde)

Les indicateurs standards de consommation de matières (DE, DMC, DMI RMC et RMI) sont calculés à partir des indicateurs D_{pba} et D_{cba} de la façon suivante (le détail des calculs est présenté dans le rapport MatMat-1 (A. Teixeira, et al. 2020)) :

$$DE = \sum_Y D_{pba}_{[FR,Total]}$$

$$DMC = \sum_{Y \neq E} D_{pba}_{[reg,Total]}, \quad reg = \{FR, RoW, Total\}$$

$$DMI = \sum_Y D_{pba}_{[reg,Total]}, \quad reg = \{FR, RoW, Total\}$$

$$RMC = \sum_{Y \neq E} D_{cba}_{[reg,Total]}, \quad reg = \{FR, RoW, Total\}$$

$$RMI = \sum_Y D_{cba}_{[reg,Total]}, \quad reg = \{FR, RoW, Total\}$$

3. Développements d'une base de données de calibration hybride

La base de données de calibration de MatMat est construite selon une méthode SNAC (« Single Country National Accounts Consistent footprints ») simplifiée, telle que décrite par (Tukker et al 2018). Cette méthode consiste à coupler la base de données entrées-sorties multirégionale mondiale EXIOBASE avec des statistiques nationales spécifiques.

Un certain nombre de développements ont été réalisés pour améliorer la base de données initiale, ils sont décrits dans la section 3.1. Les résultats d'empreintes carbone et matière obtenus pour l'année de calibration sont présentés dans la section 3.2. Les limites méthodologiques et les pistes d'amélioration sont discutées dans la section 3.3.

3.1. Présentation des différents développements menés sur la base de données de calibration

3.1.1. Distinction entre matières premières vierges et matières issues du recyclage

La base de données Exiobase au format IOT sur laquelle était initialement construit la calibration du modèle MatMat ne distingue pas les filières de matériaux à base de matières premières vierges (MPV ou « primaire ») ou issues du recyclage (MPR ou « secondaires »). Cette information est perdue lors de la transformation des tables SUT (*Supply and Use Tables*) au format IOT. Au sein du formalisme SUT d'Exiobase, les deux filières (primaire et secondaire) produisent un même bien, cependant chacune avec sa propre structure de coût. Lors du passage du format SU au format symétrique IO, l'absence de distinction entre leur produit respectif conduit à l'agrégation des filières secondaires au sein des filières primaires.

Pour permettre de distinguer désormais ces deux filières dans MatMat, nous utilisons la base MRSUT pour re-désagréger chaque secteur entre filière primaire et secondaire dans la base MRIOT. Pour ce faire, nous transposons la méthode réalisée au cœur du modèle Pycirk par (Donati, et al. 2021).

La matrice de *Supply* est donc d'abord modifiée pour définir la production de chaque secteur secondaire comme une production de matériau recyclé (MPR). Puis on reconstruit une matrice des consommations intermédiaires du MRIO à deux régions à partir des matrices d'emplois (*Use*) et de ressources (*Supply*) de la base MRSUT (en valeurs monétaires) selon l'hypothèse ITA (*Industry Technology assumption*). Choisie pour la construction de la base IO symétrique d'Exiobase¹⁰, cette hypothèse méthodologique suppose que chaque secteur d'activité utilise une unique technologie de production pour fabriquer ses différents produits. Par conséquent, l'étape centrale de la construction de la matrice Z du système IO symétrique consiste à retrouver la structure des consommations intermédiaires d'un secteur α par la somme des structures d'emplois de tous les secteurs de la matrice *Use*, pondérées par la part de leur production de produit α dans leur production totale (tirée de la matrice de *Supply*). Les structures de consommations intermédiaires initiales des secteurs de matériaux concernés (papier, verre, plastique, bois, ciment, acier, aluminium, cuivre, plomb/zinc/étain, métaux précieux, autres métaux, déchets de la construction) et les extensions environnementales associées sont donc ouvertes en deux dans la base MRIOT (en valeurs monétaires) au prorata de cette nouvelle matrice Z, chaque filière retrouvant de fait une structure de production distincte.

Concernant la désagrégation des lignes correspondant aux usages en MPV et MPR de chacun des secteurs, l'information sur la répartition des consommations entre matières premières et secondaires de chaque secteur n'est pas incluse dans Exiobase. On suppose alors que tous les secteurs consomment dans une même proportion une matière secondaire donnée, ce qui équivaut à un taux d'incorporation de matière recyclée identique dans tous les secteurs de production dans chaque région de production, en ignorant les contraintes techniques propres à chaque secteur. Ce taux est calculé comme la part de la production de la filière secondaire dans le total de la production primaire et secondaire (c'est-à-dire la part de marché de la filière secondaire), les productions en valeur monétaire étant tirées de la matrice de ressources de

¹⁰ Pour les détails et bénéfices de cette hypothèse, cf. « Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables, Methodologies and working papers, 2008 edition. ISBN 978-92-79-04735-0. », chapitre 11.

la base SUT (*Supply matrix*). Par exemple, dès lors qu'un secteur consomme de l'aluminium, sa consommation d'aluminium est divisée entre une consommation d'aluminium vierge et une consommation d'aluminium recyclé, au prorata de la part d'aluminium recyclé dans la production totale d'aluminium.

Un rééquilibrage du faible déficit emplois-ressources résiduel (max 0,01 M€ pour la France) est opéré au niveau des autoconsommations de matériaux des filières primaires et secondaires en fonction de leurs niveaux observés¹¹.

3.1.2. Correction et extension de la comptabilité physique

Le modèle MatMat s'appuie sur une comptabilité en unités mixtes (physique et monétaire) permettant notamment de faciliter l'introduction d'hypothèses de scénarisation bottom-up et d'assoir sa représentation des interdépendances sectorielles sur un réalisme physique.

Le modèle MatMat propose désormais une représentation physique des matières premières (biomasse cultivée, la pêche, la sylviculture, les minerais métalliques, les minéraux non-métalliques, les combustibles fossiles bruts), de l'énergie et des matériaux de base, avec une distinction entre MPV et MPR.

Ces flux physiques ont été calibrés sur la base de statistiques nationales. Comme indiqué en section 2.1.1, chaque extension environnementale (consommations d'énergie, de matières émissions et émissions de GES,) est calibrée selon le même formalisme que le système MRIO initial à deux régions (cf. deuxième bloc sur Figure 4). MatMat manipule donc une représentation entrée-sortie multi-couches (monétaire, masse, énergie) des flux selon la méthodologie d'hybridation des flux économiques décrite par (Merciai 2019). L'ensemble de cette procédure est décrite ci-après.

3.1.2.1. Méthode générale

Le Tableau 1 résume la nature des flux hybridés dans MatMat ainsi que les principales sources de données employées pour ce faire. Les comptes d'Eurostat (ComExt et EW-MFA) et les données du Bilan National du Recyclage (BNR) de l'ADEME et de l'USGS ont été mises en cohérence pour hybrider les flux de matières au sens large. Les flux énergétiques sont exprimés en unité physique principalement à partir du compte satellite sur l'énergie d'Exiobase. Quelques corrections sont réalisées sur la base du bilan énergétique d'Eurostat. L'hybridation est réalisée sur la structure de données du MRIO monétaire, agrégé à deux régions (France vs RdM). La Figure 6 schématise la méthode d'hybridation pour l'énergie, les matières premières et les matériaux. Elle est explicitée dans les sections ci-après. Elle consiste en une ventilation de volumes physiques de matières au prorata des factures contenues dans la matrice Input-Output (cf. partie 4.4 du précédent rapport MatMat (A. Teixeira, et al. 2020) pour le détail de la méthode).

¹¹ On choisit de ne pas appliquer une méthode de rééquilibrage global du système IO (type RAS) qui risquerait d'altérer la qualité des données de manière non contrôlée. Le déficit emplois-ressources total est contrebalancé en priorité en laissant inchangés les niveaux de production de MPR et de MPV, et en dernier recours en ajustant les productions de MPV et MPR sans faire varier les usages totaux de matériau de la filière primaire.

Category	Sub-category	Number of sectors	Units	Additional Sources
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	Eurostat
	Metal ores	8	k.tonnes	Eurostat
	Non Metallic Minerals	3	k.tonnes	Eurostat
Food industry	Animal Products	5	M.EUR	
	Dairy products	1	M.EUR	
	Vegetable Products	6	M.EUR	
Manufacturing industry	Clothing industry	3	M.EUR	BNR / Eurostat / USGS
	Primary & secondary materials	28	k.tonnes	
	Chemicals & fertilizers	3	M.EUR	
	Transport equipment	2	M.EUR	
	Other manufacturing product	11	M.EUR	
Energy industry	Coal	4	k.toe	Eurostat
	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	INSEE
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	

Tableau 1 : Synthèse des flux économiques et de leur unité (hybridés ou non) dans MatMat, ainsi que les sources de données complémentaires mobilisées pour l'hybridation. 12 des 16 matériaux transformés sont déclinés en MPV et MPR.

3.1.2.2. Correction de l'hybridation sur l'énergie

Les extensions environnementales d'Exiobase sur le bilan énergétique détaillé sont basées sur les données de l'AIE. Elles renseignent les consommations totales en chacun des produits énergétiques pour chaque secteur d'activité, sans distinction de l'origine de l'approvisionnement (blocs jaune Figure 6).

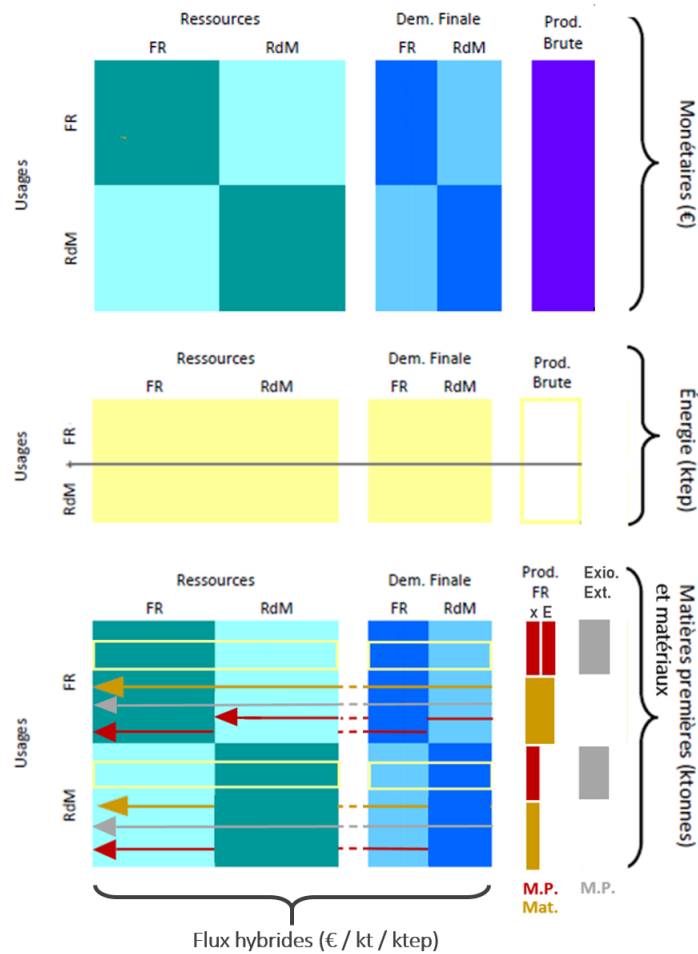


Figure 6 : Structure de données MRIO obtenue après agrégation à deux régions d'Exiobase (V3.7 ou V3.8) en flux monétaires et extraction des extensions d'intérêt, puis ventilation des données en flux physiques (symbolisée par des flèches de couleur) pour reconstruire une matrice MRIO en unités mixtes au format HIO (étapes 1 et 2 de la Figure 4). Adapté de (A. Teixeira, et al. 2020). M.P. = matières premières, Mat. = Matériaux, Exio. Ext. = extensions d'Exiobase.

Le module de calibration de MatMat propose une désagrégation de la demande énergétique selon le lieu de sa production. Pour ce faire, nous utilisons le bilan énergétique d'Eurostat afin d'estimer le taux d'importation moyen en unité physique x_{row}/x_{FR} pour chaque produit énergétique. Cela permet de s'affranchir des incohérences pour chaque usage énergétique entre flux physiques et flux économiques présentes dans Exiobase¹². En parallèle, lors de la transformation des tables MRIO en tables SRIO (cf. section 2.1.1), nous prenons garde à bien corriger les flux du commerce de biens énergétiques en cohérence avec l'hypothèse d'absence d'exportation de produits importés (i.e. $E_{row} = 0$, dictée par l'impossibilité de retrouver ces flux à partir des données EXIOBASE au format MRIO). Cette hypothèse forte est problématique pour certains flux comme le gaz naturel, qui présente une production quasi-nulle avec des exportations de produits importés importantes. Il est alors nécessaire de retrancher les exportations de produits importés par rapport aux données officielles pour conserver l'équilibre de marché.

Sur la base du taux x_{row}/x_{FR} calculé à partir d'Eurostat, les consommations physiques de produits énergétiques extraites des extensions environnementales d'Exiobase sont ainsi séparées entre production domestique et importations, et viennent remplacer les données monétaires du système SRIO, bloc par bloc, dans chaque région du monde selon l'origine de l'approvisionnement (en jaune Figure 6). Pour être

¹² La désagrégation des usages énergétiques par origine de l'approvisionnement était initialement réalisée au prorata des factures présentes dans la table IO monétaire d'Exiobase. Des incohérences sur l'énergie entre flux physiques et flux économiques ont été observées (notamment par l'absence d'un flux économique mais la présence d'un flux physique ou vice versa) nécessitant d'améliorer la méthode.

cohérence avec l'hypothèse $E_{row} = 0$, nous ajustons les données de commerces en retranchant les exportations de produits importées selon la procédure suivante :

$$\begin{cases} E_{imp} = \min(E, x_{RoW}) \\ E' = E - E_{imp} = \begin{cases} 0 & \text{si } E < x_{RoW} \\ E - x_{RoW} & \text{sinon} \end{cases} \\ x_{RoW}' = x_{RoW} - E_{imp} = \begin{cases} x_{RoW} - E & \text{si } E < x_{RoW} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{cases}$$

3.1.2.3. Correction et extension de l'hybridation sur la matière

La méthode d'hybridation des flux de matières décrite dans (A. Teixeira, et al. 2020) a été améliorée selon plusieurs dimensions : (i) hybridation des exportations et importations basée sur les données ComExt jugées plus fiables (assortie d'un traitement préparatoire pour assurer la cohérence de la représentation physique avec le formalisme IO), (ii) corrections sur les niveaux de productions de matières premières à partir de la base EW-MFA d'Eurostat, (iii) extension de la représentation physique aux flux de matériaux à partir des données du Bilan National du Recyclage (BNR) de l'ADEME et d'Eurostat.

La procédure d'hybridation des usages intérieurs de matières se décompose en deux grandes étapes (**couleurs rouge et marron** sur la Figure 6).

D'une part, nous construisons les vecteurs de production, d'importations et d'exportations de matières en unité physique pour la France par mise en cohérence des différentes bases de données retenues (voir Tableau 2).

D'autre part, nous procédons à l'hybridation des tables entrée-sortie par ventilation des différents vecteurs construits à l'étape précédente sur les usages. Cette ventilation se fait au prorata des usages énergétiques (ktep) pour la matière première fossiles (cf. flèches marrons, Figure 6) et des factures monétaires pour le reste de la matière (cf. flèches rouges, Figure 6). La procédure d'hybridation de la matière première utilisée à l'étranger reste similaire à celle présentée dans le premier rapport (cf. flèche grise figure 6, méthode reprise de Teixeira et al. 2020), en prenant en compte les usages français consommés à l'étranger (cf. flèches rouges, Figure 6).

Les exportations (sous-colonne « E ») et les importations françaises de matières premières en volume physique sont tirées des données ComExt d'Eurostat, plus conformes aux règles comptables de MatMat (issues de la comptabilité nationale). Elles couvrent aussi l'ensemble de l'économie, notamment la matière première et les matériaux, apportant une cohérence d'ensemble aux données d'hybridation. Si des données de commerce extérieur venaient à manquer dans la base ComExt, elles sont substituées par défaut par les données équivalentes de la base EW-MFA.

Concernant les matières premières agricoles, le détail sectoriel disponible sur les céréales dans Eurostat est inférieur à celui présent dans Exiobase (e.g. riz, blé, autres céréales). En conséquence, les flux de céréales sont hybridés au prorata des productions en volumes physiques tirées des extensions d'Exiobase, en s'assurant que les volumes totaux de céréales produits domestiquement, exportés et importés restent égaux aux volumes totaux d'Eurostat correspondants.

Concernant les flux de matériaux, les données de productions totales exprimées en tonnes proviennent des informations du BNR et de l'USGS, et à défaut d'Eurostat (notamment ComExt pour les imports/exports). Le Tableau 2 récapitule la source des données mobilisée pour l'hybridation de chacun des différents matériaux. A défaut, lorsqu'un flux de matériau primaire est indiqué comme extrait des bases d'Eurostat (mention « ComExt » ou « ComExt_exp_p »), cela signifie que ce flux primaire a été déduit à partir du flux secondaire associé, donné par le BNR, afin que la somme des flux primaire et secondaire soit égale au flux total d'Eurostat (c'est par exemple le cas du bois sur la production et les exportations, ou du verre sur les importations et exportations). Les matériaux pour lesquels il n'existe pas dans Exiobase de filières de recyclage ne sont pas hybridés (e.g. céramique, briques & tuiles, caoutchouc, autres produits minéraux non métalliques).

Enfin, des corrections des incohérences entre les volumes physiques des productions domestiques et des exportations sont mises en œuvre :

1. Suppression des flux physiques de minerais métalliques si les flux monétaires correspondants sont nuls dans Exiobase
2. Pour les minerais métalliques, dans le cas où la production domestique (x_{FR}) s'avère inférieure aux exportations (E), on retranche aux importations et aux exportations la différence $E - x_{FR}$ afin de

supprimer ce que l'on assimile à des réexportations directes de matières importées (même correction que sur l'énergie). L'impact de ces deux corrections est cependant marginal.

3. Pour les matériaux où les niveaux de production sont inconnus, les volumes de production domestique sont recalculés à l'aide des prix des exportations en €/kg déduits de ComExt (cf. mention « ComExt_Exp_prices » dans le Tableau 2).

Sectors \ VARIABLE	PRODUCTION	EXPORT	IMPORT	Sectors \ VARIABLE	PRODUCTION	EXPORT	IMPORT
Wood and wood products	ComExt_Exp_p	ComExt	ComExt	Basic iron and steel	BNR	ComExt	ComExt
Secondary Wood	BNR	BNR	-	Secondary steel	BNR	BNR	BNR
Pulp	BNR	BNR	BNR	Precious metals	ComExt_Exp_p	ComExt	ComExt
Secondary paper	BNR	BNR	BNR	Secondary precious metals	-	-	-
Plastics, basic	ComExt_Exp_p	ComExt	ComExt	Aluminium	BNR	BNR	BNR
Secondary plastic	BNR	-	-	Secondary aluminium	BNR	BNR	BNR
Glass and glass products	BNR	ComExt	ComExt	Lead, zinc and products	USGS/BNR	USGS/BNR	USGS/BNR
Secondary glass	BNR	BNR	BNR	Secondary lead	USGS/BNR	USGS/BNR	USGS/BNR
Cement, lime and plaster	USGS/ADEME	ComExt	ComExt	Copper products	BNR	BNR	BNR
Secondary cement, lime...	USGS/ADEME	-	-	Secondary copper	-	-	-
Secondary construction mat.	BNR	-	-	Other non-ferrous metal products	ComExt_Exp_p	ComExt	ComExt
Rubber and plastic products				Secondary other non-ferrous metals	-	-	-
Bricks, tiles and baked clay				Other non-metallic mineral products			
Ceramic goods				Paper and paper products			

Note : Les matériaux dans les cases grisées n'ont pas de filières de recyclage associées dans Exiobase et ne sont pas hybridés. Un tiret indique que l'information n'est pas disponible dans ces sources de données complémentaires (la valeur est alors par défaut tirée des extensions d'Exiobase) ou bien que le flux monétaire correspondant dans Exiobase est nul.

