

Études & documents

*Le modèle Vulcain :
une approche en équilibre
général calculable de
l'économie circulaire et de l'énergie*

n° 147

Mai

2016

ÉCONOMIE ET ÉVALUATION



Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)

Titre du document : Le modèle Vulcain : une approche en équilibre général calculable de l'économie circulaire et de l'énergie

Directeur de la publication : Xavier **Bonnet**

Auteur(s) : Alexandre **Godzinski***

Remerciements : Je souhaite remercier particulièrement Alain **Ayong Le Kama**, Jean-Jacques **Becker**, Alain **Bernard**, Xavier **Bonnet**, Dominique **Bureau**, Jean-Christophe **Bureau**, Mélanie **Calvet**, Patrice **Christmann**, Jean **De Beir**, Mouez **Fodha**, Jean **Fouré**, Christophe **Gouel**, Christine **Lagarenne**, Vincent **Marcus**, Bérengère **Mesqui**, François **Meunier**, Kambiz **Mohkam**, Doris **Nicklaus**, Christophe **Poupard**, Francesco **Ricci**, Katheline **Schubert**, Olivier **Simon** et Marc **Vielle**.

Contact CGDD : ernr.seei.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

Date de publication : Mai 2016

* en poste au CGDD lors de la rédaction de ce document

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent.
L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

Sommaire

Résumé.....	3
Introduction	5
1. Description du modèle.....	6
1.1 Analyse du problème et structure globale.....	6
1.2 Ménages.....	9
1.3 Entreprises.....	12
1.3.1 Secteur de l'extraction minérale et fossile.....	12
1.3.2 Secteur du service de traitement des déchets.....	12
1.3.3 Secteur de production de l'électricité.....	14
1.3.4 Secteur de production du bien générique.....	15
1.4 État	16
1.5 Modélisation de l'économie ouverte.....	17
1.6 Équilibre des marchés	18
1.7 Dynamique du modèle.....	19
1.8 Deux situations polaires : l'économie purement linéaire et l'économie purement circulaire.....	20
2. Calibration.....	20
2.1 Champ du modèle : deux matières minérales (acier et aluminium) et trois matières fossiles (pétrole, charbon et gaz).....	21
2.2 Calibration statique.....	21
2.2.1 Calibration des paramètres structurels.....	21
2.2.2 Calibration des flux de matières minérales et fossiles ainsi que des flux économiques.....	23
2.3 Calibration dynamique	24
3. Cahier de variantes.....	25
3.1 Chocs relatifs à l'économie circulaire	26
3.1.1 Hausse de 100 % du prix international des matières minérales primaires (minerai de fer et bauxite)	26
3.1.2 Taxe sur les matières minérales primaires de 0,01 % du PIB <i>ex post</i>	28
3.1.3 Taxe sur le traitement des déchets par stockage de 0,01 % du PIB <i>ex post</i>	29
3.1.4 Comparaison des chocs relatifs à l'économie circulaire.....	31
3.2 Chocs relatifs à l'énergie	33
3.2.1 Hausse de 20 % du prix international des matières énergétiques fossiles (pétrole, charbon et gaz)	33

3.2.2 Taxe carbone de 1 % du PIB <i>ex post</i>	34
3.2.3 Taxe sur l'électricité de 1 % du PIB <i>ex post</i>	36
3.2.4 Comparaison des chocs relatifs à l'énergie	37
Conclusion	39
Annexes	40
Annexe 1 : Fonctions CES et CET	40
Annexe 2 : Principales variables du modèle	44
Annexe 3 : Principales équations du modèle	46
Annexe 4 : Flux de matières minérales et fossiles	57
Bibliographie	63

Résumé

Peu de modèles économiques parviennent à ce jour à livrer une vision d'ensemble des interactions entre l'économie et l'utilisation des ressources. Le modèle développé dans ce document a l'ambition de contribuer à combler cette lacune, en livrant une représentation stylisée de l'économie mondiale et des flux de matières, minérales et fossiles, qui y sont attachés. Il intègre à cet égard deux matières minérales (acier et aluminium), trois matières fossiles (pétrole, charbon et gaz) et l'électricité. Le modèle permet ainsi d'étudier l'impact d'une politique environnementale tant sur les grandeurs macroéconomiques « classiques » (PIB, emploi, exportations...) que sur des grandeurs physiques (taux de recyclage, consommation de matière, consommation d'énergie...).

En outre, le caractère global du modèle permet de rendre compte de mécanismes de « bouclage macroéconomique » (ou d'effets d'entraînement), particulièrement pertinents dès lors que l'on souhaite étudier l'impact d'une hausse du prix international des matières premières ou la mise en place d'une taxe carbone. Enfin, le modèle reposant sur des comportements décrits à l'échelle microéconomique, il est adapté à l'étude de modifications profondes de l'économie, telles qu'engendrées par des scénarios de transition énergétique ou vers l'économie circulaire.

Introduction

Les ressources non renouvelables sont des ressources naturelles qui font partie intégrante de notre économie. Elles comprennent d'une part des ressources durables¹, par exemple les métaux, qu'il est possible de recycler après leur utilisation, conduisant au développement de l'économie circulaire. Elles comprennent d'autre part des ressources non durables, c'est-à-dire non usuellement recyclables, comme les matières fossiles utilisées comme source d'énergie. L'ensemble des activités économiques recourent à ces types de matières, sachant en outre que leurs utilisations sont liées : la production de métal sous forme utilisable par l'économie requiert ainsi de l'énergie, toutefois en moindre proportion lorsque cette production est réalisée à partir de déchets métalliques plutôt que de minerai métallique.

Assez peu d'outils économiques permettent cependant d'avoir une vision d'ensemble des interactions entre l'économie et les flux de ressources non renouvelables, qu'elles soient durables ou non. Du côté de l'énergie et comparativement à l'économie circulaire, les modèles macroéconomiques appliqués s'intéressant aux thématiques énergétiques sont relativement nombreux. On distingue classiquement les modèles macroéconométriques, constitués d'équations de comportements sous forme réduite et estimées économétriquement, et les approches plus structurelles en équilibre général, stochastiques ou non. Au niveau français, on peut citer notamment les modèles Mésange (Klein et Simon, 2010, développé par l'INSEE et la Direction générale du Trésor) et Mascotte (Baghli *et al.* 2004, développé par la Banque de France), modèles macroéconométriques agrégés sectoriellement et avec une représentation synthétique des comportements énergétiques (consommation des ménages en énergie, consommation des entreprises en énergie, sans distinction de la forme d'énergie considérée). Henriet, Maggari et Schubert (2014) présentent un modèle d'équilibre général calculable, agrégé sectoriellement : à la différence des modèles macroéconométriques, les comportements des agents économiques dans les modèles d'équilibre général calculable y sont modélisés de façon « microfondée », c'est-à-dire dérivant de programmes d'optimisation réalisés au niveau microéconomique (maximisation du profit sous contrainte de production pour les entreprises, maximisation de l'utilité sous contrainte budgétaire pour les ménages). L'énergie y est traitée comme un facteur de production, au même titre que le travail et le capital, et impacte par conséquent l'offre de l'économie. Au niveau mondial, les modèles EPPA (*MIT Emissions Prediction and Policy Analysis*, Paltsev *et al.* 2005), ENV-Linkages (OECD, 2014) et GEMINI-E3 (Bernard et Vielle, 2008) sont des modèles d'équilibre général calculable, multi-pays et désagrégés sectoriellement, tandis que DICE (*Dynamic Integrated Climate-Economy*, Nordhaus, 2008) est un modèle d'équilibre général calculable agrégé mais qui modélise l'évolution physique et l'impact économique de la concentration en CO₂ de l'atmosphère, ce qui en fait un modèle dit « intégré », dans la mesure où il intègre à la fois des comportements économiques et physiques.

À l'inverse, les modèles macroéconomiques théoriques ou appliqués s'intéressant à l'économie circulaire sont extrêmement rares. Dans la littérature théorique, les travaux pionniers de De Beir, Fodha et Magris (2010), Di Vita (2007) et Pittel, Amigues et Kuhn (2010) intègrent la matière première secondaire comme substitut à la matière première primaire² dans des modèles macroéconomiques agrégés, sans modélisation spécifique du secteur de traitement des déchets. Dans la littérature appliquée, AIM/Material (*Asia-Pacific Integrated Model*, Masui, 2005) et EMEC (*Environmental Medium term Economic model*, Sjöström et Östblom, 2009) sont des modèles d'équilibre général calculable désagrégés, précurseurs d'une modélisation intégrée de l'économie circulaire, et qui procèdent en deux étapes : un premier module détermine l'équilibre économique tandis que le second fournit les quantités de déchets produits et leur répartition suivant les modes de traitement. En revanche, ces modèles n'incluent pas au sein d'un même équilibre la génération de déchets et la réintégration de la matière secondaire dans le processus de production.

Le but du présent travail est double : d'une part, contribuer à la modélisation économique rendant compte des flux de ressources non renouvelables sous leurs différentes formes (notamment, s'agissant des ressources durables, les flux de matière primaire, secondaire, de déchets, *etc.*) et, d'autre part, quantifier l'impact économique et physique de différents instruments économiques visant à limiter les pressions environnementales liées aux flux de ressources non renouvelables.

Ce document présente un modèle macroéconomique appliqué et stylisé de l'économie circulaire, dans lequel les flux de ressources non renouvelables durables sous leurs différentes formes (matière primaire, déchets, matière secondaire) font partie intégrante de l'équilibre économique. Sont modélisées les interactions entre la matière primaire et la production totale de l'économie, entre la consommation des agents économiques et la production de déchets, entre le traitement des déchets et la quantité de matière recyclée et entre la matière première secondaire et la production totale de l'économie. Ceci permet d'intégrer de manière globale la circularité des flux de matières au sein même de l'équilibre économique, là où les autres

¹ Cf. Rotillon 2010 : « Une ressource n'est pas durable si son extraction et sa consommation la rendent inutilisable pour des usages futurs. Certains minéraux, comme l'or ou l'argent, peuvent être recyclés dans certains de leurs usages et sont donc durables, contrairement au pétrole par exemple. ».

² Les matières premières secondaires (encore appelées matières premières de recyclage) désignent des matières issues de déchets qui, après une opération de prétraitement (tri, régénération...), sont réintroduits dans le processus de production (cf. SOeS, 2013b). Les matières premières secondaires se distinguent ainsi des matières premières primaires, ces dernières provenant d'un processus d'extraction, et non de recyclage. Dans la suite, on parlera plus simplement de **matières primaires** et de **matières secondaires**.

approches appliquées dissocient équilibre économique et traitement des déchets. Par ailleurs, l'énergie est également modélisée, permettant de traduire notamment les liens entre l'économie circulaire et la consommation d'énergie.

S'intéressant aux métaux et à l'énergie, le modèle a été nommé Vulcain, en référence au nom latin du dieu forgeron de la mythologie gréco-romaine. La première partie décrit le modèle, qui contribue à la littérature sur l'efficacité matière, sur le traitement des déchets et sur l'énergie. La partie 2 détaille la calibration et les différentes sources de données utilisées. La partie 3 présente un cahier de variantes relatives à l'économie circulaire et à l'énergie.

1. Description du modèle

1.1 Analyse du problème et structure globale

La ligne de conduite suivie au cours du travail de modélisation a consisté à construire le modèle le plus simple possible, sous la contrainte qu'il puisse rendre compte des phénomènes macroéconomiques essentiels liés à l'économie circulaire et à l'énergie. Ce travail peut se diviser en six étapes, résumées ici.

I) Choix du modèle : un modèle d'équilibre général calculable

Il s'agit dans un premier temps de déterminer le type de modèle, conditionné par la disponibilité des données et la finalité de l'outil. Les données sur les flux de matières non énergétiques n'étant pas disponibles sous forme de séries longues, une approche macroéconométrique est difficilement envisageable. En revanche, l'approche en équilibre général reste possible, le manque de données étant ainsi suppléé par un surcroît de structure dans la modélisation adoptée. Par ailleurs, parmi les finalités de l'outil figure l'étude de modifications significatives de l'économie (telles qu'inscrites par exemple dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte, à savoir une réduction importante des quantités de déchets stockées ou une décarbonation de l'économie), ce qui conduit à privilégier l'utilisation d'équations sous forme non linéarisée, de façon à capter les changements structurels, potentiellement forts et non linéaires, induits par de telles modifications. Un modèle d'équilibre général calculable est l'outil le plus à même de répondre à ce cahier des charges.

II) Prise en compte des flux de matières minérales à travers une approche par élément physique

Il convient ensuite de déterminer la manière de prendre en compte les flux de matières minérales au sein du modèle macroéconomique.

Une première option revient à considérer la matière physique de façon générique, sous la forme, par exemple, de tonnes équivalent matière. Si cette option présente l'avantage de la simplicité du point de vue formel, les caractéristiques physiques des matières font que leur transformation sous forme utilisable par l'économie, leurs usages par les agents économiques et leur capacité à être recyclées sont de nature très différente³, ce qui limite la portée d'un modèle reposant sur une telle approche.

Une autre option consiste à utiliser une approche par produits (voitures, appareils électroménagers...) et à modéliser non pas les flux de matières dans l'économie mais ceux des produits, puis en déduire les quantités de matières associées via le contenu matière des produits. Cette option a l'avantage de pouvoir reposer sur une grande disponibilité des données sur le plan sectoriel. Cependant, deux inconvénients majeurs se posent : d'une part, le contenu en matière d'un produit évolue au cours du temps ; d'autre part, l'approche produits n'a de sens que sur une partie de la chaîne physique, s'appliquant difficilement avant la production ou après l'utilisation du produit.

Enfin, une dernière possibilité est une approche par matières physiques. Son avantage est de pouvoir suivre la circulation de la matière tout au long de ses interactions avec l'économie, y compris lors de son éventuel recyclage, tout en tenant compte des spécificités physiques de celle-ci. L'inconvénient est la difficulté de disposer de données économiques adaptées, car la comptabilité nationale n'a pas été conçue dans cette optique. C'est néanmoins cette dernière approche qui a été retenue, car semblant la plus à même de rendre compte des interactions entre les flux de matières et l'économie. Plus généralement, la manière de disposer d'un champ d'étude aussi large et stable que possible serait de considérer successivement, lorsque cela est possible, les éléments de la classification périodique de Mendeleïev. En effet, hors réaction nucléaire, la nature de l'élément reste inchangée tout au long de ses interactions avec le processus de production des biens, leur consommation, les déchets qui en résultent, l'élimination de ses déchets ou leur recyclage. Conformément à cette approche et pour des raisons de disponibilité des données et d'importance des flux en unités physiques, on a choisi de considérer les éléments fer (Fe) et aluminium (Al).

³ À masse équivalent matière donnée, une canette de boisson est par exemple bien plus simple à recycler qu'un téléphone portable, du fait de l'hétérogénéité des matières utilisées et de la difficulté de la déconstruction.

III) Un modèle en économie ouverte, traduisant la circulation de matière aux différents niveaux de l'économie

On définit à présent le périmètre géographique du modèle, son périmètre sectoriel et les types d'agents économiques modélisés.

S'agissant du périmètre géographique, l'ouverture commerciale de la France et la quasi-absence d'extraction de ressources minérales métalliques sur son sol impliquent de pouvoir modéliser l'économie française en lien avec le reste du monde. Deux solutions s'offrent alors : représenter la France comme une « petite économie ouverte », en considérant le reste du monde comme exogène et en ne modélisant que les comportements d'importations et d'exportations de la France avec le reste du monde ; ou modéliser le reste du monde comme une économie à part entière, « symétrique » de l'économie française. C'est cette seconde approche qui a été privilégiée, permettant notamment au modèle d'étudier l'impact sur l'économie française d'une variation du prix d'une ressource (hausse du prix du minerai de fer ou du pétrole par exemple). En effet, la hausse du prix d'une ressource a un effet à la fois sur la structure de l'économie française et sur celle du reste du monde. La France est alors touchée de façon directe (ressource plus chère pour l'économie française) et également indirecte (*via* la réaction du reste du monde au renchérissement de la ressource) : ce dernier effet peut ne pas être négligeable et doit dès lors être pris en compte, ce que l'approche en petite économie ouverte ne peut aisément réaliser.

Compte tenu des données disponibles, il est difficile de réaliser un modèle désagrégé du point de vue sectoriel et parvenant à modéliser les flux de matière dans les différents secteurs de l'économie. Néanmoins, de façon à prendre en compte autant que possible les interactions entre les matières et l'économie, certains secteurs spécifiques ont été distingués, le reste de l'économie demeurant agrégé.

Pour les matières durables (métaux), les principales interactions consistent dans l'extraction de matière première primaire, son utilisation pour la production de biens de consommation, la consommation de ces biens par les agents économiques (ménages notamment), la production de déchets qui résulte des étapes précédentes, le traitement des déchets par stockage ou recyclage et, enfin, l'utilisation de matière première secondaire, issue du recyclage, pour la production de biens de consommation. Ces étapes sont complexes et non nécessairement séquencées. De manière à ce que le modèle reste le plus compact possible, on a retenu la structure suivante :

- un secteur extractif de matière primaire ;
- un secteur de production de bien final⁴, qui utilise à cet effet de la matière primaire et de la matière secondaire en tant que substituts imparfaits ;
- un ménage qui consomme le bien final et produit des déchets ;
- un secteur de traitement des déchets, par stockage ou par recyclage.

Dans la mesure où il y a un bouclage partiel des flux de matière *via* le recyclage, une attention particulière a été accordée à la conservation de la masse de matière en présence, de façon à ce que le modèle économique soit réaliste sur le plan physique⁵.

Pour les matières non durables (matières fossiles), la circulation des flux est plus simple, puisqu'après une première utilisation, il n'y a pas de bouclage. Les différentes étapes prises en compte dans le modèle comprennent l'extraction de matière fossile et son utilisation afin de produire des biens finaux, processus qui utilise par ailleurs de l'électricité, produite partiellement à partir de matière fossile. Les matières fossiles considérées sont le pétrole, le charbon et le gaz.

Hormis la modélisation des secteurs spécifiques liés à l'extraction de matière, au traitement des déchets par stockage ou recyclage ou à la production de l'électricité, le reste de l'économie, comme dit plus haut, demeure agrégé et supposé produire un bien dit « générique », représentatif de l'ensemble des biens produits par les autres secteurs de l'économie.

La figure 1 présente de façon schématique la structure du modèle par secteur et agent économique, pour une région du monde, une matière durable (par exemple un métal) et une matière non durable (par exemple une matière fossile). À noter que dans cette représentation stylisée de l'économie, l'intégralité des déchets produits est attribuée à la consommation des ménages (le traitement des déchets générés au cours du processus de production est implicitement refacturé au ménage lors de la consommation finale) et, par ailleurs, les matières durables et non durables ne sont consommées directement que par les entreprises (le bien demandé par le ménage est agrégé).

⁴ Un bien est dit final lorsqu'il est demandé par les ménages, à des fins de consommation ou d'investissement.

⁵ La conservation de la masse de matière se traduit notamment par le fait que la masse de matière recyclée reste inférieure à la masse de matière envoyée en centre de traitement des déchets et que la quantité de déchets produits par les ménages dépende non seulement du volume économique consommé mais aussi du contenu en matière des biens.

IV) Modélisation des comportements des agents économiques

Il s'agit ensuite de modéliser le comportement des agents économiques, à travers celui d'un agent représentatif. Dans un cadre d'équilibre général calculable, chaque agent représentatif maximise sa fonction objectif sous contrainte : le ménage maximise son utilité sous sa contrainte budgétaire et l'entreprise maximise son profit sous sa contrainte technologique (fonction de production). L'utilité du ménage et les fonctions de production sont définies principalement à partir de formes fonctionnelles de type « CES » ou « CET⁶ » permettant une simplicité de manipulation et de bonnes propriétés économiques (voir annexe 1). Le détail des comportements des ménages et des entreprises sera abordé dans les sections 1.2 et 1.3.

V) Finalisation du modèle

Les programmes de maximisation sous contrainte de chaque agent, traduits en conditions du premier ordre, ainsi que les équations d'équilibre des marchés (égalisation de l'offre et de la demande, cf. partie 1.6) permettent de définir l'équilibre statique, c'est-à-dire à une date donnée et à dotation en facteurs primaires (capital et travail) donnée.

L'ajout d'équations d'évolution permet enfin de déterminer l'équilibre dynamique du modèle (cf. partie 1.7). Cette construction en deux étapes (équilibre statique puis équilibre dynamique) présente l'avantage de la simplicité à la fois du point de vue théorique et du point de vue de la mise en œuvre informatique. Les programmes de chaque agent (maximisation de la fonction objectif sous contrainte) à chaque date sont donc définis uniquement à partir des variables à cette même date.

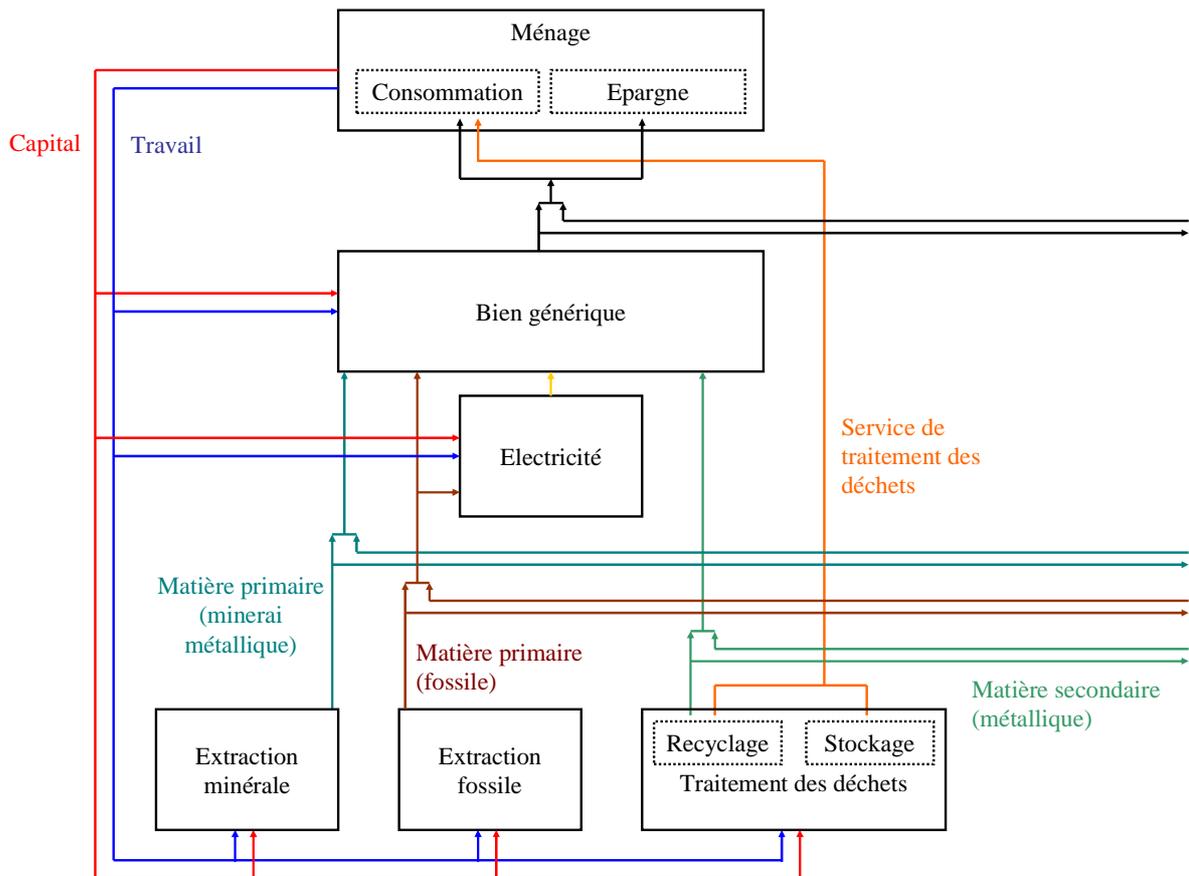
VI) Calibration et simulation

La sixième et dernière étape consiste à mettre en œuvre informatiquement le modèle et à le calibrer (partie 2). Il est alors possible d'en étudier le comportement par la simulation de chocs standards (hausse du prix du pétrole, *etc.*).

On décrit à présent plus en détail la structure du modèle et la modélisation des comportements des agents économiques, en abordant successivement les ménages, les entreprises, le gouvernement, l'ouverture de l'économie et l'équilibre des marchés⁷.

⁶ CES : *Constant elasticity of substitution*; CET : *Constant elasticity of transformation*. La définition de ces fonctions et leurs caractéristiques sont détaillées dans l'annexe 1.

⁷ Dans la suite, on note R l'ensemble des régions du modèle, M l'ensemble des matières durables (métaux) et F l'ensemble des matières non durables (matières fossiles).

Figure 1 : Structure du modèle pour une région, une matière minérale et une matière fossile

1.2 Ménages

Le point central de la modélisation du comportement des ménages, dans le cadre d'un modèle s'intéressant à l'économie circulaire, est la prise en compte de la production de déchets par ceux-ci. Trois difficultés, peu résolues dans la littérature, se posent et impliquent des choix de modélisation.

La première est le sens du flux physique de matière par rapport au flux financier. Lorsqu'un ménage achète un bien à une entreprise, le flux financier (paiement du prix du bien à l'entreprise par le ménage) est de sens opposé au flux physique de matière (le bien acheté par le ménage contient usuellement de la matière). À l'inverse, lorsqu'un ménage souhaite ou, selon le contexte réglementaire, doit faire traiter ses déchets, il paie en général pour leur collecte et leur traitement. Dans ce cas de figure, les flux financier et physique sont de même sens. La solution retenue dans le modèle est de considérer que la production de déchets par les ménages, et leur collecte, s'effectuent par l'achat par ces derniers d'un service traitement des déchets. Ce service est payé par le ménage et implique un flux sortant de matière, du ménage vers l'entité qui produit ce service⁸.

La deuxième difficulté réside dans le fait que la quantité de déchets que produit *in fine* un bien donné dépend non seulement du volume économique de bien acheté, mais aussi de la masse de matière contenue dans ce bien. À titre illustratif, si un ménage achète deux fois plus d'un bien donné, il produira toutes choses égales par ailleurs deux fois plus de déchets, mais s'il achète une quantité donnée de ce bien, et que, toutes choses égales par ailleurs, le bien contient deux fois plus de matière, il produira également deux fois plus de déchets. Ces considérations sont essentielles dès lors qu'on souhaite satisfaire à la réalité physique de la conservation de la masse. La solution proposée dans le modèle consiste à prendre en compte, dans la quantité de service de traitement des déchets achetée par le ménage, la teneur en matière du bien agrégé. Il convient de noter à cet égard qu'on est ici en présence d'une externalité des entreprises vers les ménages, les premières décidant de la quantité de

⁸ La conséquence de cette approche est qu'il est supposé que l'intégralité des déchets produits par les ménages est collectée par le service de traitement des déchets. En pratique, la collecte des déchets produits par les ménages peut être mise en œuvre par des collectivités (collecte régulière en porte à porte) ou des entreprises (service d'enlèvement d'un ancien appareil électroménager lors d'un nouvel achat par exemple).

matière contenue dans les biens produits, les seconds supportant le coût de traitement des déchets induits par les biens, proportionnel à leur contenu en matière.

Enfin, une difficulté supplémentaire vient du fait qu'en pratique, la durée de vie des biens est variable selon le type de biens et notamment l'usage qui en est fait. Une approche détaillée consisterait à déterminer, à chaque date suivant l'achat d'un bien donné, la fraction de matière qui devient un déchet. Outre la question de la disponibilité des données, cette approche aurait pour conséquence technique que le ménage, avec le type de dynamique choisie (calcul date par date, donc sans anticipation du futur) se trouverait à chaque date avec une quantité déterminée de déchets, fonction de ses choix passés, pour laquelle il devrait acheter la quantité de service de traitement des déchets correspondante. Dans ce cadre, un choix simple et stylisé a été fait, selon deux hypothèses polaires : d'une part, les biens consommés à une date donnée produisent des déchets uniquement à cette même date (la consommation peut se définir comme une destruction par l'usage), la quantité de déchets générés étant égale à la quantité de matière contenue dans les biens consommés, d'autre part les biens épargnés (non consommés) ne produisent jamais de déchets (leur durée de vie est supposée très grande).

