

Forces et fragilités des tableaux internationaux entrées-sorties pour le calcul de l'empreinte carbone

Documents de travail

N° 2023-14 – Mai 2023





Institut national de la statistique et des études économiques

2023/14

Forces et fragilités des tableaux internationaux entrées-sorties pour le calcul de l'empreinte carbone

ALEXANDRE BOURGEOIS* FLAVIEN GERVOIS**
RAPHAËL LAFROGNE-JOUSSIER***

Mai 2023

Département des Études Économiques – Timbre G201
88, avenue Verdier – CS 70058 – 92541 MONTROUGE CEDEX – France
Tél. : 33 (1) 87 69 59 54 – E-mail : d3e-dg@insee.fr – Site Web Insee : <http://www.insee.fr>

*Ces documents de travail ne reflètent pas la position de l'Insee et n'engagent que leurs auteurs.
Working papers do not reflect the position of INSEE but only their author's views.*

* Insee-Dese – Département des études économiques – Division Etudes macroéconomiques

** ENSAE

*** Insee-Dese – Département des études économiques – Division Etudes macroéconomiques, CREST-Ecole Polytechnique

Forces et fragilités des tableaux internationaux entrées-sorties pour le calcul de l'empreinte carbone

L'empreinte carbone mesure les émissions de gaz à effet de serre (GES) induites par la demande finale d'un pays. Même s'il n'existe pas encore de méthode ni de données standardisées au niveau international pour effectuer le calcul, l'utilisation de Tableaux Internationaux d'Entrées-Sorties (TIES) est largement répandue dans la littérature. Un TIES retrace l'ensemble des flux de biens et services entre les branches d'activité des différentes régions du monde. Il permet ainsi de reconstituer le processus de production des biens et services, et donc de mesurer les GES émis à chaque étape. Dans ce document, nous comparons différentes bases TIES et d'émissions de GES ainsi que les empreintes carbone qui en découlent, afin d'évaluer la fiabilité et la robustesse de la méthode de calcul selon les sources utilisées. Nous établissons que l'empreinte carbone de la France peut varier jusqu'à 20% selon le TIES utilisé. Ces différences sont dues principalement à la méthode utilisée pour ventiler les importations par pays d'origine lors de la construction du TIES. Nous montrons que l'empreinte carbone calculée avec un TIES qui comprendrait les détails des principaux partenaires commerciaux de la France ou qui regrouperait les pays en zones économiquement homogènes suffirait à estimer convenablement l'empreinte carbone. En revanche, agréger les branches d'activités en grands secteurs d'activité peut conduire à modifier l'empreinte de 15%. En utilisant des méthodes de bootstrap, nous établissons que la variabilité des coefficients, d'un TIES à l'autre, entraîne autant de variabilité dans le calcul de l'empreinte carbone qu'un bruit gaussien sur les données source de l'ordre de 20 à 30%.

Mots-clés : Modélisation input-output, empreinte carbone, environnement, robustesse

Multi-Regional Input-Output matrices for carbon footprints: strengths and weaknesses

The carbon footprint measures the greenhouse gas (GHG) emissions induced by a country's final demand. Although there is no internationally standardized method or data to perform the calculation, the use of International Input-Output Tables (MRIOS) is widespread in the literature. An MRIO traces all the flows of goods and services between industries in different regions of the world. It thus makes it possible to reconstruct the production process of goods and services, and therefore to measure the GHGs emitted at each stage. In this paper, we compare different MRIOS and GHG emission databases and the resulting carbon footprints in order to assess the reliability and robustness of the calculation method according to the sources used. We establish that the carbon footprint of France can vary up to 20% depending on the MRIO used. These differences are mainly due to the method used to break down imports by country of origin when constructing the MRIO. We show that the carbon footprint calculated with a MRIO that includes the details of France's main trading partners or that groups countries into economically homogeneous zones would be sufficient to estimate the carbon footprint adequately. On the other hand, aggregating industries into large sectors of activity can lead to a 15% change in the footprint. Using bootstrap methods, we establish that the variability of the coefficients, from one MRIO to another, leads to as much variability in the calculation of the carbon footprint as a Gaussian noise on the source data of the order of 20 to 30%.