Tableau 2 : Sources des données mobilisées pour l'hybridation des flux de matériaux.

3.1.2.4. Intégration des émissions de GES

MatMat dispose désormais d'une fonctionnalité de calcul de l'empreinte carbone, suite à l'extension aux GES de la méthodologie générique détaillée en section 2.1.3.

Les émissions de GES considérées dans MatMat sont les émissions de CO₂, N₂O, CH₄ et les gaz fluorés. Ces données, désagrégées par secteur de production et par usage, proviennent de la base de données

Exiobase. Elles ne sont pas publiques et nous ont été communiquées par le NTNU¹³. Le format de ces données d'émissions est identique à celui présenté pour l'énergie (Figure 6). Les émissions de GES de la combustion ont été calculées par le NTNU à partir des consommations intermédiaires et finales de produits énergétiques fossiles tirées de l'AIE en appliquant, à chaque produit énergétique, un coefficient d'émission tiré des données du GIEC (en tCO₂eq/tep).

Les émissions des procédés industriels, de l'agriculture et des modes de traitement des déchets sont calculées selon le même principe, en appliquant à chaque unité de production le coefficient d'émission associé.

On dispose donc d'un système SRIO dans lequel les émissions de GES sont comptabilisées comme des consommations finales ou intermédiaires (formalisme « multi-layer » emprunté à (Merciai 2019)), sur lequel on applique les traitements mathématiques génériques pour le calcul d'empreinte, définis à la section 2.3. Le bilan des émissions est mis en cohérence avec le bilan énergétique.

3.1.3. Construction d'une matrice d'investissement

Comme rappelé au chapitre 1, les biens d'investissements sont parmi les principaux consommateurs de matériaux : construction, équipements de transports, machines-outils, etc. Or, la transition bas carbone s'accompagne d'un important changement structurel qui nécessite une transformation profonde des stocks de capital productif. La désagrégation du vecteur d'investissement initial en une matrice carrée à 200 secteurs constitue une nouvelle extension du modèle MatMat qui présente un double avantage :

1. Améliorer la projection de la demande finale d'investissement adressée au système productif, en traduisant plus finement les chroniques sectorielles des scénarios de transition bas carbone dans MatMat.
2. Donner une autre vision des pressions environnementales liées à la production du capital grâce à de nouveaux indicateurs d'empreintes environnementales, en attribuant l'impact d'un investissement à l'acteur qui le réalise et non au bien d'investissement en lui-même. Les investissements de chaque secteur sont alors comptabilisés comme des consommations intermédiaires additionnelles du processus de production, modifiant de fait la matrice des coefficients techniques calibrée à l'année de base. Les chaînes de valeurs complétées par les besoins en capital permettent de se rapprocher d'une description des émissions de GES selon le périmètre du « scope 3 ». L'impact des investissements nécessaires à la transition est réattribué aux autres composantes de la demande finale (ménages, gouvernement, exportations) grâce au calcul entrée-sortie usuel et la répartition des responsabilités des différents secteurs dans l'empreinte totale est modifiée.

Dans le cadre de ce projet, seul le premier point a été traité. On renvoie vers (Teixeira et Lefèvre 2023) pour le second point.

La construction de la matrice d'investissement à partir du vecteur d'investissement d'Exiobase (Formation brute de capital fixe ou FBCF) est schématisée Figure 7. La procédure est largement documentée dans la littérature (cf. (Södersten, Wood et Hertwich 2018a), (Södersten, Wood et Hertwich 2018b)). Pour ce faire nous avons mobilisé la base de données EU KLEMS *Growth and Productivity account*¹⁴. Cette base de données a l'avantage d'offrir un format générique pour plusieurs régions du monde. La base de données KLEMS renseigne les investissements annuels (en prix et en volume) de 34 branches de l'économie française dans 10 biens¹⁵, matériels (équipements de communications, de transports, etc.) et immatériels (R&D, logiciels informatiques, etc.). Le détail sectoriel est donné dans le Tableau 5 en annexe.

Une correspondance est d'abord établie entre chacun des 10 biens de KLEMS et les 200 secteurs d'Exiobase. Chaque investissement du vecteur de FBCF d'Exiobase à 200 produits est ensuite ventilé entre les 34 branches de KLEMS, au prorata des dépenses d'investissement (en valeur monétaire) qu'elles réalisent dans le bien correspondant à l'année de base choisie. Cela permet d'obtenir une matrice d'investissement de dimensions 200 x 34. La possibilité est laissée à l'utilisateur d'attribuer directement

¹³Norwegian University of Science and Technology, les concepteurs d'Exiobase.

¹⁴Site euklems.eu

¹⁵La liste exhaustive est indiquée Tableau 5.

des investissements d'Exiobase aux branches KLEMS de son choix¹⁶, pour tenter de pallier aux difficultés de mise en correspondance entre certains secteurs d'Exiobase et les 10 biens de KLEMS¹⁷.

L'étape suivante consiste à désagréger les 34 colonnes de la matrice d'investissement en 200 colonnes. Une correspondance a donc été établie entre chacun des 200 secteurs d'Exiobase et les 34 branches de KLEMS. A noter que plusieurs secteurs d'Exiobase peuvent correspondre à la même branche de la segmentation KLEMS. Sur la base de la correspondance établie, les 34 colonnes de la matrice d'investissement sont alors désagrégées en 200 secteurs au prorata de la consommation de capital fixe (CCF¹⁸) que chaque secteur réalise dans la CCF totale « fictive » de sa branche KLEMS de rattachement (les données de CCF sont tirées des extensions d'Exiobase)(exemple en rose sur la Figure 7)¹⁹. La méthode de désagrégation retenue évite les doubles comptes et tient compte du changement de nomenclature entre KLEMS (Nace rev2) et Exiobase (Nace rev1). La procédure est appliquée aux consommations domestiques et importées avec le même jeu de données de KLEMS, la base de données KLEMS ne distinguant pas les consommations de biens d'investissement en fonction de leur origine d'approvisionnement²⁰. Au terme de la procédure de désagrégation totale, la structure d'investissement d'un secteur d'Exiobase dans MatMat est quasi identique à celle de sa branche KLEMS de rattachement. En conséquence, tous les secteurs de MatMat rattachés à une même branche KLEMS (branche énergie (D), branche transports et entrepôts (H), etc. Voir Tableau 5.) possèdent une structure d'investissement identique. Par exemple, les différents secteurs de production d'électricité (à partir de gaz, d'éolien, etc.) partagent la même structure d'investissement, ce qui ne permet pas à ce stade de faire émerger des impacts contrastés entre les trajectoires d'investissements des multiples scénarios possibles d'évolution du mix électrique.

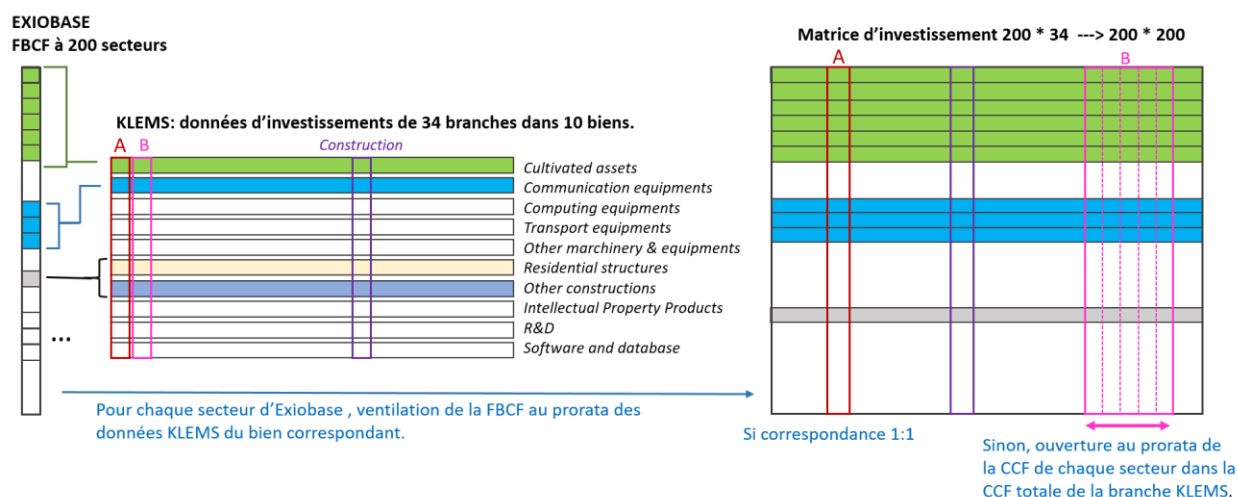


Figure 7 : Schéma de la construction de la matrice d'investissement à 200 secteurs à partir des données KLEMS.

3.1.4. Désagrégation du secteur de la construction

Dans MatMat, le secteur de la construction englobe « les activités de construction générale et de construction spécialisée pour les bâtiments et le génie civil » (section F de la NACE). En 2015, la construction était responsable de près de 20 % de l'empreinte matières (RMC) en minéraux non-métalliques et en minerais métalliques ainsi qu'une part conséquente de la production de matériaux (ciment, bois, cuivre, matériaux minéraux pour la construction).

¹⁶ Le fichier Klems_aggregation.xlsx fourni avec le code de MatMat propose déjà une matrice de correspondance remplie à l'utilisateur.

¹⁷ Difficulté d'attribution de 15 % des investissements d'Exiobase sur KLEMS, en particulier sur les services et les biens immatériels (R&D), voir en annexe Figure 13. Problème spécifique concernant le bien R&D : la FBCF en R&D est nulle dans Exiobase car comptabilisée comme une consommation intermédiaire, contre 50 Mds€ dans la base KLEMS.

¹⁸ Voir encadré p. 28 pour définition.

¹⁹ Méthode reprise de (Södersten, Wood et Hertwich 2018a) et (Södersten, Wood et Hertwich 2018b).

²⁰ Une nouvelle version de la base propose en revanche une matrice complète de CCF au format MRIO d'Exiobase (200 secteurs et 49 régions).

Dans le cadre de la présente convention, l'objectif était d'ouvrir l'unique secteur « construction » d'Exiobase pour suivre les évolutions de trois sous-secteurs distincts.

- La construction de bâtiments, qui a un fort impact sur les besoins en matière et concentre une part importante des investissements de la transition bas carbone.
- Les activités de rénovation : dans les scénarios de transition SNBC-2 (AME vs AMS), le rythme des constructions neuves diminue au profit de la rénovation énergétique et non-énergétique des bâtiments existants.
- Le génie civil.

Cette désagrégation du secteur de la construction implique d'une part de désagréger la matrice des coefficients techniques, pour obtenir un contenu différencié en matières premières et matériaux entre les nouveaux sous-secteurs. D'autre part, la consommation finale en construction étant quasi-exclusivement comptabilisée comme de la FBCF, une désagrégation supplémentaire de la matrice d'investissement s'impose pour améliorer la projection de la demande dans chaque nouveau sous-secteur de la construction.

3.1.4.1. Désagrégation de la matrice des coefficients techniques

Le TES139 de l'INSEE sert de base à la désagrégation du système SRIO dans MatMat, en offrant un détail de quatre branches sur la construction (promotion immobilière, construction de bâtiments, génie civil, travaux de construction spécialisés). Son utilisation permet de conserver une cohérence d'ensemble de la désagrégation en opérant sur toutes les consommations intermédiaires du secteur, et donc non limitées à ses seules consommations de matériaux. Dans la suite, les sous-catégories promotion immobilière et construction neuve sont agrégées en un unique bien construction de bâtiments neufs. Le Tableau 3 indique le périmètre des sous-secteurs de la construction de l'INSEE.

41	Construction de bâtiments	42	Génie civil	43	Travaux de construction spécialisés
41.1	Promotion immobilière	42.1	La construction, l'entretien et la réparation de routes, voies ferrées, ponts et tunnels	43.1	Démolition et préparation de sites (<i>dont forages et sondages, terrassement, déblayage</i>)
41.2	Construction de bâtiments résidentiels et non résidentiels entiers <i>maisons individuelles ; logements collectifs ; bâtiments de services publics (hôpitaux, écoles) ; bâtiments aéroportuaires ; bureaux ; commerces ; entrepôts ; salle de sport...</i>	42.2	Réseaux et lignes (pour fluides, électricité, télécommunications) <i>inclut les centrales électriques</i>	43.2	Travaux d'installations électriques, plomberies et autres travaux d'installation <i>Inclut l'installation de chauffage</i>
		42.9	Autres ouvrages de génie civil <i>ouvrages maritimes et fluviaux, installations industrielles (raffineries et usines chimiques), installations sportives extérieures</i>	43.3	Travaux de finition <i>Plâtrerie, menuiserie, revêtements des sols et murs, peinture, vitrerie, chauffage, conditionnement d'air, isolation thermique et acoustique ...</i>
				43.9	Autres travaux spécialisés <i>Couverture, charpente, maçonnerie, fondations, échafaudages ...</i>

Tableau 3 : Description de la segmentation Nace rev2 utilisée par l'INSEE pour le secteur de la construction.

Au préalable, dans le TES INSEE, les composantes de la formation brute de capital autre que la FBCF (c'est-à-dire les variations de stocks, et acquisitions moins cession d'objets de valeur) sont ignorées. Les variables de la production et des consommations intermédiaires du TES sont donc rééquilibrées pour tenir compte de cette réduction de la demande finale. Pour cela, l'hypothèse est faite que la fabrication de ces composantes de l'investissement nécessite les mêmes structures de production que celles des autres biens de demande finale (les coefficients techniques restent inchangés avant et après la correction du TES). Une matrice de correspondance est établie entre les nomenclatures de l'INSEE (NAF/Nace rev 2) et d'Exiobase (Nace rev 1). Dans le système SRIO de MatMat, les consommations intermédiaires et finales en bien « construction » d'Exiobase sont désagrégées entre les trois sous-secteurs INSEE au prorata des montants correspondants dans le TES INSEE (désagrégation sur les lignes, en rose dans la Figure 8). De même, les consommations intermédiaires du secteur « construction » (en colonne) sont ventilées pour

chaque bien (ligne à ligne) au prorata des consommations intermédiaires des trois branches du TES INSEE dans chaque bien. On obtient ainsi trois structures de production distinctes (désagrégation sur les colonnes, Figure 8).

Pour certains secteurs de matériaux, la correspondance INSEE-Exiobase se fait un pour un²¹. Mais le TES INSEE étant moins détaillé qu'EXIOBASE sur la matière, certaines catégories de produits d'Exiobase sont ventilées entre les trois branches de la construction avec une même clef de répartition : matières premières non métalliques (en jaune Figure 8), produits minéraux non métalliques (en bleu ; essentiellement des matériaux de construction), produits métalliques hors acier (en vert clair), et produits énergétiques fossiles. Ceci empêche de distinguer des effets différenciés des besoins entre matériaux correspondant à une même catégorie INSEE en fonction des évolutions de la demande de construction. Par exemple, le secteur « produits minéraux non-métallique hors verre » du TES INSEE est utilisé pour désagréger les consommations intermédiaires des trois sous-secteurs de la construction dans les biens « Ciment », « Céramiques » et « Briques » d'Exiobase. Les variations des besoins en ciment, en briques et en céramiques pour l'ensemble de la construction seront ainsi identiques entre elles, malgré des chocs de demande différents s'appliquant aux trois sous-secteurs de la construction.

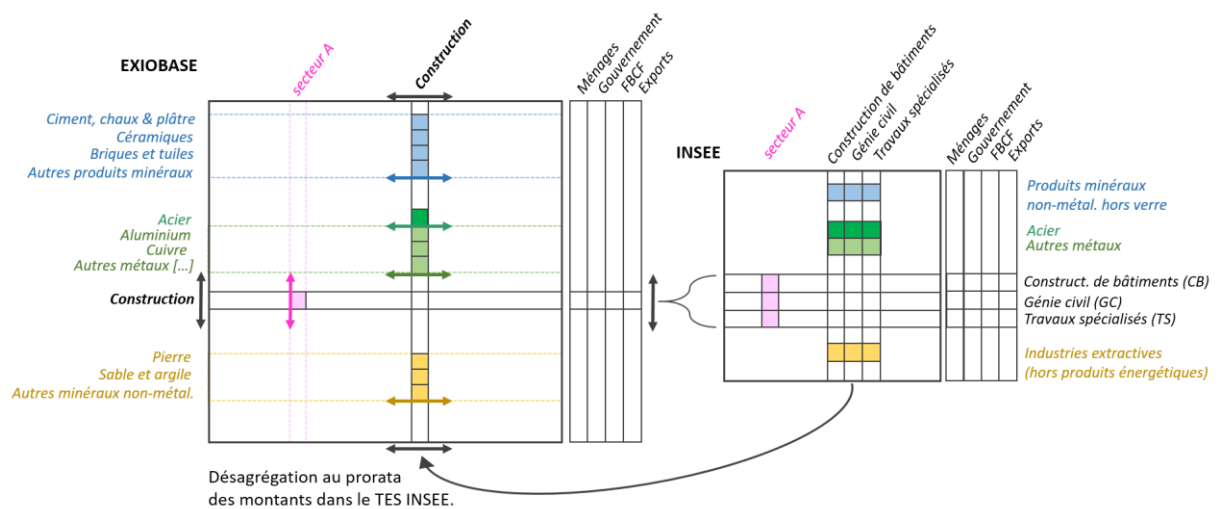


Figure 8 : Schéma de la désagrégation du système SRIO (matrice des consommations intermédiaires et vecteurs de demande finale) sur la base des données du TES de l'INSEE.

Par ailleurs, les pertes de flux observées après désagrégation²² sur les exportations et sur les consommations intermédiaires importées sont négligées car faibles.

In fine, la désagrégation de la construction apporte une plus-value à l'étude des besoins en matière mais ne conduit pas à des coefficients techniques aussi réalistes que souhaités pour certains matériaux dans les sous-secteurs de la construction.

3.1.4.2. Désagrégation de la matrice d'investissement

Pour compléter la matrice d'investissement avec la désagrégation de la construction, des matrices de ventilation spécifiques sont créées pour les nouveaux sous-secteurs à partir des données de capital fixe (CF) de l'INSEE et des données de la base KLEMS. La méthodologie est illustrée dans la Figure 9.

²¹Fabrication d'éléments en métal pour la construction, Produits en plastiques et en caoutchouc, produits en bois, en verre, en papier.
²² Il existe des flux nuls dans le TES INSEE qui ne sont pas nuls dans Exiobase, d'où une perte de flux dans le système SRIO de MatMat après désagrégation au prorata selon les données du TES INSEE.