La modélisation de la production de déchets par les ménages étant faite, on aborde à présent les caractéristiques plus usuelles du comportement des ménages. L'utilité des ménages à une date donnée dépend de trois composantes : la consommation, l'investissement et le loisir, selon une fonction d'utilité construite à partir d'un emboîtement de fonctions de type CES. Le comportement des ménages résulte ainsi de la maximisation de cette fonction d'utilité compte tenu de leur contrainte budgétaire. Le ménage répartit ainsi son revenu entre consommation et investissement (épargne), ce revenu dépendant du temps qu'il décide de ne pas consacrer au loisir.

Le bien de consommation est un bien composite, construit à partir :

- d'une part, du bien générique produit nationalement et du bien générique produit dans le reste du monde (importé)⁹ ;
- d'autre part, du service de traitement des déchets pour chaque matière durable.

Le volume économique du service de traitement des déchets est exprimé en unité physique de matière, représentant la quantité de matière consommée par les ménages (conservation de la masse de matière). Celle-ci est égale à la quantité de matière entrant dans la demande des ménages, ajustée de la part investie (qui ne produit pas de déchets). La quantité de matière entrant dans la demande des ménages provient, d'une part, de la matière (primaire et secondaire) contenue dans le bien générique produit nationalement et, d'autre part, de la matière (primaire et secondaire) contenue dans le bien générique importé.

Par exemple, en économie fermée et en l'absence d'investissement, la quantité physique de service traitement de déchets serait égale à quantité utilisée par l'économie domestique (matière primaire et matière secondaire). Dans le cas de deux régions (France et reste du monde) et en présence d'investissement, la quantité de déchets de matière m produits en France à la date t est la suivante¹⁰ :

$$W_{m,t,France} = \frac{C_{France,t}}{C_{France,t} + I_{France,t}} \left[\left(M_{m,France,France,t}^P + M_{m,France,France,t}^S + M_{m,France,RDM,t}^P + M_{m,France,RDM,t}^S \right) \frac{Y_{France,France,t}}{Y_{France,t}} + \left(M_{m,RDM,France,t}^P + M_{m,RDM,France,t}^S + M_{m,RDM,RDM,t}^P + M_{m,RDM,RDM,t}^S \right) \frac{Y_{France,RDM,t}}{Y_{RDM,t}} \right]$$

Dans le cas général d'un modèle à r régions, la quantité de déchets de matière m produits dans la région r à la date est la suivante :

$$W_{m,t,r} = \frac{C_{r,t}}{C_{r,t} + I_{r,t}} \sum_{r_1 \in R} \sum_{r_2 \in R} \left(M_{m,r_1,r_2,t}^P + M_{m,r_1,r_2,t}^S \right) \frac{Y_{r,r_1,t}}{Y_{r_1,t}}$$

où $W_{m,t}$ est la quantité de déchets (exprimée en unité physique) produits par les ménages ou, de façon équivalente, la quantité de service de traitement des déchets de matière m demandée à la date t par les ménages de la région r ;

$C_{r,t}$ le volume de consommation des ménages en bien générique, $I_{r,t}$ le volume d'investissement des ménages en bien générique ;

⁹ La construction du bien composite à partir des biens ainsi décrits s'effectue au moyen d'une fonction de type CES.

¹⁰ Dans le crochet, les termes de la première parenthèse correspondent aux matières minérales primaires et secondaires utilisées par le secteur du bien générique en France, ces matières pouvant provenir de France ou du reste du monde, tandis que les termes de la seconde parenthèse correspondent aux matières minérales primaires et secondaires utilisées par le secteur du bien générique dans le reste du monde, ces matières pouvant elles aussi provenir de France ou du reste du monde.

$Y_{r,t}$ la production de bien générique dans la région r ;

$Y_{1,r,t}$ la demande de bien générique dans la région r en provenance de la région r_1 ;

$M_{m,r_1,r_2,t}^P$ la quantité de matière primaire de type m (exprimée en unité physique) utilisée par le secteur générique de la région r_1 et provenant de la région r_2 ;

$M_{m,r_1,r_2,t}^S$ la quantité de matière secondaire de type m (exprimée en unité physique) utilisée par le secteur générique de la région r_1 et provenant de la région r_2 .

L'investissement des ménages est constitué de biens génériques (domestiques et importés) qui, s'accumulant, augmentent le capital de l'économie domestique. Le loisir est considéré comme une fraction du temps disponible, exogène (l'autre fraction constituant l'offre de travail).

Les revenus des ménages sont constitués des revenus du travail (salaire horaire multiplié par la quantité d'heures travaillées), des revenus du capital (rémunération unitaire du capital multipliée par le stock de capital de l'économie domestique)¹¹ ainsi que d'un transfert issu de recettes fiscales. Le fait que les ménages reçoivent les revenus du capital constitue une hypothèse usuelle des modèles d'équilibre général calculable : ceux-ci sont considérés en effet comme propriétaires du capital de leur région du monde d'appartenance, le louant aux entreprises et en recevant en retour une rémunération. La contrainte des ménages s'écrit dès lors de la façon suivante :

$$r_{r,t} \cdot \bar{K}_{r,t} + w_{r,t} \cdot \bar{L}_{r,t} + T_{r,t} = p_{Y,A,r,t} \cdot C_{r,t} + \sum_{m \in M} p_{W,m,r,t}^{TTC} \cdot W_{m,r,t} + p_{Y,A,r,t} \cdot I_{r,t} + w_{r,t} \cdot L_{r,t}^H$$

où $\bar{K}_{r,t}$ (resp. $\bar{L}_{r,t}$) est la dotation en capital (resp. en travail) du ménage de la région r à la date t ;

$r_{r,t}$ (resp. $w_{r,t}$) est le taux d'intérêt (resp. le salaire) ;

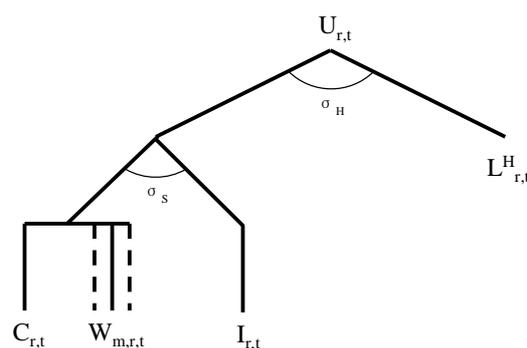
$T_{r,t}$ est le transfert reçu par le ménage ;

$C_{r,t}$ (resp. $I_{r,t}$) est le volume de consommation (resp. d'investissement) en bien générique et $p_{Y,A,r,t}$ son prix ;

$W_{m,r,t}$ est la quantité de service de traitement des déchets de matière m demandé par le ménage et $p_{W,m,r,t}^{TTC}$ son prix TTC ;

$L_{r,t}^H$ est la quantité de loisir du ménage.

Figure 2 : Structure de l'utilité des ménages



Note : $U_{r,t}$ est l'utilité du ménage. $C_{r,t}$ représente la consommation en bien générique du ménage de la région r à la date t , $W_{m,r,t}$ sa consommation en service de traitement des déchets (matière m), et $I_{r,t}$ son investissement. Le partage entre consommation et épargne s'effectue grâce à une fonction CES dont l'élasticité de substitution est σ_S . $L_{r,t}^H$ représente la quantité de loisir du ménage.

¹¹ Le travail est supposé parfaitement mobile entre les secteurs au sein de chaque région du monde, mais n'est pas mobile entre les régions. Cela assure un niveau unique de salaire dans chaque région du monde, ce niveau pouvant différer entre les régions. Ce point est abordé dans la partie 1.5.

1.3 Entreprises

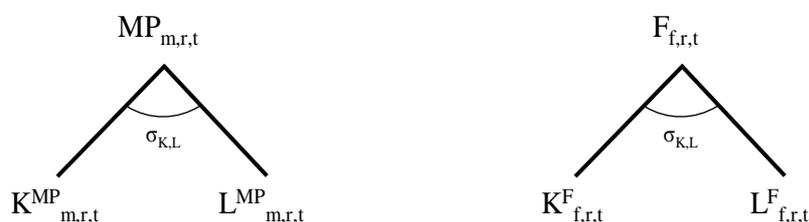
On décrit à présent la modélisation des entreprises, en abordant successivement le secteur de l'extraction minérale et fossile, le secteur du service de traitement des déchets, le secteur de production de l'électricité et le secteur de production du bien générique.

Dans chaque secteur productif, les entreprises sont considérées en concurrence pure et parfaite, chacune d'entre elle maximisant son profit sous sa contrainte technologique (fonction de production) à prix des intrants et des produits donnés. La résolution de ce programme leur permet de déterminer leur demande en intrants, compte tenu des niveaux donnés des prix.

1.3.1 Secteur de l'extraction minérale et fossile

L'extraction des matières première primaires du sol, qu'elles soient minérales ou fossiles, est réalisée à partir de capital et de travail, selon une technologie CES. L'utilisation de biens intermédiaires ou d'énergie¹² n'a pas été modélisée, pour des raisons de simplicité. La structure productive, pour chaque matière durable (minérale) et chaque matière non durable (fossile), est résumée par la figure 3.

Figure 3 : Structure des secteurs d'extraction minérale (gauche) et fossile (droite)



Note : $MP_{m,r,t}$ (resp. $F_{f,r,t}$), exprimé en unité physique, représente la production de matière minérale primaire (resp. matière fossile) de la région r à la date t , produite à partir du stock de capital $K^{MP}_{m,r,t}$ (resp. $K^F_{f,r,t}$) et de la quantité de travail $L^{MP}_{m,r,t}$ (resp. $L^F_{f,r,t}$), selon une élasticité de substitution $\sigma_{K,L}$.

1.3.2 Secteur du service de traitement des déchets

Le traitement des déchets est un secteur central pour un modèle s'intéressant à l'économie circulaire, car il relie les flux de matières en aval (matières contenues dans les déchets issus des biens en fin de vie) et les flux de matières en amont (matières primaires secondaires qui servent à produire de nouveaux biens finaux). Dans le modèle, ce secteur agrège différentes étapes du processus de gestion des déchets : collecte, transfert, traitement par stockage ou par recyclage¹³. Sa construction, novatrice par rapport à la littérature, répond à trois objectifs :

- assurer la conservation de la quantité physique de matière ;
- avoir un taux de recyclage endogène. On souhaite que la répartition des déchets entre chaque mode de traitement ne soit pas fixée de façon exogène mais résulte de mécanismes économiques : par exemple, le renchérissement du coût relatif d'un mode de traitement des déchets par rapport à un autre doit conduire à une baisse de la part du flux de déchets orienté vers ce mode ;
- disposer de propriétés économiques plausibles, et notamment une technologie de production homogène de degré 1. Autrement dit, doubler la taille de l'ensemble de l'économie doit être sans influence sur le taux de recyclage.

Deux modes de traitement des déchets sont modélisés : le traitement par stockage et le traitement par recyclage. L'égalisation de la demande de service de traitement des déchets (déchets produits par les ménages) à l'offre de traitement (somme des déchets stockés et des déchets recyclés) permet d'assurer la conservation de la quantité physique de matière à cette étape. Un corollaire est que la masse de matière secondaire produite à partir des déchets reste inférieure ou égale à la masse totale de déchets. À noter par ailleurs que les deux modes de traitement des déchets sont supposés être des substituts parfaits (marché unifié), ce qui implique qu'à l'équilibre les services de traitement des déchets par stockage et par recyclage ont un prix identique. Enfin, les modes de traitement des déchets sont caractérisés par les hypothèses polaires suivantes :

- les déchets envoyés en recyclage sont intégralement recyclés. L'achat par le ménage d'une unité du service de traitement des déchets par recyclage permet de traiter une unité physique de déchets et de produire une unité physique de matière secondaire ;

¹² L'étape du processus de production primaire de l'acier ou de l'aluminium requérant le plus d'énergie est la transformation du minerai en métal.

¹³ Les matières minérales prises en compte lors de la calibration étant métalliques, l'incinération n'est pas considérée.

- les déchets envoyés en installation de stockage n'induisent aucun recyclage. L'achat d'une unité du service traitement des déchets par stockage permet de stocker une unité physique de déchets.

Par ailleurs, le service de traitement des déchets par stockage, le service de traitement par recyclage et la matière secondaire sont considérés comme les produits d'une même entreprise représentative, utilisant par ailleurs du travail et du capital comme facteurs de production (selon une substitution de type CES). Compte tenu du prix de ces facteurs de production, du prix des services de traitement et de celui de la matière secondaire, l'entreprise choisit la répartition entre les modes de traitement qui maximise son profit, autrement dit la répartition optimale entre la quantité de déchets recyclés et la quantité de déchets stockés. Cette approche est rendue possible par l'utilisation d'une fonction de production de type CET¹⁴. Elle assure l'endogénéité du taux de recyclage : en effet, le taux de recyclage est défini comme la part des déchets recyclés dans le total des déchets traités, soit la part du service de traitement des déchets par recyclage dans le total du service de traitement des déchets, et résulte du comportement de l'entreprise représentative du service de traitement des déchets :

$$R_{m,r,t} = \frac{W_{m,r,t}^{RECY}}{W_{m,r,t}^{RECY} + W_{m,r,t}^{STOCK}} = \frac{(A_{m,r}^{RECY})^{-\theta_{w,m}} \cdot (p_{W,m,r,t}^{TTC} + P_{MS,m,r,t})^{\theta_{w,m}}}{(A_{m,r}^{RECY})^{-\theta_{w,m}} \cdot (p_{W,m,r,t}^{TTC} + P_{MS,m,r,t})^{\theta_{w,m}} + (A_{m,r}^{STOCK})^{-\theta_{w,m}} \cdot \left(\frac{p_{W,m,r,t}^{TTC}}{1 + \tau_{WSTOCK,m,r,t}} \right)^{\theta_{w,m}}}$$

où $W_{m,r,t}^{RECY}$ et $W_{m,r,t}^{STOCK}$ sont respectivement les quantités de déchets de matière m traités par recyclage et par stockage dans la région r à la date t ;

$p_{W,m,r,t}^{TTC}$ est le prix TTC du service de traitement des déchets ;

$\tau_{WSTOCK,m,r,t}$ est la taxe sur le traitement des déchets par stockage (TGAP déchets) ;

$p_{MS,m,r,t}$ est le prix de la matière secondaire ;

$\theta_{w,m}$ est l'élasticité de transformation entre les deux modes de traitement des déchets ;

$A_{m,r}^{RECY}$ et $A_{m,r}^{STOCK}$ sont des paramètres d'échelle.

L'utilisation de la fonction CET assure également l'homogénéité de degré 1 de la production de service de traitement des déchets : la hausse homothétique des facteurs de production est sans impact sur la répartition entre déchets recyclés et déchets stockés, donc sans effet sur le taux de recyclage.

En résumé, le secteur de traitement des déchets peut se voir comme une structure à trois étages :

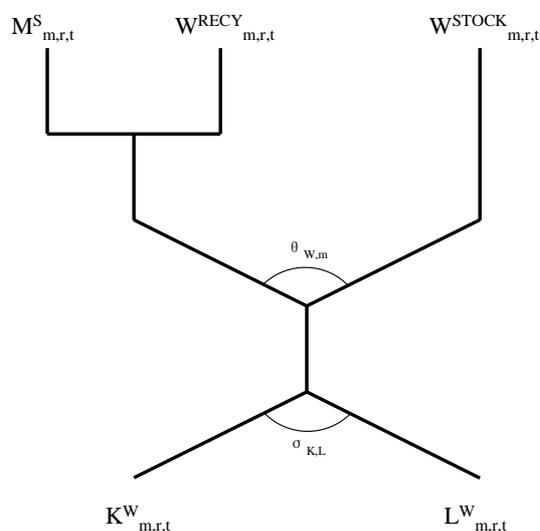
- les intrants (facteurs de production travail et capital) combinés par une fonction CES ;
- une fonction CET qui produit d'une part, le service de traitement par stockage et, d'autre part, un bien en deux parties¹⁵ ;
- le bien en deux parties étant constitué du service de traitement des déchets par recyclage et de la matière secondaire.

¹⁴ Cf. annexe 1. CET signifie *Constant Elasticity of Transformation*. Il s'agit d'une fonction CES « inversée ». Dans la littérature, la fonction de production CET est notamment utilisée pour modéliser la mise en concurrence des types de cultures possibles pour une surface de terre donnée (par exemple, une parcelle peut être utilisée soit pour cultiver du blé, soit des betteraves).

¹⁵ On peut interpréter ce nœud de la fonction de production (partie supérieure gauche sur la figure 4) comme une fonction Leontief inversée, utilisant un input et produisant deux outputs, avec des facteurs d'échelle égaux à 1.

Cette structure est schématisée sur la figure 4.

Figure 4 : Structure du secteur de traitement des déchets



Note : $M^S_{m,r,t}$, exprimé en unité physique, représente la quantité de matière secondaire produite. $W^{RECY}_{m,r,t}$ et $W^{STOCK}_{m,r,t}$, exprimés en unité physique, représentent respectivement les quantités de déchets recyclés et stockés, ou, de façon équivalente, les services de traitement des déchets par recyclage et par stockage. Ces services sont produits selon une fonction CET, d'élasticité de transformation $\theta_{W,m}$, à partir du capital et du travail (stock de capital $K^W_{m,r,t}$ et quantité de travail $L^W_{m,r,t}$ agencés selon une fonction CES d'élasticité de substitution $\sigma_{K,L}$).

1.3.3 Secteur de production de l'électricité

Le secteur de production de l'électricité est une version stylisée inspirée des nombreux modèles d'équilibre général calculable s'intéressant à l'énergie comme les modèles EPPA (Paltsev et al. 2005) ou ENV-Linkages (OECD, 2014). La production d'électricité dans le modèle s'effectue à partir de trois sources d'énergie (nucléaire, renouvelable ou fossile), chacun de ces processus étant modélisé sous la forme d'une fonction de production de type CES et les trois processus étant ensuite agencés en une fonction CES de production de l'électricité.

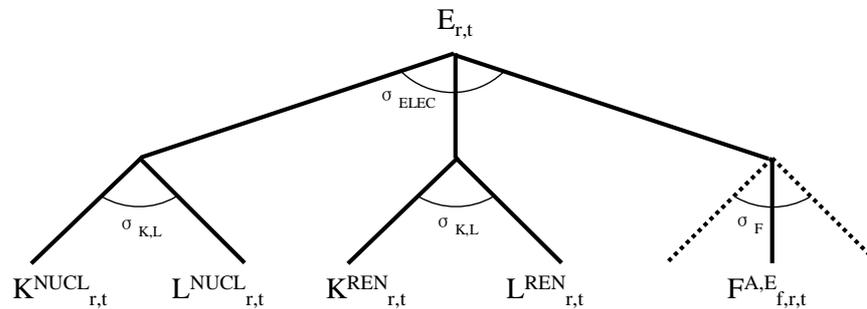
Par ailleurs, on fait les hypothèses polaires suivantes par souci de simplicité :

- s'agissant de la production d'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable, seuls les facteurs primaires, capital et travail, sont utilisés. Les consommations intermédiaires (par exemple de matières fissiles¹⁶ pour le nucléaire) ne sont pas considérées ;
- s'agissant de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles, seules les consommations intermédiaires de combustibles fossiles sont considérées comme intrants (pas de facteurs de production tels que le travail ou le capital).

¹⁶ Les coûts des combustibles fissiles ne représentent qu'une petite partie des coûts de la production d'électricité d'origine nucléaire : voir le rapport de la Cour des Comptes de 2014 sur le coût de production de l'électricité nucléaire pour plus de détail.

La structure productive est représentée sur la figure 5.

Figure 5 : Structure du secteur électricité



Note : $E_{r,t}$ représente la production d'électricité dans la région r à la date t . Cette production s'effectue selon une fonction CES d'élasticité de substitution σ_{ELEC} entre la production d'électricité d'origine nucléaire (à partir de capital $K^{NUCL}_{r,t}$ et de travail $L^{NUCL}_{r,t}$) et selon une fonction CES d'élasticité de substitution $\sigma_{K,L}$, d'origine renouvelable (à partir de capital $K^{REN}_{r,t}$ et de travail $L^{REN}_{r,t}$) et d'origine fossile (à partir d'énergies fossiles $FA,E_{f,r,t}$ selon une fonction CES d'élasticité de substitution σ_F).

1.3.4 Secteur de production du bien générique

Le secteur de production du bien générique, appelé aussi secteur générique, modélise le fonctionnement de l'ensemble du tissu productif de l'économie, hormis pour les secteurs précédemment décrits. La fonction de production de ce secteur est de type « KLEM », c'est-à-dire prenant comme intrants du capital, du travail, de l'énergie et des matières. Elle est construite à partir de fonctions CES « emboîtées ». Ces choix de modélisation sont usuels dans les modèles macroéconomiques d'équilibre général calculable.

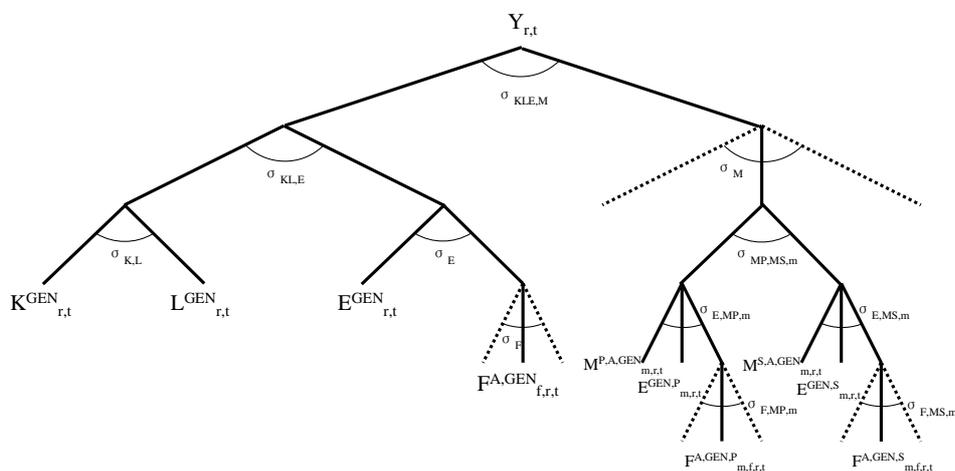
Plus précisément, la structure productive est la suivante :

- la production de bien générique résulte d'une fonction CES entre un agrégat composite « capital-travail-énergie » et un agrégat composite « matières minérales » ;
- l'agrégat composite « capital-travail-énergie » résulte d'une fonction CES entre une CES « capital-travail » et une CES « électricité-matières fossiles ». À noter que dans la CES « électricité-matières fossiles », l'électricité est produite selon la structure décrite précédemment (1.3.3) tandis que l'agrégat « matières fossiles » est une CES des différentes matières fossiles considérées (pétrole, charbon et gaz), ces dernières étant produites selon la structure décrite au 1.3.1 ;
- l'agrégat composite « matières minérales » est une fonction CES entre les matières. Chaque matière résulte d'une fonction CES entre un agrégat composite « matière primaire-électricité-matières fossiles » et un agrégat composite « matière secondaire-électricité-matières fossiles », traduisant l'imparfaite substitution entre la matière primaire et la matière secondaire¹⁷ ;
- l'agrégat composite « matière primaire-électricité-matières fossiles » (sidérurgie primaire) résulte d'une fonction CES entre la matière primaire (produite selon la structure décrite au 1.3.1), l'électricité (produite selon la structure décrite au 1.3.3) et l'agrégat « matières fossiles », elle-même CES des différentes matières fossiles considérées, produites chacune selon la structure décrite au 1.3.1 ;
- enfin, l'agrégat composite « matière secondaire-électricité-matières fossiles » (sidérurgie secondaire) est analogue au précédent, excepté pour la matière secondaire dont la structure productive a été décrite au 1.3.2.

¹⁷ Même si les éléments physique fer (Fe) et aluminium (Al) reste inchangés après une première utilisation, la matière secondaire peut contenir d'autres éléments physiques (impuretés provenant de la difficulté à déconstruire les biens et donc à séparer les matières, ajout d'autres éléments physiques lors de la production d'alliages primaires) qui font que matières primaire et secondaire n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques et ne sont donc pas des substituts parfaits.

La figure 6 résume cette structure productive. L'apport du modèle, en termes de modélisation de secteur productif de type KLEM, est de considérer explicitement les demandes de matières primaires et secondaires. De plus, pour chaque matière et chaque type d'utilisation (utilisation sous forme primaire ou secondaire), un mix énergétique détaillé est utilisé, pour refléter les besoins énergétiques des différentes utilisations¹⁸.

Figure 6 : Structure du secteur générique



Note : $Y_{r,t}$ représente la production de bien générique dans la région r à la date t . Cette production s'effectue selon une fonction CES d'élasticité de substitution $\sigma_{KLE,M}$ entre un agrégat « capital-travail-énergie » et un agrégat « matières minérales ». L'agrégat « capital-travail-énergie » est une fonction CES d'élasticité de substitution σ_{KLE} entre un agrégat « capital-travail » (fonction CES d'élasticité de substitution σ_{KL} entre le capital $K_{r,t}^{GEN}$ et le travail $L_{r,t}^{GEN}$) et entre un agrégat « électricité-matières fossiles » (fonction CES d'élasticité de substitution σ_E entre l'électricité $E_{r,t}^{GEN}$ et l'agrégat « matières fossiles », lui-même CES d'élasticité de substitution σ_F entre les matières fossiles $F_{r,t}^{A,GEN}$). L'agrégat « matières minérales » est une fonction CES d'élasticité de substitution σ_M entre les matières minérales m . Chaque matière minérale m est une fonction CES d'élasticité de substitution $\sigma_{MP,MS,m}$ entre un agrégat « matière primaire-électricité-matières fossiles » (CES d'élasticité de substitution $\sigma_{E,MP,m}$ entre la matière primaire utilisée $M_{m,r,t}^{P,A,GEN}$, l'électricité $E_{m,r,t}^{GEN,P}$ et les matières fossiles $F_{m,r,t}^{A,GEN,P}$) et un agrégat « matière secondaire-électricité-matières fossiles » (CES d'élasticité de substitution $\sigma_{E,MS,m}$ entre la matière secondaire utilisée $M_{m,r,t}^{S,A,GEN}$, l'électricité $E_{m,r,t}^{GEN,S}$ et les matières fossiles $F_{m,r,t}^{A,GEN,S}$).

1.4 État

La modélisation de l'action publique se limite à la seule présence de quatre taxes, générant des recettes fiscales transférées intégralement et forfaitairement à chaque date et dans chaque région aux ménages. Le budget de l'État est donc équilibré à chaque date et dans chaque région. Les taxes modélisées portent sur certains biens contenant de la matière durable ou non durable, de façon à limiter les pressions environnementales liées aux flux de matières.

Les quatre taxes considérées sont les suivantes :

- une taxe sur la consommation de matière minérale primaire durable ;
- une taxe sur la consommation du service de traitement des déchets par stockage, équivalente à une taxe sur la quantité de déchets non recyclés et par conséquent assimilable à la taxe générale sur les activités polluantes portant sur les installations de traitement des déchets (TGAP déchets) ;
- une taxe sur la consommation d'énergie fossile, proportionnelle au contenu du CO₂ des matières fossiles, c'est-à-dire une taxe carbone. Pour cette taxe, l'activité métallurgique (qu'elle soit liée à de la matière primaire ou secondaire) ainsi que le secteur électricité, sont exonérés, en conformité à la situation existante ;
- une taxe sur la consommation d'électricité, assimilable à la taxe intérieure sur la consommation d'électricité (TICFE). Pour cette taxe, l'activité métallurgique (qu'elle soit liée à de la matière primaire ou secondaire) est exonérée, également conformément à la situation existante.

¹⁸ La production d'acier primaire requiert du coke de charbon, tandis que la production d'aluminium primaire requiert de l'électricité et du coke de pétrole (pour produire l'anode, qui se détruit lors du processus d'électrolyse). La production secondaire requiert de la chaleur pour faire fondre les déchets métalliques, chaleur produite à partir d'électricité ou de matière fossile.