Keywords: Input-Output model, Carbon footprint, Environment, Robustness

Classification JEL : F64, Q53

Table des matières

Introduction	5
1 Le calcul de l’empreinte carbone	9
1.1 Contexte et définitions	9
1.2 Méthode de calcul d’une empreinte carbone avec un TIES	10
1.3 Approche du dernier pays d’importation	12
1.4 La méthode de calcul de l’empreinte carbone française par le SDES	14
1.5 L’approche SNAC	14
2 Comparaison des TIES	16
2.1 Quels critères de comparaison ?	16
2.2 Présentation des TIES	17
2.3 Cylindrage	20
2.4 Comparaison	21
3 Comparaison des bases d’émissions	26
3.1 Niveaux d’émissions	26
3.2 Coefficients d’émissions	28
4 Calcul d’empreinte carbone	29
4.1 Calculs croisés TIES-Émissions	29
4.2 Comparaison des TIES en évolution	30
4.3 Décomposition par pays	31
4.4 Décomposition par branches	31
4.5 Décomposition de l’évolution	31
5 Variantes dans le calcul de l’empreinte carbone	33
5.1 Branches et produits	33
5.2 Effets d’agrégation	33
5.3 Approche SNAC	34
5.4 Approche du dernier pays d’importation	35
6 Robustesse du calcul d’empreinte : une méthode de bootstrap	36
6.1 Méthode (1) : bootstrap non-paramétrique inter-TIES	37
6.2 Méthode (2) : bootstrap paramétrique	39
6.3 Méthode (3) : bootstrap hybride	40
Conclusion	42
Références bibliographiques	42
A Tableaux supplémentaires	46
B Figures supplémentaires	48
C Description et construction d’un TIES	54
D Calcul de l’empreinte carbone à l’aide d’un TIES	58

E	Analyse de décomposition structurelle	63
F	Comparaison des approches en produits et en branches	65
G	Effets d'agrégation	68
H	Conserver les données nationales au sein d'un TIES : l'approche SNAC	73
I	Méthodologie et résultats détaillés sur le bootstrap	78

Introduction

Le dérèglement climatique est un enjeu majeur pour les décennies à venir. La plupart des politiques environnementales nationales visent la réduction des gaz à effet de serre (GES) émis sur le territoire, l’inventaire d’émissions. Dans le cadre des Accords de Paris sur le climat, 193 membres de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) se sont ainsi engagés à atteindre des émissions nettes de GES nulles d’ici la seconde moitié du XXI^e siècle. L’inventaire des émissions de GES est une mesure essentielle de la pression anthropique sur l’environnement, mais insuffisante pour décrire pleinement la réalité. En effet, l’inventaire ne renseigne pas sur les GES émis dans le monde pour produire les biens consommés dans un pays. Or les chaînes de valeurs sont de plus en plus mondialisées (Johnson, 2014, World Bank, 2019). En outre, l’inventaire ne mesure pas les fuites de GES, les délocalisations d’activités émettrices de GES à l’étranger. Le concept d’empreinte carbone a été développé pour compléter l’information sur le sujet. L’empreinte carbone est une mesure des émissions de GES associées à la consommation de produits par un pays, indépendamment du lieu de fabrication de ces produits. Ainsi, les émissions liées à la production d’un bien exporté sont attribuées au pays de production selon l’inventaire, au pays consommateur selon la méthode de l’empreinte. Il en découle que les niveaux d’émissions mesurés par ces deux méthodes diffèrent pour un pays donné. L’empreinte carbone des pays membres de l’OCDE est en moyenne plus élevée que leur inventaire d’émissions, tandis qu’elle est plus faible pour les pays qui n’en sont pas membres (Yamano and Guilhoto, 2020).