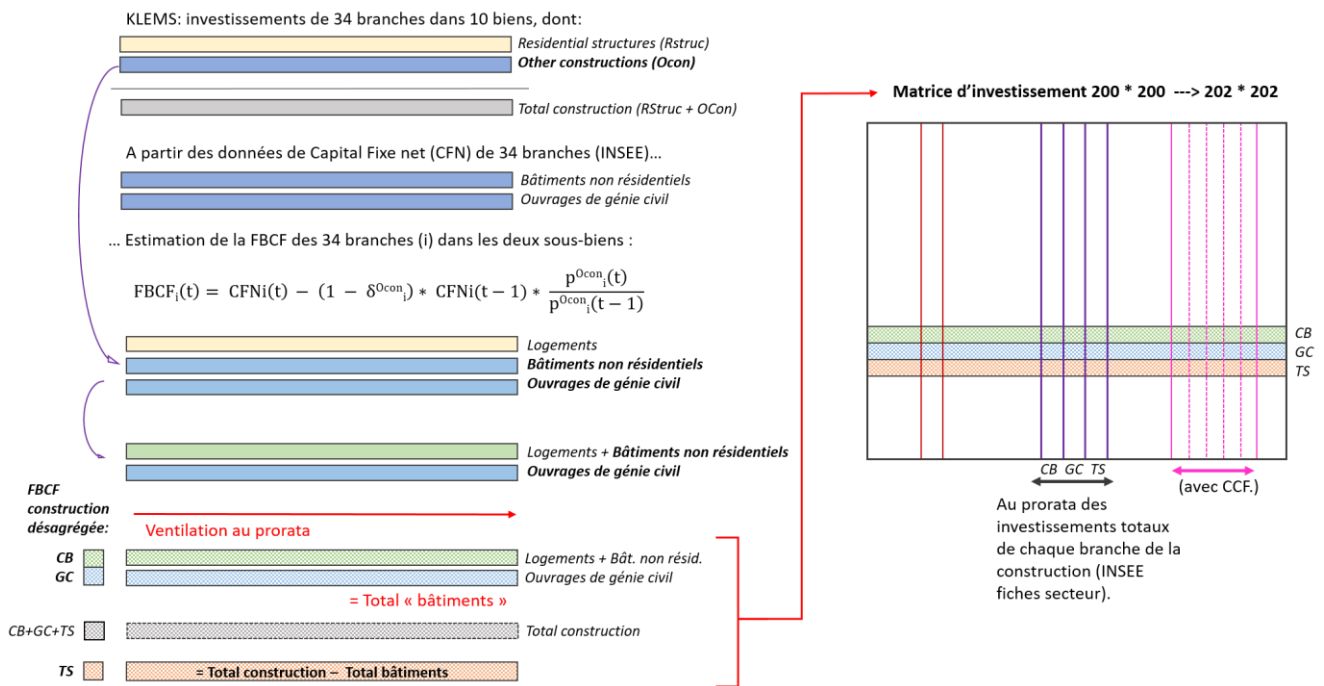


Figure 9 : Schéma de la désagrégation du secteur construction dans la matrice d'investissement. Dans la formule d'estimation de la FBCF, l'indice i indique une branche quelconque de la segmentation KLEMS et l'indice t l'année de référence choisie pour la calibration.

L'INSEE publie des données²³ de capital fixe net (CFN) de 37 branches dans une douzaine d'actifs fixes, selon une segmentation quasi-identique à celle de KLEMS (voir définitions des grandeurs économiques en encadré). Tout d'abord, cette segmentation à 37 secteurs est agrégée marginalement pour être compatible avec celle de la base de données KLEMS (34 secteurs). Pour le secteur de la construction, deux actifs fixes sont disponibles pour les bâtiments autres que logements dans les données INSEE – "ouvrages de génie civil" et "bâtiments non résidentiels" – au lieu d'un seul dans KLEMS (actif fixe OCon, voir Figure 9). Cependant, l'INSEE ne publie pas les données de FBCF de ces 37 secteurs dans les différents actifs fixes. Une formule simple de mesure de la dépréciation du capital fixe permet d'estimer approximativement la FBCF réalisée par chaque branche i dans chacun de ces deux actifs. Elle fait intervenir les taux de dépréciation du capital δ et indices de prix p référencés dans la base KLEMS pour l'actif OCon :

$$FBCFi(t) = CFNi(t) - (1 - \delta_i^{Ocon}) * CFNi(t-1) * \frac{p_i^{Ocon}(t)}{p_i^{Ocon}(t-1)}, \text{ avec } t \text{ l'année de référence}$$

Le capital fixe net en prix courant étant évalué au prix de remplacement, les indices de prix permettent de corriger les variations de valeur entre les deux années consécutives mobilisées dans l'estimation (correction de faible ampleur). Cette formule simple conduit à estimer des investissements négatifs pour certaines branches, ils sont arbitrairement mis à zéro (correction marginale cependant). Afin de conserver la cohérence des données initiales de KLEMS, la FBCF de chacune des 34 branches dans l'actif OCon est ensuite répartie entre les deux nouveaux actifs ("ouvrages de génie civil" et "bâtiments non résidentiels") au prorata des estimations de FBCF réalisée précédemment. On obtient ainsi une subdivision de l'actif OCon en deux actifs ("ouvrages de génie civil" et "bâtiments non résidentiels"), selon les 34 secteurs de KLEMS.

Ensuite, l'investissement d'Exiobase dans le produit « construction » est désagrégé en trois produits (construction de bâtiments, génie civil, travaux spécifiques) conformément aux données figurant dans le vecteur de FBCF du TES139 de l'INSEE (désagrégation des lignes de la matrice d'investissement). Pour assurer l'équilibre comptable entre la production et la somme des consommations intermédiaires et finales (dont l'investissement), il est nécessaire de ventiler les investissements totaux du vecteur de FBCF d'Exiobase selon les clefs de répartition précédemment déterminées. Ainsi, le montant total investi en "Construction de bâtiments" du TES 139 de l'INSEE est ventilé entre les 34 branches au prorata de la

²³ Données de CFN et CFB: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2832673?sommaire=2832834>

somme d'investissements effectués dans les actifs fixes « logements » et « autres bâtiments non-résidentiels » (génie civil exclu) par les 34 branches de KLEMS. De même, le montant total investi en "génie civil" est ventilé entre les 34 branches au prorata des investissements effectués dans l'actif "ouvrages de génie civil" par les 34 branches de KLEMS. Enfin, le montant total investi en "Travaux spécifiques" est calculé pour chacune des 34 branches comme la différence entre le montant investi par chaque branche dans l'ensemble des actifs de la construction (construction de bâtiments, génie civil, travaux spécifiques) et ses investissements précédemment déterminés en "génie civil" et "construction de bâtiments".

Enfin, la matrice des investissements avec les 3 nouveaux produits de construction ventilés en 34 branches est désagrégée en 202 secteurs selon la procédure décrite plus haut (cf. section 3.1.3). Les structures d'investissement des nouveaux secteurs de la construction sont supposées identiques à celle du secteur initial à désagréger et sont ouvertes au prorata de leur « l'investissement brut corporel hors apport », tiré des fiches sectorielles²⁴ de l'INSEE, pour aboutir à une matrice carrée à 202 secteurs.

Capital fixe et Consommation de capital fixe

La **formation brute de capital fixe** (FBCF) est constituée par les acquisitions moins cessions d'actifs fixes réalisées par les producteurs résidents. Les actifs fixes sont les actifs corporels ou incorporels issus de processus de production et utilisés de façon répétée ou continue dans d'autres processus de production pendant au moins un an.

Le **capital fixe brut** (CFB) mesure le stock des actifs fixes acquis par la formation brute de capital fixe des périodes passées qui sont encore utilisés dans la production à l'instant où le stock est mesuré. Les actifs fixes acquis dans le passé à des prix différents sont réévalués aux prix des actifs fixes neufs de même type (prix de remplacement), pour obtenir le capital fixe brut à prix courants.

La **consommation de capital fixe** (CCF) mesure, pour une période donnée, la perte de valeur du stock de capital fixe utilisé par un producteur, du fait du temps, de l'usure physique, de l'obsolescence ordinaire ou des dommages accidentels courants.

Le **capital fixe net** (CFN) est égal au capital fixe brut diminué du cumul de la consommation de capital fixe.

3.2. Résultats pour l'année de calibration – 2015

3.2.1. Empreinte matières en 2015

Le modèle MatMat fournit différentes mesures standardisées de la consommation de matières premières, calculés à partir des indicateurs Dpba et Dcba définis plus haut (cf. section 2.3 et Teixeira et al. 2020).

La DE (pour *Domestic Extraction*) indique la quantité totale de matières premières extraites sur le territoire. En y ajoutant la quantité totale de matières premières importées par l'économie française (flux apparents), on obtient la DMI (*Direct Material Input*). La DMC (*Direct Material Consumption*) est obtenue en retranchant à la DMI les exportations apparentes de matières premières (exportations directes).

La RMI (*Raw Material Input*) intègre en sus de la DMI les consommations de matières premières à l'étranger qui ont permis de produire les biens importés par la France. Enfin la RMC (*Raw Material Consumption*) s'obtient à partir de la RMI en excluant les masses de matières exportées ainsi que les quantités de matières premières mobilisés en France et à l'étranger pour produire les biens exportés par la France. La RMC correspond à l'empreinte matières de l'économie.

Selon le MTES²⁵, en 2016 l'extraction domestique s'élevait à 580 Mt, dont 58 % de minéraux non-métalliques (MNM) et 42% de biomasse, les combustibles fossiles et minéraux métalliques étant essentiellement importés. La calibration des flux physiques dans MatMat repose sur des données d'Eurostat et conduit donc à des indicateurs de valeur similaire (DE = 599 Mt en 2015 dont 56 % de MNM)

²⁴ Fiches sectorielles de la construction: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3554432?sommaire=3554439>

²⁵ Publications disponibles sur <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/pressions-exercees-par-les-modes-de-production-et-de-consommation/prelevements-de-ressources-naturelles/utilisation-des-ressources-naturelles-en-france/article/l-empreinte-matieres-de-la-france?glossarise=2733>

étant donnée la variabilité annuelle de l'extraction domestique (640 Mt en 2014 avec 55% de MNM, 636 Mt en 2018, d'après le MTES). La DMC évaluée par MatMat est sensiblement inférieure à celle renseignée par Eurostat (déficit de 60 Mt, dont 45 Mt de produits énergétiques fossiles, cf. section 3.3.1). Par rapport à la DMI d'Eurostat, l'évaluation de MatMat présente un différentiel de -80 Mt de produits énergétiques fossiles, -70 Mt de biomasse, -35 Mt de minerais métalliques et -40 Mt de MNM (cf. section 3.3.1).

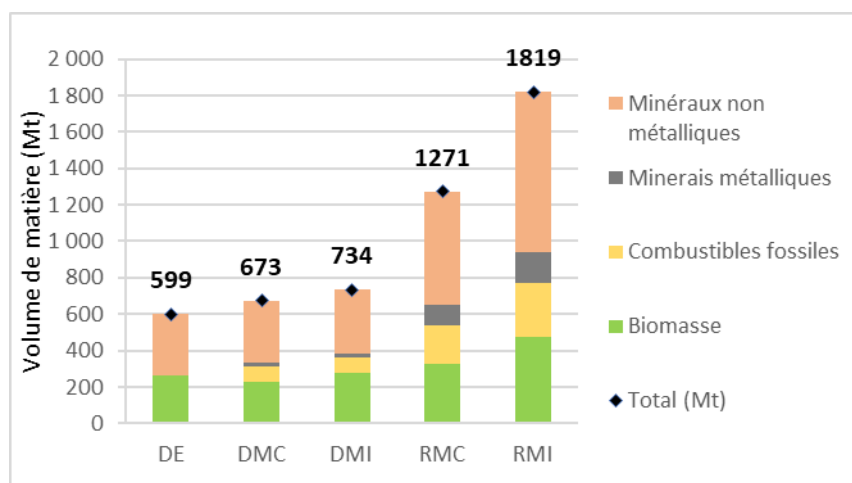


Figure 10 : Indicateurs d'empreinte matières pour la France, en 2015 (résultat MatMat-v2.1)

La proportion des combustibles fossiles et des minerais métalliques dans le total de la consommation de matières premières augmente fortement lorsque l'on tient compte des flux cachés des matières incluses dans les biens importés (RMC et RMI). L'empreinte matières (RMC) mesurée par MatMat en 2015 est très supérieure à la DMC (Figure 10). Elle est aussi bien supérieure aux mesures fournies par le MTES, qui utilise l'outil RME-Tool d'Eurostat (RMC = 862 Mt en 2015. Source : CGDD(SDES), 2021). Ces écarts s'expliquent par les différences entre les bases de données et les méthodes mobilisées pour le calcul d'empreinte. L'approche retenue dans MatMat, appuyée sur une base de données au format MRIO, peut souffrir des défauts d'harmonisation de la description des flux de commerce entre régions du monde, avec notamment une tendance à surestimer l'empreinte matières (cf. le rapport (A. Teixeira, et al. 2020) section 4.7.1. Figures 17 et 18 pour une comparaison des empreintes matières évaluées par (A. Teixeira, et al. 2020) et (Mohkam et Simon 2019) du CGDD et de l'INSEE, ainsi que la rubrique méthodologie de (Calatayud et Mohkam 2018 (avril)) pour les implications des méthodologies MRIO de l'UNEP-IRP et RME-Tool d'Eurostat). Le traitement du reste du monde en une seule entité économique peut également amener un biais d'agrégation sur les résultats.

La Figure 11 présente les décompositions de la consommation intérieure apparente de matières premières (DMC) et de l'empreinte matières (RMC) en minéraux non-métalliques et en minerais métalliques par secteurs de demande directe (pour la DMC) ou par biens de consommation finale (pour la RMC) pour l'année de calibration 2015 (figures complémentaires pour la biomasse et les combustibles fossiles en annexe, Figure 16).

L'indicateur RMC_dom a été calculé en retranchant à la RMC la part importée de l'empreinte matières (indicateur D_imp). Il permet ainsi de visualiser d'une part les différences de responsabilité dans la consommation de matières premières entre les logiques « production-based » et « consumption-based » (DMC vs RMC_dom)²⁶ et d'autre part l'évolution de la structure de l'empreinte matières lorsque les flux cachés importés ne sont pas pris en compte (RMC_dom vs RMC).

On constate que la production de matériaux et de biens manufacturés représente l'essentiel de la DMC en MNM (80%) et la quasi-totalité de la DMC en minerais métalliques. Quand l'on passe sur une logique consommation (par produit, RMC_dom), on constate que les MM et MNM sont essentiellement consommés par la construction, puis les autres biens manufacturés et les équipements de transport. Le poids de la demande d'équipements de transport et de produits manufacturés s'accroît entre la RMC_dom et la RMC, passant de 40 % à 53 % du total sur les minerais métalliques et de 30 % à 43 % sur les MNM. De même, la part des services progresse légèrement, en raison de leur place prépondérante

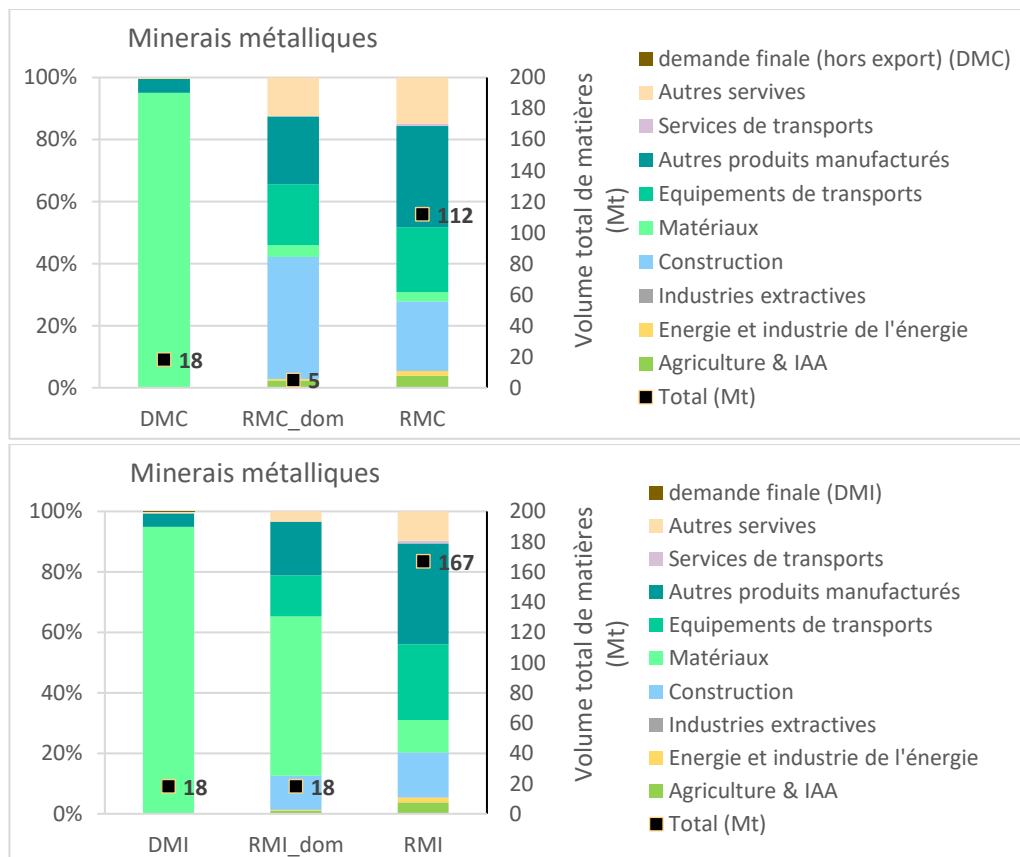
²⁶ L'indicateur DMC désagrégé représenté figure 11 relève d'une approche « production-based » car il trace les consommations de matières apparentes de chaque secteur économique (y compris celles de la demande finale).

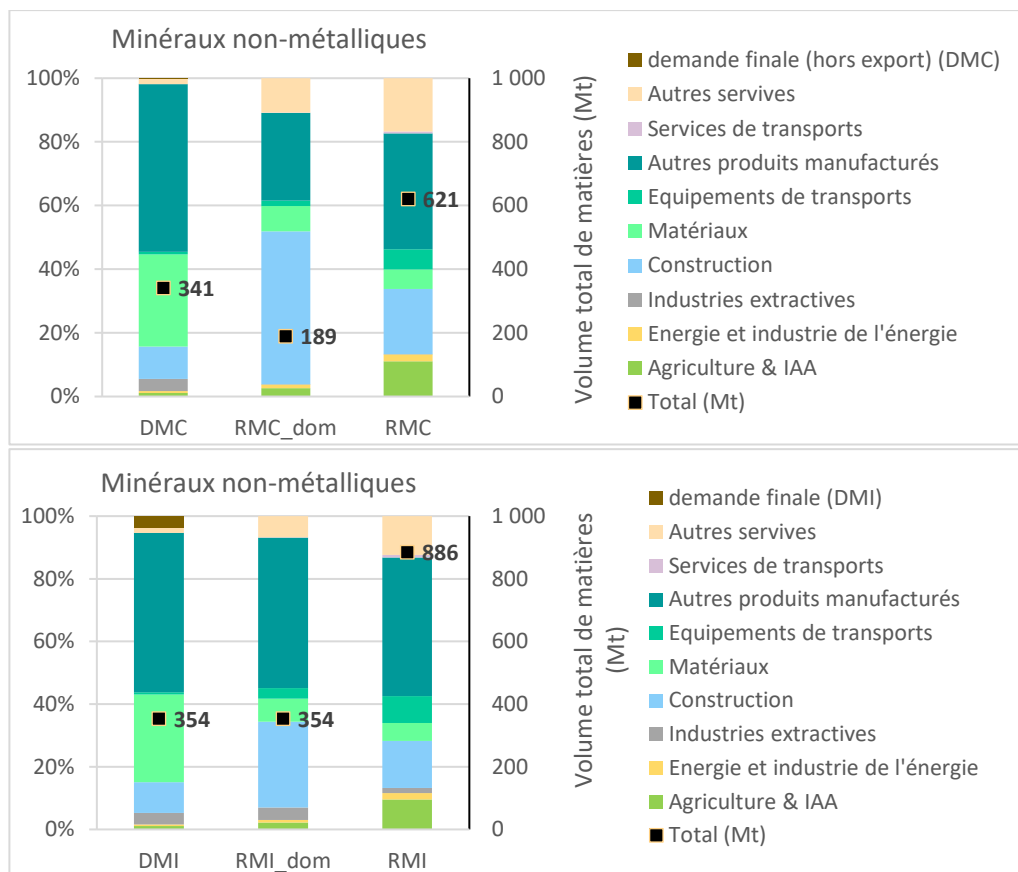
dans l'économie et du fait que leurs consommations intermédiaires « matérielles » se portent principalement sur des produits manufacturés (équipements), dont une large part est importée.

On observe aussi que, par leur consommation d'engrais et de produits chimiques, le secteur agricole et les industries agro-alimentaires représentent un poste de consommation de MNM non négligeable en RMC alors que leur contribution à la DMC était négligeable. Pour ces deux catégories de MP, on constate une forte baisse de la RMC_dom par rapport à la DMC, en raison des exportations françaises de produits transformés. Ce fort contenu en MP des exportations et importations françaises est à éclaircir, notamment concernant les MNM.