1.5 Modélisation de l'économie ouverte

Les matières minérales métalliques et fossiles étant très largement issues de l'importation en France, la prise en compte des interdépendances entre les économies est primordiale. Comme mentionné plus haut, le modèle comporte deux « régions » : la France et le reste du monde. Chacune de ces deux régions fait l'objet d'une modélisation formellement identique, telle que décrite précédemment et intégrant notamment les échanges entre l'une et l'autre.

Parmi les huit grands types de biens intersectoriels que comporte le modèle, quatre font parties de marchés ouverts et sont donc échangeables entre régions (bien générique, matières minérales primaires, matières minérales secondaires et matières fossiles) et quatre de marchés fermés (travail, capital, électricité et service de traitement des déchets). En effet, le travail est un facteur de production supposé de manière générale peu mobile. Le capital, à l'inverse, est mobile mais son incorporation dans un marché ouvert nécessiterait des développements sur les marchés financiers, hors du champ de ce modèle. L'électricité peut être considérée comme non échangeable compte tenu de la faible part de sa production qui se trouve exportée. Le service de traitement des déchets, enfin, est difficilement délocalisable, du moins s'agissant de la collecte, et est soumis par ailleurs à des contraintes réglementaires (notamment la directive-cadre européenne sur les déchets 2008/98/CE qui pose le principe de proximité de la gestion des déchets, c'est-à-dire de « gérer les déchets au plus près du lieu de production »).

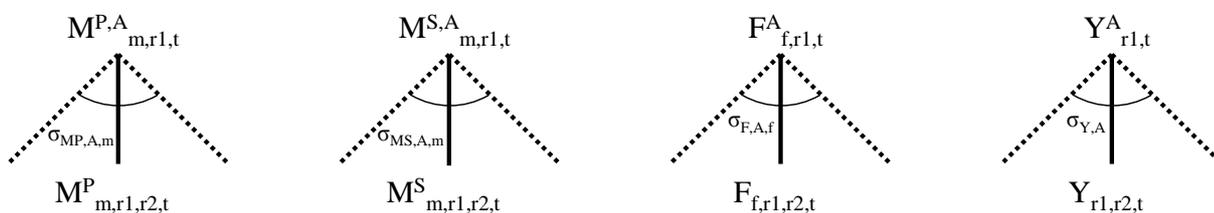
Les biens échangeables produits dans chaque région sont supposés imparfaitement substituables, dans la mesure où leurs caractéristiques ne sont pas totalement identiques, où les échanges entre régions peuvent faire face à différentes contraintes, et où les ménages de chaque région peuvent avoir une préférence pour les biens produits domestiquement. L'hypothèse usuelle d'Armington, qui repose sur l'utilisation de fonctions de type CES, a été retenue pour caractériser la substituabilité imparfaite entre le bien domestique et le bien importé. Par exemple, au niveau du bien générique, la demande de bien générique par les ménages s'égalise à une offre de bien générique « agrégé », constituée de bien générique produit nationalement et de bien générique importé. Celle-ci s'écrit :

$$Y_{r_1,t}^A = \left(\sum_{r_2 \in R} A_{r_1,r_2}^{Y,A} (Y_{r_1,r_2,t}^{Y,A})^{\frac{\sigma_{Y,A}-1}{\sigma_{Y,A}}} \right)^{\frac{\sigma_{Y,A}}{\sigma_{Y,A}-1}}$$

- où $A_{r_1,t}$ est l'offre de bien générique agrégé de la région r_1 à la date t ;
 $Y_{r_1,r_2,t}^{Y,A}$ est la demande de bien générique par la région r_1 et produit par la région r_2 ;
 $\sigma_{Y,A}$ est l'élasticité d'Armington ;
 les $A_{r_1,r_2}^{Y,A}$ sont des paramètres d'échelle.

Conformément à l'hypothèse d'Armington, la demande de bien échangeable, dans chaque région modélisée, s'écrit comme l'agrégation, par une fonction de type CES, des demandes des biens produits par les différentes régions. Ceci vaut pour les matières minérales primaires, les matières minérales secondaires, les matières fossiles et le bien générique. La figure 7 schématise cette structure.

Figure 7 : Marchés ouverts : matière minérale primaire, matière minérale secondaire, matière fossile, bien générique (de gauche à droite)



Note : $MP_{m,r1,t}^{P,A}$ (resp. $MS_{m,r1,t}^{S,A}$, $F_{f,r1,t}^A$, $Y_{r1,t}^A$) représente la matière minérale primaire (resp. matière minérale secondaire, matière fossile, bien générique) utilisée dans la région r_1 , qui est un agrégat l'ensemble des matières minérales primaires $MP_{m,r1,r2,t}^P$ (resp. matières minérales secondaires $MS_{m,r1,r2,t}^S$, matières fossiles $F_{f,r1,r2,t}$, biens génériques $Y_{r1,r2,t}$) produites dans les régions r_2 et destination de la région r_1 . Cette agrégation s'effectue selon une fonction CES d'élasticité de substitution $\sigma_{MP,A,m}$ (resp. $\sigma_{MS,A,m}$, $\sigma_{F,A,f}$, $\sigma_{Y,A}$) qui traduit l'imparfaite substitution entre les biens produits dans les différentes régions. L'exposant « A » dans les notations rappelle que l'hypothèse d'Armington est utilisée.

1.6 Équilibre des marchés

Chacun des marchés correspondant aux huit types de biens intersectoriels du modèle est équilibré à chaque date et dans chaque région, traduisant l'égalité de l'offre et de la demande de ces biens. Les équations d'équilibre des marchés figurent en annexe 3.

Sur le marché du capital, l'offre est constituée des dotations à chaque date du ménage représentatif, tandis que la demande est constituée de la demande du secteur générique, des secteurs extractifs (extraction des matières minérales et des énergies fossiles), du secteur de production de l'électricité et des secteurs de traitement des déchets (traitement des différentes matières minérales). Il en est de même de l'équilibre du marché du travail, hormis le fait que l'offre de travail dépend du choix du ménage de consacrer plus ou moins de temps au loisir.

Sur le marché du service de traitement des déchets, l'offre de service provient des deux « bras » du secteur (traitement par stockage et traitement par recyclage), tandis que la demande de service provient du ménage.

Sur le marché de l'électricité, l'offreur est le secteur de production d'électricité tandis que le demandeur est le secteur générique (dont la demande peut se décomposer en demande d'électricité hors sidérurgie, et pour chaque matière, demande d'électricité pour la sidérurgie primaire et pour la sidérurgie secondaire).

Pour les biens échangeables avec le reste du monde, l'équilibre des marchés correspondant est plus complexe car faisant intervenir les flux exportés et importés des biens considérés, ainsi que les élasticités d'Armington associées. Par exemple, s'agissant du bien générique, l'offre de bien générique produit en France s'égalise avec les demandes provenant de France (demande des ménages français pour le bien générique produit en France) et du reste du monde (demande des ménages étrangers pour le bien générique produit en France), soit, dans le cas général d'un modèle à r régions :

$$Y_{r1,t} = \sum_{r2} Y_{r2,r1,t}$$

Par ailleurs, la demande de bien générique par les ménages français (consommation et investissement de ce bien) s'égalise avec l'offre de bien générique issu de l'hypothèse d'Armington, la construction de ce bien étant décrite à la section 1.5. Soit, dans le cas général d'un modèle à r régions :

$$Y_{r,t}^A = C_{r,t} + I_{r,t}$$

Des équations analogues valent pour les autres biens échangeables avec le reste du monde : matières minérales primaires, matières minérales secondaires, matières fossiles.

La figure 1 fournit une représentation visuelle des offreurs et demandeurs pour chaque bien.

À noter que l'équilibre des différents marchés, associé à la contrainte budgétaire des ménages et aux conditions de zéro profit des entreprises, implique également l'équilibre de la balance commerciale. À chaque date, les exportations des biens échangeables en valeur sont égales aux importations en valeur :

$$\begin{aligned} & P_{Y,France,t} \cdot Y_{RDM,France,t} \\ & + \sum_m \left(p_{MP,m,France,t} \cdot M_{m,RDM,France,t}^P + p_{MS,m,France,t} \cdot M_{m,RDM,France,t}^S \right) + \sum_f p_{F,f,France,t} \cdot F_{f,RDM,France,t} \\ & = P_{Y,RDM,t} \cdot Y_{France,RDM,t} \\ & + \sum_m \left(p_{MP,m,RDM,t} \cdot M_{m,France,RDM,t}^P + p_{MS,m,RDM,t} \cdot M_{m,France,RDM,t}^S \right) + \sum_f p_{F,f,RDM,t} \cdot F_{f,France,RDM,t} \end{aligned}$$

Cette spécificité du modèle peut se justifier dans la mesure où, sur le long terme, qui est le terrain de prédilection des modèles d'équilibre général calculable, il est peu vraisemblable que la position extérieure nette d'une région reste fortement déséquilibrée. Un ajustement de la balance commerciale est alors prévisible. Dans notre modèle, l'équilibre est réalisé à chaque date par l'ajustement du taux de change réel, rapport entre le niveau des prix domestiques et celui des prix étrangers, qui, en l'absence de rigidités sur les prix, est parfaitement flexible. Ce mécanisme ne serait plus possible dans le cadre d'une économie en change fixe ou en union monétaire¹⁹ où, pour équilibrer la position extérieure nette de chaque région du monde, il serait alors nécessaire de modéliser les flux de capitaux entre régions.

¹⁹ La modélisation de l'économie française en change fixe dans la zone euro, la zone euro étant en change flexible avec le reste du monde, pourrait constituer un prolongement intéressant du modèle.

1.7 Dynamique du modèle

Les parties précédentes se sont concentrées sur la description des comportements à une date donnée, dans un cadre statique. On aborde à présent la dynamique du modèle, c'est-à-dire les mécanismes qui le font évoluer de la date t à la date $t + 1$. Ceux-ci reposent sur trois facteurs :

- l'accumulation du capital, du fait de l'investissement effectué par les ménages ;
- la croissance exogène de la population ;
- l'accroissement de la productivité du travail dans l'ensemble des secteurs et de la productivité globale des facteurs dans les secteurs extractifs.

L'accumulation du capital suit une dynamique du type du modèle de Solow : le capital à un instant $t+1$ est égal au capital en t déprécié, auquel s'ajoute l'investissement des ménages :

$$\bar{K}_{r,t+1} = (1 - \delta_r) \bar{K}_{r,t} + I_{r,t}$$

Par ailleurs, la population active croît à un taux exogène.

Enfin, l'ensemble des secteurs est supposé intégrer une efficacité de travail augmentant selon un taux de croissance exogène. Dans les secteurs extractifs, la productivité globale des facteurs dépend, de façon décroissante, de la somme des extractions passées.

$$A_{m,r,t+1}^{\text{extraction minérale}} = \phi_{m,r} \left(\sum_{\tau \leq t} M_{m,r,\tau}^P \right) \text{ et } A_{f,r,t+1}^{\text{extraction fossile}} = \phi_{f,r} \left(\sum_{\tau \leq t} F_{f,r,\tau} \right)$$

où les fonctions ϕ sont décroissantes (cf. annexe 3.11). Cette approche a le mérite de capter de façon simple et pragmatique la complexité des mécanismes à l'origine de l'épuisement des ressources non renouvelables, que le modèle n'a pas vocation à expliquer (cf. encadré 1).

Encadré 1 : Le mécanisme d'épuisement des ressources épuisables

Même si la nature épuisable des ressources a été théorisée par Hotelling (1931), le mécanisme d'épuisement des ressources épuisables reste difficile à modéliser du fait de la nature complexe du phénomène. Brandt (2010) en livre un état des lieux :

- les ressources les moins coûteuses sont usuellement extraites en premier (« *least cost principe* », avec par ailleurs des exceptions théoriques). Le coût marginal d'extraction augmente ainsi petit à petit ;
- les marchés ne sont pas parfaitement concurrentiels (existence de monopoles ou de cartels, droits de propriétés imparfaits, existence de comportements stratégiques destinés à freiner l'entrée de substituts) ;
- le niveau technologique varie avec le temps, pouvant en outre être endogène aux conditions de marché (le renchérissement du prix d'une ressource stimule l'exploration) ;
- la taille des stocks existants, pour lesquels il existe plusieurs définitions géologiques ou économiques (réserves prouvées, réserves probables, ressources présumées, ressources spéculatives, comme détaillé dans Rotillon, 2010), est incertaine ;
- les ressources non renouvelables peuvent être substituées par d'autres ressources non renouvelables (les terres rares nécessaires à la fabrication de lampe à économie d'énergie fluorescence ne sont pas les mêmes que les terres rares nécessaires à la fabrication de lampes à économie d'énergie à technologie LED) ou par d'autres ressources renouvelables (énergie solaire à la place d'énergie fossile). Ces substituts, lorsqu'ils sont abondants, sont désignés dans la littérature comme des ressources « *backstop* ».

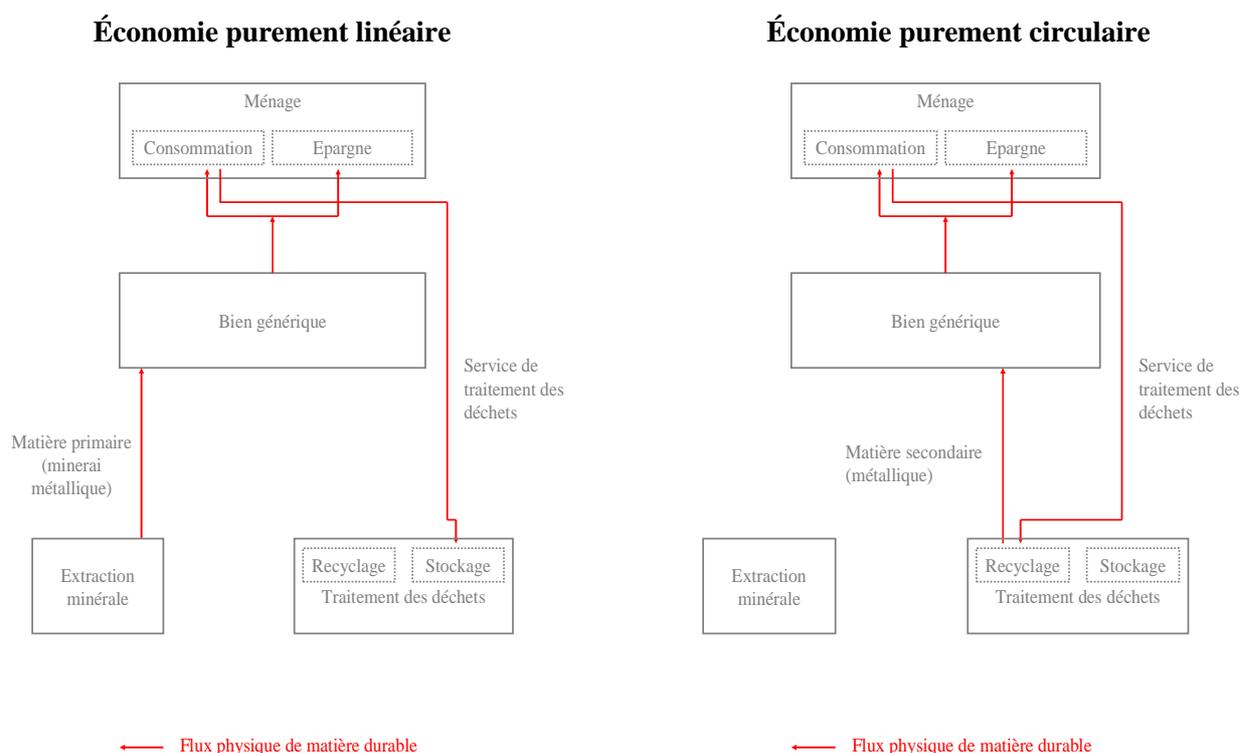
1.8 Deux situations polaires : l'économie purement linéaire et l'économie purement circulaire

Après cette description théorique du modèle et afin d'illustrer concrètement les concepts d'économie linéaire et circulaire qui y sont associés, on a représenté schématiquement les flux de matières minérales et les agents économiques modélisés (figure 8).

Deux modes de fonctionnement polaires de l'économie peuvent être distingués, entre lesquels toute économie peut se situer :

- **l'économie purement linéaire**, qui est le mode de fonctionnement historique de l'économie en matière de gestion des ressources durables. Après une phase d'extraction, la matière est utilisée afin de produire des biens finaux, qui sont consommés ou investis afin de participer à l'accumulation de capital physique. Les biens consommés sont éliminés et les déchets stockés dans le sol ;
- **l'économie purement circulaire**, qui peut être vue comme une situation de long terme vers laquelle tendre afin de réduire les pressions sur l'environnement liées au caractère épuisable des ressources et à la gestion des déchets. L'économie fonctionne exclusivement avec les ressources déjà en circulation dans l'économie. Après utilisation, les biens finaux qui ne participent pas à l'accumulation de capital physique produisent des déchets qui sont recyclés, permettant de produire de nouveaux biens finaux. Aucune matière primaire n'est utilisée. Une telle économie suppose, outre le développement du recyclage, une réduction importante de l'intensité matières des biens finaux.

Figure 8 : Représentation d'une économie purement linéaire (gauche) et purement circulaire (droite) : mise en évidence des agents économiques du modèle impliqués et des flux physiques de matière durable (minérale)



Note : Par souci de simplicité, seuls les flux de matières durables sont représentés.

2. Calibration

La partie précédente a décrit de façon théorique les comportements des agents économiques présents dans le modèle. On aborde à présent des aspects plus empiriques, consacrés notamment à la calibration du modèle. En premier lieu, il s'agit de déterminer le champ du modèle, c'est-à-dire la nature des matières minérales et fossiles modélisées. La calibration consiste dès lors à assigner une valeur aux paramètres du modèle, de façon à pouvoir le simuler numériquement.

Dans la mesure où l'écriture du modèle permet de le résoudre séquentiellement date après date (*recursive dynamic*), il est possible d'en calibrer d'abord les paramètres relatifs à l'équilibre statique (calibration statique), puis ceux relatifs à la dynamique du modèle (calibration dynamique). La stratégie de calibration statique distingue deux cas de figure :

- les paramètres structurels (élasticités de substitution ou de transformation des fonctions CES/CET), qui peuvent être calibrés à partir de valeurs documentées dans la littérature, du fait d'études consacrées à leur estimation ou de modèles intégrant également ce genre de paramètres ;
- les autres paramètres (paramètres d'échelle) sont calibrés de façon indirecte, à partir des données de flux économiques (ou physiques) et de prix des intrants sur une année donnée (année de base). Autrement dit, la calibration de ces paramètres vise à ce que le modèle puisse répliquer des flux économiques (ou physiques) et des prix cohérents avec les données de l'année de base.

2.1 Champ du modèle : deux matières minérales (acier et aluminium) et trois matières fossiles (pétrole, charbon et gaz)

Le choix des matières modélisées, qu'elles soient durables ou non, est guidé par des questions de disponibilité des données et d'importance économique des matières concernées (les deux enjeux n'étant pas sans lien).

Les matières durables considérées sont des métaux non précieux : l'acier (plus précisément, les métaux ferreux) et l'aluminium. En effet, leurs interactions avec l'économie sont aisément identifiables²⁰. En outre, l'acier est le métal le plus utilisé au monde en termes de quantités, tandis que l'aluminium est le second (près de 1 000 Mt consommées pour l'acier et environ 37 Mt pour l'aluminium en 2005, selon l'U.S. Geological Survey, 2008). De ce fait, il existe des données détaillées sur les quantités échangées et sur leurs prix, à la fois pour la matière primaire et la matière secondaire. L'aluminium est par ailleurs souvent cité comme exemple de matériau dont la production à partir de déchets nécessite nettement moins d'énergie qu'à partir de minerai (90 % à 95 % d'énergie économisée, voir Chen et Graedel, 2012). Enfin, il existe en France une production primaire et secondaire d'acier et d'aluminium.

Les matières non durables considérées sont les principales énergies fossiles : pétrole, charbon et gaz. La bonne disponibilité des données sur l'énergie permet une couverture large de cette thématique par le modèle. Par souci de simplification, les usages non énergétiques des ressources mentionnées ne sont pas considérés.

2.2 Calibration statique

2.2.1 Calibration des paramètres structurels

La calibration statique débute par celle des paramètres structurels statiques du modèle, c'est-à-dire les élasticités de substitution ou de transformation des différentes formes fonctionnelles présentes dans le modèle (fonctions de production, utilité des ménages).

Pour les élasticités relatives aux nœuds usuellement présents dans les modèles d'équilibre général calculable, c'est-à-dire en dehors de l'arbitrage entre matières primaire et secondaire et entre modes de traitement des déchets, les valeurs proviennent essentiellement des modèles EPPA et ENV-Linkages ainsi que de Hertel, Hummels, Ivanic et Keeney (2007) pour les élasticités d'Armington. En particulier :

- on retient une élasticité de substitution unitaire entre le travail et le capital (ce qui signifie que ces deux facteurs sont combinés suivant une fonction Cobb-Douglas) au niveau de tous les secteurs qui utilisent du capital et du travail (secteurs du bien générique, de l'électricité, de l'extraction de matières minérales ou de matières fossiles, du traitement des déchets) ;
- l'élasticité de substitution entre acier et aluminium est fixée à 0,1 (faible substituabilité entre ces deux matières), qui est également la valeur retenue pour la substitution entre matière minérale et énergie ainsi qu'entre matières fossiles pour la sidérurgie (faible substituabilité due aux contraintes techniques de la production sidérurgique). Les autres types de substitution (intra-énergies, entre l'agrégat capital-travail et l'énergie, entre l'agrégat capital-travail-énergie et les matières minérales) sont supposés légèrement plus élevés (élasticités de substitution de 0,5, sauf pour la substitution entre matières fossiles où l'élasticité est de 0,9) ;

²⁰ Même lorsqu'ils sont utilisés dans un alliage, les éléments Fe et Al constituent usuellement l'élément majoritaire de l'alliage considéré, ce qui ne serait par exemple pas le cas des terres rares.

- les élasticités d'Armington sont fixées à 3 pour le bien générique et à 6 pour les matières minérales ou fossiles (traduisant une forte substitution entre consommation domestique et consommation importée) ;
- enfin, l'élasticité des ménages est caractérisée de façon usuelle par une élasticité de substitution unitaire²¹ entre la consommation et l'investissement (fonction Cobb-Douglas) et une substitution plus élevée²² entre le loisir et la consommation-investissement (élasticité de substitution de 2).

La calibration des paramètres structurels relatifs à l'arbitrage entre matières primaire et secondaire et entre modes de traitement des déchets porte sur deux paramètres : d'une part, l'élasticité de substitution entre matières primaire et secondaire, et, d'autre part, l'élasticité de transformation entre traitement des déchets par recyclage et par stockage. Pour la première, on retient les valeurs données dans Mannaerts (2004), à savoir des élasticités de substitution entre matière primaire et matière secondaire assez élevées : 3 pour l'acier et 2 pour l'aluminium. Pour la seconde, on utilise l'élasticité-prix de l'offre de matière secondaire, estimée à 0,39 pour l'acier dans Söderholm et Ejdemo (2008) et à 0,21 pour l'aluminium dans Blomberg et Söderholm (2009). Les élasticités de transformation entre traitement des déchets par recyclage et par stockage correspondantes²³ sont assez faibles : 1,2 pour l'acier de 0,2 pour l'aluminium.

Il convient de noter que les élasticités de substitution et de transformation sont identiques pour la France et le reste du monde, comme dans la plupart des modèles mondiaux à plusieurs régions existant. En revanche, la calibration des paramètres structurels relatifs à l'économie circulaire fait intervenir une distinction entre l'acier et l'aluminium, tant au niveau de l'arbitrage entre matières primaire et secondaire qu'au niveau de l'arbitrage entre modes de traitement des déchets.

Tableau 1 : Paramètres structurels (élasticités de substitution et de transformation) de l'équilibre statique

Description du paramètre	Notation	Calibration
Élasticités de substitution hors économie circulaire		
entre le loisir et l'agrégat consommation-épargne	σ_H	2
entre consommation et épargne	σ_S	1
entre l'agrégat capital-travail et l'énergie	σ_{KLE}	0,5
entre capital et travail	σ_{KL}	1
entre l'électricité et les matières fossiles	σ_E	0,5
entre matières fossiles	σ_F	0,9
entre modes de production d'électricité	σ_{ELEC}	0,5
Élasticités spécifiques à l'économie circulaire		
substitution entre l'agrégat capital-travail-énergie et les matières minérales	$\sigma_{KLE,M}$	0,5
substitution entre métaux	σ_M	0,1
substitution entre matière primaire et matière secondaire	$\sigma_{MP,MS,m}$	3 (acier), 2 (aluminium)
substitution entre la matière minérale (primaire ou secondaire), l'électricité et les matières fossiles	$\sigma_{E,MP,m}, \sigma_{E,MS,m}$	0,1
substitution entre matières fossiles (au sein de la sidérurgie primaire et secondaire)	$\sigma_{F,MP,m}, \sigma_{F,MS,m}$	0,1
transformation entre traitement des déchets par recyclage et traitement des déchets par stockage	$\theta_{W,m}$	1,2 (acier), 0,2 (aluminium)
Élasticités d'Armington		
entre biens génériques produits dans les différentes régions du monde	$\sigma_{Y,A}$	3
entre matières minérales primaires extraites dans les différentes régions du monde	$\sigma_{MP,A,m}$	6
entre matières minérales secondaires produites dans différentes régions du monde	$\sigma_{MS,A,m}$	6
entre matières fossiles extraites dans les différentes régions du monde	$\sigma_{F,A,f}$	6

²¹ Une conséquence de cette élasticité unitaire est que le taux d'investissement (égal au taux d'épargne) est exogène.

²² Cf. Boeters et Savard (2013).

²³ Le passage de l'élasticité-prix à l'élasticité de transformation est réalisé à prix des intrants du secteur de traitement des déchets (capital et travail) fixés et à quantité totale de déchets à traiter fixée.

2.2.2 Calibration des flux de matières minérales et fossiles ainsi que des flux économiques

Il s'agit ensuite de calibrer les flux physiques du modèle, les prix des matières associées et les principaux agrégats économiques, pour en déduire les valeurs des paramètres d'échelle des fonctions CES et CET du modèle. Pour cela, on calibre d'abord les secteurs relatifs aux matières minérales (acier, aluminium), aux matières fossiles (pétrole, charbon et gaz) et à l'électricité. La calibration du secteur générique s'en déduit par solde, en connaissant les données macroéconomiques dans les deux régions du modèle. L'année de calibration correspond à l'année 2012, la plus récente du point de vue des données disponibles sur l'acier et l'aluminium.

Concernant l'acier et l'aluminium, le modèle est calibré de manière à ce que leurs flux physiques respectent la conservation de la masse, conformément aux hypothèses de modélisation :

- en premier lieu, on calibre les flux en amont de la production du bien générique (flux intrants de matières primaires et de matières secondaires) dans la mesure où les données nécessaires sont connues avec précision, à partir des niveaux de productions primaires et secondaires des secteurs métallurgiques ;
- le contenu en acier et aluminium du bien générique de chaque région modélisée s'en déduit. Sous l'hypothèse d'homogénéité du bien, permettant d'appliquer un *prorata*²⁴, on en déduit également le contenu en acier et aluminium du bien générique issu de l'hypothèse d'Armington ;
- le partage du bien générique entre consommation (supposée produire instantanément une quantité de déchets égale à la masse de matière contenue dans le bien consommé) et investissement (dont la matière est supposée s'accumuler intégralement dans les infrastructures), permet alors de déterminer la quantité de déchets produits, conformément à l'hypothèse de conservation de la masse de matière.

Les données nécessaires à cette étape de la calibration sont issues pour l'acier de la Fédération Française de l'Acier (2013) et la *World Steel Association* (2015), et pour l'aluminium de l'Association Française de l'Aluminium et de la *World Aluminium*²⁵. Les flux d'acier et d'aluminium, ainsi calibrés dans le modèle pour la France et le reste du monde, sont représentés en annexe 4. Ils rendent compte de la taille de la France comme « petite économie ouverte » par rapport au reste de l'économie mondiale :

- les masses d'acier et d'aluminium primaires, utilisés en France dans le processus de production ou échangés avec le reste du monde, sont faibles par rapport aux flux dans le reste du monde ;
- les quantités d'acier et d'aluminium traités par le service de traitement des déchets sont également faibles par rapport au reste du monde.