L’empreinte carbone d’un pays s’avère cependant complexe à calculer. Ceci tient à ce que le calcul nécessite de retracer l’origine des biens et services consommés, et donc de reconstruire l’ensemble des GES émis tout au long du processus de production. Une complexité renforcée par la mondialisation, qui allonge les chaînes de production sur un grand nombre de pays. Idéalement, une base de données qui recenserait les émissions de GES associées à chaque étape de production de chaque bien ou service permettrait de calculer directement l’empreinte carbone. Dans les faits, seulement des données plus agrégées sont disponibles et il est nécessaire de faire des hypothèses pour estimer ce type d’information. Ceci explique en partie pourquoi il n’existe actuellement aucune méthode standardisée à l’échelle internationale pour calculer l’empreinte carbone d’un pays, ni de base de données de référence le permettant. Chaque pays est libre de calculer son empreinte avec la méthode et les données qui lui semblent les plus appropriées. Ce n’est pas le cas de l’inventaire d’émissions, qui est le fruit du système d’information standardisé officiel de comptabilité d’émissions de GES défini par la CCNUCC, et dont le report annuel est obligatoire¹. Les pays développent donc leurs propres méthodes, sans toujours utiliser les mêmes données. Dans ce contexte, les empreintes nationales deviennent difficilement comparables, compliquant l’inscription de la réduction de l’empreinte des pays dans les objectifs climatiques.

La méthode de calcul d’empreinte carbone à l’aide d’un Tableau International Entrées-Sorties (TIES) est un outil disponible pour standardiser les mesures d’empreinte. Le principe, basé sur un modèle en contenu, est ancien, mais la méthode a récemment connu un regain d’intérêt (Tukker et al., 2018, 2020). Elle est notamment citée par le dernier rapport du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2022), est mise en oeuvre par l’OCDE (Yamano and Guilhoto, 2020), et a déjà été appliquée à plusieurs pays dans des études universitaires (Owen et al., 2014, Edens et al., 2015, Hambÿe et al., 2018, Dawkins et al., 2019,

1. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

Palm et al., 2019). Un TIES est le pendant à l'échelle mondiale des tableaux des entrées-sorties (TES) nationaux : il rassemble dans un même cadre comptable, les comptes de production et d'exploitation par branches, pour chaque branche de chaque pays.

Cette méthode TIES, en ce qu'elle repose sur une base de données mondiale, permet donc de calculer des empreintes carbone qui sont directement comparables pour tous les pays. Construire un TIES nécessite néanmoins une modélisation qui repose sur des hypothèses, et donc un ensemble de choix méthodologiques. Aujourd'hui, plusieurs bases TIES co-existent et leurs différences statistiques sont connues, notamment documentées par (Owen, 2017, Dawkins et al., 2019).

Afin de calculer l'empreinte, il faut adjoindre au TIES une base de données dite base d'émissions, qui est constituée de données issues d'inventaires nationaux d'émissions². En général, les producteurs de TIES joignent à l'élaboration d'un TIES celle d'autres tables qui recensent des grandeurs comme les émissions de GES ou l'utilisation de ressources, sous les mêmes principes de comptabilité que ceux utilisés pour construire le TIES.

Il existe donc un enjeu important pour les services en charge du calcul de l'empreinte carbone au niveau national d'évaluation de la maturité des bases TIES et des bases d'émissions associées afin d'envisager de basculer sur une méthodologie de ce type (Tukker et al., 2018). Une telle évaluation a récemment été conduite sur l'empreinte carbone de la Suède (Dawkins et al., 2019). Dans le même esprit, l'objet de ce travail est de comparer les TIES et les bases d'émissions existants, d'identifier et de comprendre leurs principales différences, et d'analyser comment celles-ci impactent le calcul d'empreinte carbone.

Tout d'abord, nous distinguons dans l'empreinte carbone les émissions issues des processus de production de celles directement émises par les ménages. Par exemple, le carburant utilisé pour les véhicules personnels ou pour le chauffage au fioul émet des GES lors de sa combustion. Ces émissions, appelées émissions directes des ménages, sont comptabilisées à la fois dans l'inventaire national et dans l'empreinte carbone. Contrairement au reste des émissions qui composent l'inventaire, répartir ces émissions directes entre les pays du monde ne présente donc aucune difficulté. Aussi notre analyse porte sur l'empreinte hors émissions directes des ménages. L'interprétation des chiffrages et résultats de sensibilité sera donc circonscrite à l'empreinte hors émissions directes.³

Nous retenons cinq TIES et leurs bases d'émissions associées, disponibles librement et gratuitement :

- La base Figaro diffusée par Eurostat, dans sa version de 2021, qui a été révisée depuis la rédaction de ce document de travail ;
- les bases de l'OCDE : ICIO21 (pour le TIES) et TECO2 (pour les émissions) ;
- les bases de trois instituts ou consortiums de recherche : celles du WIOD (WIOD 16 et WIOD12), celles d'Exiobase (Exiobase3), et celles d'Eora (Eora26).