A noter aussi qu'en réattribuant les besoins en matières premières uniquement par produits de demande finale, l'impact des investissements n'est pas rattaché aux secteurs investisseurs. Dès lors, les services n'ont qu'un impact limité dans l'empreinte matières alors que leur poids économique est majeur. Autre exemple frappant, la contribution des services de transport à l'empreinte matières est minime, alors que leurs investissements en véhicules et infrastructures est conséquent. Le développement d'indicateurs dans lesquels l'impact des investissements est réattribué aux produits de demande finale auxquels ils contribuent effectivement permettrait de construire une image plus réaliste des responsabilités de chaque produit de demande finale dans l'empreinte matières.

La Figure 11 permet de mener la même analyse pour la RMI et la DMI.





Note : Les indicateurs RMC_dom et RMI_dom sont construits en retranchant aux indicateurs RMC et RMI leur part importée (données par l'indicateur Dimp défini section 2.3). Le « secteur » « demande finale » n'est pertinent que pour la lecture des indicateurs DMI et DMC.

Figure 11: Décomposition des indicateurs DMC et DMI (par secteurs consommateurs) et RMC, RMI (par biens de demande finale) pour la France en 2015 (résultats MatMat), pour les minéraux non métalliques et les minerais métalliques.

3.2.2. Empreinte carbone en 2015

Les résultats sont présentés ici pour les seules émissions de CO₂, CH₄, et N₂O issues de la combustion de produits fossiles. Le volume d'émissions territoriales (300 Mt, Figure 12) est similaire à celui fourni par le MTES pour un périmètre équivalent, c'est-à-dire limité à la stricte utilisation de l'énergie (hors procédés industriels, déchets, agriculture hors utilisation de l'énergie, et hors UTCATF : 322 Mt en 2016, cf. (Baude, et al. 2019) p.36). Les émissions liées aux procédés industriels, à l'agriculture (hors usage de l'énergie) et aux déchets ne sont pas présentées dans ce rapport, mais elles représentaient 30% de l'empreinte carbone en 2015²⁷.

Environ 30 % des émissions territoriales de la combustion sont attribuées directement à l'activité des ménages (carburant des véhicules particuliers, consommations énergétiques fossiles pour les logements, etc.). La somme des émissions territoriales de GES des services (services de transport et autres activités de services) et des ménages dans MatMat (soit 198 Mt) est comparable au volume d'émissions de GES associées aux catégories « transport » et « résidentiel/tertiaire » disponibles dans la synthèse du MTES (211 MtCO₂eq).

Concernant l'empreinte carbone, le MTES l'évalue à 712 MtCO₂eq en 2016, due à 55% aux flux cachés dans les importations (Datalab : Baude et al., 2019). L'empreinte carbone est calculée dans ce rapport sur un périmètre plus restreint (GES énergétique uniquement) et s'établit à 520 MtCO₂eq en 2015 (dont 57 % émises à l'étranger lors de la production des importations). Près de la moitié est attribuée à la consommation finale de produits énergétiques et de services. La part des émissions attribuées à la

²⁷ Voir (Teixeira et al. 2023) pour une analyse sur l'ensemble des GES.

demande de construction et de biens manufacturés augmente sensiblement entre émissions territoriales et empreinte carbone : d'une part à cause de leur fort taux d'importation (pour les biens manufacturés) et d'autre part en raison de la réallocation des émissions nécessaires à la production de matériaux comme le ciment et l'acier aux secteurs consommateurs (pour la construction).

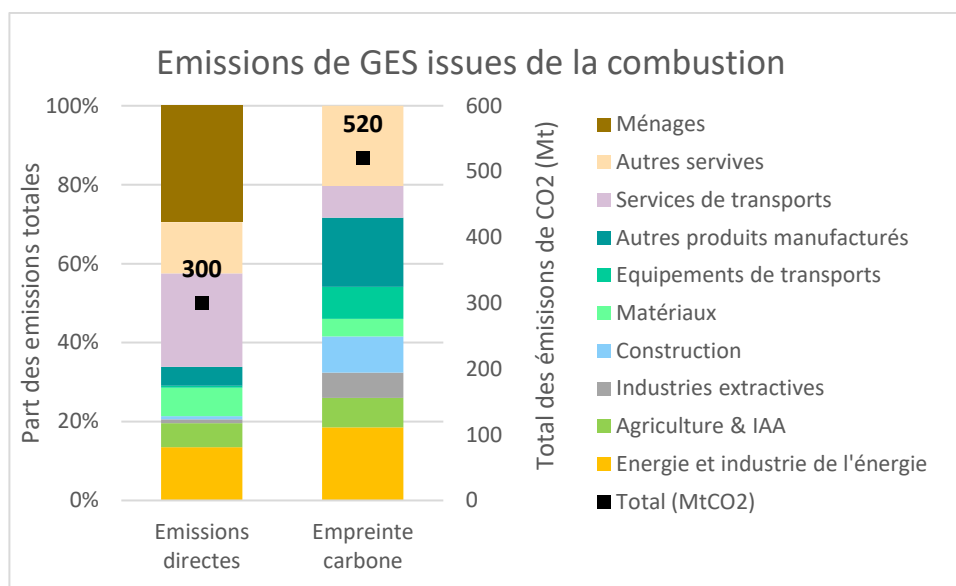


Figure 12: Décompositions des émissions directes (territoriales) par secteur et de l'empreinte carbone par biens de demande finale, pour la France en 2015 (résultats MatMat-v2.1). Périmètre des émissions de GES prises en compte : CO₂, CH₄, N₂O issus d'une combustion.

3.3. Limites méthodologiques et recommandations pour la calibration

3.3.1. Diagnostic des difficultés de calibration sur la matière première

Des différences entre les valeurs des indicateurs d'empreinte matières produites par MatMat et par Eurostat s'observent pour notamment trois raisons : une différence de périmètre sur les matières premières considérées, des écarts entre les sources de données mobilisées et l'hypothèse considérée dans MatMat de l'absence de toute réexportation directe de matières importées. Les comparaisons sont réalisées avec trois publications EUROSTAT : EW-MFA qui décrit les flux physiques de matières à partir d'une approche MFA (Material flow analysis), ComExt qui regroupe les données statistiques détaillées sur les échanges internationaux de biens, et les indicateurs matières agrégés publiés en ligne (accessible sur le Data Browser²⁸).

En premier lieu, on constate que les indicateurs DMC et DMI calculés directement à partir des données de la base EW-MFA présentent des valeurs inférieures à celles publiées en ligne par Eurostat par catégories agrégées de matières (cf. Tableau 4). A noter aussi que dans les données EW-MFA, les « produits à base de » matières premières et les animaux importés ou exportés sont comptabilisés comme des matières premières, à la différence de MatMat.

La DMI calculée par MatMat pour 2015 (total hors combustibles fossiles) présente un déficit de 44 Mt par rapport à la DMI recalculée à partir des données EW-MFA sur un périmètre équivalent à celui de MatMat, contre seulement 6 Mt de moins dans MatMat sur la DMC, car les pertes de flux sur les imports et exports se compensent partiellement.

Par ailleurs, il existe un écart conséquent entre les données ComExt servant de base à l'hybridation dans MatMat et EW-MFA sur les volumes importés et exportés (cf. Tableau 4, colonne 'ComExt' pour la DMI : 47 Mt d'imports de moins dans ComExt par rapport à EW-MFA hors « produits à base de ») mais ces différences se compensent largement dans la DMC. Pour les combustibles fossiles, la calibration en flux

²⁸ https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_mfa/default/table?lang=fr

physiques dans MatMat est basée sur les données de l'AIE et présente un écart important avec Eurostat sur les deux indicateurs (81 Mt de déficit sur la DMI, et 43 Mt sur la DMC).

	Total (Mt)		Différences incrémentales (Mt) entre données Eurostat et ComExt		
	MatMat v2.2	Eurostat	EWMFA	EWMFA hors "produits à base de"	ComExt
DMI (2015)					
Biomasse	275	344	-23	-35	-11
Combustibles fossiles	87	168	-8	-15	
Minerais métalliques	18	55	-1	-15	-21
Minéraux non-métal.	354	392	-17	-9	-13
Total (hors fossil fuels)	647	791	750	691	644
DMC (2015)					
Biomasse	227	231	0	-3	-1
Combustibles fossiles	87	130	-14	0	
Minerais métalliques	18	19	1	-4	2
Minéraux non-métal.	341	352	0	-3	-8
Total (hors fossil fuels)	586	602	603	593	586

Tableau 4 : Comparaison des indicateurs de consommation directe de matière (DMC, DMI) calculés à partir de différentes sources de données.

Focus sur les matières biomasse

La comptabilité des flux de biomasse en unité physique dans MatMat souffre de plusieurs limites. D'une part, les cheptels ne sont pas comptabilisés en flux physiques dans MatMat ni considérés comme matières premières agricoles, contrairement à Eurostat (pour les imports exports uniquement). Ensuite, les cultures fourragères et autres déchets agricoles n'ont pas d'équivalences appropriées avec les secteurs disponibles dans Exiobase. Ces deux derniers produits sont en effet assimilés par Exiobase à des impacts de la production et non comme des productions agricoles en elles-mêmes, et figurent de fait uniquement dans les extensions environnementales de la base. Dans la version actuelle de MatMat, les résidus de culture et biomasse pâturée (95 Mt de production dans EW-MFA) ou bien les cultures fourragères et autres déchets agricoles (1 Mt de tonnes d'import/export dans ComExt) sont utilisés pour hybrider les flux des « cultures primaires » ou des « crops n.e.c. » (« autres cultures »). Ce qui n'est pas pleinement satisfaisant car les impacts sur ces produits ne se superposent pas aux consommations de « crops n.e.c. » (cf. variable DE_used dans les extensions d'Exiobase). Ensuite, la biomasse à usage énergétique n'est pas distinguée spécifiquement dans Exiobase. Cela pose des difficultés notamment pour traduire les évolutions des flux de matière destinés à la méthanisation ou les consommations de bois à usage énergétique.

Des modifications de la méthode d'hybridation seraient donc à prévoir pour améliorer la représentation des flux de biomasse dans MatMat. Une solution pourrait consister à comptabiliser les cheptels en unité physique (kt), à la fois pour une scénarisation plus réaliste et pour se rapprocher du périmètre des matières premières d'Eurostat (concernant les imports/exports d'animaux). Mais seules les données d'import/export sont disponibles dans les bases ComExt et EW-MFA d'Eurostat, et les données manquantes de productions domestiques sont également absentes des extensions d'Exiobase. Des données du projet SISA (ADEME) pourraient éventuellement venir combler ce manque. Les cultures fourragères et la biomasse pâturée étant d'une certaine manière des co-productions de l'élevage, ces flux pourraient être comptabilisés en unité physique avec les flux de cheptels (même si dans les matrices Supply-Use d'Exiobase, il n'y a pas trace d'une « véritable » production de matières agricoles autres que des animaux par les secteurs de l'élevage). De même, la paille étant une co-production de la culture de céréales, elle pourrait être comptabilisée en flux physique avec les flux de céréales, moyennant une modification de la correspondance avec le découpage sectoriel disponible dans la base IO. Dans ce cas

cependant, il faudrait trouver une clef de répartition adaptée pour désagréger et répartir ces flux sur plusieurs secteurs d'élevage, à l'image du travail réalisé sur les céréales (cf. section 3.1.2.3). Une attention toute particulière devrait être portée aux périmètres des différentes données utilisées dans la procédure d'hybridation (extensions d'Exiobase, ComExt, SISA), actuellement totalement substituables mais qui peuvent devenir complémentaires et venir s'ajouter les unes aux autres au cours de la procédure. Après discussion avec des équipes partenaires du projet, il n'apparaît cependant pas réaliste d'utiliser les flux d'animaux comme clefs de répartition pour hybrider les flux de biomasse associés aux élevages. Les flux de biomasse associées à l'élevage devraient être plutôt attribués aux secteurs qui produisent réellement ces matières. La désagrégation des secteurs agricoles dans MatMat pourrait permettre de lever ces difficultés. Des échanges sont en cours pour trouver des données supplémentaires dans ce but.

3.3.2. Désagréger les partenaires commerciaux de la France

Un module annexe de commerce extérieur, MatMat-Trade, est en cours de développement pour permettre de mieux considérer les pressions exercées par les biens et services importés. Ce module entrée-sortie multirégional pourra alimenter le calcul d'empreinte dans MatMat avec des trajectoires contrastées des contenus matière et carbone moyens des importations françaises (variable CoefRoW). Il s'appuie sur les sorties du modèle macro-économique IAM Imacsim-R Monde du CIRED, utilisées pour déformer le MRIO d'Exiobase en prospective selon des trajectoires de décarbonation dans les différentes régions du monde disponibles (respect des NDC²⁹, respect des engagements +2degrés, etc.). Ensuite, le module permet d'explorer différents scénarios de commerce extérieur français, dans lesquels les pays d'origine des importations françaises peuvent évoluer en fonction de critères exogènes (notamment le contenu carbone de la production de chaque pays). Les sorties de MatMat-Trade sont réagrégées sous la forme de CoefRoW propres au format SRIO de MatMat pour embarquer en prospective ces deux effets dans MatMat, via une évolution des contenus carbone et matières moyens des importations françaises.

3.3.3. Améliorer la matrice d'investissement

On remarque dans les données de KLEMS une légère variabilité temporelle des structures d'investissement, notamment dans les actifs de la construction et les biens d'équipements, du fait de leur poids dans l'investissement total de chaque secteur et de la nature des investissements (les grands projets de construction induisent certainement des fluctuations d'une année sur l'autre). On relève également une tendance générale de faible augmentation des investissements en « logiciels et bases de données » en parallèle d'une réduction des dépenses de R&D. La pertinence de moyenniser les structures d'investissement sur quelques années consécutives ou d'extrapoler les tendances observées sur les données passées avant de procéder à la construction de la matrice d'investissement de MatMat reste une question en suspens.

De même, avec la méthode actuelle de construction de la matrice d'investissement (cf. 3.1.3), les secteurs du transport, leviers d'action majeurs des scénarios de transition bas carbone, possèdent in fine tous la même structure d'investissement (issue de l'unique secteur correspondant « Transportation et Storage » dans la base KLEMS). Il en est de même pour les secteurs de l'énergie, regroupés dans KLEMS au sein d'un seul secteur « production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ». Le total d'investissement résultant pour chacun des secteurs de l'agrégat peut également être biaisé en raison du proxy utilisé pour séparer ces structures (en l'occurrence la consommation de capital fixe des secteurs), notamment sur l'énergie (la CCF étant le seul paramètre disponible directement dans Exiobase). Ainsi, après ouverture de la matrice d'investissement, on obtient dans MatMat comme montants d'investissements pour ces secteurs :

- Production et distribution d'énergie : 15 Mds EUR d'investissement en 2015 dans MatMat. L'ouverture des structures d'investissement à l'aide de la CCF au niveau du total d'investissement par branches de production d'électricité (nucléaire / hydro / éolien / solaire photovoltaïque) conduit à des écarts sensibles avec les données d'observation disponibles pour 2015 (fournies par exemple par le Panorama I4CE). Les investissements dans le solaire photovoltaïque sont quasiment inexistantes dans MatMat en 2015, ceux dans l'éolien sont deux à trois trop faibles, et ceux dans l'hydroélectricité anormalement élevés (environ 2 Mds EUR au lieu de 700 M EUR selon l'I4CE). Pour améliorer l'ouverture de la matrice d'investissement, le proxy de désagrégation pourra être modifié en utilisant des données plus

²⁹ Nationally Determined Contributions (UNFCCC) : dans l'Accord de Paris sur le climat, contributions décidées au niveau national à l'effort de réduction des émissions de GES mondiales.

représentatives de l'investissement total de chaque filière de production d'électricité (par exemple le chiffrage des dépenses d'investissement par technologies de production de l'I4CE en 2015).

- Services de transports : 26 Mds EUR d'investissement en 2015 dans MatMat, dont transports routiers (5 Mds EUR), transport ferroviaires (7 Mds EUR), transports aériens (2 Mds EUR), transports fluviaux et maritimes (0,6 Mds EUR), services auxiliaires de transports³⁰ (11 Mds EUR). En comparaison des statistiques nationales, les services auxiliaires de transports réalisent deux fois trop d'investissement tandis que ceux des transports routiers et ferroviaires ne sont pas assez élevés. L'ouverture de la matrice d'investissement sur les services de transport pourrait être affinée grâce aux données d'investissements corporels bruts hors apport disponibles dans les fiches sectorielles publiées par l'INSEE, assorties si besoin d'informations complémentaires sur le transport ferroviaire de voyageurs présentes dans les Comptes du transports (sous couvert de disponibilité).

L'utilisation d'un proxy plus proche de la FBCF pourrait permettre de corriger ces déformations. Un temps sera prévu dans la prochaine Convention de recherche pour estimer s'il est pertinent de distinguer des structures d'investissement propres à chaque secteur énergétique au vu des ordres de grandeurs en jeu sur les besoins en matière et émissions de GES. Si besoin, des méthodes et des données existent dans la littérature pour avancer dans cette voie (Wiebe, et al. 2018).

3.3.4. Améliorer la désagrégation de la construction

En l'état, le découpage en trois sous-secteurs de la construction dans la matrice des coefficients techniques n'est pas satisfaisant, car l'impact unitaire sur les consommations de matières du secteur des travaux spécifiques (TS) est plus élevé que celui de la construction de bâtiments (CB), notamment sur le ciment. Le périmètre des TS chevauche celui des CB et du Génie Civil (GC), et n'est donc pas idéal pour notre étude (cf. Tableau 3).

Concernant la désagrégation de la construction dans la matrice d'investissement, d'autres limites sont à relever :

- Formule simpliste pour estimer la FBCF à partir du capital fixe net (CFN). La comptabilité nationale utilise une méthode plus précise pour déterminer le CFN à partir des données de FBCF : la méthode de l'inventaire perpétuel³¹. Mais il semble très lourd d'inverser cette méthode pour déduire la FBCF à partir du CFN.
- Du fait du manque de données, nous sommes contraints d'utiliser dans cette formule des taux de dépréciation et des indices de prix identiques pour le génie civil et les autres bâtiments non résidentiels (qui de plus ont été supposés ou déduits des données par les concepteurs de la base KLEMS, et ne proviennent pas d'une source extérieure).
- Les trois actifs de la construction comprennent déjà une partie de travaux spécifiques, ce qui déforme a priori la répartition de l'investissement avec ces clefs de ventilation entre les 34 branches de KLEMS. Par ailleurs, nous avons fait un choix méthodologique simple mais arbitraire pour trouver une clef de répartition de l'investissement en TS entre les 34 branches (cf. 3.1.4.2). La recherche d'une meilleure clef de répartition pour les TS paraît compromise d'emblée par l'écart inexpliqué des investissements en logements entre KLEMS et les Comptes du Logement.

Par ailleurs, le TES symétrique de l'INSEE servant de support à la désagrégation des branches de la construction est exprimé en prix de base et non en prix d'acquisition comme Exiobase. Le prix de base ne tient pas compte des impôts et subventions sur les produits, ni des frais de transports nécessaires pour prendre possession des produits. Mais l'hypothèse que les trois branches de la construction se fournissent au même prix dans un bien donné paraît raisonnable, ce qui implique que la désagrégation du vecteur des consommations intermédiaires est peu impactée par l'utilisation de données en prix de base au lieu de prix d'acquisition. Cette subtilité pourrait cependant poser des difficultés pour l'application de la méthode de désagrégation à d'autres secteurs pour lesquels les différences induites par le prix de base sont plus marquées (industries chimiques et pharmaceutiques ; produits informatiques, électroniques et optiques ; machines et équipements ; matériels de transports).

³⁰ "Support & auxiliary transport services" = agences de voyage et exploitation des infrastructures de transport

³¹ https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2571441/imet120_h_Le_compte_de_capital_fixe.pdf.