Les flux physiques rendent compte également de la dépendance de l'économie française à la matière primaire (minerai) : le minerai de fer (pour produire de l'acier) et la bauxite (pour produire de l'aluminium) dans le processus de production primaire proviennent des importations²⁶. En revanche, presque la moitié de la matière secondaire (déchets métalliques) issue du traitement des déchets par recyclage est exportée²⁷.

Il convient de noter que la méthode de calibration choisie peut conduire à des flux physiques différents de ceux découlant d'une méthode fondée sur un grand nombre de biens différents ou d'une estimation directe des flux de déchets par catégorie. Elle présente néanmoins l'avantage de la simplicité et de la cohérence macroéconomique des flux.

Concernant les matières fossiles et l'électricité, il n'y a pas de circularité des flux de matière à respecter. Les données utilisées, disponibles de façon détaillée, proviennent pour la France du bilan énergétique de la France pour 2012 (SOeS, 2013a) et pour le reste du monde du *World Energy Outlook 2014* (Agence internationale de l'énergie, 2014) et du *Key World Energy Statistics 2014* (Agence internationale de l'énergie, 2014). Par ailleurs, la quantité d'énergie ainsi que le mix nécessaires à la production de métal à partir de minerai métallique et de déchets métalliques proviennent de rapports et d'échanges avec les associations de l'acier et de l'aluminium, notamment, pour l'aluminium, *International Aluminium Institute* (2013) et la *European Aluminium Association* (2013b). Les flux de matières fossiles (pétrole, charbon et gaz), calibrés dans le modèle pour la France et le reste

²⁴ Lorsqu'un flux économique se divise en plusieurs parties, les flux physiques associés sont supposés suivre la même répartition.

²⁵ Statistiques disponibles sur les sites internet des associations.

²⁶ Le minerai de fer utilisé en France en 2012 provient en majorité du Brésil et du Canada (respectivement 56 % et 25 % des importations en masse), tandis que la bauxite provient principalement de Guinée et de Grèce (respectivement 77 % et 15 % des importations en masse). Source : données douanières.

²⁷ Les échanges de déchets ferreux et d'aluminium en provenance ou à destination de la France sont en majorité réalisés avec des pays européens. Pour les déchets ferreux, les premières destinations sont la Belgique (25 %), l'Espagne (25 %), le Luxembourg (14 %) et l'Italie (12 %), tandis que les premières provenances sont l'Allemagne (35 %), la Belgique (23 %) et le Royaume-Uni (17 %). Pour les déchets d'aluminium, les premières destinations sont l'Italie (22 %), l'Espagne (17 %), la Belgique (15 %) et l'Allemagne (14 %), tandis que les premières provenances sont l'Allemagne (35 %), la Belgique (17 %) et le Royaume-Uni (8 %). Source : données douanières.

du monde, sont représentés en annexe 4. Ils rendent compte en particulier, tant pour la France que pour le reste du monde, des caractéristiques du mix électrique et du mix énergétique, relativement à l'année 2012.

Une fois traités les flux physiques de matières minérales, fossiles et d'électricité, on en calibre les prix. Les matières minérales et fossiles étant des biens le plus souvent très homogènes, elles ont un prix mondial quasi-unique, donc quasi-identique entre la France et le reste du monde. Ceci se traduit par le choix d'une même valeur dans la calibration de leurs prix, quelle que soit la région du monde :

- pour l'aluminium et l'acier, le prix de la matière primaire a été calibré à partir des données douanières d'importations de minerais - minerai de fer, bauxite - en valeur et en volume physique, relativement à l'année 2012. On retient un prix du minerai de fer de 101 € la tonne et un prix de la bauxite de 59 € la tonne, ce qui, compte tenu de la teneur respective de ces minerais en fer et en aluminium²⁸, implique un prix de l'acier, en tant que matière primaire, de 191 € par tonne et 246 € par tonne pour l'aluminium en tant que matière primaire ;
- le prix de la matière secondaire a été calibré à partir des données douanières d'importations de déchets métalliques en valeur et en volume physique, relativement à 2012 également. On retient ainsi un prix de 339 € par tonne pour le fer en tant de matière secondaire et de 1 183 € par tonne pour l'aluminium en tant de matière secondaire. Ces prix ont été confrontés aux données fournies dans le rapport de bilan du recyclage 2001-2010 de l'Ademe (ADEME, 2012) ;
- pour les matières fossiles, on retient le prix moyen du pétrole, du charbon et du gaz pour l'année 2012 (SOeS, 2013b), à savoir 87 € le baril pour le pétrole (soit 112 \$²⁹), 72 € par tonne pour le charbon et 8 € par million de Btu³⁰ pour le gaz.

Concernant l'électricité, on calibre le prix de ses différents modes de production (nucléaire à l'aide notamment du rapport de la Cour des Comptes de 2014 sur le coût de production de l'électricité nucléaire, énergies renouvelables et énergies fossiles) ce qui permet d'en déduire, compte tenu du mix électrique, le prix de l'électricité dans le modèle.

Enfin, s'agissant du prix du service de traitement des déchets, la calibration pour la France a été effectuée en retenant le coût technique pour les recyclables secs des ordures ménagères, hors verre, issu du référentiel technique de l'Ademe (ADEME, 2015b). On retient ainsi un prix du traitement des déchets de 343 € la tonne. Ce prix est supposé identique pour l'acier et l'aluminium, ainsi que pour la France et le reste du monde, en l'absence de plus amples informations sur ce sujet.

Par ailleurs, le bien générique produit par la France est pris comme numéraire (son prix étant par conséquent fixé à 1) et les taxes introduites dans le modèle sont supposées nulles dans le scénario de référence. Enfin, on calibre les agrégats économiques du modèle à l'aide des données de l'Insee pour la France et du FMI pour le reste du monde. Ces deux sources sont cohérentes au niveau d'agrégation utilisé.

2.3 Calibration dynamique

Le taux de croissance de l'offre de travail provient de projections démographiques (de l'Insee pour la France et de l'édition 2015 des *World Population Prospects* (ONU, 2015) pour le reste du monde). L'équation d'accumulation du capital est calibrée en utilisant un taux de dépréciation du capital de 10 % par an, valeur usuelle de la littérature. L'investissement étant égal à l'épargne, le stock de capital de l'année de base en volume s'en déduit, compte tenu du taux d'investissement (égal dans le modèle au taux d'épargne) calibré à 22 % pour la France et 24 % pour le reste du monde d'après les données du FMI, et sous une hypothèse de stationnarité : le taux de croissance du capital à l'état stationnaire égalise le taux de croissance de l'offre de travail. Le taux de croissance de la productivité du travail est calibré à son niveau de long terme donné dans Henriet, Maggior et Schubert (2014).

À titre illustratif, le processus d'épuisement est calibré à partir des projections du *World Energy Outlook 2015* (Agence internationale de l'énergie, 2015) pour les matières fossiles. Pour les métaux, la productivité globale des facteurs des secteurs extractifs de minerai de fer et de bauxite est supposée constante dans le temps. En effet, d'un point de vue empirique, les séries longues sur deux siècles sur les prix des métaux, sans tendance nette à la hausse ou à la baisse, et sur les quantités échangées, nettement croissantes, ne semblent pas montrer de phénomène d'épuisement. D'un point de vue théorique ensuite, le progrès technique pourrait compenser la diminution de teneur des minerais (cf. le modèle théorique de Stuermer et Schwerhoff, 2015, où la technologie, endogène, peut compenser le phénomène d'épuisement, de telle sorte que le coût de production peut rester constant malgré une extraction augmentant exponentiellement). Enfin, d'un point de vue géologique, les éléments fer et aluminium sont relativement abondants dans la croûte terrestre, dans la mesure où ils représentent respectivement 5 % et 8 % de la masse de cette dernière.

²⁸ La teneur moyenne en fer (resp. aluminium) du minerai de fer (resp. de la bauxite) est de 53% (resp. 24%).

²⁹ Le taux de change euro-dollar est le suivant : 1 euro = 1,29 dollar.

³⁰ Un Btu (British thermal unit) vaut environ 1055 joules.

3. Cahier de variantes

Le modèle, d'équilibre général calculable, est composé de formes structurelles, qui ne sont ni réduites ni linéarisées. **Il est donc particulièrement adapté à l'étude des changements structurels de l'économie sur le moyen et le long terme. En revanche, en raison notamment de l'absence de rigidités sur les prix, il n'est pas adapté à l'étude du court terme.**

Deux types d'études sont dès lors possibles :

- l'étude de l'équilibre statique, c'est-à-dire de l'équilibre de l'économie résultant d'une situation où les dotations en facteurs primaires (capital et travail), ainsi que les niveaux technologiques sont fixés. L'équilibre statique s'interprète alors comme une représentation de l'équilibre de moyen terme de l'économie, où l'on peut considérer que les dotations en facteurs primaires ainsi que les niveaux technologiques sont fixés ;
- l'étude de l'équilibre dynamique, c'est-à-dire de la trajectoire constituée dans le modèle d'une succession d'équilibres statiques³¹. Entre deux dates successives, les dotations de capital, de travail, ainsi que les niveaux technologiques sont modifiés. La dynamique obtenue est représentative de la trajectoire de l'économie sur le long terme, au cours de laquelle les dotations en facteurs primaires ainsi que les niveaux technologiques changent.

Dans le but d'illustrer simplement les propriétés comportementales du modèle, cette partie présente la déformation de l'équilibre statique suite à différents chocs analytiques. Par construction, le modèle permet d'étudier simultanément l'impact de ces chocs sur les grandeurs purement économiques (PIB, consommation des ménages, emploi, etc.), sur les grandeurs relatives à l'économie circulaire (flux physiques de matières minérales, taux de recyclage, etc.) et sur les grandeurs relatives à l'énergie (consommations d'énergie, émissions³² de CO₂, etc.).

Six chocs sont considérés, dont trois relatifs à l'énergie et trois à l'économie circulaire :

- une hausse du prix international des matières minérales primaires ;
- une hausse de la taxe sur les matières minérales primaires (taxe sur le flux amont de matière) ;
- une hausse de la taxe sur le traitement des déchets par stockage (taxe sur le flux aval de matière) ;
- une hausse du prix international des matières énergétiques fossiles.
- une hausse de la taxe sur les matières énergétiques fossiles selon leur contenu carbone (taxe carbone) ;
- une hausse de la taxe sur la consommation d'électricité.

La hausse des prix internationaux des matières minérales primaires (resp. des matières fossiles) impacte les secteurs extractifs des matières minérales primaires (resp. des matières fossiles) de la France et du reste du monde.

Les taxes, en revanche, sont supposées augmenter en France uniquement³³. Pour chaque taxe, la recette est redistribuée intégralement et forfaitairement aux ménages en France³⁴. **Il est à noter que l'impact d'une taxe dépend non seulement de la nature de celle-ci, mais également de la manière dont la recette est redistribuée.** L'utilisation d'une hypothèse commune sur la redistribution des recettes des taxes considérées permet donc de comparer ces taxes entre elles.

Les chocs relatifs à l'économie circulaire sont choisis pour étudier la façon dont le modèle rendrait compte de la transition d'une économie linéaire vers une économie circulaire (graphique 8). En effet, deux options paraissent (entre autres) possibles relativement à une telle transition :

- d'une part, réorienter les flux de matières en amont du processus de production des biens, de manière à utiliser davantage de matière secondaire et moins de matière primaire ;
- d'autre part, réorienter les flux de matières en aval du processus de production et d'utilisation finale des biens, de manière à ce que les déchets engendrés par l'utilisation finale des biens soient davantage recyclés et moins stockés.

³¹ Le fait que l'équilibre dynamique soit constitué d'une succession d'équilibres statiques est une conséquence du caractère récursif de la dynamique du modèle. Ce ne serait pas le cas si le modèle intégrait des mécanismes de type « *forward looking* » (anticipations rationnelles par exemple).

³² Les émissions de CO₂ sont calculées à partir des consommations de matières fossiles (endogènes du modèle) et des contenus en CO₂ de chaque matière fossile (pétrole, charbon, gaz).

³³ Dans les sections de comparaison graphique des chocs relatifs à l'économie circulaire (3.1.4) et à l'énergie (3.2.4), les impacts pour la France de la mise à place de taxes au niveau mondial, en plus ceux de la mise en place de taxes en France uniquement, sont également représentés.

³⁴ Dans un modèle d'équilibre général calculable, toute recette doit être affectée. Le choix d'un transfert intégral et forfaitaire au ménage est guidé par des raisons de simplicité. Ainsi, lors de la mise en place d'une taxe dans une région du monde, la recette de cette taxe est redistribuée intégralement et forfaitairement au ménage de cette région.

Ces deux réorientations des flux peuvent se faire respectivement par modification des prix relatifs de la matière secondaire par rapport à la matière primaire (hausse du prix international des matières primaires minérales ou taxe sur les matières minérales) et par modification des prix relatifs du traitement des déchets par recyclage par rapport au traitement par stockage (taxe sur le traitement des déchets par stockage)³⁵.

Le choc de hausse du prix international des matières fossiles et celui de taxe carbone sont choisis dans l'optique d'étudier la façon dont le modèle rendrait compte d'une transition vers une économie sobre en carbone. La hausse du prix international des matières fossiles peut s'interpréter dans un contexte de raréfaction des ressources tandis que la hausse de taxe carbone illustre la mise en place d'une politique au niveau national. Dans la mesure où, à l'inverse des matières durables, il n'existe pas de circularité des flux pour les matières non durables, seules sont considérées des modifications des prix relatifs des flux amonts. Enfin, de par son rôle dans le schéma énergétique, ainsi que par comparaison avec la taxe carbone, on considère une taxe sur la consommation d'électricité.

Chaque choc entraîne une modification de l'équilibre statique du modèle, le faisant passer de l'équilibre initial avant le choc (résultant de la calibration effectuée précédemment, relativement à l'année 2012) à l'équilibre final compte tenu du choc. On détermine alors l'écart relatif entre les deux équilibres. Le modèle fournit les impacts³⁶ pour la France et pour le reste du monde, mais seuls les résultats pour la France sont présentés dans la suite.

Les tableaux de résultats présentent les impacts sur les agrégats de l'équilibre ressources - emplois (sauf pour les dépenses publiques puisque les recettes de l'État sont intégralement reversées au ménage) en volume à prix constant de l'année de base et en prix. Ils présentent également les impacts sur les autres agrégats économiques d'intérêt (par exemple, sur l'emploi), puis sur les grandeurs relatives à l'économie circulaire (utilisation de matière et traitement des déchets) et enfin sur les grandeurs relatives à l'énergie.

Lorsque cela est possible, les résultats du modèle Vulcain sont comparés à ceux d'autres sources. Concernant les chocs relatifs à l'économie circulaire, pour lesquels les outils et études macroéconomiques sont rares, les impacts de la hausse de la taxe sur le traitement des déchets par stockage sont comparés avec les résultats économétriques de l'Ademe (2014). Concernant les chocs relatifs à l'énergie, pour lesquels les modèles macroéconomiques sont plus nombreux, une comparaison avec le modèle Mésange (Insee-DG Trésor) est effectuée pour la hausse du prix des ressources fossiles et avec France Stratégie (2015) pour la taxe carbone et la taxe sur l'électricité.

3.1 Chocs relatifs à l'économie circulaire

3.1.1 Hausse de 100 % du prix international des matières minérales primaires (minerai de fer et bauxite)

Description du choc

Dans le modèle, le prix international des matières minérales primaires est représenté par le prix de production des secteurs d'extraction de ces matières (ces matières étant très homogènes, leurs prix respectifs sont quasi-identiques dans les deux régions). Du fait de son caractère endogène, le prix international des matières minérales primaires résulte de l'équilibre du modèle et de ce fait ne peut être directement modifié. Cette difficulté est levée en considérant la hausse de ce prix comme la conséquence d'un choc négatif sur l'offre des secteurs d'extraction des matières minérales. Le choc est simulé à travers une diminution exogène du progrès technique de ces secteurs, en France et dans le reste du monde, de façon à obtenir un doublement du prix de production³⁷. **Le prix du minerai de fer passe de 101 € à 202 € la tonne et celui de la bauxite passe de 59 € à 118 € la tonne**³⁸. La France consommant presque uniquement des ressources minérales primaires importées, le choc représente un doublement *ex ante* de la facture extérieure de la France au regard de ces ressources (qui passerait, en l'absence de réduction des quantités importées, de 0,07 % à 0,14 % du PIB).

Mécanismes

La hausse du prix international des matières minérales primaires induit une baisse de la consommation de ces matières, en France et dans le reste du monde. La hausse de la facture extérieure de la France au regard de ces ressources est donc moins forte *ex post* (de 0,07 % à 0,11 % du PIB) qu'*ex ante*.

La consommation de matières minérales secondaires diminue également, bien que dans une moindre mesure : en effet, en France comme dans le reste du monde, le renchérissement des matières minérales primaires induit une substitution en faveur

³⁵ De façon symétrique, des subventions (vues comme des taxes négatives) auraient également pu être considérées.

³⁶ Le modèle est mis en œuvre informatiquement grâce au logiciel GAMS et à l'utilisation du solveur CONOPT.

³⁷ Plus précisément, on considère une baisse de la productivité globale des facteurs des secteurs extractifs de matières minérales primaires, exogène dans le modèle. A fonction de demande donnée, sa diminution constitue un choc négatif sur la fonction d'offre et implique donc une hausse du prix des matières minérales primaires.

³⁸ Soit, compte tenu des teneurs en fer et en aluminium des deux minerais, le prix d'une tonne d'éléments fer contenu dans du minerai de fer passe de 191 € à 382 € et le prix d'une tonne d'éléments aluminium contenu dans de la bauxite de 246 € à 492 €.

des matières minérales secondaires, mais la baisse de la consommation de matière minérale primaire induit une baisse de la consommation totale de matière minérale et donc de la production de déchet, ce qui limite la quantité de matière disponible pour le recyclage. Les déchets sont davantage orientés vers le recyclage, du fait de la demande pour la matière minérale secondaire induite par l'effet de substitution entre matières primaire et secondaire.

S'agissant des grands agrégats économiques, la hausse du prix des matières minérales primaires constitue un renchérissement d'intrants de production, d'où une baisse du PIB. Celle-ci est cependant limitée compte tenu de la faible ampleur du choc au regard de l'économie française, de la diminution des quantités de matières minérales primaires consommées (baisse des importations) et du fait que le choc affecte aussi le reste du monde. En particulier, l'économie française utilisant relativement moins de matière primaire que le reste du monde³⁹, le prix du bien générique produit à l'étranger augmente légèrement par rapport au prix du bien générique produit en France. L'économie française s'en trouve dès lors plus compétitive. Les exportations, cependant, diminuent, du fait de la baisse de demande adressée par le reste du monde à la France.

La consommation finale d'énergie diminue, suite à trois facteurs : la moindre utilisation de matières minérales dans l'économie implique une moindre demande d'énergie associée (énergie liée à l'utilisation de matières minérales dans la production du bien générique) ; par ailleurs, l'utilisation de matières minérales privilégie la matière secondaire, moins intensive en énergie ; enfin, la baisse d'activité induit une baisse générale de consommation d'énergie (partie non spécifique de la production du bien générique).

Tableau 2 : Hausse de 100 % du prix des matières minérales primaires

<i>Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :</i>		
Économie générale		
PIB (volume)	-0,01 %	-
Consommation (volume)	-0,04 %	-
Investissement (volume)	-0,12 %	-
Exportations (volume)	-0,10 %	-
Importations (volume)	-0,25 %	-
Prix de la consommation	-0,06 %	-
Prix de l'investissement	0,02 %	+
Prix des exportations	0,11 %	+
Prix des importations	0,26 %	+
Salaire	-0,10 %	-
Prix du capital	-0,10 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	-0,06 %	-
Emploi (écart en milliers)	-0,3	-
Taux de chômage (écart en points)	0,00	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	13,4	+
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	-0,1	-
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	-12,7	-
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	-0,8	-
Matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	-10,92 %	-
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	-24,69 %	-
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	-1,84 %	-
Prix TTC du traitement des déchets	-17,87 %	-
Taux de recyclage (écart en points)	6,14	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-19,97 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	-2,76 %	-
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	-10,03 %	-
Énergie		
Consommation finale d'énergie	-0,92 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-1,12 %	-
Consommation finale d'électricité	-0,23 %	-
Émissions de CO ₂	-1,21 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	-0,31 %	-

³⁹ Relativement au PIB, la production de métal à partir de matière primaire est moins importante en France qu'à l'étranger.

3.1.2 Taxe sur les matières minérales primaires de 0,01 % du PIB *ex post*

Description du choc

La taxe concerne la consommation de matières minérales primaires en France, qui provient presque exclusivement d'importations. Il s'agit d'une taxe *ad valorem* dont le taux est calibré de façon à ce que le montant effectivement collecté soit égal à 0,01 % du PIB⁴⁰. On obtient ainsi un **taux de taxe de 15 %, soit, exprimé en accise, 15 € par tonne de minerai de fer et 9 € par tonne de bauxite**. La recette de la taxe est transférée intégralement aux ménages.

Tableau 3 : Taxe sur les matières minérales primaires de 0,01 % du PIB *ex post*

Montant du transfert :	210 M€	
<i>Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :</i>		
Grandeurs économiques générales		
PIB (volume)	-0,002 %	-
Consommation (volume)	0,001 %	+
Investissement (volume)	-0,001 %	-
Exportations (volume)	-0,027 %	-
Importations (volume)	-0,020 %	-
Prix de la consommation	-0,003 %	-
Prix de l'investissement	-0,001 %	-
Prix des exportations	0,003 %	+
Prix des importations	-0,004 %	-
Salaire	-0,011 %	-
Prix du capital	-0,013 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	0,004 %	+
Emploi (écart en milliers)	-0,5	-
Taux de chômage (écart en points)	0,002	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	0,0	+
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	-0,1	-
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	-0,2	-
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	-0,3	-
Grandeurs relatives aux matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	-0,16 %	-
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	-0,55 %	-
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	0,10 %	+
Prix TTC du traitement des déchets	-0,43 %	-
Taux de recyclage (écart en points)	0,16	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-6,94 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	4,45 %	+
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	-0,36 %	-
Grandeurs relatives à l'énergie		
Consommation finale d'énergie	-0,31 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-0,38 %	-
Consommation finale d'électricité	-0,08 %	-
Émissions de CO ₂	-0,41 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	-0,01 %	-

⁴⁰ Le montant *ex ante* correspondant est de 0,0107 % du PIB.

Mécanismes

Les effets de la taxe sont proches de ceux du choc précédent, puisqu'il s'agit dans les deux cas, pour la France, d'un renchérissement des matières minérales primaires consommées, excepté le fait que la taxe considérée ici ne touche que l'économie française.

Le renchérissement des matières minérales primaires consommées en France induit une baisse de leur consommation⁴¹, comme dans le choc précédent. Par substitution, la consommation de matières minérales secondaires augmente. Contrairement au choc précédent, le reste du monde n'est pas touché par la hausse du prix de la matière primaire, donc la consommation de matière secondaire à l'étranger évolue peu, et l'étranger peut satisfaire un surcroît de demande de matière secondaire de la France. La consommation de matières minérales (primaires et secondaires) diminue toutefois au total, à cause du renchérissement du prix moyen de ces dernières.

Il en découle une baisse des quantités de déchets (moins de matière contenue dans la consommation de biens produits par l'économie domestique). La répartition des déchets suivant les modes de traitement se déforme légèrement au profit du recyclage, du fait du surcroît de demande pour la matière minérale secondaire. Le surcroît de demande pour la matière minérale secondaire est au total davantage satisfait par l'étranger que par une augmentation du taux de recyclage en France.

La diminution du PIB provient du fait que la taxe renchérit les intrants de production pour les entreprises. Par ailleurs, le reste du monde n'étant pas touché, le prix du bien générique produit en France augmente par rapport à celui produit à l'étranger. Cependant, l'ampleur de l'effet sur le PIB reste très limitée compte tenu du transfert intégral de la recette aux ménages. À cet égard, la consommation des ménages augmente : en effet, du fait du surcroît de demande de matière secondaire, le prix du traitement des déchets diminue, conduisant à une baisse du prix de consommation. S'agissant des importations, elles diminuent au total, sous l'effet de moindres importations de matières minérales primaires. Les exportations diminuent également du fait de la moindre compétitivité de l'économie française.

La consommation d'énergie diminue, du fait de l'effet récessif général de la taxe sur l'économie et également parce que le renchérissement des matières minérales primaires privilégie l'utilisation de la matière secondaire, moins intensive en énergie.

3.1.3 Taxe sur le traitement des déchets par stockage de 0,01 % du PIB *ex post*

Description du choc

La taxe concerne le service de traitement des déchets par stockage en France (tant pour l'acier que pour l'aluminium). Le taux de taxe est calibré de façon à ce que le montant collecté effectivement soit égal à 0,01 % du PIB⁴². Le taux de taxe *ad valorem* vaut **7,0 %**, soit, exprimé en accise, **23 € par tonne de déchets traités**. La recette de la taxe est transférée intégralement aux ménages.

Mécanismes

La taxe renchérit le traitement des déchets par stockage relativement au recyclage. Toutes choses égales par ailleurs, les déchets produits sont donc davantage orientés vers le recyclage. Ceci conduit à un surcroît d'offre de matières minérales secondaires, induisant, principalement, un surcroît d'exportations vers le reste du monde et, dans une plus faible mesure, par substitution, une moindre consommation de matières minérales primaires⁴³. Au total, la consommation de matières minérales (primaire et secondaire) augmente, à cause de la baisse du prix moyen de ces dernières. Il en découle une hausse des quantités de déchets traitées (plus de matière contenue dans les biens consommés). Le prix TTC de traitement des déchets augmente, d'une part en raison de la taxe sur le stockage et d'autre part du fait du surcroît de demande pour le service de traitement des déchets.

La hausse conjointe des quantités de déchets traitées et du prix de traitement conduit les ménages à allouer une plus forte part de leur revenu au traitement des déchets, au détriment de la consommation de bien générique. Au total, la consommation des ménages diminue. L'effet sur le PIB est négatif.

⁴¹ Le prix hors taxe de la matière minérale primaire étant presque inchangé par la taxe en France, la baisse de 7 % de sa consommation en France se traduit par une baisse de 7 % également de la facture extérieure de la France au regard de ces ressources.

⁴² Le montant *ex ante* correspondant est de 0,0108 % du PIB. La différence entre le montant *ex ante* et le montant *ex post* s'explique d'une part par la baisse de la consommation du service de traitement des déchets par stockage et d'autre part par la baisse de son prix HT.

⁴³ Le prix hors taxe de la matière minérale primaire étant presque inchangé par la taxe en France, la baisse de 0,4 % de sa consommation en France se traduit par une baisse de 0,4 % également de la facture extérieure de la France au regard de ces ressources.

Tableau 4 : Taxe sur le service de traitement des déchets par stockage de 0,01 % du PIB *ex post*

Montant du transfert :	210 M€	
<i>Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :</i>		
Grandeurs économiques générales		
PIB (volume)	-0,001 %	-
Consommation (volume)	-0,004 %	-
Investissement (volume)	0,011 %	+
Exportations (volume)	0,000 %	-
Importations (volume)	0,002 %	+
Prix de la consommation	0,014 %	+
Prix de l'investissement	-0,001 %	-
Prix des exportations	-0,002 %	-
Prix des importations	-0,004 %	-
Salaire	0,002 %	+
Prix du capital	0,000 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	0,004 %	+
Emploi (écart en milliers)	-0,5	-
Taux de chômage (écart en points)	0,002	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	-2,2	-
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	0,0	-
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	1,7	+
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	0,0	-
Grandeurs relatives aux matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	0,09 %	+
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	-3,36 %	-
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	2,36 %	+
Prix TTC du traitement des déchets	2,99 %	+
Taux de recyclage (écart en points)	1,37	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-0,38 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	0,59 %	+
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	0,18 %	+
Grandeurs relatives à l'énergie		
Consommation finale d'énergie	-0,02 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-0,02 %	-
Consommation finale d'électricité	-0,01 %	-
Émissions de CO ₂	-0,03 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	0,00 %	-

Encadré 2 : Comparaison avec l'étude de l'ADEME (2014)

L'étude de l'ADEME « Recycler les déchets ou importer des matières premières ? » s'intéresse à la relation économétrique existant entre production de matière secondaire, exportations de matière secondaire et importation de matières primaire et secondaire. Les relations sont estimées au niveau mondial et le champ est l'ensemble des métaux.