Du fait de leurs couvertures temporelles différentes, nous menons les comparaisons entre les bases sur la l'année commune la plus récente, en 2014. D'un TIES à l'autre, la production mondiale, la demande finale ou les consommations intermédiaires totales sont différentes. De plus, les structures mondiales de production et de commerce peuvent s'écarter sur des branches ou des

2. L'inventaire national d'émissions de GES calcule des quantités de GES physiquement émises par grand secteur d'activité à l'intérieur du pays. Ces inventaires nationaux sont réalisés chaque année selon les lignes directrices du GIEC pour répondre aux normes de la CCNUCC.

3. Les émissions directes des ménages s'élèvent à 115MtCO₂éq en France, en 2019, soit 1,71tCO₂éq par habitant (Citepa, 2021).

pays donnés. Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que les différents TIES sont parfois issus de données différentes, mais également produits par des institutions ou organismes différents, dont chacun a sa méthode de réconciliation des données nationales pour créer un TIES. C'est le cas par exemple lorsqu'il s'agit de mettre en cohérence les importations d'un pays avec les exportations d'un autre (valorisation CAF/FAB) ou encore de répartir les achats des touristes français à l'étranger (passage au concept de résidence).

Tout d'abord d'un TIES à l'autre, l'écart absolu entre certaines mêmes cases du tableau d'entrées intermédiaires peut atteindre 1.100 milliards d'euros, soit 1% de la production mondiale, tandis que le total des entrées intermédiaires peut parfois s'écarter de 10%. La production totale est proche entre les cinq bases, mais sa ventilation par branche présente des différences. La demande finale mondiale, elle, varie jusqu'à 5% entre les bases, mais son évolution temporelle est similaire d'une source à l'autre. C'est sur l'origine des importations que les TIES s'écartent le plus les uns des autres. Ces écarts sont dus en grande partie aux différentes méthodes de retraitement et de mise en cohérence des importations et des exportations. Par exemple, les importations de la France depuis les Etats-Unis sont deux fois plus élevées dans Figaro 2 que dans les autres bases, mais inversement, celles en provenance d'Italie, de Grande-Bretagne ou d'Espagne sont deux fois moins élevées. La ventilation des importations par branche est également variable d'une base à l'autre, et ce particulièrement pour Eora26. Cette différence tient à la difficulté à rapprocher la nomenclature d'activité utilisée par Eora26 (NACE Rev.1) avec celle des autres bases (NACE Rev.2).

Ensuite, les bases d'émissions de GES présentent des couvertures géographiques, temporelles et de GES différentes. En particulier, Teco₂ ne recense que les émissions de CO₂, tandis que la base d'Eurostat ne concerne que les pays de l'Union européenne. De plus, à périmètre constant, les intensités d'émissions (le total de GES émis par euro produit) peuvent varier d'une base à l'autre. C'est presque toujours le cas pour Eora26. Teco₂, la base d'Eurostat, et celle d'Exiobase sont souvent proches. Dans la mesure où cette dernière présente une couverture temporelle longue (1995-2020), une nomenclature d'activité très détaillée (163 branches) et recense les principaux pays émetteurs à l'échelle mondiale, nous choisissons Exiobase comme base d'émissions de référence, pour ensuite comparer l'empreinte carbone calculée en ne faisant varier que le TIES.