Voir aussi le Manuel de l'OCDE "La Mesure du capital":

<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264067752-fr.pdf?expires=1632853531&id=id&accname=guest&checksum=833675D628BAAEF91C7D5E707441FA0A3>

In fine, il nous apparaît plus approprié de redéfinir le découpage sectoriel de la construction en rassemblant dans un seul secteur CB et TS, et d'isoler des structures de coûts propres à la rénovation énergétique et non-énergétique. Des données d'ACV/ICV pourraient venir compléter les expertises sectorielles existantes sur la construction (CSTB, ADEME) pour progresser dans cette voie (méthodes hybrides IO + ICV/ACV revues par (Crawford, et al. 2018), et les applications de (Vivanco 2020) et (Gibon, et al. 2015) par exemple).

4. Evaluation de scénarios de transition bas-carbone

4.1. Revue de littérature

Comme expliqué dans le chapitre 2, le modèle MatMat fonctionne sur le principe de l'analyse entrée-sortie (IO pour input-output). Basée sur les tableaux entrée-sortie établis par la comptabilité nationale, l'analyse IO permet de décortiquer l'ensemble des chaînes de valeur et de transformation de la matière dans une économie. Elle permet notamment de calculer la production totale nécessaire de chaque secteur économique pour satisfaire un niveau donné de la demande finale. Depuis l'article précurseur de (Leontief 1970), la littérature regorge d'exemples d'applications de cette méthode pour évaluer les pressions environnementales exercées par les processus économiques.

L'ICV (inventaire de cycle de vie) est également une méthode précise et standardisée pour évaluer les besoins en matière d'un bien et ses impacts environnementaux. Elle consiste à cartographier l'ensemble des flux de matière mobilisés pour la production de ce bien particulier et offre un grand niveau de détail sur sa composition mais son résultat peut pâtir d'une délimitation erronée des chaînes de valeurs associées au système étudié (Lutter, Giljum et Bruckner 2016).

Si l'analyse IO est moins détaillée que l'ICV, elle évite d'avoir à fixer arbitrairement des limites aux chaînes de transformation mobilisées pour produire le bien considéré. Elle décrit donc l'économie à un niveau de désagrégation intermédiaire.

L'objet de la présente revue de littérature est de cartographier l'usage du formalisme entrée-sortie pour construire un scénario bas carbone en vue de déterminer l'impact des évolutions de la demande (d'énergie, d'investissements, de biens et services) sur les besoins en matériaux, en matières premières et sur les émissions de GES.

Un scénario de transition bas carbone peut être vu comme un ensemble cohérent d'hypothèses sur :

1. Une demande d'énergie par secteurs et une offre énergétique cohérente ;
2. Une demande d'investissements associés aux évolutions du système énergétique ;
3. Une consommation finale en équipements et services compatible avec l'offre énergétique.

La matière n'est généralement pas un point focal des scénarios bas-carbone mais elle impose des contraintes tout au long des chaînes de transformation. En effet, l'activité des secteurs manufacturiers est contrainte à la fois par l'atteinte de cibles d'émissions de GES (qui déterminent la quantité de matériaux qu'ils peuvent fabriquer ou transformer) et par le niveau de la demande finale de biens et services. La matière est donc un levier essentiel des scénarios bas-carbone, dans la mesure où la réduction des besoins en matériaux permet de limiter les émissions liées à la production des biens et des technologies bas-carbone déployées (Hatfield-Dodds, et al. 2017).

Les enjeux de description de la matière sont multiples :

- Garantir une représentation plus réaliste des flux et s'assurer des équilibres de masses pour une meilleure précision de l'empreinte (travail de calibration).
- Mieux évaluer les besoins matériels futurs : construire des paramètres de projection « physiques » de la demande.
- Tenir compte des rétroactions économie-matières-carbone :
 - o La transition bas carbone requiert des investissements pour la décarbonation des activités, qui peuvent générer un besoin accru en matières/matériaux et ainsi avoir un impact sur l'empreinte matières et les émissions de GES.
 - o L'efficacité matières dans les processus de production (c'est-à-dire la réduction des besoins en matériaux pour le même service/bien fourni) peu réduire les émissions de GES liées à l'usage des biens (par exemple, les voitures plus légères sont plus économes en carburants).
 - o Le niveau de la consommation finale de biens matériels et de services et les évolutions de l'efficacité matières conditionnent les quantités de matières/matériaux consommées par l'économie et donc influent sur le niveau des émissions générées par leur extraction / transformation (consommation d'énergie ou émissions de procédés).

Sous certaines hypothèses (Perrier et Quirion 2016), l'analyse IO permet de déduire les quantités de biens à produire dans l'économie pour satisfaire un choc de demande finale. Il faut pour cela être capable de traduire correctement les évolutions des composantes de la demande finale et les changements technologiques des processus de production associés aux évolutions des systèmes techniques.

Dans la littérature, trois approches sont mises en œuvre pour estimer l'impact sur les besoins matières et l'empreinte carbone de scénarios de transition bas carbone (Wiebe, et al. 2018) :

- Modèle IO classique dit 'static demand-driven'
- Modèle IO couplé à un modèle macroéconomique :
 - ⇒ Modèle d'équilibre général calculable (EGC) (ex : Imaclim-R)
 - ⇒ Modèle macro-économétrique (ex : Nemesis et ThreeME)

Le principe des méthodes dites 'static demand-driven' IO est de modifier de manière exogène (sur la base de dires d'experts) les paramètres du système productif, offrant ainsi une flexibilité qui permet de décrire au plus près un scénario technico-économique pour une analyse prospective. Wiebe et al. (2018) défendent que, dans un modèle IO, la mise en œuvre de changements technologiques exogènes est supérieure aux méthodes qui modélisent les comportements afin de rendre les changements technologiques endogènes. Cette méthode de couplage « directe » requiert cependant une grande rigueur du modélisateur dans la traduction du scénario en paramètres de projection.

Les deux dernières méthodes ont été développées pour étudier l'effet de chocs économiques (taxe carbone, etc.) et bénéficier de la cohérence économique globale du modèle macroéconomique.

Le projet MatMat cherche à proposer une approche mixte dans laquelle l'analyse IO est alimentée par des résultats de modélisation macroéconomique complétés par des expertises sectorielles exogènes, afin de profiter des bénéfices des deux méthodes (A. Teixeira, et al. 2020)³². Le niveau de désagrégation sectorielle des bases de données IO est généralement bien supérieur à celui des modèles macroéconomiques utilisés pour évaluer l'impact des scénarios de transition bas carbone (tel que ThreeME ou Imaclim). Appliquée aux résultats de ces modèles macroéconomiques, l'analyse IO étoffe donc la mesure de l'impact des changements économiques et technologiques modélisés sur les besoins en matière.

Les sections suivantes analysent comment sont traitées les projections de demande finale, de consommation d'énergie et des investissements dans les modèles énergie-économie-environnement basés sur le formalisme entrée-sortie.

4.1.1. Scénarisation de la demande des ménages et des consommations intermédiaires

Résumé de la section

Pour projeter les évolutions de la demande dans un modèle IO, il existe deux grandes catégories de méthodes dans la littérature :

- Méthode exogène : intégration de chocs exogènes dans le cadre IO à partir d'expertises sectorielles, de résultats de projections économétriques (Wiebe, et al. 2018) ou de sorties de modélisation macroéconomique (Beylot, et al. 2018), sans rétroactions des sorties du modèle IO sur les paramètres de projection.
- Méthode endogène : évolution des paramètres du modèle IO à partir d'équations économétriques calibrées rétrospectivement (Cambridge Econometrics, GINFORS) ou alors en chainant les modèles (avec ou sans rebouclage entre ces modèles). A noter que le chaînage entre modèle reste une méthode peu ré-exploitable car les auteurs développent généralement leur propre architecture de modélisation.

³² Plus précisément, cf. section 4.7.1 du rapport MatMat1.

Plusieurs méthodes sont développées dans la littérature pour évaluer le niveau de la demande finale. **La première catégorie consiste en une déformation exogène d'un système entrée-sortie**, soit sur la base d'expertises, soit grâce à des sorties de modélisation macroéconomiques.

Wiebe et al. (2018) étudient les impacts différentiels entre les scénarios 2°C ETP³³ et 6°C ETP de l'AIE³⁴ sur les besoins en produits énergétiques fossiles et en minerais métalliques. Pour ce faire, ils utilisent des estimations économétriques sur les années antérieures référencées dans Exiobase (méthode des moindres carrés) pour extrapoler les tendances passées d'évolution de la consommation des ménages et du gouvernement et de la Formation Brute de Capital Fixe (FBCF) en fonction du PIB. La structure de consommation du gouvernement et de la FBCF sont ensuite modifiées de manière exogène sur la base des hypothèses considérées dans ces scénarios. La structure de la consommation des ménages est quant à elle modifiée via une estimation statistique basée sur le principe d'entropie maximum de Golan (2001)³⁵ pour déterminer l'évolution des parts de revenu consacrées à chaque type de bien.

De façon similaire, (de Koning, Huppel, et al. 2016) et (de Koning, Kleijn, et al. 2018) modélisent une trajectoire de décarbonation ambitieuse de l'économie en pilotant de manière exogène des changements qualitatifs sur les consommations des ménages (vers par exemple plus de services, moins de biens matériels et moins de déplacements motorisés) et sur les systèmes technologiques (électrification des véhicules, développement des énergies renouvelables existantes, déploiement des technologies CCS³⁶ dans les centrales thermiques fossiles).

Alternativement, certaines études projettent des résultats de modélisations macroéconomiques pour renseigner les évolutions de la demande finale dans le modèle IO. Par exemple, pour estimer la production de déchets des ménages français à l'horizon 2020 associée à quatre scénarios de consommation, (Beylot, et al. 2018) renseignent dans un modèle d'analyse IO les évolutions de la demande des ménages à partir des résultats de simulations du modèle macro-économétrique NEMESIS. La scénarisation s'applique à trois scénarios de « volume » (entre lesquels seuls les paramètres du taux de croissance annuelle du PIB et de la consommation des ménages diffèrent) et un scénario d'évolution « qualitative » dans lequel les ménages orientent davantage leurs consommations vers les services culturels et de divertissement, de communication, d'éducation et de santé et réduisent leurs dépenses alimentaires, vestimentaires et de transport.

Une deuxième catégorie de méthode repose sur le développement d'une architecture autonome de modélisation en équilibre général, dans laquelle les évolutions économiques sont endogènes. Ces modèles intègrent parfois explicitement des tendances d'évolution sur l'usage de la matière.

Dans le modèle multirégional E3ME développé par (Cambridge Econometrics 2014), la demande de matières est liée par une relation économétrique avec l'activité des secteurs, le prix de production, des indicateurs de progrès technique, etc. Les relations économétriques sont calibrées rétrospectivement pour faire évoluer les paramètres du modèle IO en projection (consommation, investissement, commerce international, demande de matières et d'énergie). E3ME présente les avantages d'un modèle dynamique : les contenus matières de la production peuvent notamment varier en réponse aux prix et aux autres facteurs de production, plutôt que de suivre une structure de production de Léontief figée, caractéristique d'un modèle IO.

Dans le même esprit, le modèle MRIO dynamique GINFORS, développé par GWS³⁷ ((Lutz, Meyer et Wolter 2005) et (Meyer, et al. 2013)), repose sur une architecture de modules économiques entrée-sorties nationaux couplés à un module de commerce bilatéral, et reliés à des matrices de comptabilité physique pour les flux d'énergie. Le module de commerce permet par exemple de déterminer les exportations et importations de chaque nation en fonction des prix relatifs des produits échangés. Chacun des modules économiques nationaux modélisent les variables économiques de façon endogène : les coefficients techniques dépendent des prix des biens, les consommations énergétiques (en unité physique) sont déterminées par un module énergie-émissions, avec un traitement spécifique des différentes consommations d'énergie des ménages (transports / chauffage & climatisation / autres usages domestiques). Un modèle d'usage des ressources calcule in fine le volume de ressources extraites (12

³³ Energy Technology Perspectives

³⁴ Agence internationale de l'énergie

³⁵ Golan A, Perloff JM, Shen EZ (2001) Estimating a demand system with non-negativity constraints: Mexican Meat demand. *Rev Econ Stat* 83:541-550. <https://doi.org/10.1162/00346530152480180>

³⁶ *Carbon capture and storage* : capture et stockage du carbone.

³⁷ Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Osnabrück, Deutschland.

matières premières, eau, 4 usages des sols) selon la logique entrée-sortie standard : des coefficients unitaires d'impact environnemental (« stressors » dans la littérature IO) viennent multiplier les drivers économiques appropriés (niveaux de production sectorielle, revenu disponible des ménages, etc.). La couverture géographique mondiale du modèle GINFORS permet aussi bien d'analyser l'usage des ressources dans une logique de production comme d'empreinte (grâce à la connaissance des impacts environnementaux indirects cachés dans les importations).

Plusieurs modèles sont parfois imbriqués pour déterminer le choc de demande finale et les impacts environnementaux. Selon cette approche mixte, (Schandl, Hatfield-Dodds, et al. 2016) déterminent l'impact sur les besoins en matière de trois scénarios de taxe carbone à l'horizon 2050 en chainant un modèle technologique sur la matière (MEFISTO), un modèle d'EGC climat-économie (GIAM) et un modèle multirégional d'analyse IO chargé de déterminer les empreintes environnementales (notamment matières premières et GES) des scénarios. Le modèle MEFISTO évalue la vitesse des améliorations d'efficacité matière des processus et génère un compte satellite de flux de matière qui est utilisé en entrée du modèle IO et du modèle GIAM. La modélisation GIAM se base sur les hypothèses du niveau de taxe carbone de chaque scénario et génère un ensemble de tableaux entrée-sortie et des comptes satellites sur l'énergie et les émissions de GES qui servent ensuite de base à l'analyse IO. Les auteurs envisagent à l'avenir de boucler les modèles MEFISTO et GIAM pour prendre en compte les interdépendances et rétroactions entre effets macroéconomiques et améliorations des efficacités matières.

(Hatfield-Dodds, et al. 2017) progressent également dans cette direction en intégrant au modèle GTEM-C (un modèle macroéconomique d'équilibre général calculable associé à un modèle bottom-up de la production d'énergie) une structure entrée-sortie permettant de suivre la dynamique de dix flux de matériaux³⁸. Ils analysent ainsi l'effet sur les émissions de GES et le niveau d'extraction de matières d'un scénario de transition énergétique auquel est associé un paquet de mesures portant sur l'usage de la matière : efficacité matière standard (moins de matière utilisée pour un volume donné de production), taxe sur le volume de matières extraites, sobriété de la demande de matières. Les indices de production ainsi modélisés sont appliqués aux volumes de matières fournis par l'IRP à l'année de base pour obtenir des projections des consommations de matières à l'horizon 2050 (uniquement dans une approche « production », et non une logique d'empreinte englobant l'ensemble des chaînes de valeur amont).

Dans un travail postérieur, (Schandl, Lu, et al. 2020) reprennent cette méthode et traduisent les scénarios SSP³⁹ du GIEC en paramètres d'entrée du modèle macroéconomique GTEM-C pour évaluer leurs besoins en matières premières. Les auteurs complètent leurs projections en traduisant également un jeu d'hypothèses qualitatives d'efficacité matière (en kg/EUR) sur chaque grande catégorie de matières premières (minéraux non métalliques, biomasse et énergies fossiles, à l'exception des minerais métalliques). Ces travaux s'écartent de la méthode classique de déformation d'un système IO sur la base de modélisation macroéconomique en proposant une méthode hybride pour intégrer au modèle les interactions matière-économie.

Plus spécifiquement concernant les consommations énergétiques, les modèles CGE et les IAM⁴⁰ intègrent de façon explicite une modélisation économique des secteurs énergétiques, voire parfois un respect des équilibres emplois-ressources sur les quantités physiques d'énergies. Des modèles énergétiques bottom-up (comme Medpro de Enerdata) sont parfois mobilisés de façon « bouclée » avec les modèles CGE. Cela permet de ainsi tenir compte dans la modélisation de comportements économiques endogènes suites à la variation du prix des énergies, ou encore d'assurer la cohérence du bilan énergétique du scénario avec l'ensemble des hypothèses sectorielles considérées. En comparaison, les méthodes 'static demand driven IO' ne font souvent appel qu'à des bilans énergétiques « cibles » détaillés (publiés par l'AIE par exemple) pour déformer les coefficients techniques énergétiques du système IO en projection. Par exemple, (Wiebe, et al.) utilisent l'évolution « macro » des consommations d'énergies tirées des bilans énergétiques prospectifs de l'AIE pour déformer les coefficients techniques. Cette méthode exogène peut manquer de précision car souvent, le détail sectoriel des consommations de chaque produit énergétique disponible dans ces données prospectives n'est pas suffisamment fin au regard du détail sectoriel des bases IO utilisées.

³⁸ Cette démarche est similaire à celle employée par l'OCDE (OCDE 2019).

³⁹ Shared Socio-economic Pathways, publiés par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.

⁴⁰ *Computable general equilibrium, Integrated Assessment Model*

4.1.2. Scénarisation des investissements

La transition énergétique doit nécessairement s'accompagner d'une consommation de technologies spécifiques pour que le scénario ait une cohérence d'ensemble (Wiebe, et al. 2018). Autrement dit, il ne peut y avoir de transition énergétique sans investissement dans des technologies spécifiques (mobilité, bâtiment, industrie, etc.). La projection de la demande d'investissements « verts » ou d'investissements permettant des gains d'efficacité énergétique doit donc être réalisé simultanément avec la décarbonation de l'activité économique dans le modèle.

Résumé de la section

Deux méthodes principales sont développées dans la littérature pour tenir compte des besoins matière associés aux investissements.

La première consiste à traiter l'investissement comme une demande finale, mais à projeter précisément sa structure en apportant de façon exogène des informations sur l'évolution des investissements de chaque secteur de l'économie (a minima pour ceux jouant un rôle de premier plan dans la transition énergétique : énergie, transports, bâtiments).

La deuxième méthode consiste à considérer les investissements comme des intrants des processus de production (consommations de capital), et de fait à déterminer la demande d'investissement de façon endogène. Elle est alors soit traitée comme variable par un modèle macroéconomique, soit déduite des évolutions du niveau de production de chaque secteur dans le cas du formalisme entrée-sortie (on considère alors qu'une unité de production nécessite toujours la même quantité de consommation de capital).

4.1.2.1. Déformation de la structure de la demande d'investissement par choc exogène

Une première méthode de prise en compte de la FBCF consiste à isoler les investissements correspondants aux technologies déployées pour la transition bas carbone pour modifier la structure du vecteur d'investissement total de l'économie en projection, et donc mieux renseigner la demande finale d'investissement dans l'analyse IO. Par exemple, (Wiebe, et al. 2018) associent à chaque mode de production d'électricité une structure d'inputs propre à la fabrication de la technologie de production d'électricité correspondante, qui permet de répartir le montant total investi dans ce mode de production d'énergie sur les différents inputs (dépenses en "machineries et équipements", "appareils électriques", "construction", "services"). Ainsi la demande d'investissement évolue en projection selon la part de chaque mode de production dans le mix électrique.

(Ji, Zou et Tian 2019) utilisent une méthode identique pour obtenir la demande finale d'investissement dans l'économie chinoise associée à un ensemble de grands projets d'infrastructures (autoroutes, lignes de trains à grande vitesse, réseaux ferrés urbains) et étudier via l'analyse IO l'impact de ce plan d'investissement sur l'économie nationale et sur la demande d'énergie.

(Södersten, Wood et Hertwich 2018a) poussent plus loin la désagrégation de la demande d'investissement. Ils proposent une analyse IO des émissions associées aux investissements réalisés par chaque secteur économique de différents pays. Pour ce faire, ils construisent une matrice des consommations de capital pour chaque région du monde à partir de la base de données KLEMS (soit 40 secteurs et leurs investissements, en valeur nominale ou en valeur réelle, dans 8 biens élémentaires pour une trentaine de pays développés, désagrégés en matrices de consommation de capital de taille 200x200, au même niveau de détail qu'Exiobase). Grâce à une méthode statistique de décomposition structurale du résultat de l'analyse IO, ils séparent l'effet de « volume » (surplus de demande d'investissement dans un bien donné) de l'effet « technique » (intensité carbone de la chaîne de transformation qui permet de produire ce bien) sur les émissions de GES. Cette étude en statique fait entrevoir la possibilité d'une désagrégation plus poussée du vecteur d'investissement pour des études prospectives.