Les résultats principaux de cette étude de l'ADEME sont qu'une augmentation de 2,5 % de la production de matière secondaire induit une augmentation de 1,5 % des exportations de matière secondaire et une diminution de 0,58 % des importations totales de matières (primaire et secondaire).

Les impacts de la hausse de 0,01 % du PIB *ex post* de la taxe sur le traitement des déchets par stockage, présentée ici, sont une augmentation de 2,4 % de la production de matière, une augmentation de 3,3 % des exportations de matière secondaire et une diminution de 0,77 % des importations totales de matières (primaire et secondaire).

À hausse de la production de matière secondaire donnée, la baisse des importations totales de matière se situe dans l'intervalle de confiance des résultats de l'étude de l'ADEME, tandis que la hausse des exportations de matière secondaire est plus marquée.

Les différences peuvent tenir au type de choc considéré. L'étude de l'ADEME estime une relation économétrique, pour laquelle toutes les sources de variabilité participent à l'identification, tandis que le choc considéré ici est une hausse de la taxe sur le traitement des déchets par stockage : la courbe de demande française de matière secondaire reste inchangée, toutes choses égales par ailleurs, ce qui peut expliquer pourquoi le surcroît de matière secondaire produite est davantage exporté. Les différences peuvent aussi tenir à des différences de champ (ensemble des métaux dans l'étude ADEME *versus* acier et aluminium) et de zone géographique (impact mondial moyen dans l'étude ADEME *versus* impact sur la France, qui exporte presque la moitié de sa production secondaire, cf. annexe 4).

3.1.4 Comparaison des chocs relatifs à l'économie circulaire

Une comparaison des résultats des chocs précédents, selon leur ampleur et selon qu'ils touchent uniquement la France ou l'ensemble de l'économie mondiale, est riche d'enseignements.

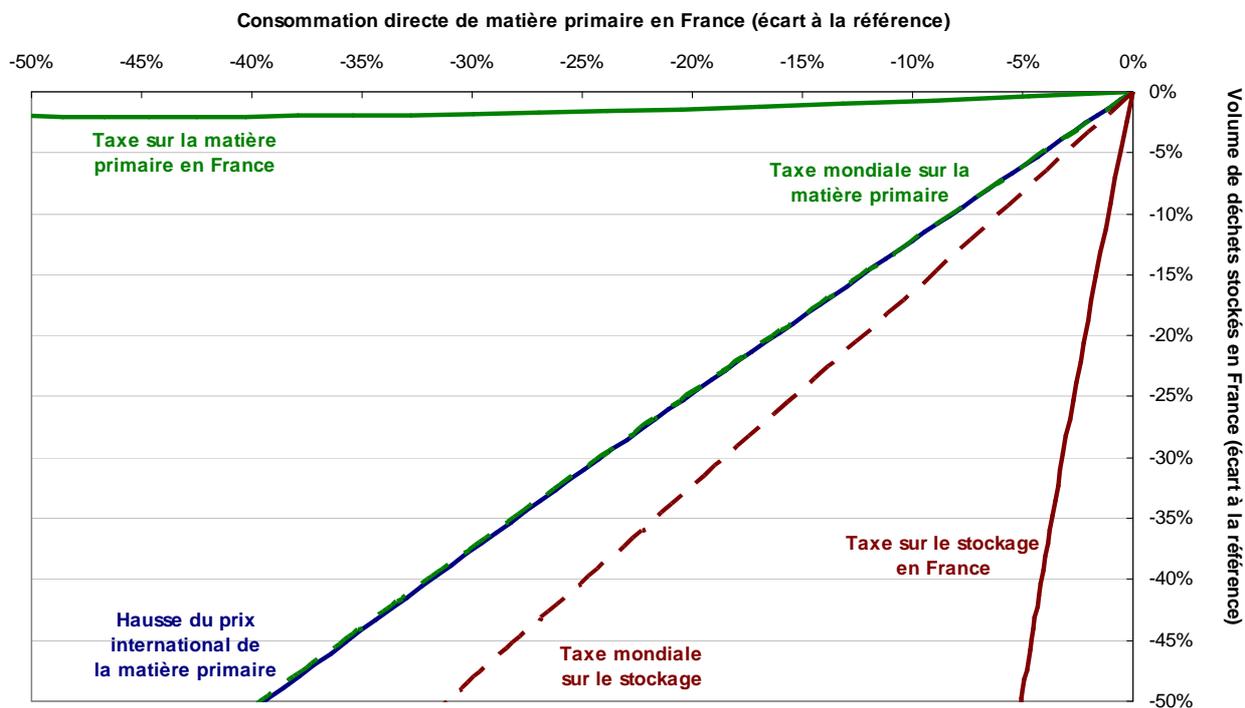
La figure 9 s'intéresse à l'impact des chocs, pour la France, en termes de consommation de matière minérale primaire et de quantités de déchets stockés. Ces deux variables peuvent s'interpréter comme des indicateurs des pressions environnementales liées à l'économie des ressources (consommation de matière minérale primaire comme indicateur des externalités liées à l'extraction, quantités de déchets stockés comme indicateur des externalités liées au stockage). Dès lors, on voit qu'une hausse du prix international des matières minérales primaires tend à réduire les pressions tant du côté de l'extraction des ressources (moins de matière primaire consommée) que du côté du stockage (moins de déchets stockés).

En revanche, dès lors qu'elles sont instaurées en France uniquement, la taxe sur les matières minérales primaires et la taxe sur le stockage apparaissent comme des instruments complémentaires pour réduire l'une ou l'autre des pressions concernées. Cette complémentarité est due à la petite taille de l'économie française par rapport au reste du monde. Instaurée en France uniquement, la taxe sur les matières minérales primaires conduit à un surcroît de demande de matière minérale secondaire, satisfaite essentiellement par des importations supplémentaires de matière secondaire, sans augmentation significative du taux de recyclage en France. S'agissant de la taxe sur le stockage, lorsqu'elle est instaurée en France uniquement, le surcroît de matière secondaire disponible est majoritairement exporté, d'où une faible diminution de la consommation de matière minérale primaire en France. Lorsque ces taxes sont mises en place à un niveau mondial, les impacts touchent aussi bien la consommation de matières minérales primaires que les quantités de déchets stockés : taxer la matière minérale primaire induit une augmentation du taux de recyclage, pour pouvoir satisfaire la demande en matière de l'économie mondiale, et par conséquent une baisse des déchets stockés⁴⁴ ; de même, taxer le stockage au niveau mondial diminue les quantités extraites de matières minérales primaires, du fait du surcroît de matière minérale secondaire disponible.

La figure 10 présente l'impact des chocs précédents, pour la France, en termes de PIB et de montant prélevé *ex post*. Pour les deux taxes instaurées en France uniquement ainsi que pour la taxe mondiale sur le stockage, on observe que le montant prélevé *ex post* croît puis décroît lorsque le taux de taxe augmente. À partir d'un certain seuil, l'augmentation du taux de taxe ne compense plus la baisse de la quantité échangée, ce qui conduit à une baisse du montant de la recette (courbe de Laffer). Enfin, à montant prélevé donné et lorsque les taxes sont instaurées en France uniquement, la taxe sur le stockage a un impact moins négatif que la taxe sur la consommation de matière minérale primaire. En effet, la première stimule directement la production d'un bien en France (matière secondaire), ce qui n'est pas le cas de la seconde.

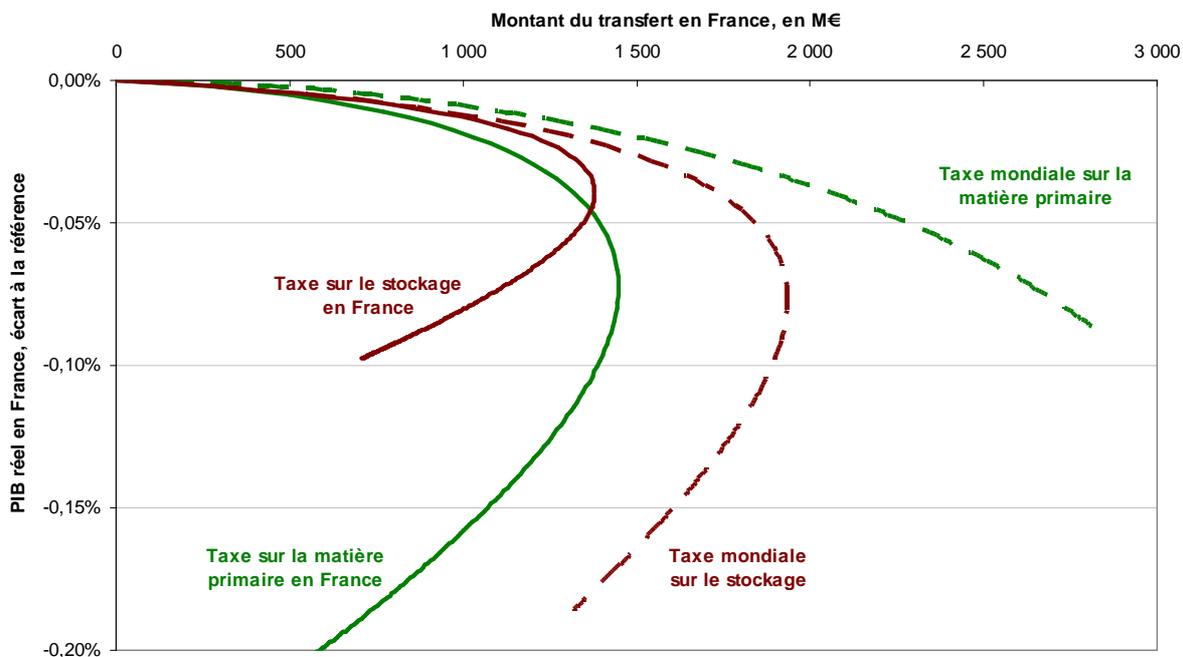
⁴⁴ En particulier, en termes de consommation de matières primaires et de quantités de déchets stockés, la taxe mondiale sur la consommation de matières minérales primaires a un impact très proche d'une hausse du prix international de ces matières. À prix TTC des minerais donnés, ces deux chocs ne diffèrent que selon la répartition des revenus : dans le cas de la hausse du prix international des matières primaires, c'est le secteur extractif qui est rémunéré (et donc les ménages de la région d'extraction *via* la rémunération du capital et du travail) tandis que dans le cas d'une taxe sur la consommation de matières minérales, la recette fiscale de chaque région est transférée forfaitairement au ménage de la région.

Figure 9 : Impact sur la consommation de matière primaire et sur le volume de déchets stockés de choc relatifs à l'économie circulaire de magnitude croissante



Lecture : Les axes de la figure se lisent ainsi comme un tableau de bord où, plus l'équilibre se déplace vers la gauche et vers le bas, plus les pressions environnementales sont faibles.

Figure 10 : Impact sur le montant transféré et sur le PIB de choc relatifs à l'économie circulaire de magnitude croissante



3.2 Chocs relatifs à l'énergie

3.2.1 Hausse de 20 % du prix international des matières énergétiques fossiles (pétrole, charbon et gaz)

Description du choc

La simulation de ce choc est analogue à celui de la hausse du prix des matières minérales primaires. Dans le modèle, le prix des matières fossiles est représenté par le prix de production de leurs secteurs extractifs (ces matières étant très homogènes, leur prix respectif est quasi-identique dans les deux régions). Du fait de son caractère endogène, ce prix résulte de l'équilibre du modèle et de ce fait ne peut être directement modifié. La hausse simulée ici est donc considérée comme la conséquence d'un choc négatif sur l'offre des secteurs extractifs de matières fossiles. Le choc est simulé à travers une diminution exogène du progrès technique de ces secteurs, en France et dans le reste du monde, de façon à obtenir une hausse de 20 % de leur prix de production⁴⁵. **Le prix du pétrole passe de 87 € à 104 € le baril (soit 112 à 134 \$ le baril), celui du charbon de 72 € à 86 € par tonne et celui du gaz de 8 € à 10 € par million de Btu.** Compte tenu du fait que la France consomme essentiellement des ressources fossiles importées, le choc représente une hausse de la facture extérieure de la France (qui passerait, en l'absence de réduction des quantités importées, de 3,2 % à 3,8 % du PIB).

Mécanismes

Le renchérissement des énergies fossiles induit une baisse de leur consommation et par conséquent des émissions de CO₂. La hausse de la facture extérieure de la France est donc moins forte *ex post* (de 3,2 % à 3,5 % du PIB) qu'*ex ante*.

Les énergies fossiles constituant un intrant de production, la hausse de prix provoque une baisse du PIB. Le reste du monde est également touché et, compte tenu d'une utilisation en matières fossiles plus intensive que l'économie française, le prix du bien générique produit par l'étranger augmente par rapport au bien générique produit en France. La France s'en trouve plus compétitive, ce qui limite l'effet récessif du renchérissement des énergies fossiles. En particulier, les importations françaises diminuent fortement (moindres consommations d'énergies fossiles et moindre consommation de bien générique importé).

La consommation de matières minérales (primaires et secondaires) diminue, du fait de leur statut d'intrant peu substituable de la production de bien générique. Il en découle une baisse de la quantité de déchets produits. En raison de la moindre intensivité en matières fossiles dans leur processus de production, le prix des produits métalliques issus de la sidérurgie secondaire diminue par rapport à celui des produits métalliques issus de la sidérurgie primaire. La demande de matières minérales secondaires augmente, et par conséquent les déchets traités sont davantage orientés vers le recyclage.

Encadré 3 : Comparaison avec le modèle Mésange

Dans le modèle Mésange⁴⁶, les résultats à 4 ans d'une hausse de 20 % du prix du pétrole (avec réaction endogène du reste du monde) sont une baisse de 0,16 % du PIB et de 0,47 % de la consommation. Dans le choc présenté ici, les résultats représentatifs de l'équilibre de moyen terme sont une baisse de 0,09 % du PIB et de 0,76 % de la consommation.

Les résultats sur la consommation sont plus directement comparables, car les différences d'hypothèses sur la balance commerciale rendent la comparaison des résultats sur le PIB moins pertinente : dans le modèle Mésange, le taux de change est fixe, tandis que dans le modèle Vulcain présenté ici, le taux de change est flexible et équilibre la balance commerciale en valeur.

La baisse de consommation est plus forte dans Vulcain. Cette différence s'explique en premier lieu par l'ampleur du choc, plus élevée dans Vulcain que dans Mésange (dans Vulcain, le choc représente une hausse de la facture énergétique de 0,6 % du PIB *ex ante*, contre 0,3 % dans Mésange), et par le fait que les horizons d'analyse sont très différents (moyen terme pour Vulcain contre 4 ans dans Mésange). Compte tenu de la différence d'ampleur de choc, l'écart entre Vulcain et Mésange est faible s'agissant de l'impact sur la consommation.

⁴⁵ Plus précisément, on considère une baisse de la productivité globale des facteurs des secteurs extractifs de matières fossiles, exogène dans le modèle. A fonction de demande donnée, sa diminution constitue un choc négatif sur la fonction d'offre et implique donc une hausse du prix des matières fossiles.

⁴⁶ Cf. Klein et Simon (2010).

Tableau 5 : Hausse de 20 % du prix des matières fossiles (pétrole, charbon et gaz)

Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :

Grandeurs économiques générales		
PIB (volume)	-0,09 %	-
Consommation (volume)	-0,76 %	-
Investissement (volume)	-0,80 %	-
Exportations (volume)	-0,17 %	-
Importations (volume)	-2,49 %	-
Prix de la consommation	0,08 %	+
Prix de l'investissement	0,11 %	+
Prix des exportations	0,04 %	+
Prix des importations	2,42 %	+
Salaire	-0,62 %	-
Prix du capital	-0,68 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	-0,43 %	-
Emploi (écart en milliers)	-18,4	-
Taux de chômage (écart en points)	0,06	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	-12,3	-
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	1,5	+
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	-6,9	-
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	-0,6	-
Grandeurs relatives aux matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	-5,04 %	-
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	-9,77 %	-
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	-1,92 %	-
Prix TTC du traitement des déchets	-6,52 %	-
Taux de recyclage (écart en points)	1,98	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-6,96 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	-2,25 %	-
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	-4,24 %	-
Grandeurs relatives à l'énergie		
Consommation finale d'énergie	-7,04 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-8,83 %	-
Consommation finale d'électricité	-0,97 %	-
Émissions de CO ₂	-8,84 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	13,78 %	+

3.2.2 Taxe carbone de 1 % du PIB *ex post*

Description du choc

La taxe concerne la consommation de matières fossiles en France, proportionnellement au contenu en CO₂ de ces matières. La taxe est calibrée de façon à ce que le montant collecté effectivement soit égal à 1 % du PIB⁴⁷, soit un taux de 79 €/tCO₂. Contrairement à la variante précédente, les prix augmentent en France uniquement. La recette est intégralement transférée au ménage. Enfin, en conformité avec les possibilités offertes par la directive européenne 2003/96/CE, les activités métallurgiques et de génération d'électricité sont supposées exemptées de la taxe.

⁴⁷ Le montant *ex ante* correspondant est de 1,22 % du PIB.

Mécanismes

Les effets de la taxe sont similaires à ceux du choc précédent, puisqu'il s'agit dans les deux cas, pour la France, d'un renchérissement des matières fossiles consommées, excepté le fait que la taxe considérée ici ne touche que l'économie française. Le renchérissement des matières fossiles induit une diminution de leur consommation en volume et donc des émissions de CO₂. La facture extérieure de la France baisse de 3,2 % à 2,7 % du PIB.

Du fait de la faible substituabilité entre les matières fossiles et les facteurs de production capital et travail, l'activité et l'emploi diminuent. Le bien générique français se renchérit par rapport au bien générique étranger, car seule l'économie française est soumise à la taxe carbone. Il s'ensuit une forte baisse des exportations. Les importations diminuent également, sous l'effet des moindres consommations de matières fossiles.

Compte tenu de la faible substituabilité résidant entre les matières minérales et les autres facteurs de production (travail, capital et matières fossiles), la consommation de matières minérales (primaires et secondaires) diminue. Les quantités de déchets produits n'en baissent pas pour autant : en effet, si le système productif utilise moins de matières minérales, les ménages consomment davantage de bien générique en provenance de l'étranger, devenu plus compétitif, et dont la teneur en matière minérale est plus importante.

Tableau 6 : Taxe carbone de 1 % du PIB *ex post*

Montant du transfert :	21 000 M€	
<i>Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :</i>		
Grandeurs économiques générales		
PIB (volume)	-0,23 %	-
Consommation (volume)	-0,10 %	-
Investissement (volume)	-0,11 %	-
Exportations (volume)	-1,29 %	-
Importations (volume)	-0,86 %	-
Prix de la consommation	-0,12 %	-
Prix de l'investissement	-0,12 %	-
Prix des exportations	0,00 %	-
Prix des importations	-0,44 %	-
Salaire	-1,06 %	-
Prix du capital	-1,26 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	0,44 %	+
Emploi (écart en milliers)	-53,5	-
Taux de chômage (écart en points)	0,18	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	-51,3	-
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	-2,2	-
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	0,7	+
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	-0,7	-
Grandeurs relatives aux matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	0,41 %	+
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	0,14 %	+
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	0,59 %	+
Prix TTC du traitement des déchets	-1,45 %	-
Taux de recyclage (écart en points)	0,11	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-0,52 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	-0,31 %	-
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	-0,40 %	-
Grandeurs relatives à l'énergie		
Consommation finale d'énergie	-12,57 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-16,23 %	-
Consommation finale d'électricité	-0,16 %	-
Émissions de CO ₂	-14,59 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	27,75 %	+

Encadré 4 : Comparaison avec France Stratégie (2015)

Dans une analyse comparative des modèles macroéconomiques relatifs à la transition énergétique, France Stratégie (2015) détaille la réaction de différents modèles à des chocs de taxes énergétiques. En particulier, une taxe carbone de 1 % du PIB *ex ante*, et dont la recette n'est pas redistribuée aux ménages, se traduit par une baisse du PIB à long terme située entre 0,7 % et 1,3 % pour la plupart des modèles considérés. L'impact obtenu dans le modèle Vulcain, à montant prélevé *ex ante* identique, semble cohérent, compte tenu du fait que la recette collectée est intégralement reversée aux ménages.

Par ailleurs, la taxe carbone conduit à long terme à une baisse des émissions de CO₂ entre 14 % et 15 % selon les modèles et à une baisse des consommations d'énergie finale entre 10 % et 12 % pour la plupart des modèles considérés. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par Vulcain.

3.2.3 Taxe sur l'électricité de 1 % du PIB *ex post*

Description du choc

La taxe concerne la consommation d'électricité en France. Elle est calibrée de façon à ce que le montant collecté effectivement soit égal à 1 % du PIB⁴⁸, soit un **taux de 72 €/MWh**. La recette est intégralement transférée au ménage. Enfin, en conformité avec les possibilités offertes par la directive européenne 2003/96/CE, les activités métallurgiques sont supposées exemptées de la taxe.

Mécanismes

Le renchérissement du prix de l'électricité induit une diminution de sa consommation en volume. Du fait de la faible substituabilité entre l'électricité et les matières fossiles, ces dernières voient leur consommation diminuer également. La facture extérieure de la France au regard de ces dernières baisse de 3,2 % à 3,1 % du PIB.

Pour la même raison – faible substituabilité entre facteurs de production – l'impact sur le PIB est négatif et l'emploi total diminue. Le bien générique français se renchérit par rapport au bien générique étranger, car seule l'économie française est soumise à la taxe sur l'électricité. Il s'ensuit une baisse des exportations.

Les matières minérales (primaires et secondaires) étant faiblement substituables aux autres facteurs de production, dont l'électricité utilisée par la partie non spécifique du secteur générique, leur consommation diminue.

Les quantités de déchets produits baissent également car le système productif utilise moins de matières minérales et que les importations de bien générique étranger, dont la teneur en matière minérale est plus importante, baissent très légèrement.

Encadré 5 : Comparaison avec France Stratégie (2015)

Dans France Stratégie (2015), une taxe sur l'électricité de 1 % du PIB *ex ante*, et dont la recette n'est pas redistribuée aux ménages, se traduit par une baisse du PIB à long terme située entre 0,8 % et 1,4 % pour la plupart des modèles considérés. L'impact obtenu dans le modèle Vulcain, à montant prélevé *ex ante* identique, semble cohérent, compte tenu du fait que la recette collectée est intégralement reversée aux ménages. De plus, pour les modèles considérés, la baisse de PIB est plus marquée dans le cas de la taxe sur l'électricité que dans le cas de la taxe carbone, ce qui est également le cas pour Vulcain.

Par ailleurs, la taxe sur l'électricité conduit à long terme à une baisse des consommations d'énergie finale entre 6 % et 7 % pour la plupart des modèles considérés. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus par Vulcain.

⁴⁸ Le montant *ex ante* correspondant est de 1,47 % du PIB. La différence entre le montant *ex ante* et le montant *ex post* s'explique d'une part par la baisse de la consommation d'électricité et d'autre part par la baisse de son prix HT.

Tableau 7 : Taxe sur l'électricité de 1 % du PIB *ex post*

Montant du transfert :	21 000 M€	
<i>Sauf mention contraire, écart relatif à la référence (équilibre statique initial) et signe de l'écart :</i>		
Grandeurs économiques générales		
PIB (volume)	-0,34 %	-
Consommation (volume)	-0,30 %	-
Investissement (volume)	-0,31 %	-
Exportations (volume)	-0,32 %	-
Importations (volume)	-0,21 %	-
Prix de la consommation	-0,04 %	-
Prix de l'investissement	-0,03 %	-
Prix des exportations	0,00 %	-
Prix des importations	-0,11 %	-
Salaire	-1,16 %	-
Prix du capital	-1,37 %	-
Prix du bien générique français par rapport au bien générique étranger	0,11 %	+
Emploi (écart en milliers)	-58,4	-
Taux de chômage (écart en points)	0,19	+
Emploi dans le secteur générique (écart en milliers)	46,6	+
Emploi dans le secteur extraction (écart en milliers)	1,0	+
Emploi dans le secteur des déchets (écart en milliers)	-0,1	-
Emploi dans le secteur électrique (écart en milliers)	-105,8	-
Grandeurs relatives aux matières minérales		
Traitement des déchets (volume physique)	-0,16 %	-
Traitement des déchets par stockage (volume physique)	-0,73 %	-
Traitement des déchets par recyclage (volume physique)	0,22 %	+
Prix TTC du traitement des déchets	-1,91 %	-
Taux de recyclage (écart en points)	0,23	+
Consommation de matière primaire (volume physique)	-0,25 %	-
Consommation de matière secondaire (volume physique)	-0,28 %	-
Consommation de matières primaire et secondaire (volume physique)	-0,26 %	-
Grandeurs relatives à l'énergie		
Consommation finale d'énergie	-7,18 %	-
Consommation finale d'énergie fossile (hors secteur électricité)	-0,30 %	-
Consommation finale d'électricité	-30,46 %	-
Émissions de CO ₂	-2,53 %	-
Prix TTC de l'énergie, hors métallurgie	30,42 %	+

3.2.4 Comparaison des chocs relatifs à l'énergie

De façon analogue aux chocs relatifs à l'économie circulaire, on peut comparer les impacts économiques et environnementaux des chocs précédents, selon qu'ils touchent la France uniquement ou l'économie mondiale dans son ensemble.

La figure 11 s'intéresse à l'impact des chocs, pour la France, en termes de consommation finale d'énergie et d'émissions de CO₂, ce qui peut s'interpréter comme des indicateurs de pressions environnementales liés à la consommation d'énergie. À réduction de consommation finale d'énergie donnée, la taxe carbone entraîne une diminution des émissions de CO₂ nettement plus importante que la taxe sur la consommation d'électricité, dans la mesure où la première cible directement les flux à l'origine des émissions de CO₂. Par ailleurs, au regard de ces deux indicateurs de pressions environnementales, l'impact d'une hausse du prix international des matières fossiles (du fait par exemple de leur épuisement progressif) est proche de celui de la mise en place d'une taxe carbone au niveau mondiale⁴⁹.

⁴⁹ À prix TTC des matières fossiles donnés, la différence entre les deux chocs est liée à la répartition des revenus issus, selon le cas, de la taxe ou de la vente des matières fossiles.

La figure 12 présente l'impact des chocs précédents, pour la France, en termes de PIB et de montant prélevé *ex post*. À montant prélevé donné et lorsqu'elles sont instaurées en France uniquement, la taxe carbone a un impact moins négatif que la taxe sur la consommation d'électricité. En effet, la taxe carbone a pour effet direct une baisse de revenu du secteur d'extraction de matières fossiles, situé à l'étranger, et donc une baisse de revenu du ménage à l'étranger, alors que la taxe sur l'électricité a pour effet direct une baisse de revenu du secteur électricité, situé en France et donc une baisse de revenu du ménage en France. Pour la même raison, lorsque les deux taxes sont instaurées au niveau mondial, l'impact sur le PIB en France reste moins négatif pour la taxe carbone que pour la taxe sur la consommation d'électricité. Ces baisses plus faibles de l'activité dans le cas de la taxe carbone que dans le cas de la taxe sur l'électricité se traduisent par ailleurs par des baisses plus faibles de l'emploi, car l'impact négatif sur la demande de travail est moindre.