En 2014, l'empreinte carbone (hors émissions directes des ménages) de la France calculée avec ces 4 TIES et la base d'émissions Exiobase 3 se situe entre 8.9 et 9.6tCO₂ éq par habitant. Des écarts importants peuvent parfois apparaître (en 2012, Figaro 2 fournit une empreinte de 142MtCO₂ soit 24,7% plus élevée que Wiod). En décomposant l'empreinte carbone de la France selon les pays ou selon les branches qui y contribuent, il apparaît que les différences de traitement des flux de commerce internationaux, déjà visibles sur les TIES, semblent expliquer une grande partie des écarts entre les niveaux calculés d'empreinte et les profils d'évolution selon la base choisie.

Nous explorons ensuite quatre déclinaisons d'usage des TIES. Tout d'abord, notre analyse utilise des TIES en branches. Cela signifie que les données de production et de consommation sont celles relatives à une branche d'activité, qui regroupe les entreprises qui sont considérées comme appartenant à cette branche. Certains TIES et bases d'émissions comme Figaro ou Exiobase 3 sont diffusés en branches mais aussi en produits, c'est-à-dire que l'information porte sur le produit correspondant à chaque branche homogène d'activité. Nous documentons les écarts entre les bases selon ces deux formats, avant de montrer que le passage de l'un à l'autre modifie

très à la marge l’empreinte carbone hors émissions directes des ménages, de 1%.

Ensuite, nous explorons les conséquences que peuvent avoir l’agrégation de branches en branches d’activités plus larges, ou de groupes de pays en zones géographiques. Le TIES et la base d’émissions d’Exiobase sont fournis à un niveau de détail sectoriel fin ; à pays fixés, agréger ces 162 branches en seulement 12 augmente l’empreinte carbone de la France de 10 à 15%. L’agrégation des pays en zones géographiques plus grandes a un impact moins prononcé. À niveau de branches fixé, agréger des pays peut écarter l’empreinte française de sa valeur calculée de 2 à 5% lorsque les pays sont agrégés en 10 zones arbitrairement, jusqu’à environ 15% lorsque tous les pays sont agrégés en un reste du monde. Regrouper les pays en des zones au sein desquelles les pays partagent des structures économiques homogènes ne modifie que peu l’empreinte française (moins de 2% d’écart).

Troisièmement, nous implémentons une méthode de calcul de l’empreinte appelée SNAC (Single National Accounts Consistent). Les méthodes SNAC visent à réconcilier les données d’un TIES avec celles d’un pays donné, et sont notamment utilisées afin de construire une empreinte carbone nationale. Nous mettons en oeuvre une de ces méthodes, développée par [Owen et al. \(2014\)](#), qui consiste à “insérer” le tableau entrées-sorties de la France dans le TIES Figaro, pour l’année 2017. L’empreinte carbone de la France est environ 20% plus élevée avec le TIES issu de cette méthode SNAC, mais cette différence peut être en partie expliquée par des limites de l’algorithme de réconciliation. De plus, la nouvelle version du TIES Figaro parue depuis la rédaction de cette étude pourrait conduire à un écart plus faible.

Enfin, nous explorons les biais introduits par une utilisation de données d’émissions et de commerce international uniquement, sans prendre en compte les structures de production à l’échelle mondiale. Ceci reviendrait à attribuer aux importations françaises un contenu carbone qui correspond à celui qui aurait prévalu si le dernier pays duquel on importe un bien l’avait produit entièrement. Nous estimons que cela sous-estimerait l’empreinte carbone française de 20%.