Allant dans ce sens pour affiner leurs travaux, (Wiebe, et al. 2018) recommandent d'inclure davantage de changements de la structure de la FBCF, ainsi que d'analyser les conséquences des évolutions de la demande des ménages sur l'empreinte carbone, en intégrant les effets variables du commerce international.

4.1.2.2. Endogénéisation de la dynamique des investissements dans un modèle IO

a) Certains modèles technico-économiques détaillés (comme ThreeME et Imacim-R Monde) intègrent des investissements endogènes via la présence de modules sectoriels appelés blocs hybrides ou nexus (choix de véhicule, rénovation des bâtiment, arbitrage entre technologies de productions, choix d'une source d'énergie, etc.). Le modèle ThreeME présente un niveau de détail intéressant sur l'industrie et les matériaux de base (cf. Figure 16, en annexe). Chaque secteur possède une structure d'investissement propre et fixe en projection, accrue homothétiquement suivant l'évolution de son investissement total dans le reste de l'économie (hypothèse de complémentarité des biens d'investissement, dite de Leontief). Cependant le détail sectoriel du modèle ThreeME ne permet pas de discriminer précisément les structures d'investissement propres aux secteurs spécifiques de la transition bas carbone, notamment dans la construction ou les biens d'équipements, ni les matériaux nécessaires à la fabrication des technologies bas-carbone (fer et acier, aluminium, cuivre, etc.).

b) Une deuxième approche propre au calcul entrée-sortie consiste à exhiber des structures d'investissement pour chaque secteur de l'économie et à traiter ses consommations de capital comme une consommation intermédiaire standard (sur la base du travail de Södersten décrit précédemment), donnant lieu à des coefficients techniques « augmentés des besoins en capital », qu'on suppose ensuite fixes en projection. Cette approche correspond à une analyse sur un « sentier de croissance stabilisé », sans modification des coefficients techniques : pour un secteur donné, un euro de production supplémentaire nécessite toujours le même volume d'investissement pour y répondre.

Sur le même principe, la prise en compte dans le modèle IO d'investissements spécifiques de la transition bas carbone peut être améliorée par des données d'inventaire de cycle de vie : le vecteur d'impact en matières premières et inputs énergétiques nécessaires à la production d'une technologie utilisée par un secteur spécifique est substitué/ajouté au vecteur d'inputs de ce secteur dans le système IO (méthode dénommée également hybrid Life Cycle Assessment (LCA)-IO dans la littérature). Un choc de demande finale sollicitant ce secteur englobera donc aussi les besoins et les émissions de GES de l'économie pour produire cette technologie.

De nombreuses études utilisent cette méthode (b) pour évaluer l'impact matière ou carbone de changement du mix électrique établi par des scénarios de transition bas carbone. Wolfram et al. (2016) s'en servent pour désagréger le secteur de production d'électricité australien en différents modes de production et évaluer l'empreinte carbone de sa transition vers un mix EnR, en faisant varier la part respective de chaque technologie dans le mix énergétique, tout comme (Igos, et al. 2015). La désagrégation du secteur électrique se fait au niveau des données au format SUT : les besoins en matière de chaque technologie de production (disponibles en t/kWh, et issues d'une étude de type *process analysis*) servent à renseigner des structures de consommations spécifiques à chaque technologie dans la matrice des entrées intermédiaires (« *Use table* »), tandis que la matrice des ressources en produits (« *Supply table* ») est désagrégée suivant l'hypothèse que chaque secteur électrique utilise une unique technologie pour produire un seul type d'électricité donné.

(Hertwich, Gibon, et al. 2015) utilisent cette technique pour comparer les besoins en ciment, fer, cuivre, aluminium et différents impacts environnementaux du scénario d'évolution du mix électrique BLUE Map de l'AIE par rapport au scénario BAU (*Business As Usual* = tendanciel). Ils détaillent précisément le secteur électrique mondial (avec six technologies photovoltaïques, deux technologies de centrales solaires thermodynamiques à concentration, deux technologies hydroélectriques, deux technologies éoliennes *offshore* et une technologie *onshore*, et trois modes thermiques avec et sans technologies de CCS) grâce à la base de données d'ACV Ecoinvent 2.2 au sein d'un modèle IO à 9 régions appuyé sur EXIOBASE.

(de Koning, Kleijn, et al. 2018) étendent la méthode à d'autres technologies bas-carbone (véhicules électriques, travaux de construction) pour évaluer l'extraction nécessaire en 2050 de plusieurs minerais (Fe, Al, Cu, Ni, Li, Zn, Pb, In, Nd, Dy) dans différents scénarios technologiques (intégrant également des efficacités matière tendancielle), dont un scénario sur la composition des aimants des motorisations électriques pour examiner les besoins en métaux rares (néodyme). A noter que les auteurs soulignent que la prédiction des besoins matières à un horizon lointain est difficile car la composition matière des biens pourrait varier brutalement, suite à des ruptures technologiques.

4.1.3. Modèles de demande de matières et matériaux spécifiques

Notre revue de la littérature a également porté sur les possibilités de couplage d'un modèle IO avec des modèles spécifiquement développés pour étudier la demande dans un matériau particulier. Ces modèles

s'appuient sur une description fine de la teneur de biens spécifiques en un matériau et sur une détermination de la future demande finale adressée aux secteurs qui utilisent ces produits (notamment, les technologies mobilisées par la transition énergétique). Par exemple, pour évaluer la criticité du cuivre dans la transition énergétique mondiale, (Seck, et al. 2020) couplent un modèle de chaîne d'approvisionnement de la filière cuivre (de l'extraction aux débouchés) à un modèle d'EGC (chargé de déterminer la demande globale d'énergie) et un modèle technico-économique énergétique (servant à déterminer le mix énergétique optimal), tout en intégrant également des contraintes sur la disponibilité des ressources et sur les échanges internationaux. Un travail similaire a été développé pour l'étude des besoins en ciment des technologies de production d'énergie bas-carbone (Hache, et al. 2020). (Fishman, et al. 2021) livrent une revue fournie d'autres approches par scénarios⁴¹ sur des matériaux spécifiques, notamment les métaux. Ces modèles évaluent finement les futurs besoins d'un matériau particulier mais sont difficilement transposables simultanément à l'ensemble des matériaux mobilisés par l'économie, la méthode employée étant à chaque fois spécifique au matériau étudié et donc lourde à généraliser à l'ensemble des matériaux.

4.2. Enseignements de la revue de littérature

Pour modéliser les flux de matières ou évaluer les impacts matières et carbone de scénarios de transition bas-carbone, il est courant d'utiliser l'analyse entrée-sortie. Ces calculs d'empreintes environnementales traitent le plus fréquemment des évolutions du système énergétique. Concernant les besoins matériels, les études se concentrent généralement sur les matériaux à la production énergivores comme le ciment, la sidérurgie et les autres industries des métaux (aluminium, cuivre).

Pour traduire les scénarios dans un modèle IO, différentes méthodes sont employées dans la littérature. Le premier ensemble de méthodes consiste à projeter les évolutions de la **demande finale** de façon exogène, à partir des informations techniques tirées des scénarios, de résultats de modélisations macroéconomiques ou de résultats économétriques. Le second ensemble de méthodes consiste à faire évoluer de façon endogène les paramètres du modèle IO, à partir d'équations économétriques calibrées rétrospectivement ou alors en chainant les paramètres de différents modèles.

Focus Investissements : La projection de la demande d'investissement peut être réalisée à l'aide des sorties appropriées d'un modèle macroéconomique ou bien construite par déformation d'une matrice d'investissement sur la base des données du scénario pour chaque secteur investisseur (méthodes exogènes). Les besoins d'investissement peuvent également être endogénéisés dans le système entrée-sortie, de manière à plutôt refléter un « sentier d'investissement » stabilisé, offrant de fait la possibilité de réattribuer les besoins en matières et en énergie de la production du capital aux entités économiques responsables de ces investissements (branches d'activités, services, ménages, gouvernement, exportations) et donc de mieux refléter l'impact environnemental réel des chaînes de valeur dans l'économie.

Energie et matières : modélisées de façon endogène dans les modèles les plus aboutis (à l'image de l'énergie dans les IAM), plus généralement sous la forme de chocs exogènes pour les matières. Dans les modèles d'équilibre général fonctionnant sur le principe de l'entrée-sortie (modèles macro-économétriques), des équations d'évolution basées sur des analyses économétriques sont parfois ajoutées pour modéliser les tendances de progrès technique sur l'usage de la matière. Pour plusieurs études, les gains d'efficacité matières sont simplement traduits sur les coefficients techniques par des chocs exogènes (cf. Wiebe 2018, Schandl 2016 & 2020, Hatfield-Dodds 2017), basés sur des tendances observées historiquement, des expertises prospectives ou bien des courbes d'apprentissage génériques de type logistiques (s-curve, selon lesquelles les gains d'efficacité saturent sur le temps long).

Dans MatMat, nous faisons le choix de construire le choc d'investissement (respectivement le reste de la demande finale) par la déformation d'une matrice d'investissement (respectivement des consommations des ménages et des exportations) à partir des sorties d'un modèle macroéconomique (ThreeME, dans lequel les décisions d'investissement, de production et de consommation sont endogènes), avec une complétion possible par des données sectorielles tirées des scénarios étudiés. Peu d'auteurs croisent ainsi les deux approches méthodologiques. C'est le cas de Beylot et al. (2018) qui construisent une projection manuelle de la consommation de services superposée ensuite aux modélisations de NEMESIS. Et de Deetman et al. (2020) qui retravaillent les sorties d'une modélisation macroéconomique de leur scénario pour les convertir en chroniques d'investissement des nouvelles surfaces tertiaires à construire afin

⁴¹ Entendue comme l'évaluation des besoins en matière selon des scénarios économiques prospectifs.

d'estimer les besoins en matériaux associés. Nous pensons que cette méthode permet de mieux faire ressortir les différences entre scénarios en retrouvant des détails « agrégés » dans la modélisation MEGC, et d'assurer néanmoins une cohérence globale de la projection du système IO.

En sus, des tendances d'efficacités matières peuvent être intégrées par choc exogène via l'interface de scénarisation des coefficients techniques. Les consommations énergétiques sont pilotées par le bilan énergétique tiré du MEGC ThreeME, car les indices de niveau d'activité de chaque secteur économique permettent d'en déduire des variations de coefficients techniques, dans la logique IO.

4.3. Méthode de scénarisation retenue

4.3.1. Méthode générale : couplage avec le modèle ThreeME

Sur la base de la revue de littérature et des nouvelles fonctionnalités du modèle, une méthodologie de couplage entre le modèle MatMat et le modèle d'équilibre général calculable ThreeME a été testée pour scénariser les scénarios de transitions de neutralité carbone défini par l'ADEME. Les fonctionnalités de MatMat offrent la possibilité de compléter en suite ce couplage par des expertises sectorielles spécifiques, notamment sur la matière. Cette méthode permet de construire un choc de demande par scénario tout en préservant une cohérence économique d'ensemble, comme réalisé par Schandl et al. (2016) et Igos et al. (2015) (cf. section 4.1).

Dans cette version du modèle, un module de scénarisation permet d'automatiser la construction de scénario à partir des sorties de ThreeME pour la projection : des coefficients techniques relatifs aux consommations de produits énergétiques, de la demande finale (C, G, I, E) et des taux d'importation, selon une correspondance entre secteurs ThreeME-MatMat définie par l'utilisateur/rice (Figure 15). Les variables en volume monétaire dans ThreeME sont corrigées de l'inflation (unité = millions d'euros de 2006). Cependant, certains secteurs de ThreeME servent à renseigner simultanément les évolutions en projection de plusieurs secteurs de MatMat, conduisant à une utilisation sous-optimale de la calibration opérée dans MatMat pour l'année de base (à l'image des matériaux métalliques non ferreux détaillés dans MatMat (aluminium, cuivre, etc.) mais informés en prospective par les trajectoires de demande d'un unique secteur agrégé « métaux non ferreux » de ThreeME). L'apport ponctuel d'informations sectorielles permet de compléter ou affiner certaines projections tirées de ThreeME. L'interface de paramétrisation permet ensuite de modifier à la main l'ensemble des paramètres de projection (et notamment les coefficients techniques non énergétiques).

4.3.2. Cas spécifiques des investissements, des taux d'importation et du bilan énergétique

4.3.2.1. Projection des investissements

Le modèle ThreeME dispose d'une matrice d'investissement réduite (24 x 24 secteurs mais contenant seulement six biens d'investissement en pratique), avec des structures d'investissement fixes dans le temps. Les variations de la FBCF totale de chaque secteur de ThreeME entre 2015 et 2050 renseignent une projection homothétique des structures d'investissement des secteurs dans MatMat, pour déformer la matrice carrée de FBCF selon la méthode recommandée par Wiebe et al. (2018) et Ji et al. (2019).

Les sorties de ThreeME servent à informer les grandes tendances d'évolution des consommations de capital calibrées dans la matrice d'investissement de MatMat. Si des informations plus détaillées sont disponibles dans les expertises sectorielles, elles pourraient être utilisées pour compléter les projections de ThreeME. Notamment, les chroniques d'investissement de l'I4CE pourraient être utilisées pour compléter l'analyse).

Toutefois, à ce stade, ni les matrices d'investissement de MatMat, ni celles de ThreeME n'intègrent de structures d'investissement différenciées par technologie de production d'énergie au sein de chaque agrégat énergétique. Des raffinements pourraient être mis en œuvre à l'avenir : distinction de structures d'investissement propres à chaque filière énergétique, correction du total investi par chaque filière, et projection des investissements futurs selon les capacités de production installées annuellement. Cependant, ces raffinements ne semblent pas déterminants : en 2015, l'empreinte matières des investissements du secteur de production d'électricité représente tout de même 15% de l'empreinte totale de la FBCF, mais à peine 1% de la RMC totale de la France.

4.3.2.2. Projection des taux d'importation

Un taux d'importation est calculé pour chaque bien à partir des sorties ThreeME, comme le ratio entre le volume importé et la production domestique. Sa variation relative entre l'année de base et l'année de projection est ensuite utilisée pour projeter le taux d'importation dans MatMat, selon la correspondance des secteurs ThreeME-MatMat définie plus haut (Figure 15).

Cette approche, qui allège l'interface de paramétrisation, oblitère la distinction du taux d'importation de chaque bien en fonction des différents usages. Les taux d'importation sont en effet supposés identiques entre secteurs pour un bien donné, bien que des taux différenciés soient disponibles dans les sorties ThreeME. Au vu de l'analyse des sorties de ThreeME, nous estimons que cette simplification altère peu la précision de la projection, des variations significatives du taux d'importation entre usage n'étant observées que pour un nombre restreint de biens (dans la SNBC-2 : pour « organic basic chemicals », « basic iron and steel », « refined petroleum product », « manufacture and distribution of gas »). Toutefois, cette scénarisation pourrait être révisée à terme pour mieux intégrer l'information disponible dans ThreeME sur les taux d'importation.

4.3.2.3. Projection des consommations et des mix énergétiques

Les sorties de ThreeME alimentent également la projection des consommations intermédiaires et finales de produits énergétiques, par produit et par usage, selon la correspondance des secteurs ThreeME-MatMat et étendue à tous les sous-secteurs énergétiques de ThreeME (cf. Figure 15). A noter que lors de la scénarisation d'un choc de demande dans MatMat, on déforme aussi les niveaux d'activité de chacun des secteurs et donc, par ricochet, le bilan énergétique.

Dans ThreeME, pour un vecteur énergétique donné (e.g. électricité), le mix énergétique consommé par chacun des secteurs d'activité est supposé égal au mix énergétique global du vecteur (e.g. part nucléaire/éolien/solaire/etc. pour le vecteur électricité). Également dans ThreeME, les parts de chaque sous-produit énergétique dans le mix de chaque vecteur (e.g. pétrole, gaz, électricité) permettent de désagréger les consommations énergétiques de chaque vecteur énergétique en sous vecteurs (par exemple électricité nucléaire, électricité solaire, etc.) et ainsi de construire des projections à un niveau de détail plus fin pour informer le bilan énergétique de MatMat.

En projection, le bilan énergétique de MatMat est informé de la façon générique suivante. L'évolution des consommations énergétiques des ménages dans MatMat est paramétrée en appliquant les variations entre 2015 et 2050 des consommations des ménages modélisées par ThreeME aux consommations de 2015 correspondantes dans MatMat. Les projections des coefficients techniques reposent sur les variations de coefficients techniques de ThreeME, secteur par secteur, entre l'année de base et l'année de projection⁴².

Toutefois, compte tenu des écarts parfois observés à l'année de référence (2015) entre ThreeME et MatMat pour certains mix énergétiques ainsi que sur les consommations de certains secteurs d'activité, une méthode de projection corrigée a été mise en place. L'objectif de cette méthode corrigée est de retrouver en 2050 dans MatMat les mêmes mix et les mêmes quantités par vecteur énergétique que dans ThreeME.

Prenons le cas des bioénergies comme illustration. L'objectif de la méthode de projection corrigée est d'obtenir dans MatMat les mêmes parts et quantités d'énergies renouvelables dans le mix électrique (vecteur 23, produit par les secteurs notés 230X dans Figure 15, de bioénergies dans le mix de carburants (vecteur 22 et secteurs notés 220X) et dans le mix gazier (vecteur 24 et secteurs notés 240X) que celles données par ThreeME. Comme le mix électrique et la consommation totale de chaque source d'électricité calibrés en 2015 dans MatMat sont très similaires aux données de ThreeME, la méthode générique de projection décrite ci-dessus est appliquée⁴³. En revanche, pour le gaz et le pétrole, malgré des quantités d'énergie finale consommées par l'économie en 2015 comparables entre ThreeME et MatMat, des écarts de calibration parfois importants sur les mix énergétiques totaux et les quantités de bioénergie consommées par secteur sont observés en 2015 entre les deux modèles. Cela nous a conduit à définir des projections spécifiques (dites « adéquates ») pour ces deux vecteurs. Des corrections secteur

⁴² Les variations de coefficients techniques sont calculées à partir des productions de chaque secteur et des consommations intermédiaires d'énergie associées (par vecteur énergétique), modélisées dans ThreeME.

⁴³ Autrement dit, on choisit de ne pas forcer dans MatMat l'obtention du mix électrique ni la quantité totale de chaque source d'électricité comme données par ThreeME en 2050.

par secteur ont été faites pour obtenir le même mix (e.g. quantités consommées de gaz naturel et biogaz) dans MatMat que celui de ThreeME et les mêmes évolutions des quantités totales par vecteur⁴⁴.

Cette méthode de projection du bilan énergétique, testé sur les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME, permet bien de retrouver en projection les cibles d'émissions domestiques de GES.

4.3.3. Limites de la méthode de scénarisation retenue

Différents axes d'amélioration de la scénarisation peuvent être envisagés. Nous en listons certains ci-après.

La scénarisation automatisée à partir des données ThreeME présente des limites. Sauf pour le bilan énergétique, elle ne porte pas sur les coefficients techniques et n'intègre donc pas encore de gains d'efficacité matière. De plus, la segmentation ThreeME reste souvent trop peu désagrégée pour pouvoir informer séparément certains secteurs de MatMat (e.g. agriculture, matériaux, biens de consommation ou services). Ainsi, un même secteur de ThreeME peut informer avec la même projection plusieurs secteurs de MatMat, ne reflétant pas alors certains arbitrages décrits dans les scénarios. C'est pourquoi, par exemple dans l'exercice Transition(s) 2050 de l'ADEME, une paramétrisation manuelle est réalisée en complément, à partir d'expertises sectorielles fines sur la demande finale et les coefficients techniques de certains secteurs plus désagrégés dans MatMat (agriculture, industrie agroalimentaire, matériaux, textile notamment).