Figure 11 : Impact sur la consommation finale d'énergie et sur le PIB de choc relatifs à l'énergie de magnitude croissante

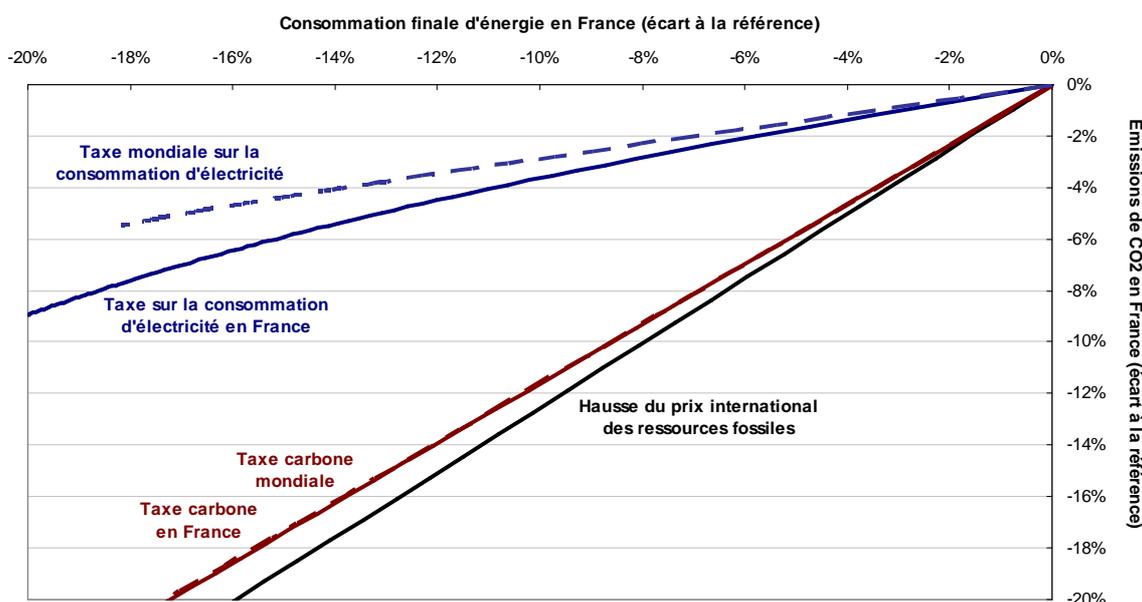
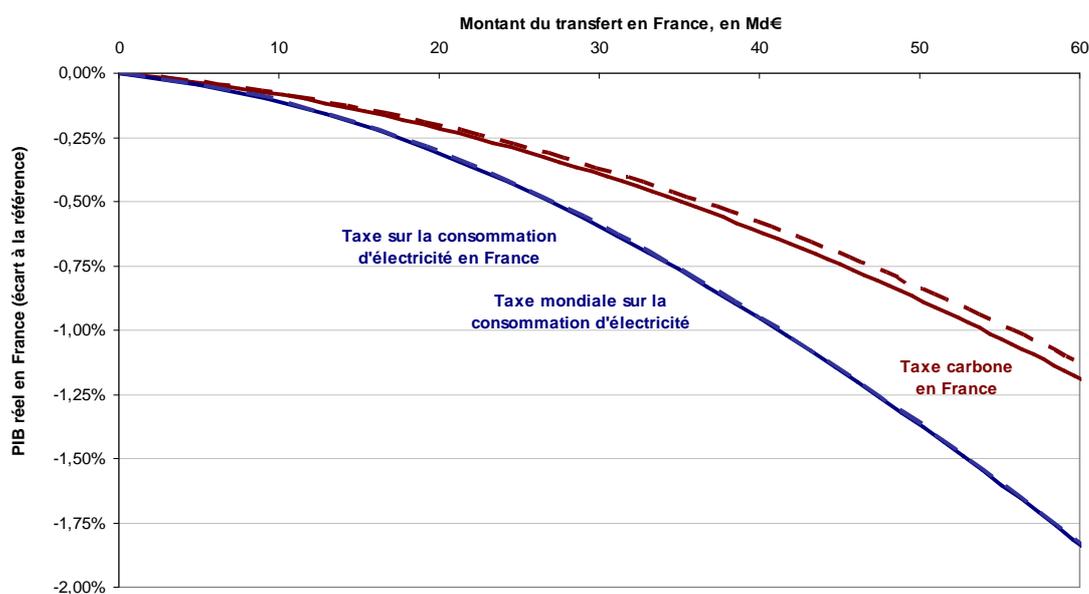


Figure 12 : Impact sur le montant transféré et sur le PIB de choc relatifs à l'énergie de magnitude croissante



Conclusion

Le modèle Vulcain est un modèle d'équilibre général calculable conçu pour étudier les impacts à moyen et long termes, tant économiques que physiques, de politiques environnementales relatives à l'économie circulaire et à l'énergie. Le modèle livre en effet une représentation stylisée de l'économie mondiale et des flux de matières, minérales et fossiles, qui y sont attachés. En particulier, les flux physiques de matières sont intégrés de façon approfondie au sein de la structure économique du modèle. S'agissant des matières minérales, l'intégration nécessite de prendre en compte, dans les flux en amont du processus productif, ceux qui proviennent aussi bien de la matière minérale secondaire, issue du recyclage des déchets, que de la matière minérale primaire. Cette approche est particulièrement innovante et constitue une véritable plus-value par rapport aux modèles existants.

En outre, le caractère global du modèle permet à l'analyse de rendre compte de mécanismes de bouclage macroéconomique, particulièrement pertinents dès lors qu'on souhaite étudier l'impact d'une hausse du prix international des matières premières ou de la mise en place d'une taxe. Enfin, le modèle reposant sur des comportements décrits à l'échelle microéconomique, il est adapté à l'étude de modifications structurelles de l'économie, telles qu'engendrées par des scénarios de transition énergétique ou vers l'économie circulaire.

L'évaluation conjointe des conséquences économiques et physiques d'une politique environnementale donnée permet d'en livrer une analyse multidimensionnelle. Le modèle peut ainsi évaluer, d'une part, la capacité d'un instrument économique à atteindre séparément ou simultanément des objectifs de réduction de consommation de matières minérales, de quantités de déchets stockés ou de consommation d'énergie, et, d'autre part, l'impact de cet instrument sur les grandeurs macroéconomiques agrégées (PIB, emploi, etc.).

De nombreux aspects restent à étudier. En termes de calibration, l'augmentation du nombre d'éléments physiques pris en compte permettrait d'affiner les résultats. En termes de structure, la prise en compte plus complète du système fiscal, ou encore l'analyse de la forme concurrentielle, notamment concernant l'extraction, pourraient représenter des prolongements intéressants. En particulier, cela permettrait d'envisager une redistribution des recettes des taxes en baisse d'impôts plus distorsifs pour obtenir des effets macroéconomiques plus favorables (notamment pour la taxe carbone, un double dividende, c'est-à-dire un effet doublement positif, sur l'environnement et l'activité). En termes de résultats, la disponibilité de données consensuelles relatives à la quantification des externalités environnementales permettrait de réaliser des analyses de l'impact sur le bien-être. Enfin, d'autres aspects plus difficiles à prendre en compte dans le cadre d'un outil macroéconomique, comme le rôle de l'éco-conception, de l'information sur les décisions de tri et d'achat, de la durée de vie des produits, du risque liés aux externalités environnementales, pourraient faire l'objet de travaux *ad hoc* ultérieurs.

Annexes

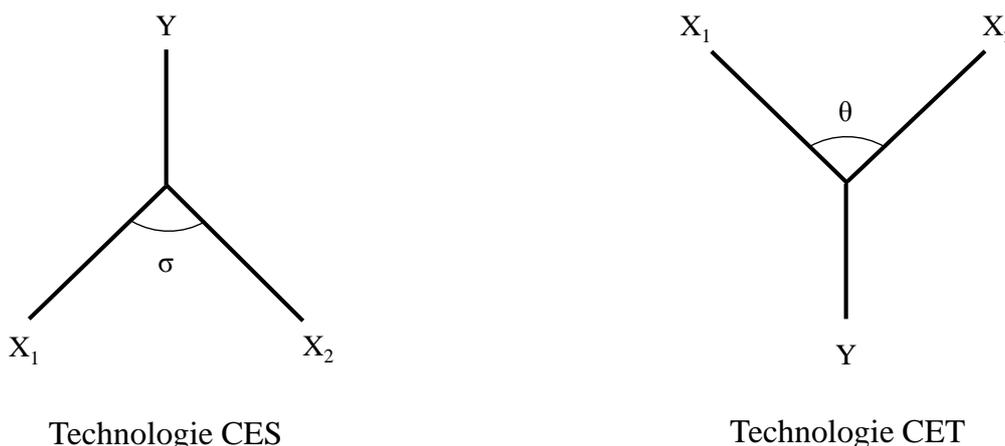
Annexe 1 : Fonctions CES et CET

Les modèles d'équilibre général calculable sont souvent construits à partir de fonctions de production de type « CES » (*Constant Elasticity of Substitution*, c'est-à-dire élasticité de substitution constante) ou « CET » (*Constant Elasticity of Transformation*, c'est-à-dire élasticité de transformation constante) :

- dans une fonction de production de type CES, deux (ou plusieurs) intrants servent à produire le bien de production, l'élasticité de substitution entre les inputs étant supposée constante ;
- dans une fonction de production de type CET, un seul intrant produit deux (ou plusieurs) biens de production, l'élasticité de transformation entre les biens de production étant supposée constante.

Ces deux types de fonction de production sont représentés schématiquement sur la figure 13. Dans le cas de la fonction CES, X_1 et X_2 sont les intrants, Y le bien de production et σ l'élasticité de substitution entre les intrants X_1 et X_2 . Dans le cas de la fonction CET, X_1 et X_2 sont les biens de production, Y l'intrant et θ l'élasticité de transformation entre les biens de production X_1 et X_2 .

Figure 13 : Représentation schématique d'un nœud de production à technologie CES (à gauche) et CET (à droite)



Fonction de production de type CES

Une fonction de production de type CES s'écrit sous la forme suivante :

$$Y^{1-1/\sigma} = A_1 X_1^{1-1/\sigma} + A_2 X_2^{1-1/\sigma}$$

où Y est le bien de production, X_1 et X_2 les intrants et $\sigma > 0$ (avec $\sigma \neq 1$ ⁵⁰) est l'élasticité de substitution entre les intrants X_1 et X_2 . A_1 et A_2 sont des paramètres d'échelle.

Considérant des entreprises pourvues d'une telle fonction de production, situées en concurrence parfaite et considérant par ailleurs le bien Y comme numéraire, le programme d'optimisation d'une entreprise représentative consiste à déterminer X_1 et X_2 de façon à ce que son profit soit maximal. Celui-ci s'écrit de la façon suivante :

$$(A_1 X_1^{1-1/\sigma} + A_2 X_2^{1-1/\sigma})^{\sigma/(\sigma-1)} - (p_1 X_1 + p_2 X_2)$$

⁵⁰ Lorsque σ tend vers 1, on retrouve une technologie Cobb-Douglas.

où p_1 et p_2 sont les prix respectifs des intrants X_1 et X_2 et sont considérés comme donnés.

La résolution analytique de ce programme d'optimisation conduit aux relations suivantes, dites « conditions du premier ordre » :

$$p_1 = A_1 (X_1 / Y)^{-1/\sigma}$$

$$p_2 = A_2 (X_2 / Y)^{-1/\sigma}$$

Ces deux relations traduisent le fait que l'entreprise choisit des quantités d'intrants telles que la productivité marginale de chacun soit égale à son coût.

Par ailleurs, en injectant ces relations dans la fonction de production, on obtient la relation suivante :

$$Y = p_1 X_1 + p_2 X_2$$

Cette relation traduit le fait que le profit est nul à l'équilibre, ce qui résulte du fait que la fonction de production est homogène de degré 1⁵¹.

De plus, les deux conditions du premier ordre impliquent la relation suivante entre le rapport des prix des intrants et leurs quantités :

$$p_1 / p_2 = (A_1 / A_2) (X_1 / X_2)^{-1/\sigma}$$

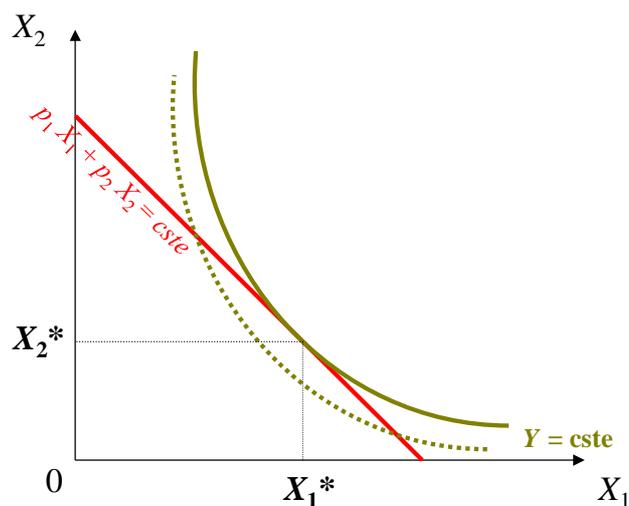
D'où :

$$\partial(X_1/X_2)/(X_1/X_2) / \partial(p_1/p_2)/(p_1/p_2) = -\sigma$$

Lorsque le prix de l'intrant 1 augmente de 1 % par rapport à l'intrant 2, la quantité utilisée d'intrant 1 diminue de σ % par rapport à l'intrant 2. L'élasticité de substitution entre les deux intrants est donc constante, égale à σ .

Le programme d'optimisation peut également se représenter graphiquement : compte tenu d'une fonction de coût donnée $p_1 X_1 + p_2 X_2 = cste$, l'entreprise choisit X_1 et X_2 lui assurant un niveau de production maximal, c'est-à-dire lorsque la courbe d'iso-production est tangente à la fonction de coût (cf. figure A1.1).

⁵¹ Une fonction $f(x, y)$ est dite homogène de degré 1 si, pour tout réel k , on a : $f(k.x, k.y) = k.f(x, y)$.

Figure A1.1 : Maximisation du profit dans le cas d'une fonction de production de type CES


Fonction de production de type CET

Une fonction de production de type CET s'écrit sous la forme suivante⁵² :

$$Y^{1+\theta} = A_1 X_1^{1+\theta} + A_2 X_2^{1+\theta}$$

où \$X_1\$ et \$X_2\$ sont deux biens produits, \$Y\$ l'intrant de production et \$\theta > 0\$ l'élasticité de transformation entre les biens \$X_1\$ et \$X_2\$. \$A_1\$ et \$A_2\$ sont des paramètres d'échelle.

Considérant des entreprises pourvues d'une telle fonction de production, situées en concurrence parfaite et considérant par ailleurs l'intrant \$Y\$ comme numéraire, le programme d'optimisation d'une entreprise représentative consiste à déterminer les niveaux de production \$X_1\$ et \$X_2\$ de façon à ce que le profit soit maximal. Celui-ci s'écrit de la façon suivante :

$$(p_1 X_1 + p_2 X_2) - (A_1 X_1^{1+\theta} + A_2 X_2^{1+\theta})^{\theta/(\theta+1)}$$

où \$p_1\$ et \$p_2\$ sont les prix respectifs des biens \$X_1\$ et \$X_2\$ et sont considérés comme donnés.

La résolution de ce programme d'optimisation conduit aux relations suivantes, dites « conditions du premier ordre » :

$$p_1 = A_1 (X_1 / Y)^{1/\theta}$$

$$p_2 = A_2 (X_2 / Y)^{1/\theta}$$

⁵² Dans le cas CES comme dans le cas CET, la fonction de production peut s'écrire sous la forme générale suivante : \$Y = A_1 X_1 + A_2 X_2\$. Dans le cas CES, le paramètre \$< 1\$ est relié à l'élasticité de substitution \$> 0\$ par la relation \$= 1/(1-)\$, tandis que dans le cas CET, le paramètre \$> 1\$ est relié à l'élasticité de transformation \$> 0\$ par la relation \$= 1/(-1)\$.

Ces deux relations traduisent le fait que l'entreprise choisit, pour chaque bien, un niveau de production tel que le coût marginal de production soit égal au prix du bien. Par ailleurs, en injectant ces relations dans la fonction de production, on obtient la relation suivante :

$$Y = p_1 X_1 + p_2 X_2$$

Cette relation traduit le fait que le profit est nul à l'équilibre, ce qui résulte du fait que la fonction de production est homogène de degré 1.

De plus, les deux conditions du premier ordre impliquent la relation suivante entre le rapport des prix des biens de production et leurs quantités :

$$p_1 / p_2 = (A_1 / A_2) (X_1 / X_2)^{1/\theta}$$

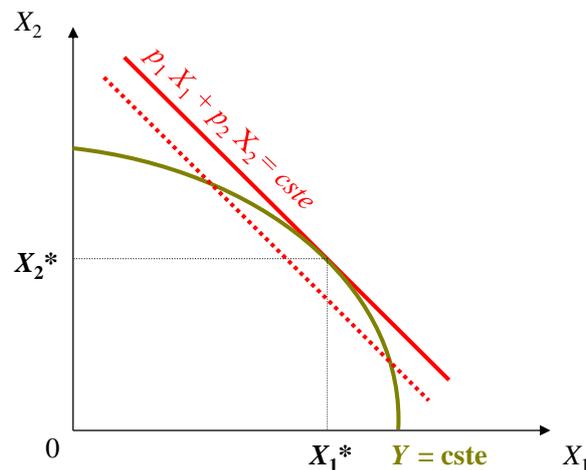
D'où :

$$\partial(X_1/X_2)/(X_1/X_2) / \partial(p_1/p_2)/(p_1/p_2) = \theta$$

Lorsque le prix du bien 1 augmente de 1 % par rapport au bien 2, la quantité produite de bien 1 augmente de θ % par rapport au bien 2. L'élasticité de transformation entre les deux intrants est donc constante, égale à θ ⁵³.

Le programme d'optimisation peut également se représenter graphiquement : compte tenu d'une quantité d'intrant donnée $Y = cste$, l'entreprise choisit X_1 et X_2 lui assurant un « chiffre d'affaires » maximal, c'est-à-dire lorsque la droite $p_1 X_1 + p_2 X_2 = cste$ est tangente à la fonction d'iso-coût (cf. figure A1.2).

Figure A1.2 : Maximisation du profit dans le cas d'une fonction de production de type CET



⁵³ Pour plus d'information concernant la technologie CET, dont l'usage est plus confidentiel que la technologie CES, voir Rutherford et Sigrist (2010).

Annexe 2 : Principales variables du modèle

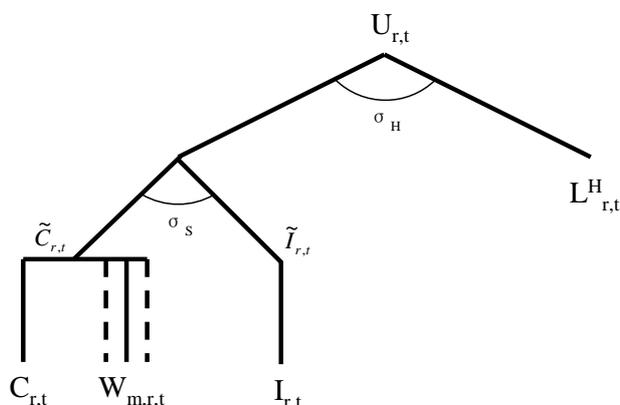
Description	Variable
Prix du capital (taux d'intérêt)	$r_{r,t}$
Offre (dotation) de capital des ménages	$\bar{K}_{r,t}$
Demande de capital du secteur générique	$K_{r,t}^{GEN}$
Demande de capital du secteur d'extraction minérale	$K_{m,r,t}^{MP}$
Demande de capital du secteur d'extraction fossile	$K_{f,r,t}^F$
Demande de capital du secteur de traitement des déchets	$K_{m,r,t}^W$
Demande de capital du secteur de production d'électricité d'origine nucléaire	$K_{r,t}^{NUCL}$
Demande de capital du secteur de production d'électricité d'origine renouvelable	$K_{r,t}^{REN}$
Prix du travail (salaire)	$w_{r,t}$
Offre (dotation) de travail des ménages	$\bar{L}_{r,t}$
Demande de travail des ménages (loisir)	$L_{r,t}^H$
Demande de travail du secteur générique	$L_{r,t}^{GEN}$
Demande de travail du secteur d'extraction minérale	$L_{m,r,t}^{MP}$
Demande de travail du secteur d'extraction fossile	$L_{f,r,t}^F$
Demande de travail du secteur de traitement des déchets	$L_{m,r,t}^W$
Demande de travail du secteur de production d'électricité d'origine nucléaire	$L_{r,t}^{NUCL}$
Demande de travail du secteur de production d'électricité d'origine renouvelable	$L_{r,t}^{REN}$
Prix TTC du service de traitement des déchets	$P_{W,m,r,t}^{TTC}$
Prix HT du service de traitement des déchets par stockage	$P_{WSTOCK,m,r,t}^{HT}$
Prix du service de traitement des déchets par recyclage	$P_{WRECY,m,r,t}$
Taux de taxe sur le service de traitement des déchets par stockage	$\tau_{WSTOCK,m,r,t}$
Offre de service de traitement des déchets par stockage	$W_{m,r,t}^{STOCK}$
Offre de service de traitement des déchets par recyclage	$W_{m,r,t}^{RECY}$
Demande de service de traitement des déchets	$W_{m,t,r}$
Prix TTC de l'électricité	$P_{E,r,t}^{TTC}$
Prix HT de l'électricité	$P_{E,r,t}^{HT}$
Taux de taxe sur l'électricité	$\tau_{E,r,t}$
Offre d'électricité	$E_{r,t}$
Demande d'électricité du secteur générique, hors sidérurgie	$E_{r,t}^{GEN}$
Demande d'électricité du secteur générique, sidérurgie primaire	$E_{m,r,t}^{GEN,P}$
Demande d'électricité du secteur générique, sidérurgie secondaire	$E_{m,r,t}^{GEN,S}$
Prix de la matière minérale primaire (minerai)	$P_{MP,m,r,t}$
Offre de matière minérale primaire	$M_{m,r1,t}^P$
Demande de matière minérale primaire	$M_{m,r2,r1,t}^P$

Description	Variable
Prix TTC de la matière minérale primaire agrégée	$P_{MP,A,m,r,t}^{TTC}$
Prix HT de la matière minérale primaire agrégée	$P_{MP,A,m,r,t}^{HT}$
Taux de taxe sur la matière minérale primaire agrégée	$\tau_{MP,A,m,r,t}$
Offre de matière minérale primaire agrégée	$M_{m,r1,t}^{P,A}$
Demande de matière minérale primaire agrégée	$M_{m,r1,t}^{P,A,GEN}$
Prix de la matière minérale secondaire (déchets métalliques)	$P_{MS,m,r,t}$
Offre de matière minérale secondaire	$M_{m,r1,t}^S$
Demande de matière minérale secondaire	$M_{m,r2,r1,t}^S$
Prix de la matière minérale secondaire agrégée	$P_{MS,A,m,r,t}$
Offre de matière minérale secondaire agrégée	$M_{m,r1,t}^{S,A}$
Demande de matière minérale secondaire agrégée	$M_{m,r1,t}^{S,A,GEN}$
Prix de la matière fossile	$P_{F,f,r,t}$
Offre de matière fossile	$F_{f,r1,t}$
Demande de matière fossile	$F_{f,r2,r1,t}$
Prix TTC de la matière fossile agrégée	$P_{F,A,f,r,t}^{TTC}$
Prix HT de la matière fossile agrégée	$P_{F,A,f,r,t}^{HT}$
Taux de taxe sur la matière fossile agrégée	$\tau_{F,A,f,r,t}$
Offre de matière fossile agrégée	$F_{f,r1,t}^A$
Demande de matière fossile agrégée du secteur générique, hors sidérurgie	$F_{f,r1,t}^{A,GEN}$
Demande de matière fossile agrégée du secteur générique, sidérurgie primaire	$F_{m,f,r,t}^{A,GEN,P}$
Demande de matière fossile agrégée du secteur générique, sidérurgie secondaire	$F_{m,f,r,t}^{A,GEN,S}$
Demande de matière fossile agrégée du secteur de production d'électricité	$F_{f,r,t}^{A,E}$
Prix du bien générique	$P_{Y,r,t}$
Offre de bien générique	$Y_{r1,t}$
Demande de bien générique	$Y_{r2,r1,t}$
Prix du bien générique agrégé	$P_{Y,A,r,t}$
Offre de bien générique agrégé	$Y_{r1,t}^A$
Demande de bien générique agrégé pour consommation	$C_{r,t}$
Demande de bien générique agrégé pour investissement	$I_{r,t}$
Transfert au ménage	$T_{r,t}$
Variable de vérification de la loi de Walras	$Leon_t$

Annexe 3 : Principales équations du modèle

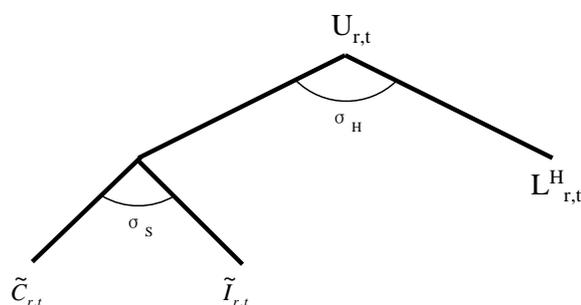
1. Ménage

Figure A3.1 : Structure globale du ménage



Contrainte budgétaire du ménage :

$$r_{r,t} \cdot \bar{K}_{r,t} + w_{r,t} \cdot \bar{L}_{r,t} + T_{r,t} = p_{U,r,t} \cdot U_{r,t} \quad (1)$$

 Figure A3.2 : Structure des étages supérieurs du ménage
(composés uniquement de fonctions CES)


Étages supérieurs, condition de zéro profit⁵⁴ et conditions du premier ordre ($F_r^{\text{ménage}}$ est une CES imbriquée dont la structure est définie par la figure A3.2) :

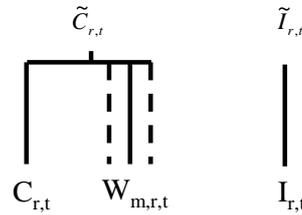
$$p_{U,r,t} \cdot U_{r,t} = p_{\tilde{C},r,t} \cdot \tilde{C}_{r,t} + p_{\tilde{I},r,t} \cdot \tilde{I}_{r,t} + w_{r,t} \cdot L^H_{r,t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{ménage}}}{\partial \tilde{C}} (\tilde{C}_{r,t}, \tilde{I}_{r,t}, A_{r,t}^L \cdot L^H_{r,t}) = \frac{p_{\tilde{C},r,t}}{p_{U,r,t}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{ménage}}}{\partial \tilde{I}} (\tilde{C}_{r,t}, \tilde{I}_{r,t}, A_{r,t}^L \cdot L^H_{r,t}) = \frac{p_{\tilde{I},r,t}}{p_{U,r,t}} \quad (4)$$

⁵⁴ Avec une fonction de production homogène de degré un, il est formellement équivalent d'écrire la condition de zéro profit ou la fonction de production d'après le théorème d'Euler (l'une pouvant être déduite de l'autre en utilisant les conditions du premier ordre). La première solution est retenue, dans la mesure où la condition de zéro profit est linéaire et donc plus facile à résoudre pour le solveur.

$$A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_r^{\text{ménage}}}{\partial L}(\tilde{C}_{r,t}, \tilde{I}_{r,t}, A_{r,t}^L, L_{r,t}^H) = \frac{w_{r,t}}{p_{U,r,t}} \quad (5)$$

Figure A3.3 : Structure de l'étage inférieur du ménage


Étage inférieur, condition de zéro profit et fonctions de demande (avec une externalité pour la demande de services de traitement des déchets, dans la mesure où les quantités demandées dépendent des quantités de matière utilisées pour produire les biens génériques de chaque région r1, cette matière pouvant provenir de différentes régions r2) :

$$p_{\tilde{C},r,t} \cdot \tilde{C}_{r,t} = p_{Y,A,r,t} \cdot C_{r,t} + \sum_m p_{W,m,r,t}^{TTC} \cdot W_{m,r,t} \quad (6)$$

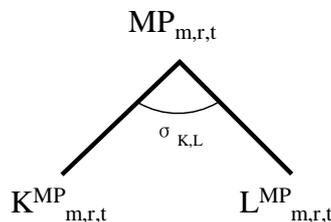
$$C_{r,t} = \tilde{C}_{r,t} \quad (7)$$

$$W_{m,t,r} = \frac{C_{r,t}}{C_{r,t} + I_{r,t}} \sum_{r1} \sum_{r2} (M_{m,r1,r2,t}^P + M_{m,r1,r2,t}^S) \frac{Y_{r,r1,t}}{Y_{r1,t}} \quad (8)$$

$$p_{\tilde{I},r,t} \cdot \tilde{I}_{r,t} = p_{Y,A,r,t} \cdot I_{r,t} \quad (9)$$

$$\tilde{I}_{r,t} = I_{r,t} \quad (10)$$

2. Secteur de l'extraction minérale

Figure A3.4 : Structure du secteur de l'extraction minérale (composé d'une unique fonction CES)