L’analyse fait ressortir que les TIES sont différents les uns des autres et que l’empreinte est sensible à ces différences. Cependant, les précédentes études de comparaison d’empreinte carbone à partir de TIES indiquent que des erreurs de mesure sur les données qui servent à construire un TIES peuvent conduire à des empreintes différentes (voir, par exemple, [Lenzen et al. \(2010\)](#)). Autrement dit, différents niveaux d’empreinte peuvent coexister aussi bien par une variabilité *inter-TIES* que par une variabilité *intra-TIES*. La dernière partie de ce document de travail cherche à quantifier l’incertitude autour de l’empreinte qui vient de ces deux sources, et d’évaluer laquelle est prépondérante. Nous quantifions la marge d’erreur *inter-TIES* en construisant des TIES fictifs dont chaque case est tirée aléatoirement parmi les TIES à disposition. On construit ainsi 10,000 TIES et autant d’empreintes. La valeur médiane de ces empreintes pour la France est de 620tCO₂eq en 2014, avec 95% des valeurs entre 580 et 660tCO₂eq, soit un intervalle de confiance de 6%. Nous évaluons ensuite la marge d’erreur *intra-TIES* en mettant en oeuvre la méthode de bootstrap *intra-TIES* développée par [Moran and Wood \(2014\)](#). Elle consiste à multiplier chaque case du TIES par un coefficient différent (une "erreur"), tiré dans une loi normale de moyenne 1 et de variance de 10%. Pour isoler la variabilité *intra-TIES*, nous implémentons cette méthode sur un TIES moyen. On construit ainsi 10,000 TIES et autant d’empreintes. 90% des valeurs obtenues se situent dans une marge de 2.6% autour de l’empreinte ;

cette marge est de 4.3 et 7.2% lorsque l'erreur est de variance 20 et 30% respectivement. L'erreur *inter-TIES* (6%) semble être proche d'une erreur *intra-TIES* de 20 à 30% sur chaque case. Pour le vérifier, nous introduisons une nouvelle méthode qui combine les deux sources de variabilité en utilisant les deux méthodes précédentes. Nous confirmons que c'est l'incertitude *inter-TIES* qui a l'impact le plus important sur l'empreinte carbone.

Nous commençons par développer le cadre formel du calcul de l'empreinte à l'aide d'un TIES en Section 1, avant de comparer les TIES existants en Section 2, ainsi que les bases d'émissions en Section 3, pour enfin présenter les résultats de calcul d'empreinte et analyser les écarts d'un TIES à l'autre en Section 4. Nous comparons la méthode TIES à des méthodes alternatives en Section 5, avant de présenter notre méthode de robustesse du calcul d'empreinte en Section 6.

1 Le calcul de l'empreinte carbone

L'empreinte carbone mesure les émissions associées à la consommation de produits par un pays, indépendamment du lieu de fabrication de ces produits. Ces émissions proviennent en grande partie du processus de production des produits consommés par les ménages (émissions liées à l'extraction de matières premières, aux procédés chimiques et à la consommation d'énergie pour la transformation etc.). Elles peuvent avoir lieu dans un autre pays que celui dans lequel le bien est consommé. Par exemple, l'empreinte carbone des voitures utilisées par les Français comprend les gaz à effet de serre émis lors des différentes étapes de production de leurs composants, du transport des matériaux, de l'assemblage des pièces, et du transport des voitures assemblées jusqu'aux concessionnaires. Dans la mesure où une grande partie des processus de production sont aujourd'hui fragmentés dans plusieurs pays, l'empreinte carbone est pour beaucoup le résultat de flux de carbone internationaux, et diffère des émissions sur le territoire consommateur. L'empreinte carbone comprend aussi les GES émis directement par les ménages (principalement liés à la combustion des carburants des véhicules particuliers et la combustion d'énergies fossiles pour le chauffage des logements). Comme ces émissions sont, par nature, locales, elles sont aussi comptabilisées dans l'inventaire des GES et n'entrent pas dans la modélisation internationale des flux de carbone.

Dans ce qui suit, le terme d'émissions ne recouvre que les émissions de GES hors émissions directes des ménages⁴.

1.1 Contexte et définitions

Nous cherchons donc à quantifier les flux internationaux de gaz à effet de serre, émis lors d'étapes de production pour des biens et services consommés par une zone géographique donnée. Pour cela, nous nous appuyons sur une formalisation qui correspond à un modèle de contenus. Ce type de modèle permet de calculer des flux de commerce international mesurés par leur contenu en valeur ajoutée, en emploi, ou encore en émissions de GES. Ces méthodes sont décrites dans Bourgeois and Briand (2019) pour un tableau des entrées-sorties (TES). Nous étendons ces modèles aux TIES afin de pouvoir retracer au mieux l'origine des contenus, en nous appuyant sur Serrano and Dietzenbacher (2008). Ceci mène à une méthode que nous présentons en section 1.2. Nous présentons ensuite deux approches alternatives en section 1.3 et 1.4.