Comme nous l'avons vu dans la section 4.3.2.3, la scénarisation du bilan énergétique dans MatMat à partir de l'évolution du bilan énergétique tel que représenté dans ThreeME pose quelques difficultés. Un axe d'amélioration porterait sur la projection de la chaleur réseau et la description des consommations de biomasse à usage énergétique. S'appuyer sur un bilan énergie plus détaillé tel que disponible dans les modèles de prévision de l'offre et la demande d'énergie (comme ceux d'ENERDATA) pourrait améliorer les projections (voir les travaux réalisés par Teixeira et al. 2023). Par ailleurs, les structures de coefficients techniques des filières de production de biocarburants et de biogaz calibrés en 2015 dans MatMat conduisent à sous-estimer les consommations matières de ces processus de production (ce n'est par exemple qu'à partir de 2018/2019 que la production de biogaz s'est développée). En conséquence, les augmentations importantes de la production de biogaz et de biocarburants en 2050 ne se traduisent pas avec réalisme sur l'empreinte matières en biomasse.

Sur la matrice d'investissement, un découpage assez fin des secteurs de services est fourni par la base KLEMS. Les services réalisent d'importants investissements matériels compte tenu de leur poids dans l'économie. Mais les hypothèses de projection manquent pour utiliser pleinement le détail disponible dans KLEMS sur les structures d'investissement. Dès lors, les secteurs de services marchands sont par exemple traités de manière identique dans MatMat lors de la scénarisation, à l'aide de l'unique secteur de 3ME correspondant. A contrario, l'unique secteur énergétique agrégé de KLEMS contraint à attribuer dans MatMat une structure identique d'investissement à tous les secteurs énergétiques d'Exiobase. De fait, cela ne permet pas de distinguer les effets des évolutions contrastées des mix énergétiques des différents scénarios (notamment concernant l'électricité et le gaz) sur le vecteur agrégé de demande d'investissement (un milliard d'euros d'investissement réalisés dans l'électricité photovoltaïque ou dans le nucléaire conduit au même vecteur d'investissement agrégé). Pour les secteurs ayant un poids économique faible sur l'investissement, comme les industries des métaux, les industries extractives, la production d'énergies fossiles et raffinées, les industries manufacturières, ou encore les déchets, le manque de structures d'investissement désagrégées dans KLEMS a relativement peu d'impact en prospective sur la demande d'investissement agrégée.

Dans l'objectif de préciser la mesure des impacts matière de la construction, la projection des investissements en ouvrages de génie civil pourrait être améliorée en affinant la désagrégation de la matrice d'investissement sur le génie civil. Un rapport de la commission européenne a notamment centralisé des informations qui seraient utiles pour désagréger les investissements en travaux publics des services de transports (Schroten, et al. 2019).

⁴⁴ A noter qu'une correction a été préalablement opérée dans MatMat à l'année de calibration pour introduire en 2015 des consommations infinitésimales mais toujours non-nulles de bioénergies (biogaz (2403) et biocarburant (2202)) de façon à ne pas fausser les projections.

Le commerce extérieur impacte fortement les consommations de matières sur le territoire national (empreinte). Néanmoins aucune scénarisation fine du commerce n'a été mise en œuvre à ce stade. De plus, le modèle ne permet pas encore de pouvoir intégrer une scénarisation du contenu matière de la production du reste du monde. Pour lever cette limite et améliorer la mesure des empreintes carbone et matières de la France, un module MRIO satellite, MatMatTrade, est en cours de développement. Ce module permettra de désagréger les partenaires commerciaux de la France et de suivre les chaînes d'approvisionnement à l'étranger. Il offrira ainsi la possibilité d'intégrer, dans la scénarisation MatMat, des trajectoires contrastées des intensités matière et carbone des importations en fonction des changements technologiques opérés dans différentes régions du monde et des choix d'approvisionnement de l'économie française en biens importés.

CONCLUSION

Le présent projet s'est attaché à consolider la méthodologie développée dans la version 1 du modèle MatMat pour analyser les effets de scénarios de transition bas carbone sur les besoins en matières et les émissions de GES de l'économie française (A. Teixeira, et al. 2020). Ce travail est motivé par un véritable enjeu méthodologique et scientifique identifié par la littérature : faire dialoguer des expertises technico-économiques prospectives et une représentation fine des échanges physiques au sein d'une économie, pour englober à la fois les effets macroéconomiques et technologiques de la transition bas-carbone dans l'analyse de ses impacts environnementaux.

Le modèle MatMat repose sur une analyse entrée-sortie en flux hybrides – physiques et monétaires – pour apporter un éclairage sur les besoins matériels de l'économie française (dans sa globalité) et permettre *in fine* une analyse simultanée de plusieurs pressions environnementales (émissions de GES, empreinte matières). Par exemple sur l'énergie, la calibration d'un système hybride permet de scénariser d'un seul tenant et de façon cohérente les évolutions des consommations de produits fossiles et les émissions associées à leur combustion.

Les développements récents de MatMat ont permis de consolider la représentation en unité physique des flux de matières premières et de l'étendre aux matériaux, avec une distinction entre les filières de production à partir de matière premières vierges (MPV) ou recyclées (MPR). Ils ont également permis d'intégrer une fonctionnalité de calcul de l'empreinte carbone en prospective. Par ailleurs, le vecteur d'investissement a été désagrégé en une matrice carrée afin d'affiner la détermination en projection de la demande finale totale et d'engager une analyse des pressions environnementales générées par ces investissements (sur la base d'indicateurs d'empreinte matières et carbone modifiés). Également une tentative de désagrégation de l'unique secteur de la construction présent dans MatMat a été réalisée afin d'améliorer la traduction des expertises sur l'évolution de la demande de bâtiments (tertiaire et résidentiel, construction neuve et rénovation) et du génie civil. A ce stade, la désagrégation opérée n'est pas satisfaisante et pour finaliser cette fonctionnalité des développements restent à engager.

Le modèle a ensuite été testé sur cette nouvelle base de données de calibration pour générer en 2015 des résultats d'empreinte matières et carbone pour la France. Côté matières, les résultats obtenus sont en accord avec les statistiques existantes en ce qui concerne l'extraction domestique et la consommation apparente de matières (DMC). Mais des écarts existent sur les entrées directes de matières (DMI) et sur les indicateurs d'empreinte (RMI et RMC) du fait des choix de corrections des données sur le commerce extérieur français et des spécificités méthodologiques du calcul d'empreinte dans MatMat.

Une méthodologie de projection, basée sur les enseignements d'une revue de la littérature, a été mise en œuvre et testée pour l'évaluation des empreintes carbone et matières des scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME (Vicard et Teixeira 2023). Les évolutions des grandes composantes de l'économie française sont renseignées à partir des sorties du modèle macroéconomique ThreeME de l'ADEME : consommations finales des ménages et du gouvernement, demande d'investissements, exportations et taux d'importation par produit. Ce bouclage entre MatMat et ThreeME permet d'embarquer, dans la modélisation MatMat, la cohérence macroéconomique d'ensemble de la transition bas carbone et ses effets directs, indirects et induits. La désagrégation dans MatMat de l'investissement total en une matrice permet d'attribuer, à partir des informations issues de ThreeME, des consommations de capital distinctes entre les secteurs clés de la transition (le secteur immobilier, les services de transports, le secteur de production d'électricité, etc.). Les consommations énergétiques finales et intermédiaires sont projetées à partir du bilan énergétique modélisées par ThreeME. La méthode de projection permet bien de retrouver les cibles d'émissions territoriales de GES des différents scénarios ADEME.

Le module de projection de MatMat donne aussi la possibilité de compléter la scénarisation automatique à partir des sorties de la modélisation ThreeME par des expertises complémentaires, paramétrées à la discrétion de l'utilisateur/rice. Ces expertises permettent de préciser certaines hypothèses sectorielles dans MatMat, non perceptible dans ThreeME du fait d'une segmentation sectorielle plus agrégée (24 secteurs) que celle de MatMat (200 secteurs). Il s'agit par exemple de l'évolution de la demande pour les produits agricoles et alimentaires, de l'intégration de gains d'efficacité matières ou de substitutions entre matériaux (par exemple entre matériaux vierges et issus du recyclage).

Comme détaillées dans ce rapport (sections 3.3 et 4.3.3), des améliorations pourraient être apportées afin de contourner certaines limitations ou combler des lacunes liées au manque de données de calibration et de projection.

Sur la méthode de calibration, les choix de données effectués pour calibrer en 2015 les flux de matières premières importés et exportés, puis les corrections effectuées par la suite, conduisent à des valeurs de DMI inférieures aux données publiées par Eurostat. De plus, en l'absence de données de prix différencié par usage, la méthode d'hybridation dans MatMat revient à supposer que tous les secteurs se fournissent tous au même prix pour une matière donnée. Également, la calibration des flux de biomasse à usage énergétique est difficile dans le cadre IO symétrique retenu pour le modèle, ce qui conduit certainement à une représentation incomplète des impacts de la transition sur la consommation de biomasse (surtout sur bois énergie et intrants des filières de biocarburants). Par ailleurs, les investissements totaux par secteur, recalculés à partir de la matrice d'investissement de MatMat, peuvent différer sensiblement de chiffres nationaux tels que celui du Panorama I4CE pour les filières d'énergies renouvelables. Un travail de recalibration de la matrice d'investissement sur les secteurs de production d'énergie pourrait être envisagé à l'avenir.

Sur la méthode de projection, la scénarisation du bilan énergétique mériterait d'être améliorée sur trois points : la projection de la chaleur réseau, la description des consommations de biomasse à usage énergétique et l'évolution des productions de bioénergies (biogaz notamment). De même, en l'état, la désagrégation de la construction réalisée ne permet pas de distinguer les diverses activités de construction (car le découpage de l'INSEE ne repose pas sur des périmètres adéquates pour isoler des biens de construction appropriés) et ne permet pas non plus de discriminer des scénarios selon des trajectoires différenciées entre rénovations et constructions neuves (car les structures de coût des trois branches isolées initialement sont trop similaires, conséquence des périmètres statistiques utilisés). Des développements complémentaires sont donc nécessaires pour différencier les besoins matières associés à la construction neuve, à la rénovation et aux travaux de génie civil. Aussi, le modèle MatMat, tel que décrit dans ce rapport, ne permet pas de tenir compte de gains tendanciels d'efficacité matières systématiques dans les processus de production (à l'exception des produits énergétiques) dans le reste du monde. Des développements sont en cours pour développer un module annexe, MatMatTrade, qui sera couplé à MatMat pour affiner l'évaluation des empreintes françaises, en intégrant les effets de l'évolution des échanges internationaux et des processus de production à l'étranger (décarbonation, gains d'efficacité matières).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baude, Manuel, Mathieu Baudry, François-Xavier Dussud, Jérôme Duvernoy, Clément Bultheel, et Charlotte Vailles. «Datalab: Les chiffres clés du climat (France, Europe et monde).» Ministère de la transition écologique et solidaire, CGDD (SDES) et I4CE, 2019.
- Beylot, Antoine, Baptiste Boitier, Nicolas Lancesseur, et Jacques Villeneuve. «The Waste Footprint of French Households in 2020: A Comparison of Scenarios of Consumption Growth Using Input-Output Analysis.» *Journal of Industrial Ecology* 22, n° 2 (2018).
- Calatayud, Philippe, et Kambiz Mohkam. «L'empreinte matières, un indicateur révélant notre consommation réelle de matières premières.» SDES, SEEID, CGDD, 2018 (avril).
- Cambridge Econometrics. «Study on modelling of the economic and environmental impacts of raw material consumption.» European Commission, 2014.
- Crawford, Robert H., Paul-Antoine Bontinck, André Stéphan, et Thomas Wiedmann. «Hybrid life cycle inventory methods - A review.» *Journal of Cleaner Production*, 2018.
- de Koning, Arjan, Gjalt Huppés, Sebastiaan Deetman, et Arnold Tukker. «Scenarios for a 2 degree world: a trade-linked input-output model with high sector detail.» *Climate Policy* 16, n° 3 (2016): 301-317.
- de Koning, Arjan, René Kleijn, Gjalt Huppés, Benjamin Sprecher, Guus van Engelen, et Arnold Tukker. «Metal supply constraints for a low-carbon economy ?» *Resources, Conservation and Recycling* 129 (2018): 202-208.
- Deetman, Sebastian, Sylvia Marinova, Ester van der Voet, et Detlef P. van Vuuren. «Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050.» *Journal of Cleaner Production* 245 (2020).
- Donati, Franco, Sidney Niccolson, Arjan de Koning, Bart Daniels, et Arnold Tukker. «Modeling the circular economy in environmentally extended input-output: A web application.» *Journal of Industrial Ecology* 25 (2021): 36-50.
- Fishman, Tomer, et al. «A comprehensive set of global scenarios of housing, mobility and material efficiency cycles and energy systems modeling.» *Journal of Industrial Ecology* 25 (2021): 305-320.
- Gibon, Thomas, Richard Wood, Anders Arvesen, Joseph D. Bergesen, Sangwon Suh, et Edgar G. Hertwich. «A Methodology for Integrated, Multiregional Life Cycle Assessment Scenarios under Large-Scale Technological Change.» *Environmental Science and Technology*, 2015.
- Hache, Emmanuel, Marine Simoën, Gondia Sokhna Seck, Clément Bonnet, Aymen Jabberi, et Samuel Carcanague. «The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios.» *International Economics*, 2020.
- Hatfield-Dodds, Steve, et al. «Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies.» *Journal of Cleaner Production* 144 (2017): 403-414.
- Hertwich, Edgar G. «Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments.» *Nature Geoscience*, 2021.
- Hertwich, Edgar G., et al. «Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies.» *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, n° 20 (2015): 6277-6282.
- IEA. «The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.» International Energy Agency, 2021.
- Igos, Elorri, Benedetto Rugani, Sameer Rege, Enrico Benetto, Laurent Drouet, et Daniel S. Zachary. «Combination of equilibrium models and hybrid life cycle-input-output analysis to predict the environmental impacts of energy policy scenarios.» *Applied Energy* 145 (2015).
- IRP, E. Hertwich, R. Lifset, S. Pauliuk, N. Heeren. «Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.» International Resource Panel (IRP), United Nations Environment Programme, 2020.
- Ivanova, Dianna, et al. «Environmental Impact Assessment of Household Consumption.» *Journal of Industrial Ecology* 20, n° 3 (2016): 526-536.
- Ji, Junping, Zijian Zou, et Yushen Tian. «Energy and economic impacts of China's 2016 economic investment plan for transport infrastructure construction: an input-output path analysis.» *Journal of Cleaner Production* 238 (2019).
- Le Treut, Gaëlle. *Methodological proposal for hybrid modelling : consequences for climate policy analysis in an open economy (France)*. Thèse de doctorat, EHESS, 2017.
- Lecocq, Frank, Alain Nadaï, et Christophe Cassen. «Etat de l'art de la modélisation prospective.» ADEME, 2019.

- Ledez, Maxime, et Hadrien Hainaut. «Panorama des financements climat.» I4CE - Institute for Climate Economics, 2020.
- Leonardon (ADEME), Philippe, Sylvain Laurenceau (CSTB), et Mathilde Louerat (CSTB). «Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050.» ADEME, 2019.
- Leonardon, Philippe (ADEME), Christel Jimenez (TBC Innovations), Bérenger Favre, et Gérard Senior (AETIC). «Prospective de consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050.» ADEME, 2019.
- Leontief, Wassily. «Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach.» *The Review of Economics and Statistics* (The MIT Press) 52, n° 3 (1970).
- Lutter, Stephan, Stefan Giljum, et Martin Bruckner. «A review and comparative assessment of existing approaches to calculate material footprints.» *Ecological Economics* 127 (2016): 1-10.
- Lutz, Christian, Bernd Meyer, et Marc Ingo Wolter. *GINFORS Model*. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS), 2005.
- Merciai, Stefano. «An input-output model in a balanced multi-layer framework.» Édité par Elsevier. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019: 104403.
- Merciai, Stefano, et Jannick Schmidt. «Methodology for the construction of global multi-regional hybrid supply and use tables for the EXIOBASE v3 database.» *Journal of Industrial Ecology* 22, n° 3 (2018): 516-531.
- Meyer, Mark, Martin Distelkamp, Gerd Ahlert, et Bernd Meyer. *Macroeconomic Modelling of the Global Economy-Energy-Environment Nexus - An Overview of Recent Advancements of the Dynamic Simulation Model GINFORS*. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS), 2013.
- Miller, Peter D., et Ronald E. Blair. *Input-Output Analysis, Foundations and Extensions*. Cambridge University Press, 2009.
- Mohkam, Kambiz, et Olivier Simon. «L’empreinte matières de l’économie française: une analyse par matière et par catégorie de produits.» *INSEE*, 2019.
- MTES. «Projet de stratégie nationale bas-carbone. Rapport d’accompagnement.» MTES, 2020 (mars).
- MTES. «Projet de stratégie nationale bas-carbone. Version pour consultation du public.» MTES, 2020.
- OCDE. «Global Material Resources Outlook to 2060 : Economic Drivers and Environnemental Consequences.» OCDE, 2019.
- Pauliuk, Stefan, Anders Arvesen, Konstantin Stadler, et Edgar G. Hertwich. «Industrial ecology in integrated assessment models.» *Nature Climate Change* 7 (2017): 13-20.
- Perrier, Quentin, et Philippe Quirion. «La transition énergétique est-elle favorable aux branches à fort contenu en emploi ? Une Approche input-output pour la France.» *FAERE Working paper*, 2016.
- Pothen, Frank. «A structural decomposition of global raw material consumption.» *Ecological Economics* 141 (2017): 154-165.
- Rauzier, Emmanuel, et al. «Transition industrielle - Prospective énergie Matière: Vers un outil de modélisation des niveaux de production.» ADEME, 2019.
- Schandl, Heinz, et al. «Decoupling global environmental pressure and economic growth: scenarios for energy use, materials use and carbon emissions.» *Journal of Cleaner Production*, 2016.
- Schandl, Heinz, et al. «Shared socio-economic pathways and their implications for global materials use.» *Resources, Conservation and Recycling* 160 (2020).
- Schroten, A., et al. «Overview of transport infrastructure expenditures and costs.» European Commission, 2019.
- Seck, Gondia Sokhna, Emmanuel Hache, Clément Bonnet, Marine Simoën, et Samuel Carcanague. «Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations.» *Resources, Conservation and Recycling*, 2020.
- Södersten, Carl-Johan, Richard Wood, et Edgar G. Hertwich. «Endogenizing Capital in MRIO Models: The Implications for Consumption-Based Accounting.» *Environmental Science and Technology*, 2018b.
- Södersten, Carl-Johan, Richard Wood, et Edgar G. Hertwich. «Environmental Impacts of Capital Formation.» *Journal of Industrial Ecology* 22 (2018a): 55-67.
- Stadler, K., R. Wood, T. Bulavskaya, C.-J. Södersten, M. Simas, et S. Schmidt. «EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables.» *Journal of Industrial Ecology* 22 (2018): 502-515.
- Teixeira, A., J. Lefèvre, A. Saussay, et F. Vicard. «Construction de matrices de flux de matières pour une prospective intégrée énergie-matière-économie.» ADEME, 2020.
- Teixeira, Antoine, et Julien Lefèvre. «Evaluation macro-économique de la stratégie nationale bas carbone française à l’horizon 2050.» juin 2019.