Condition de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_{m,r}^{\text{extraction minérale}}$ est une CES simple dont la structure est définie par la figure A3.4) :

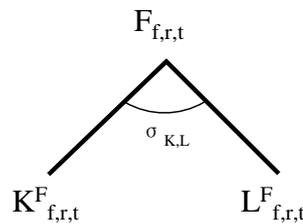
$$p_{MP,m,r,t} \cdot M_{m,r,t}^P = r_{r,t} \cdot K_{m,r,t}^{MP} + w_{r,t} \cdot L_{m,r,t}^{MP} \quad (11)$$

$$A_{m,r,t}^{\text{extraction minérale}} \cdot \frac{\partial F_{m,r}^{\text{extraction minérale}}}{\partial K_{m,r,t}^{MP}} (K_{m,r,t}^{MP}, A_{r,t}^L \cdot L_{m,r,t}^{MP}) = \frac{r_{r,t}}{P_{MP,m,r,t}} \quad (12)$$

$$A_{m,r,t}^{\text{extraction minérale}} \cdot A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_{m,r}^{\text{extraction minérale}}}{\partial L_{m,r,t}^{MP}} (K_{m,r,t}^{MP}, A_{r,t}^L \cdot L_{m,r,t}^{MP}) = \frac{w_{r,t}}{P_{MP,m,r,t}} \quad (13)$$

3. Secteur de l'extraction fossile

**Figure A3.5 : Structure du secteur de l'extraction minérale
(composé d'une unique fonction CES)**



Condition de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_{f,r}^{\text{extraction fossile}}$ est une CES simple dont la structure est définie par la figure A3.5) :

$$p_{F,f,r,t} \cdot F_{f,r,t} = r_{r,t} \cdot K_{f,r,t}^F + w_{r,t} \cdot L_{f,r,t}^F \quad (14)$$

$$A_{f,r,t}^{\text{extraction fossile}} \cdot \frac{\partial F_{f,r}^{\text{extraction fossile}}}{\partial K_{f,r,t}^F} (K_{f,r,t}^F, A_{r,t}^L \cdot L_{f,r,t}^F) = \frac{r_{r,t}}{P_{F,f,r,t}} \quad (15)$$

$$A_{f,r,t}^{\text{extraction fossile}} \cdot A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_{f,r}^{\text{extraction fossile}}}{\partial L_{f,r,t}^F} (K_{f,r,t}^F, A_{r,t}^L \cdot L_{f,r,t}^F) = \frac{w_{r,t}}{P_{F,f,r,t}} \quad (16)$$

4. Secteur du service de traitement des déchets

Figure A3.6 : Structure globale du secteur de traitement des déchets

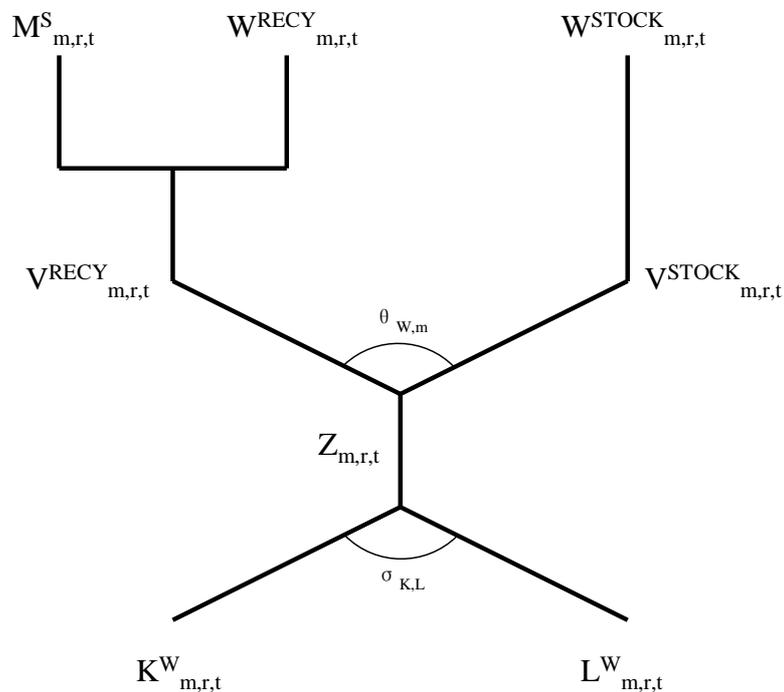
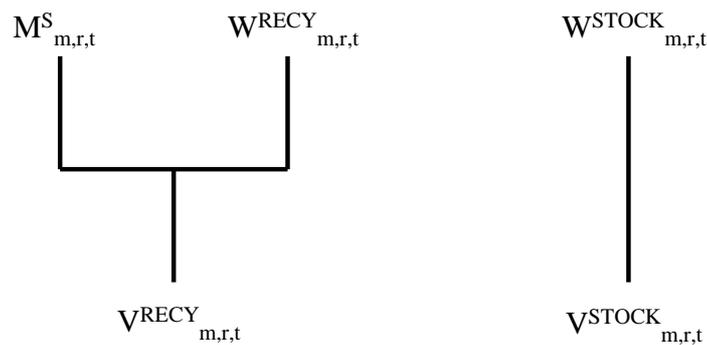


Figure A3.7 : Structure de l'étage supérieur du secteur du service de traitement des déchets (traitement des déchets par recyclage à gauche et par stockage à droite)



Étage supérieur gauche (traitement des déchets par recyclage), condition de zéro profit et fonctions d'offre :

$$p_{MS,m,r,t} \cdot M^S_{m,r,t} + p_{WRECY,m,r,t} \cdot W^{RECY}_{m,r,t} = p_{VRECY,m,r,t} \cdot V^{RECY}_{m,r,t} \quad (17)$$

$$M^S_{m,r,t} = V^{RECY}_{m,r,t} \quad (18)$$

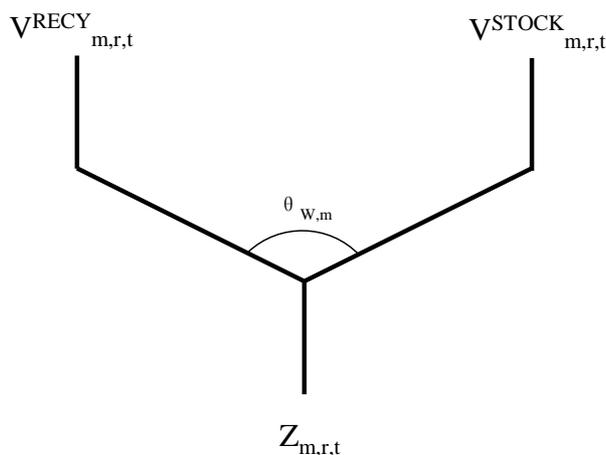
$$W^{RECY}_{m,r,t} = V^{RECY}_{m,r,t} \quad (19)$$

Étage supérieur droit (traitement des déchets par stockage), condition de zéro profit et fonction d'offre :

$$P_{WSTOCK,m,r,t}^{HT} \cdot W_{m,r,t}^{STOCK} = P_{VSTOCK,m,r,t} \cdot V_{m,r,t}^{STOCK} \quad (20)$$

$$W_{m,r,t}^{STOCK} = V_{m,r,t}^{STOCK} \quad (21)$$

Figure A3.8 : Structure de l'étage intermédiaire du secteur du service de traitement des déchets permettant l'arbitrage entre traitement des déchets par recyclage et par stockage (composé d'une unique fonction CET)



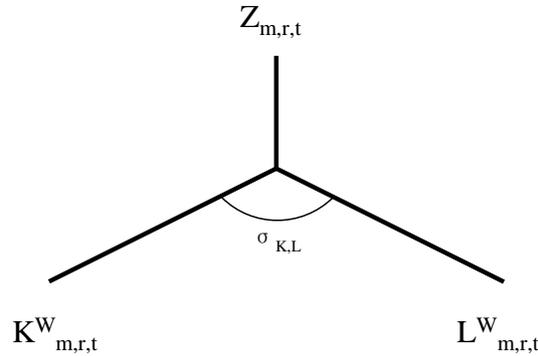
Étage intermédiaire (nœud permettant d'endogénéiser le taux de recyclage), condition de zéro profit et conditions du premier ordre (définissant les quantités offertes $V_{m,r,t}^{RECY}$ et $V_{m,r,t}^{STOCK}$ en fonction des prix relatifs), où $F_{m,r}^{\text{déchets, étage intermédiaire}}$ est une fonction CET simple dont la structure est définie par la figure A3.8 :

$$P_{VRECY,m,r,t} \cdot V_{m,r,t}^{RECY} + P_{VSTOCK,m,r,t} \cdot V_{m,r,t}^{STOCK} = P_{Z,m,r,t} \cdot Z_{m,r,t} \quad (22)$$

$$\frac{\partial F_{m,r}^{\text{déchets, étage intermédiaire}}}{\partial V_{m,r,t}^{RECY}} \left(V_{m,r,t}^{RECY}, V_{m,r,t}^{STOCK} \right) = \frac{P_{VRECY,m,r,t}}{P_{Z,m,r,t}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial F_{m,r}^{\text{déchets, étage intermédiaire}}}{\partial V_{m,r,t}^{STOCK}} \left(V_{m,r,t}^{RECY}, V_{m,r,t}^{STOCK} \right) = \frac{P_{VSTOCK,m,r,t}}{P_{Z,m,r,t}} \quad (24)$$

Figure A3.9 : Structure de l'étage inférieur du secteur du service de traitement des déchets (composé d'une unique fonction CES)



Étage inférieur, condition de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_{m,r}^{\text{déchets, étage inférieur}}$ est une CES simple dont la structure est définie par la figure A3.9) :

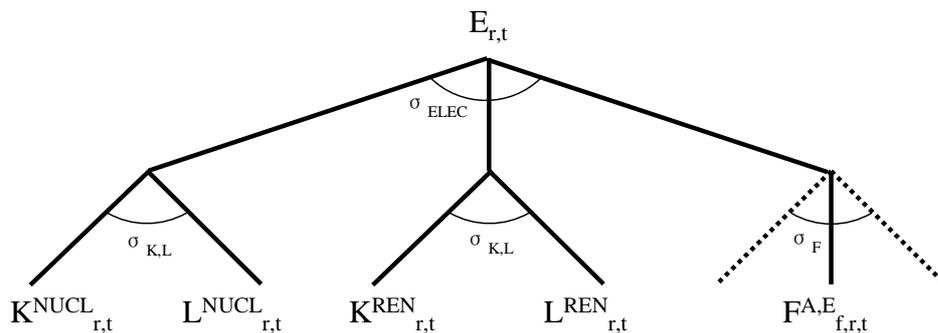
$$p_{Z,m,r,t} \cdot Z_{m,r,t} = r_{r,t} \cdot K_{m,r,t}^W + w_{r,t} \cdot L_{m,r,t}^W \quad (25)$$

$$\frac{\partial F_{m,r}^{\text{déchets, étage inférieur}}}{\partial K_{m,r,t}^W} (K_{m,r,t}^W, A_{r,t}^L \cdot L_{m,r,t}^W) = \frac{r_{r,t}}{p_{Z,m,r,t}} \quad (26)$$

$$A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_{m,r}^{\text{déchets, étage inférieur}}}{\partial L_{m,r,t}^W} (K_{m,r,t}^W, A_{r,t}^L \cdot L_{m,r,t}^W) = \frac{w_{r,t}}{p_{Z,m,r,t}} \quad (27)$$

5. Secteur de production de l'électricité

Figure A3.10 : Structure du secteur de production de l'électricité (composé uniquement de fonctions CES)



Condition de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_r^{\text{électricité}}$ est une CES imbriquée dont la structure est définie par la figure A3.10) :

$$p_{E,r,t}^{HT} \cdot E_{r,t} = r_{r,t} \cdot (K_{r,t}^{NUCL} + K_{r,t}^{REN}) + w_{r,t} \cdot (L_{r,t}^{NUCL} + L_{r,t}^{REN}) + \sum_f p_{F,A,f,r,t}^{HT} \cdot F_{f,r,t}^{A,E} \quad (28)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{électricité}}}{\partial K_{r,t}^{\text{NUCL}}} \left(K_{r,t}^{\text{NUCL}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{NUCL}}, K_{r,t}^{\text{REN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{REN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,E}})_f \right) = \frac{r_{r,t}}{P_{E,r,t}^{\text{HT}}} \quad (29)$$

$$A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_r^{\text{électricité}}}{\partial L_{r,t}^{\text{NUCL}}} \left(K_{r,t}^{\text{NUCL}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{NUCL}}, K_{r,t}^{\text{REN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{REN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,E}})_f \right) = \frac{w_{r,t}}{P_{E,r,t}^{\text{HT}}} \quad (30)$$

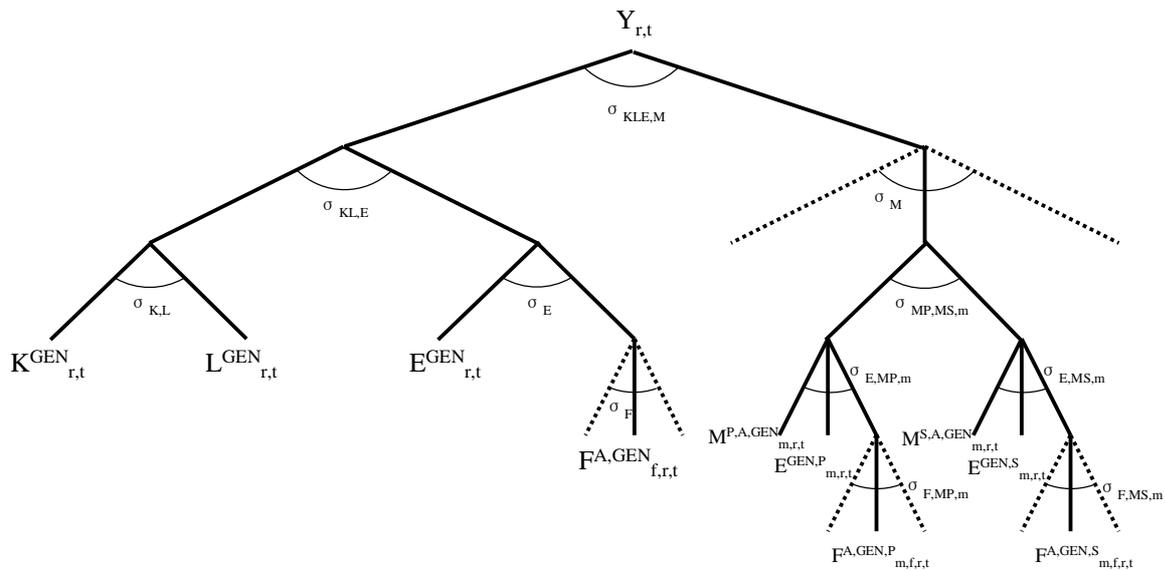
$$\frac{\partial F_r^{\text{électricité}}}{\partial K_{r,t}^{\text{REN}}} \left(K_{r,t}^{\text{NUCL}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{NUCL}}, K_{r,t}^{\text{REN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{REN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,E}})_f \right) = \frac{r_{r,t}}{P_{E,r,t}^{\text{HT}}} \quad (31)$$

$$A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_r^{\text{électricité}}}{\partial L_{r,t}^{\text{REN}}} \left(K_{r,t}^{\text{NUCL}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{NUCL}}, K_{r,t}^{\text{REN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{REN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,E}})_f \right) = \frac{w_{r,t}}{P_{E,r,t}^{\text{HT}}} \quad (32)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{électricité}}}{\partial F_{f,r,t}^{\text{E,A}}} \left(K_{r,t}^{\text{NUCL}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{NUCL}}, K_{r,t}^{\text{REN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{REN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,E}})_f \right) = \frac{P_{F,A,f,r,t}^{\text{HT}}}{P_{E,r,t}^{\text{HT}}} \quad (33)$$

6. Secteur de production du bien générique

**Figure A3.11 : Structure du secteur de production du bien générique
(composé uniquement de fonctions CES)**



Condition de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_r^{\text{générique}}$ est une CES imbriquée dont la structure est définie par la figure A3.11) :

$$\begin{aligned} p_{Y,r,t} \cdot Y_{r,t} &= r_{r,t} \cdot K_{r,t}^{\text{GEN}} + w_{r,t} \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}} + p_{E,r,t}^{\text{TTC}} \cdot E_{r,t}^{\text{GEN}} + \sum_f p_{F,A,f,r,t}^{\text{TTC}} \cdot F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}} \\ &+ \sum_m \left(p_{MP,A,m,r,t}^{\text{TTC}} \cdot M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}} + p_{E,m,r,t}^{\text{HT}} \cdot E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}} + \sum_f p_{F,A,f,r,t}^{\text{HT}} \cdot F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}} \right) \\ &+ \sum_m \left(p_{MS,A,m,r,t} \cdot M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}} + p_{E,m,r,t}^{\text{HT}} \cdot E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}} + \sum_f p_{F,A,f,r,t}^{\text{HT}} \cdot F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}} \right) \quad (34) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial K_{r,t}^{\text{GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{r_{r,t}}{P_{Y,r,t}} \quad (35)$$

$$A_{r,t}^L \cdot \frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial L_{r,t}^{\text{GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{w_{r,t}}{P_{Y,r,t}} \quad (36)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial E_{r,t}^{\text{GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{E,r,t}^{\text{TTC}}}{P_{Y,r,t}} \quad (37)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{F,A,f,r,t}^{\text{TTC}}}{P_{Y,r,t}} \quad (38)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{MP,A,m,r,t}^{\text{TTC}}}{P_{Y,r,t}} \quad (39)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{E,r,t}^{\text{HT}}}{P_{Y,r,t}} \quad (40)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{F,A,f,r,t}^{\text{HT}}}{P_{Y,r,t}} \quad (41)$$

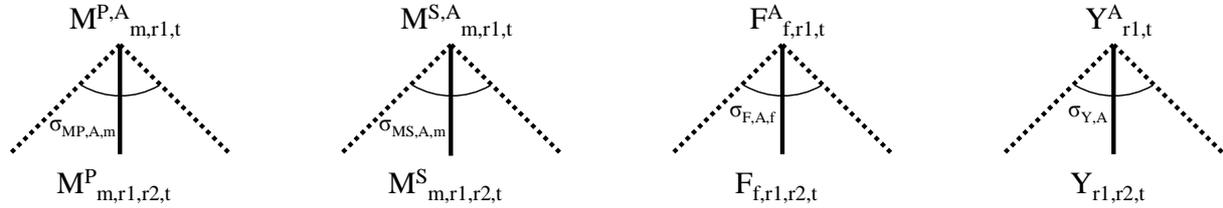
$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{MS,A,m,r,t}}{P_{Y,r,t}} \quad (42)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{E,r,t}^{\text{HT}}}{P_{Y,r,t}} \quad (43)$$

$$\frac{\partial F_r^{\text{générique}}}{\partial F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}}} \left(K_{r,t}^{\text{GEN}}, A_{r,t}^L \cdot L_{r,t}^{\text{GEN}}, E_{r,t}^{\text{GEN}}, (F_{f,r,t}^{\text{A,GEN}})_f, (M_{m,r,t}^{\text{P,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,P}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,P}})_f, M_{m,r,t}^{\text{S,A,GEN}}, E_{m,r,t}^{\text{GEN,S}}, (F_{m,f,r,t}^{\text{A,GEN,S}})_f)_m \right) \\ = \frac{P_{F,A,f,r,t}^{\text{HT}}}{P_{Y,r,t}} \quad (44)$$

7. Économie ouverte

Figure A3.12 : Structure des secteurs agrégeant les biens produits dans les différentes régions - de gauche à droite, matière minérale primaire, matière minérale secondaire, matière fossile et bien générique (pour chaque bien, la structure est composée d'une unique fonction CES)



Note : r2 dénote la région de production du bien et r1 la région d'utilisation du bien agrégé associé.

Conditions de zéro profit et conditions du premier ordre ($F_{m,r1}^{Armington\ matière\ primaire}$, $F_{m,r1}^{Armington\ matière\ secondaire}$, $F_{f,r1}^{Armington\ matière\ fossile}$ et $F_{r1}^{Armington\ bien\ générique}$ sont des CES dont les structures sont définies par la figure A3.12) :

$$P_{MP,A,m,r1,t}^{HT} \cdot M_{m,r1,t}^{P,A} = \sum_{r2} P_{MP,m,r1,r2,t} \cdot M_{m,r1,r2,t}^P \quad (45)$$

$$\frac{\partial F_{m,r1}^{Armington\ matière\ primaire}}{\partial M_{m,r1,r2,t}^P} (M_{m,r1,r2,t}^P) = \frac{P_{MP,m,r1,r2,t}}{P_{MP,A,m,r1,t}^{HT}} \quad (46)$$

$$P_{MS,A,m,r1,t} \cdot M_{m,r1,t}^{S,A} = \sum_{r2} P_{MS,m,r1,r2,t} \cdot M_{m,r1,r2,t}^S \quad (47)$$

$$\frac{\partial F_{m,r1}^{Armington\ matière\ secondaire}}{\partial M_{m,r1,r2,t}^S} (M_{m,r1,r2,t}^S) = \frac{P_{MS,m,r1,r2,t}}{P_{MS,A,m,r1,t}} \quad (48)$$

$$P_{F,A,f,r1,t}^{HT} \cdot F_{f,r1,t}^A = \sum_{r2} P_{F,f,r1,r2,t} \cdot F_{f,r1,r2,t} \quad (49)$$

$$\frac{\partial F_{f,r1}^{Armington\ matière\ fossile}}{\partial F_{f,r1,r2,t}} (F_{f,r1,r2,t}) = \frac{P_{F,f,r1,r2,t}}{P_{F,A,f,r1,t}^{HT}} \quad (50)$$

$$P_{Y,A,r1,t} \cdot Y_{r1,t}^A = \sum_{r2} P_{Y,r1,r2,t} \cdot Y_{r1,r2,t} \quad (51)$$

$$\frac{\partial F_{r1}^{Armington\ bien\ générique}}{\partial Y_{r1,r2,t}} (Y_{r1,r2,t}) = \frac{P_{Y,r1,r2,t}}{P_{Y,A,r1,t}} \quad (52)$$

8. État

Les recettes proviennent des différentes taxes implémentées dans le modèle (taxe sur la matière minérale primaire, taxe sur la matière fossile, taxe sur le service de traitement des déchets par stockage et taxe sur l'électricité) et sont intégralement transférées au ménage (pour chaque date et chaque région, le budget de l'État est équilibré).

$$\sum_m \tau_{MP,A,m,r,t} \cdot P_{MP,A,m,r,t}^{HT} \cdot M_{m,r,t}^{P,A,GEN} + \sum_f \tau_{F,A,f,r,t} \cdot P_{F,A,f,r,t}^{HT} \cdot F_{f,r,t}^{A,GEN} + \sum_m \tau_{WSTOCK,m,r,t} \cdot P_{WSTOCK,m,r,t}^{HT} \cdot W_{m,r,t}^{STOCK} + \tau_{E,r,t} \cdot P_{E,r,t}^{HT} \cdot E_{r,t}^{GEN} = T_{r,t} \quad (53)$$

9. Prix hors taxe et toutes taxes comprises

$$P_{MP,A,m,r,t}^{TTC} = (1 + \tau_{MP,A,m,r,t}) \cdot P_{MP,A,m,r,t}^{HT} \quad (54)$$

$$P_{F,A,f,r,t}^{TTC} = (1 + \tau_{F,A,f,r,t}) \cdot P_{F,A,f,r,t}^{HT} \quad (55)$$

$$P_{W,m,r,t}^{TTC} = (1 + \tau_{WSTOCK,m,r,t}) \cdot P_{WSTOCK,m,r,t}^{HT} \quad (56)$$

$$P_{W,m,r,t}^{TTC} = P_{WRECY,m,r,t} \quad (57)$$

$$P_{E,r,t}^{TTC} = (1 + \tau_{E,r,t}) \cdot P_{E,r,t}^{HT} \quad (58)$$

10. Équilibre des marchés

Équilibre entre l'offre et la demande pour les quatre marchés fermés (capital, travail, service de traitement des déchets et électricité) :

$$\bar{K}_{r,t} = \sum_m K_{m,r,t}^{MP} + \sum_f K_{f,r,t}^F + \sum_m K_{m,r,t}^W + K_{r,t}^{NUCL} + K_{r,t}^{REN} + K_{r,t}^{GEN} \quad (59)$$

$$\bar{L}_{r,t} = \sum_m L_{m,r,t}^{MP} + \sum_f L_{f,r,t}^F + \sum_m L_{m,r,t}^W + L_{r,t}^{NUCL} + L_{r,t}^{REN} + L_{r,t}^{GEN} + L_{r,t}^H \quad (60)$$

$$W_{m,r,t}^{RECY} + W_{m,r,t}^{STOCK} = W_{m,t,r} \quad (61)$$

$$E_{r,t} = E_{r,t}^{GEN} + \sum_m (E_{m,r,t}^{GEN,P} + E_{m,r,t}^{GEN,S}) \quad (62)$$

Équilibre entre l'offre et la demande pour les marchés ouverts (bien générique, matière minérale primaire, matière minérale secondaire, matière fossile), avec, pour chaque bien, à la fois l'équilibre pour le bien produit dans chaque région et le bien utilisé dans chaque région :

$$Y_{r1,t} = \sum_{r2} Y_{r2,r1,t} + 1_{r1=France} \cdot Leon_t \quad (63)$$

$$Y_{r,t}^A = C_{r,t} + I_{r,t} \quad (64)$$

$$M_{m,r1,t}^P = \sum_{r2} M_{m,r2,r1,t}^P \quad (65)$$

$$M_{m,r,t}^{P,A} = M_{m,r,t}^{P,A,GEN} \quad (66)$$

$$M_{m,r1,t}^S = \sum_{r2} M_{m,r2,r1,t}^S \quad (67)$$

$$M_{m,r,t}^{S,A} = M_{m,r,t}^{S,A,GEN} \quad (68)$$

$$F_{f,r1,t} = \sum_{r2} F_{f,r2,r1,t} \quad (69)$$

$$F_{f,r,t}^A = F_{f,r,t}^{A,GEN} + F_{f,r,t}^{A,E} + \sum_m (F_{m,f,r,t}^{A,GEN,P} + F_{m,f,r,t}^{A,GEN,S}) \quad (70)$$

11. Dynamique

Accumulation du capital :

$$\bar{K}_{r,t+1} = (1 - \delta_r) \bar{K}_{r,t} + I_{r,t} \quad (71)$$

Croissance exogène de l'offre de travail :

$$\bar{L}_{r,t+1} = (1 + n_r) \bar{L}_{r,t} \quad (72)$$

Augmentation exogène de l'efficacité du travail :

$$A_{r,t+1}^L = (1 + a_r^L) A_{r,t}^L. \quad (73)$$

La productivité globale des facteurs des secteurs extractifs (extraction minérale et fossile) est fonction de la somme des extractions passées :

$$A_{m,r,t+1}^{\text{extraction minérale}} = \alpha_{m,r}^0 \cdot \text{EXP} \left(-\alpha_{m,r}^1 \cdot \sum_{\tau \leq t} M_{m,r,\tau}^P \right) \quad (74)$$

$$A_{f,r,t+1}^{\text{extraction fossile}} = \alpha_{f,r}^0 \cdot \text{EXP} \left(-\alpha_{f,r}^1 \cdot \sum_{\tau \leq t} F_{f,r,\tau} \right) \quad (75)$$

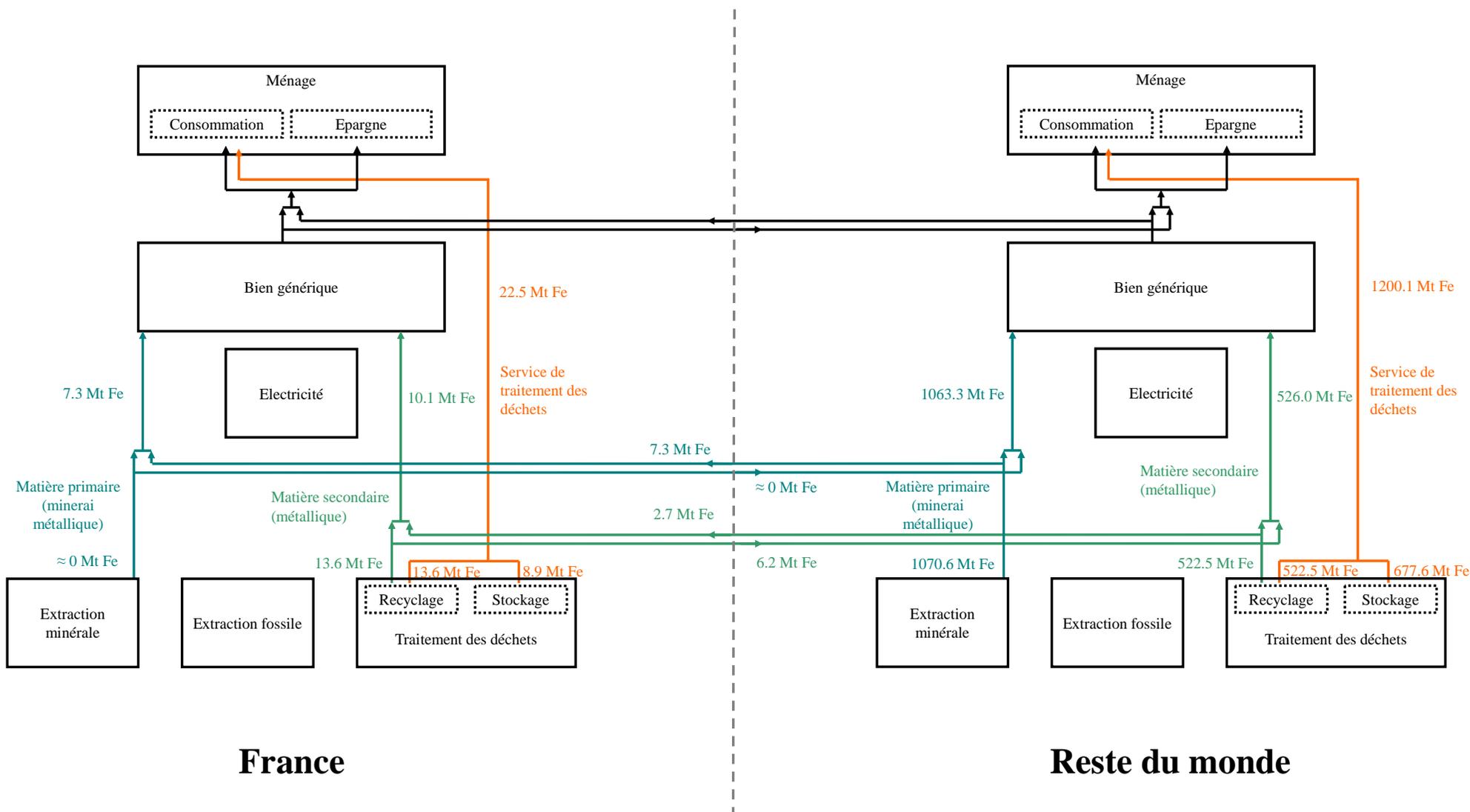
Annexe 4 : Flux de matières minérales et fossiles

Ces flux physiques des éléments fer et aluminium sont calibrés à partir des niveaux de productions primaires et secondaires. Les quantités de déchets générés sont calculées en utilisant l'hypothèse d'homogénéité du bien générique en chaque matière dans chaque région.