4. En 2019, les émissions directes représentent 25.1% des émissions de GES en France (Citepa (2021)).

Quelles données ? Le calcul de l’empreinte importée dans un modèle de contenus nécessite un TIES et une base d’émissions par branche×pays. Un TIES décrit la structure du réseau économique mondial. Les TIES sont constitués, comme les TES nationaux, de trois parties. L’une est une matrice nommée “tableau des entrées intermédiaires” : chaque colonne correspond aux consommations intermédiaires du couple branche×pays qui proviennent de chacun des autres branches×pays. Un TIES recense aussi l’offre mondiale, c’est-à-dire la production de chaque branche×pays, ainsi que la demande finale que chaque pays adresse à chaque autre branche×pays. La construction d’un TIES est expliquée en Annexe C.1, et un exemple de TIES est présenté en Figure C.2. Une base d’émissions recense toutes les émissions de GES d’une branche d’activité dans un pays donné, sur une année. Elle reflète les émissions liées à l’activité de production et est généralement construite à partir de calculs physiques qui prennent en compte le processus de production, par exemple la transformation de matières premières, mais aussi l’utilisation d’intrants énergétiques.

Terminologie L’empreinte carbone est ici l’empreinte associée à la demande finale. La demande finale comprend la consommation des ménages, les consommations des administrations publiques et des associations à but non-lucratif au service des ménages, l’investissement des entreprises, la variation de stocks des entreprises.

Notations Les matrices sont notées sous forme de lettres majuscules en caractères gras, les vecteurs par des lettres minuscules en caractères gras, et les scalaires par des minuscules. Les vecteurs sont par définition des colonnes, de sorte que les vecteurs lignes sont obtenus par transposition. La matrice $1_{(N,M)}$ est la matrice de taille (N, M) composée uniquement de 1.

1.2 Méthode de calcul d’une empreinte carbone avec un TIES

Considérons une économie mondiale composée de R zones géographiques ou régions, chacune constituée de n branches d’activité. Une description des composantes d’un TIES est présentée en Annexe C. Les grandeurs sont exprimées en valeur.

TIES Les composantes du TIES sont décrites de la façon suivante :

- Le total des consommations intermédiaires en produits de la branche i située dans la région r (en ligne) par la branche j de la région s (en colonne) constitue l’élément z_{ij}^{rs} de la matrice \mathbf{Z}^{rs} . \mathbf{Z}^{rs} est de dimension (n, n) . Lorsque $r = s$, il s’agit de consommation intermédiaires intérieures (intra-régionales), et dans le cas contraire il s’agit de consommations intermédiaires importées (inter-régionales). On notera \mathbf{Z} le tableau des entrées intermédiaires international, de taille $(R \times n, R \times n)$. Les n premières colonnes de \mathbf{Z} représentent les consommations intermédiaires des branches $j = 1, \dots, n$ de la région $s = 1$. Les n premières lignes de \mathbf{Z} représentent les produits $i = 1, \dots, n$ issus de la région $r = 1$, utilisés pour consommations intermédiaires par les branches j de toutes les régions s .
- La production de la région r est notée \mathbf{x}^r . C’est un vecteur de dimension n . L’élément x_i^r est la production de produit i de la région (issu de la branche i). On note \mathbf{x} le vecteur colonne de taille $R \times n$ qui empile les vecteurs de production \mathbf{x}^r .
- La demande finale de la région s adressée à la région r est noté \mathbf{y}^{rs} . C’est un vecteur colonne de taille n . Il est composé d’éléments y_i^{rs} , la demande finale de s en produit i (issu de la branche i) de la région r . Lorsque $r = s$, il s’agit de demande finale intérieure,

et dans le cas contraire il s'agit de demande finale importée. Notons \mathbf{Y} la matrice de taille $(R \times n, R)$ qui résume la demande finale.