- Teixeira, Antoine, et Julien Lefèvre. «Low carbon strategies need to tackle the carbon footprint of materials production.» *Working paper. AFD research paper*, 2023.
- Vicard, Fanny, et Antoine Teixeira. «Evaluation des empreintes carbone et matières des scénarios Transition(s) à horizon 2050.» ADEME, 2023.
- Vivanco, David Font. «The role of services and capital in footprint modelling.» *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25 (2020): 280-293.
- Wiebe, Kirsten Svenja, Eivind Lekve Bjelle, Johannes Többen, et Richard Wood. «Implementing exogenous scenarios in a global MRIO model for the estimation of future environmental footprints.» *Journal of Economic Structures*, 2018.
- Wolfram, Paul, Thomas Wiedmann, et Mark Diesendorf. «Carbon footprint scenarios for renewable electricity in Australia.» *Journal of Cleaner Production* 124 (2016): 236-245.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

FIGURES

Figure 1 : Composition sectorielle de la consommation finale d'énergie et des émissions de GES pour l'économie française en 2015 (à gauche) et pour l'industrie manufacturière en France en 2015 (à droite). Adapté d'Eurostat par (A. Teixeira, et al. 2020).....	9
Figure 2 : Trajectoire des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 dans le scénario AMS. Tiré de (MTES 2020).	10
Figure 3 : Structure schématique du modèle MatMat. Extrait et mise à jour à partir de (A. Teixeira, et al. 2020).....	14
Figure 4 : Procédure de traitements des données d'Exiobase pour la construction de la base de données de calibration de MatMat.	15
Figure 5 : Structure schématique des données après calibration (format SRIO). Adapté de (A. Teixeira, et al. 2020).....	16
Figure 6 : Structure de données MRIO obtenue après agrégation à deux régions d'Exiobase (V3.7 ou V3.8) en flux monétaires et extraction des extensions d'intérêt, puis ventilation des données en flux physiques (symbolisée par des flèches de couleur) pour reconstruire une matrice MRIO en unités mixtes au format HIO (étapes 1 et 2 de la Figure 4). Adapté de (A. Teixeira, et al. 2020). M.P. = matières premières, Mat. = Matériaux, Exio. Ext. = extensions d'Exiobase.	24
Figure 7 : Schéma de la construction de la matrice d'investissement à 200 secteurs à partir des données KLEMS.....	28
Figure 8 : Schéma de la désagrégation du système SRIO (matrice des consommations intermédiaires et vecteurs de demande finale) sur la base des données du TES de l'INSEE.	30
Figure 9 : Schéma de la désagrégation du secteur construction dans la matrice d'investissement. Dans la formule d'estimation de la FBCF, l'indice i indique une branche quelconque de la segmentation KLEMS et l'indice t l'année de référence choisie pour la calibration.	31
Figure 10 : Indicateurs d'empreinte matières pour la France, en 2015 (résultat MatMat-v2.1).....	33
Figure 11 : Décomposition des indicateurs DMC et DMI (par secteurs consommateurs) et RMC, RMI (par biens de demande finale) pour la France en 2015 (résultats MatMat), pour les minéraux non métalliques et les minerais métalliques.	35
Figure 12 : Décompositions des émissions directes (territoriales) par secteur et de l'empreinte carbone par biens de demande finale, pour la France en 2015 (résultats MatMat-v2.1). Périmètre des émissions de GES prises en compte : CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O issus d'une combustion.	36
Figure 13 : Correspondance entre les assets (actifs) de KLEMS et les secteurs d'Exiobase au niveau de détail standard et comparaison entre les investissements référencés par chaque base de données dans chaque secteur pour l'année 2015.....	60
Figure 14 : Détail sectoriel disponible dans le modèle ThreeME.....	61
Figure 15 : Correspondance MatMat-3ME utilisée dans l'exercice Transition(s)2050.....	62
Figure 16 : Décomposition des indicateurs DMC et DMI (par secteurs consommateurs) et RMC, RMI (par biens de demande finale) pour la France en 2015 (résultats MatMat), pour la biomasse et les combustibles fossiles.....	63

TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des flux économiques et de leur unité (hybridés ou non) dans MatMat, ainsi que les sources de données complémentaires mobilisées pour l'hybridation. 12 des 16 matériaux transformés sont déclinés en MPV et MPR.....	23
Tableau 2 : Sources des données mobilisées pour l'hybridation des flux de matériaux.....	26
Tableau 3 : Description de la segmentation Nace rev2 utilisée par l'INSEE pour le secteur de la construction.....	29
Tableau 4 : Comparaison des indicateurs de consommation directe de matière (DMC, DMI) calculés à partir de différentes sources de données.	37
Tableau 5 : Détail sectoriel disponible dans la BDD KLEMS.....	59

SIGLES ET ACRONYMES

Institutions :	
ADEME	Agence de la transition écologique
CIREN	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
SMASH	Société de mathématiques appliquées et de sciences humaines
MTESS	Ministère de la transition écologique et solidaire
CGDD	Commissariat général au développement durable
I4CE	<i>Institute for climate economics</i>
AIE	Agence internationale de l'énergie
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
Dénominations techniques :	
BNR	Bilan national du recyclage
FBCF	Formation brute de capital fixe
CCF	Consommation de capital fixe
CFN	Capital fixe net
ICV/ACV	Inventaire/Analyse du cycle de vie (<i>Life-cycle inventory/analysis ou LCI/LCA</i>)
MFA	<i>Material fluxes analysis</i> (Analyse de flux de matières)
BDD	Base de données
MRIO/SRIO	<i>Multiregional / single region input-output</i>
MEGC	Modèle d'équilibre général calculable
IAM	<i>Integrated assessment model</i>
ktep (ktoe)	Kilo-tonne équivalent pétrole (<i>kilo-tonne oil-equivalent</i>)
MPV/MPR	Matériaux primaires vierges/issus du recyclage
CCS	<i>Carbon capture and storage</i> (Captage et stockage du carbone)

5. Annexes

5.1. Base EU KLEMS

A	Agriculture, forestry and fishing
B	Mining and quarrying
C10-C12	Food products, beverages and tobacco
C13-C15	Textiles, wearing apparel, leather and related products
C16-C18	Wood and paper products; printing and reproduction of recorded media
C19	Coke and refined petroleum products
C20	Chemicals and chemical products
C21	Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations
C22_C23	Rubber and plastics products, and other non-metallic mineral products
C24_C25	Basic metals and fabricated metal products, except machinery and equipment
C26	Computer, electronic and optical products
C27	Electrical equipment
C28	Machinery and equipment n.e.c.
C29_C30	Transport equipment
C31-C33	Other manufacturing; repair and installation of machinery and equipment
D	Electricity, gas, steam and air conditioning supply
E	Water supply; sewerage; waste management and remediation activities
F	Construction
G	Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles
H	Transportation and storage
I	Accommodation and food service activities
J58-J60	Publishing, audio-visual and broadcasting activities
J61	Telecommunications
J62_J63	IT and other information services
K	Financial and insurance activities
L	Real estate activities
M_N	Professional, scientific, technical, administrative and support service activities
O	Public administration and defence; compulsory social security
P	Education
Q	Health and social work
R	Arts, entertainment and recreation
S	Other service activities
T	Activities of households as employers; undifferentiated goods- and services-producing activities of households for own use
U	Activities of extraterritorial organizations and bodies

Tableau 5 : Détail sectoriel disponible dans la BDD KLEMS.

total invest (M€)		secteurs EXIOBASE	KLEMS assests	total invest (M€)			
1 389	0	Paddy rice; Wheat; Cereal grains nec	(I_cult) Cultivated assets, current prices, NAC mn	1 365			
	0	Vegetables, fruit, nuts					
	0	Oil seeds					
	0	Sugar cane, sugar beet					
	0	Plant-based fibers					
	57	Crops nec					
	0	Wool, silk-worm cocoons					
	611	Products of forestry, logging and related services (02)					
62 866	722	cattle; pigs; poultry; raw milk; meat animals nec; animal products nec.	(I_CT) Communications equipment, current prices, NAC mn	5 072			
	12 958	Radio, television and communication equipment and apparatus (32)					
	5 686	Office machinery and computers (30)			(I_IT) Computing equipment, current prices, NAC mn	5 019	
	44 222	5 277			Fabricated metal products, except machinery and equipment (28)	(I_OMAch) Other machinery and equipment, current prices, NAC mn	61 512
		18 022			Machinery and equipment n,e,c, (29)		
		7 630			Electrical machinery and apparatus n,e,c, (31)		
		6 048			Medical, precision and optical instruments, watches and clocks (33)		
7 245	Furniture; other manufactured goods n,e,c, (36)						
32 933	24 147	Motor vehicles, trailers and semi-trailers (34)	(I_TraEq) Transport equipment, current prices, NAC mn	33 409			
	8 786	Other transport equipment (35)					
250 062	0	Construction work (45)	(I_Ocon) Total non-residential investment, current prices, NAC mn	124 122			
	0	Secondary construction material for treatment, Re-processing of secondary construction material into aggregates	(I_Rstruct) Residential structures, current prices, NAC mn	128 967			
39 325	0	Computer and related services (72)	(I_Soft_DB) Computer software and databases, current prices, NAC mn	60 756			
	0	Research and development services (73)	(I_RD) Research and development, current prices, NAC mn	48 846			
			(I_OIPP) Other IPP assets, current prices,	3579			
				71 603			

Figure 13 : Correspondance entre les assets (actifs) de KLEMS et les secteurs d'Exiobase au niveau de détail standard et comparaison entre les investissements référencés par chaque base de données dans chaque secteur pour l'année 2015.

Note: Ces montants sont concordants pour certains secteurs de production de biens matériels (actifs "computing equipment", "construction", "transport equipment") et divergent davantage pour d'autres (actifs "communications equipment", other machinery") mais des écarts importants existent concernant les investissements immatériels ("intangible assets") référencés dans la BDD KLEMS ("R&D" (comptabilisée comme consommation intermédiaire dans Exiobase) et "Computer Software and Database").

5.2. Segmentation sectorielle du modèle ThreeME V2

Détail sectoriel disponible dans ThreeME		
catégories	secteurs	
Agriculture	Agriculture, forestry and fishing	1
Manufacturing Industries	Food products and beverage	2
	Motor vehicles, trailers and semi-trailers	3
	Glass and glass products	4
	Ceramic products and building materials	5
	Articles of paper and paperboard	6
	Inorganic basic chemicals	7
	Organic basic chemicals	8
	Plastic products	9
	Basic iron and steel and of ferrous-alloys	10
	Non-ferrous metals	11
	Other industries	12
Construction	Construction of buildings and civil engineering	13
Transports	Rail transport (passenger and freight)	14
	Passenger transport by road	15
	Freight transport by road and transport by pipeline	16
	Water transport	17
	Air transport	18
Services	Business activities	19
	Public services	20
Mining (21)	Mining of coal and lignite	21
Refined petroleum products (22)	Oil	2201
	Biofuels	2202
Electric power generation, transmission and distribution (23)	Nuclear	2301
	Fuel	2302
	Combined gas	2303
	Coal	2304
	Wind	2305
	Solar	2306
	Hydraulic	2307
Cogeneration (CHP)	2308	
Manufacture and distribution of gas (24)	Natural gas	2401
	Wood	2402
	Biogas	2403
	Waste incineration	2404
	Geothermal	2405
	Cogeneration	2406

Figure 14 : Détail sectoriel disponible dans le modèle ThreeME.

Note: Les sorties de modélisation pour les vecteurs énergétiques ne sont disponibles qu'agrégées (« Electric power generation, transmission and distribution » et « Manufacture and distribution of gas ») mais les parts globales de chaque source d'énergie pour chaque vecteur sont modélisées.

Secteurs 3ME		Secteurs MatMat (Transitions)	Secteurs 3ME		Secteurs MatMat (Transitions)
1	Agriculture, sylviculture et pêche	Paddy rice	14	Transports ferroviaires	Rail_transport
		Wheat	15	Transport routier de voyageurs	Other land transport
		Cereal grains nec			
		Vegetables, fruit, nuts	16	Transport routier (ou par conduites) de marchandises	Water_transport
		Oil seeds	17	Transports par eau	
		Sugar cane, sugar beet	18	Transports aériens	Air_transport
		Plant-based fibers			
		Crops nec	19	Services marchands (secteurs)	Gas_distribution
		Farm_animals			Electricity_distribution
		Forestry			Landfill
		Fishing			Water_Other_waste_Treatment
	Real estate				
2	Industrie agro-alimentaire	Animal_Products	Services marchands	Hotel_Restaurant	
	Dairy_Products	Vegetable_Products		Commerce	
3	Automobile	Motor_vehicles	20	Services non marchands	Public_Services
4	Fabrication de verre et d'articles en verre	Primary_Glass	21	Extraction et agglomération de la houille (Charbon)	Crude_coal
		Secondary_Glass			Coal
5	Fabrication de produits céramiques	Primary_Cement_lime_plaster	2201	Raffinage et distribution de pétrole	Motor_fuels
		Secondary_Cement_lime_plaster	2202	Raffinage et distribution de biocarburants	Other_fuels
		Other_Non-Metallic_Mineral_Materials			Biofuels
6	Papier et carton	Primary_Pulp_and_paper	2301	Production d'électricité - Nucléaire (secteur)	Nuclear_fuel
	Industrie chimique minérale	Secondary_Pulp_and_paper			
7	Industrie chimique minérale	Chemicals		Production d'électricité - Nucléaire	Electricity_by_nuclear
8	Industrie chimique organique	Chemicals	2302	Production d'électricité - Pétrole	Electricity_by_petroleum
9	Transformation des matières plastiques	Primary_Plastics	2303	Production d'électricité - Gaz	Electricity_by_gas
		Secondary_Plastics	2304	Production d'électricité - Charbon	Coal-fired_electricity
10	Sidérurgie et première transformation de métaux	Primary_Steel_iron	2305	Production d'électricité - Eolien	Electricity_by_wind
		Secondary_Steel_iron	2306	Production d'électricité - Solaire	Electricity_by_solar
11	Production de métaux non ferreux	Primary_Aluminium	2307	Production d'électricité - Hydroélectrique	Electricity_by_hydro
		Secondary_Aluminium			
		Primary_Copper	2308	Production et distribution d'électricité - Autre (non attribué)	Other_electricity
		Secondary_Copper			
		Primary_Other_metals			
Secondary_Other_metals	2401	Production et distribution de gaz - Natural gas	Natural_gas		
			Gas		
12	Autres industries (secteurs)	Crude_oil	2402	Production et distribution de gaz - Wood waste incineration	Heat
		Iron_ores			
		Aluminium_ores	2405	Production et distribution de gaz - Geothermal	Heat
		Copper_ores			
		Nickel_ores_and_concentrates	2406	Production et distribution de gaz - Other natural gas and heat	Heat
		Lead_Zinc_Tin_ores			
		Precious_metal_ores_and_concentrates	2403	Production et distribution de gaz - Biogas	Biogas
		Other_metal_ores			
		Stone	2404	Production et distribution de gaz - Waste incineration (non attribué)	Other_Waste_incineration
	Sand_and_clay				
	Other_NonMetallic_minerals			Wood_Waste_incineration	
	Autres industries	Primary_Wood			
		Secondary_Wood			
		Oth_transport_equipment			
		Clothing_Industry			
		Metal_Product			
		Computers_communication equipments			
Machinery					
Other_manufacturing_industry					
13	BTP	Construction			

Figure 15 : Correspondance MatMat-3ME utilisée dans l'exercice Transition(s)2050.

Note : la mention « (secteurs) » accolée à certains secteurs de 3ME indique que ces correspondances particulières ne sont valables qu'au niveau des secteurs (c'est-à-dire pour la projection de leurs consommations d'énergie). Concernant la correspondance entre produits, ces secteurs de MatMat ne sont attribués à aucun secteur de 3ME (c'est le cas pour la projection de la demande finale et des taux d'importation).

5.3. Résultats complémentaires d’empreinte matières pour la France en 2015

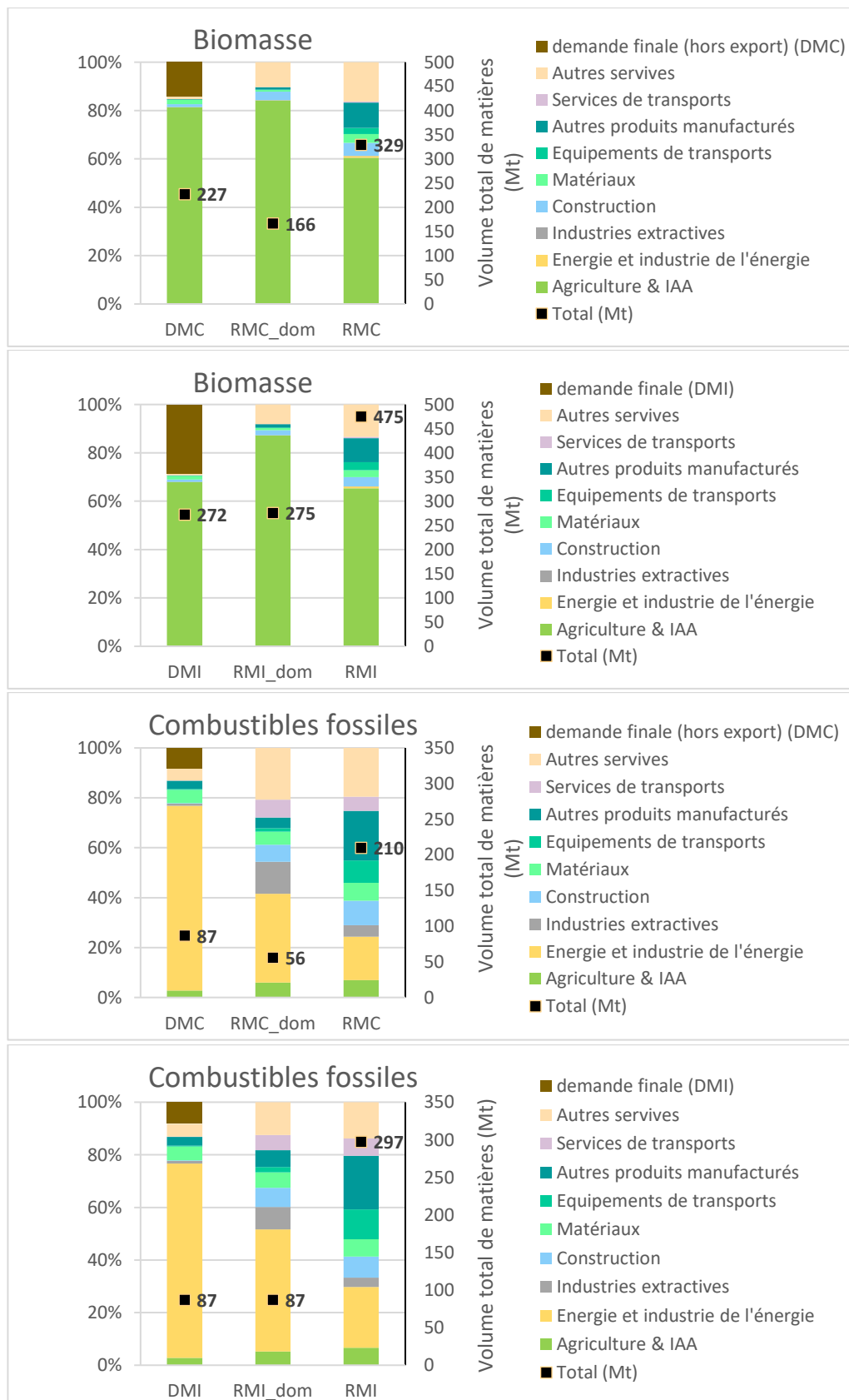


Figure 16 : Décomposition des indicateurs DMC et DMI (par secteurs consommateurs) et RMC, RMI (par biens de demande finale) pour la France en 2015 (résultats MatMat), pour la biomasse et les combustibles fossiles.

Note : Les indicateurs RMC_dom et RMI_dom sont construits en retranchant aux indicateurs RMC et RMI leur part importée (données par l’indicateur Dimp défini section 2.3).

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un

EXTENSIONS ET DEVELOPPEMENTS DU MODELE DE PROSPECTIVE INTEGREE ENERGIE-MATIERE- ECONOMIE – MatMat

MatMat est un modèle de comptabilité environnementale Entrée-Sortie qui permet une analyse prospective robuste de pressions environnementales multiples : émissions territoriales de GES, empreinte carbone, besoins en matériaux transformés et empreinte matières.

Le présent rapport reprend les différentes améliorations et développements mis en œuvre depuis la première publication du modèle MatMat par l'ADEME en septembre 2020.

Ces développements ont permis une mise à jour de la base de données de calibration du modèle et de générer de nouveaux indicateurs de sorties. Ils ont également permis de développer une méthodologie de projection, testée pour l'évaluation des empreintes carbone et matières des scénarios prospectifs Transition(s) 2050 de l'ADEME.