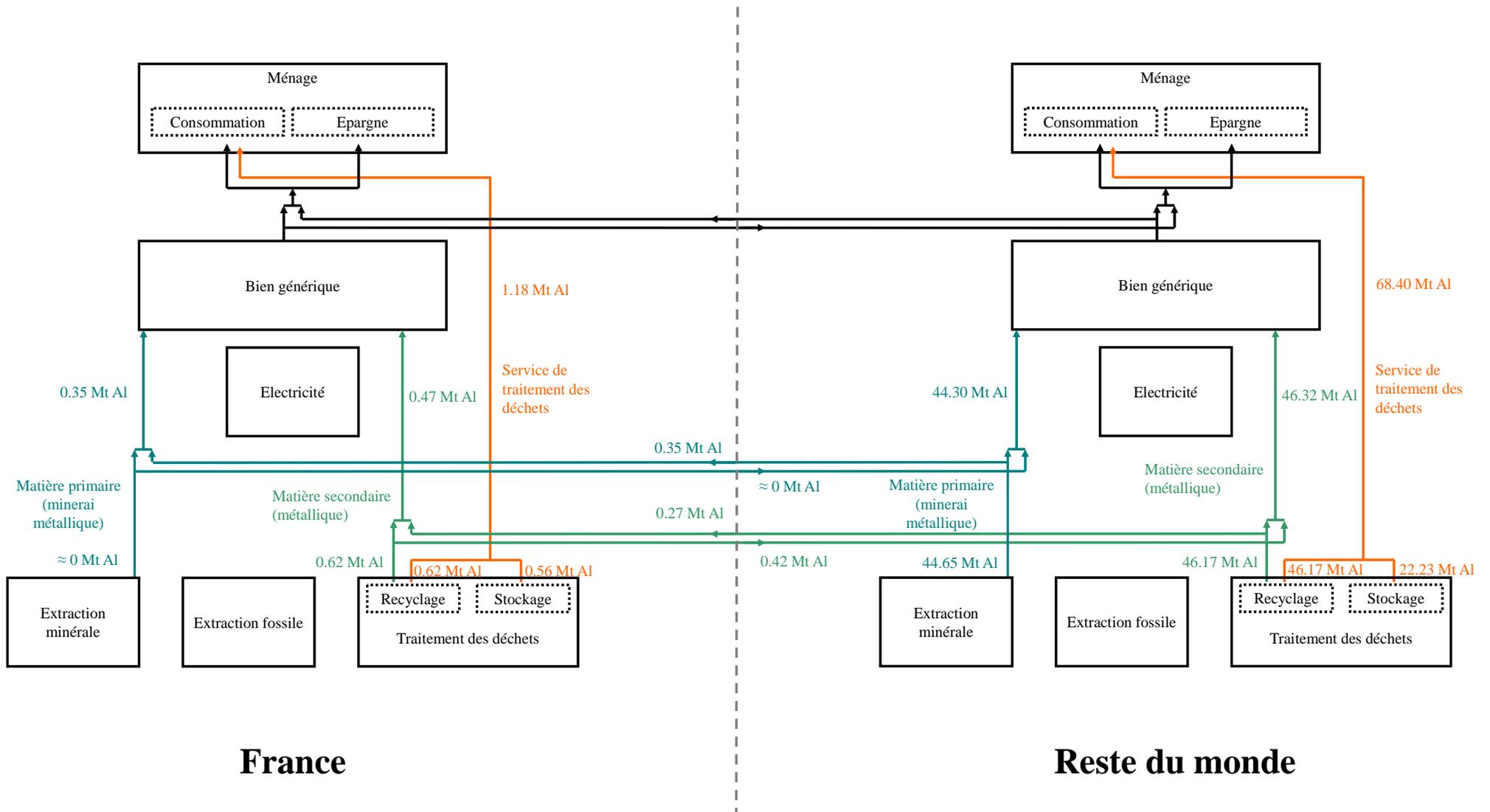
Les quantités de déchets stockés en sont alors déduites, en utilisant les niveaux de productions secondaires. Cette méthode présente l'avantage de la simplicité mais conduit vraisemblablement à surestimer les quantités de déchets générés (car les biens investis, utilisés dans les infrastructures, sont plus intensifs en matière que les biens consommés) et donc les quantités de déchets stockés.

Selon la revue de littérature de PNUE (2011), le taux de recyclage de l'élément fer issu des produits en fin de vie est compris entre 52 % et 90 % selon les sources, et celle de l'élément aluminium entre 42 % et 70 %.

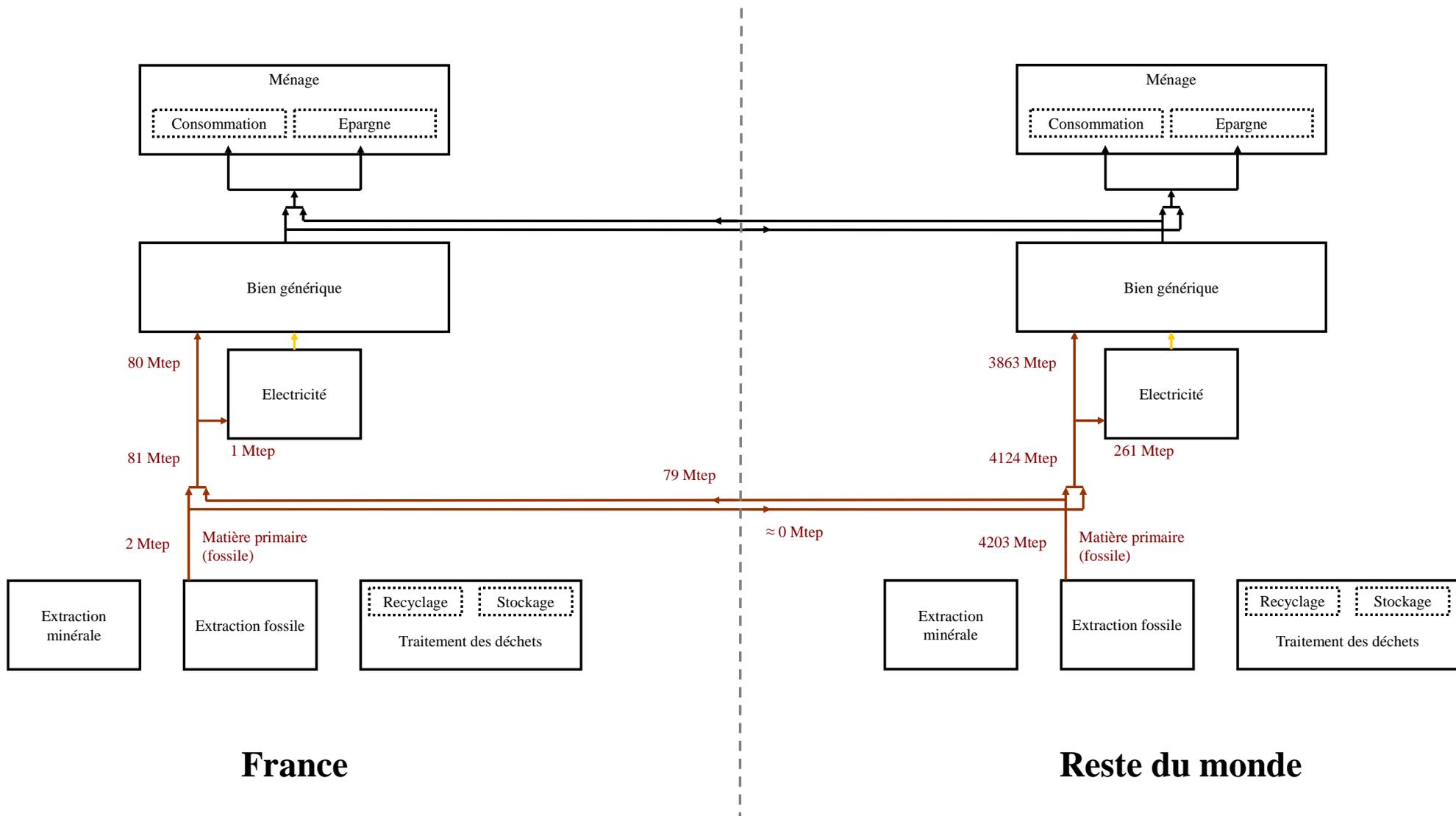
**Figure A4.1 : Flux physiques de l'élément fer en 2012
(en millions de tonnes de l'élément fer)**



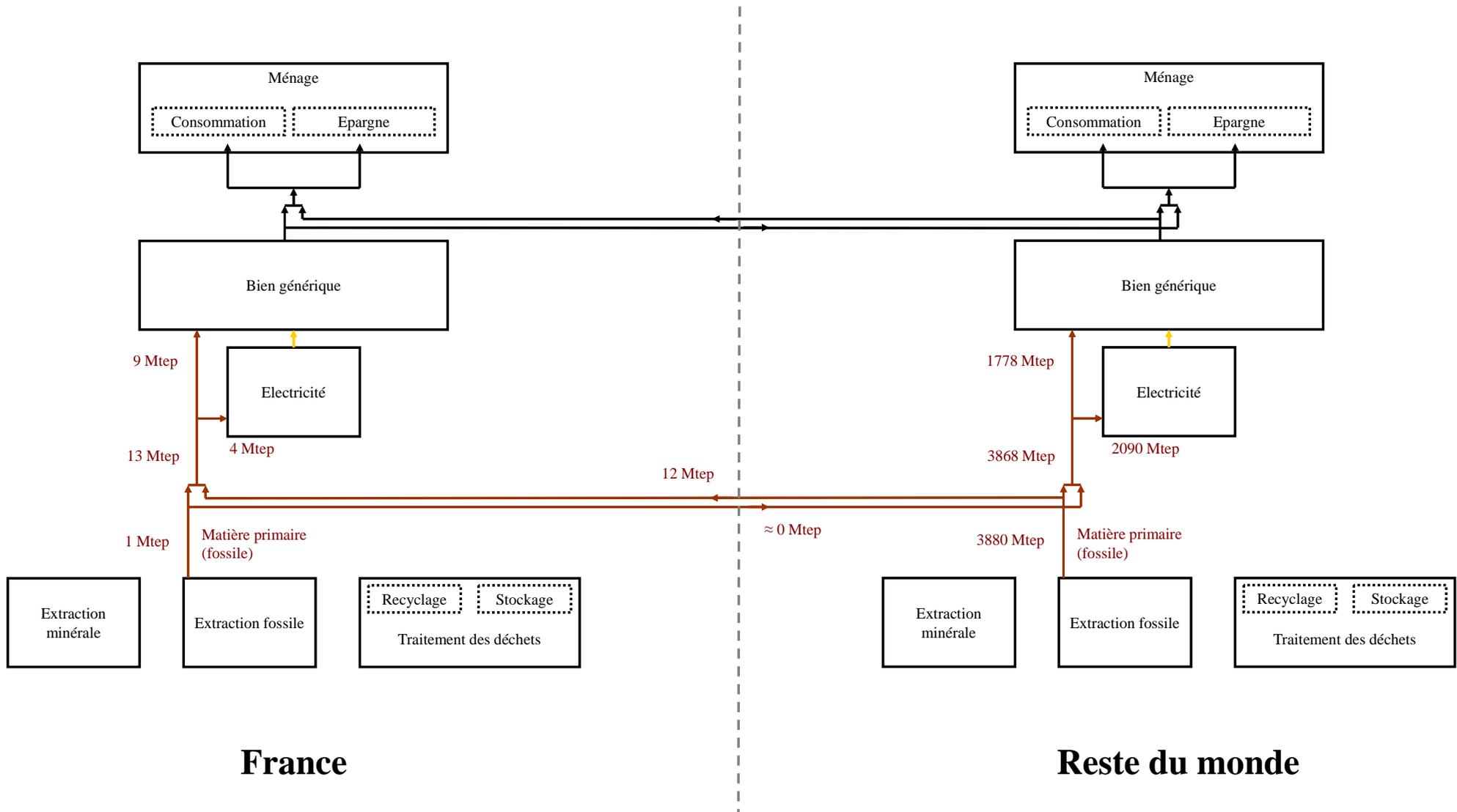
**Figure A4.2 : Flux physiques de l'élément aluminium en 2012
(en millions de tonnes de l'élément aluminium)**



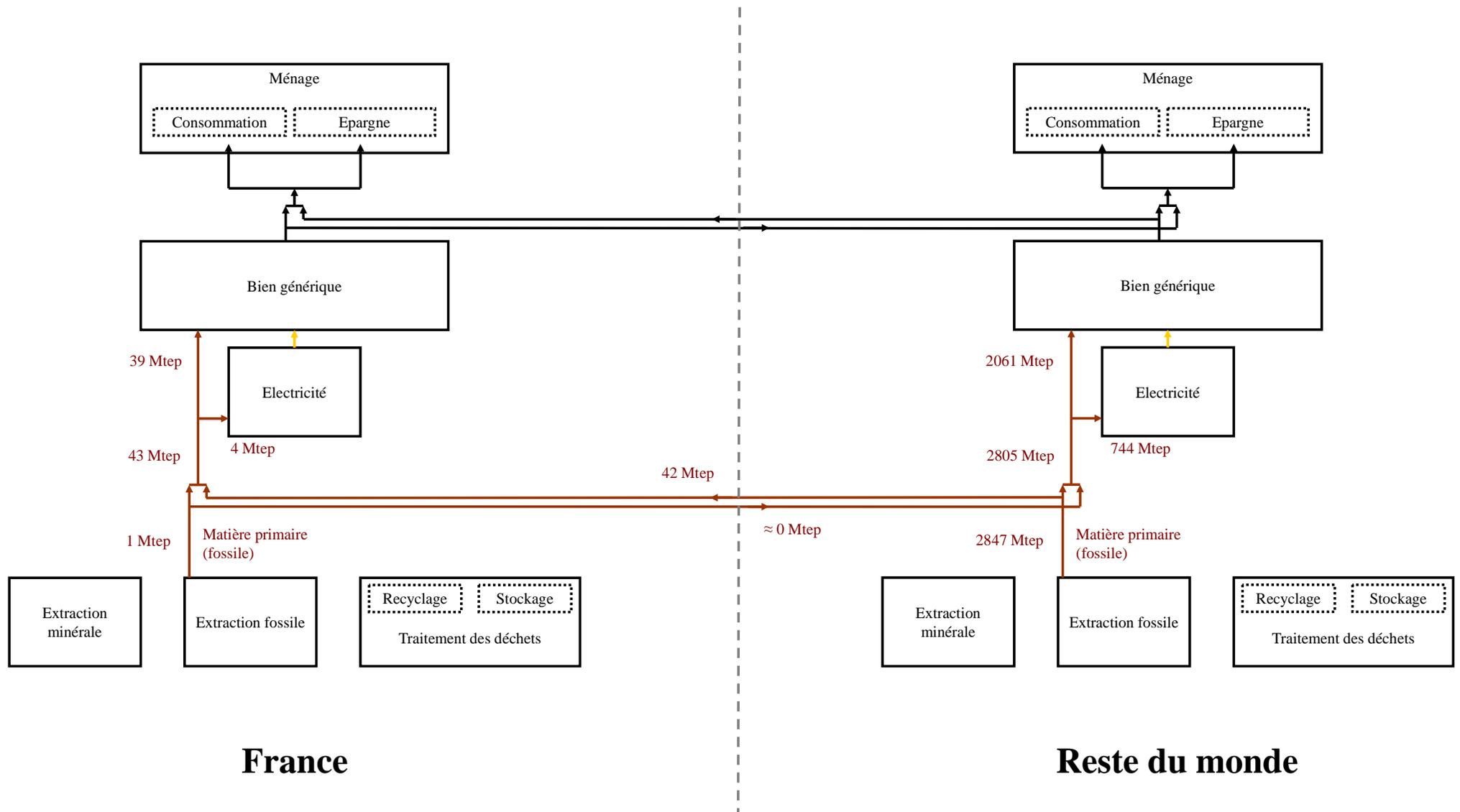
**Figure A4.3 : Flux physiques de pétrole en 2012
(en millions de tonnes d'équivalent pétrole)**



**Figure A4.4 : Flux physiques de charbon en 2012
(en millions de tonnes d'équivalent pétrole)**



**Figure A4.5 : Flux physiques de gaz en 2012
(en millions de tonnes d'équivalent pétrole)**



Bibliographie

- Agence internationale de l'énergie (2014), "World Energy Outlook 2014", OCDE/AIE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (2014), "Key World Energy Statistics 2014", OCDE/AIE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (2015), "World Energy Outlook 2015", OCDE/AIE, Paris.
- ADEME (2012), « Bilan du recyclage 2001-2010, Volume 2 : Filières matériaux et filières REP ».
- ADEME (2014), « Recycler les déchets ou importer des matières premières ? », étude réalisée pour le compte de l'Ademe par D. Dussaux et M. Glachant.
- ADEME (2015a), « Bilan national du recyclage 2003-2012 ».
- ADEME (2015b), « Référentiel national des coûts du service public de gestion des déchets en 2012 ».
- Association Française de l'Aluminium, <http://www.aluminium.fr/industrie/associations/afa>.
- Baghli, M., Brunhes-Lesage, V., De Bandt, O., Fraisse, H. et Villetelle, J.-P. (2004), « MASCOTTE : Modèle d'Analyse et de prévision de la Conjoncture Trimestrielle », Banque de France, Document de travail, n° 106.
- Blomberg, J. et Söderholm, P. (2009), "The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53(8), pp. 455-463.
- Brandt, A. R. (2010), "Review of mathematical models of future oil supply: Historical overview and synthesizing critique", *Energy*, vol. 35(9), pp. 3958-3974.
- De Beir, J., Fodha, M. et Magris, F. (2010), "Life Cycle Of Products And Cycles", *Macroeconomic Dynamics*, vol. 14(2), pp. 212-230.
- Boeters S. et Savard L. (2013), "Labor market modeling in a CGE context" *in* Dixon, P. B. et Jorgenson, D., éditeurs, *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, North Holland, Elsevier, Oxford.
- Bernard, A. et Vielle M. (2008), "GEMINI-E3, a General equilibrium model of international-national interactions between economy, energy and the environment", *Computational Management Science*, vol. 5(3), pp. 173-206.
- Chen, W.-Q. et Graedel, T.E. (2012), "Dynamic analysis of aluminum stocks and flows in the United States", *Ecological Economics*, vol. 81, pp. 92-102.
- Cour des Comptes (2014), « Le coût de production de l'électricité nucléaire, actualisation 2014 ».
- Di Vita, G. (2007), "Exhaustible Resources and Secondary Materials: A Macroeconomic Analysis", *Ecological Economics*, vol. 63(1), pp. 138-148.
- Eurofer - The European Steel Association (2013), "2012 Annual Report".
- Eurofer - The European Steel Association (2015), "European Steel in Figures 2010-2014".
- European Aluminium Association (2013a), "Activity report 2012".
- European Aluminium Association (2013b), "Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry".
- Fédération Française de l'Acier (2013), « L'acier en France - Rapport annuel 2012 ».
- France Stratégie (2015), « La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques », Document de travail n° 2015-05, octobre 2015.
- Hartwick, J. M. (1977), "Intergenerational Equity and the Investment of Rents from Exhaustible Resources", *American Economic Review*, vol. 67(5), pp. 972-974.
- Henriet, F., Maggiar, N. et Schubert, K. (2014), "A Stylized Energy-Economy Model for France", *Energy Journal*, vol. 35(4), pp. 1-37.
- Hertel, T., Hummels, D., Ivanic, M. et Keeney, R. (2007), "How Confident Can We Be in CGE-based Analysis of Free Trade Agreements?", *Economic Modelling*, vol. 24, pp. 611-635.
- Hotelling, H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, vol. 39(2), pp. 137-175.
- International Aluminium Institute (2013), "2010 Life Cycle Inventory for the Worldwide Primary Aluminium Industry".

- Johnsena, J., Reck, B. K., Wang, T. et Graedel, T. E. (2008), "The energy benefit of stainless steel recycling", *Energy Policy*, vol. 36(1), pp. 181-192.
- Klein, C. et Simon, O. (2010), « Le modèle MÉSANGE réestimé en base 2000. Tome 1 - Version avec volumes à prix constants », Document de travail de l'INSEE, n° G2010/03.
- Mannaerts, H. (2004), "Environmental policy analysis with STREAM : a partial equilibrium model for material flows in the economy", in Van Den Bergh, J. C.J.M. et Janssen, M. A., éditeurs, *Economics of industrial ecology : materials, structural change, and spatial scales*, MIT Press, Cambridge.
- Masui, T. (2005), "Policy evaluations under environmental constraints using a computable general equilibrium model", *European Journal of Operational Research*, vol. 166(3), pp. 843-855.
- Nordhaus, W. D. (2008), *"A Question of Balance : Weighing the Options on Global Warming Policies"*, Yale University Press, New Haven and London.
- OCDE (2014), "An Overview of the OECD ENV-Linkages Model : Version 3", OECD Environment Working Papers, no. 65, OECD Publishing, Paris.
- ONU (2015), "World Population Prospects : The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables". Working Paper, no. ESA/P/WP.241.
- Paltsev, S., Reilly, J. M., Jacoby, H. D., Eckaus, R. S., McFarland, J., Sarofim M., Asadoorian, M. et Babiker, M. (2005), "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model : Version 4", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Reports, no. 125.
- Pittel, K., Amigues, J.-P. et Kuhn, T. (2010), "Recycling under a material balance constraint" *Resource and Energy Economics*, vol. 32(3), pp. 379-394.
- PNUE (2011), "Recycling Rates of Metals - A Status Report".
- Rotillon, G. (2010), « Économie des ressources naturelles », La Découverte, Collection Repères, Paris.
- Rutherford, T. F. et Sigrist, D. (2010), "What if? Policy Analysis with Calibrated Equilibrium Models", CEPE Working Paper, no. 72.
- Sjöström, M. et Östblom, G. (2009), "Future Waste Scenarios for Sweden based on a CGE-model", National Institute of Economic Research, Working Paper, no. 109, Stockholm, Sweden.
- Söderholm, P. et Ejdemo, T. (2008) "Steel scrap markets in Europe and the USA", *Minerals and Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 57-73.
- SOeS (2013a), « Bilan énergétique de la France pour 2012 », Commissariat Général au Développement Durable, Collection Références.
- SOeS (2013b), « Le cycle des matières dans l'économie française », Commissariat Général au Développement Durable, Collection Références.
- SOeS (2014), « Chiffres clés de l'énergie - Édition 2013 », Commissariat Général au Développement Durable, Collection Repères.
- Solow, R. (1974), "Intergenerational Equity and Exhaustible Resources", *Review of Economic Studies*, vol. 41, pp. 29-45.
- Stuermer, M. et Schwerhoff, G. (2015), "Non-Renewable but Inexhaustible - Resources in an Endogenous Growth", Federal Reserve Bank of Dallas, Research Department, Working Paper 1506.
- U.S. Geological Survey (2008), "The Global Flows of Metals and Minerals", U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1 355.
- World Aluminium, <http://www.world-aluminium.org>.
- World Steel Association (2015), "Steel Statistical Yearbook 2015", Worldsteel Committee on Economic Studies, Brussels.

Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Tour Séquoia

92055 La Défense cedex

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouvez cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/>

Le modèle Vulcain : une approche en équilibre général calculable de l'économie circulaire et de l'énergie

Peu de modèles économiques parviennent à ce jour à livrer une vision d'ensemble des interactions entre l'économie et l'utilisation des ressources. Le modèle développé dans ce document a l'ambition de contribuer à combler cette lacune, en livrant une représentation stylisée de l'économie mondiale et des flux de matières, minérales et fossiles, qui y sont attachés. Il intègre à cet égard deux matières minérales (acier et aluminium), trois matières fossiles (pétrole, charbon et gaz) et l'électricité. Le modèle permet ainsi d'étudier l'impact d'une politique environnementale tant sur les grandeurs macroéconomiques « classiques » (PIB, emploi, exportations...) que sur des grandeurs physiques (taux de recyclage, consommation de matière, consommation d'énergie...).

En outre, le caractère global du modèle permet de rendre compte de mécanismes de « bouclage macroéconomique » (ou d'effets d'entraînement), particulièrement pertinents dès lors que l'on souhaite étudier l'impact d'une hausse du prix international des matières premières ou la mise en place d'une taxe carbone. Enfin, le modèle reposant sur des comportements décrits à l'échelle microéconomique, il est adapté à l'étude de modifications profondes de l'économie, telles qu'engendrées par des scénarios de transition énergétique ou vers l'économie circulaire.



Dépôt légal : Mai 2016
ISSN : 2102 - 4723