L'équation d'équilibre comptable entre les ressources et les emplois de la branche i de la région r s'écrit

$$x_i^r = \sum_{s,j} z_{ij}^{rs} + \sum_s y_i^{rs}.$$

Cette équation reflète le fait que la production est utilisée comme consommation intermédiaire par l'ensemble des branches et pour satisfaire la demande finale de chacun des pays. L'équilibre comptable pour la région r dans son ensemble s'écrit

$$\mathbf{x}^r = \sum_{s,j} \mathbf{Z}_{\cdot j}^{rs} + \sum_s \mathbf{y}^{rs}$$

où $\mathbf{Z}_{\cdot j}^{rs}$ est un vecteur de taille n qui contient z_{ij}^{rs} en position i . Cette équation est elle-même le bloc de n lignes qui correspondent à la région r de l'équation suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)} + \mathbf{y},$$

où $\mathbf{y} = \mathbf{Y} \times \mathbf{1}_{(R, 1)}$ contient en position i, r la demande finale adressée à la branche i du pays r . $\mathbf{Z} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)}$ est un vecteur qui en position i, r renseigne le total des usages des produits de la branche i de la région r pour consommations intermédiaires.

On définit la matrice \mathbf{A} des coefficients techniques comme étant égale aux consommations intermédiaires rapportées à la production de la branche j de la région s , soit $a_{ij}^{rs} = z_{ij}^{rs} / x_j^s$. On l'écrit matriciellement sous la forme :

$$\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Z},$$

où $\hat{\mathbf{x}}$ désigne le vecteur \mathbf{x} sous forme de matrice diagonale. Notons que nous avons $\hat{\mathbf{x}} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)} = \mathbf{x}$. L'équilibre comptable peut ainsi se réécrire

$$\mathbf{x} = \mathbf{L} \times \mathbf{y},$$

où $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ est la matrice inverse de Leontief. \mathbf{L} a pour vocation de décrire la structure de l'appareil productif dans son ensemble ; c'est une matrice de taille $(R \times n, R \times n)$. À l'instar de la matrice de consommations intermédiaires \mathbf{Z} , \mathbf{L} est constitué de matrices de taille (n, n) que l'on note \mathbf{L}^{rs} . \mathbf{L}^{rs} représente en position i, j la quantité de produit i issu de la région r que la production d'un euro de produit j de la région s nécessite, compte tenu de la structure de production mondiale.

Émissions Les émissions de gaz à effet de serre de la production de la région r sont notées \mathbf{e}^r . L'élément e_i^r correspond au total des émissions de la branche i dans la région r . Il s'agit d'émissions intérieures qui sont recensées dans les inventaires nationaux, mesurées en France par le CITEPA (Centre technique de référence en matière de pollution atmosphérique et de changement climatique). On appelle coefficients d'émission les grandeurs $c_i^r = e_i^r / x_i^r$, qui sont les rapports entre émissions et production pour chaque branche. On note \mathbf{c}^r le vecteur de taille n qui contient les c_i^r , et \mathbf{c} le vecteur qui empile les \mathbf{c}^r .

La production d'une unité de i dans la région r émet c_i^r . Donc produire une unité de j dans la région s , en plus d'entraîner des émissions égales à c_j^s , entraîne des émissions dans les branches et pays situés en amont pour la production des consommations intermédiaires nécessaires à cette production. Par exemple, cela induit dans la branche i de la région r des émissions d'un niveau

égal à $c_i^r \times a_{ij}^{rs}$. Si l'on prend en compte l'ensemble du processus de production, la production d'une unité de bien j dans la région s induit des émissions de $c_i^r \times L_{ij}^{rs} = E_{ij}^{rs}$ dans la branche i de la région r , et la production de y_j^s unités va entraîner les émissions de $c_i^r \times L_{ij}^{rs} \times y_j^s$ en biens finalement consommés dans la branche i de la région r . Suivant cette logique, on peut décomposer les émissions d'une branche selon les origines de la demande qui génère sa production. Ainsi, on a

$$e_i^r = \sum_{j,s} E_{ij}^{rs} y_j^s.$$

En notant $\mathbf{E} = \hat{\mathbf{c}} \times \mathbf{L}$ la matrice des coefficients E_{ij}^{rs} , on peut écrire sous forme matricielle :

$$\mathbf{e} = \mathbf{E} \times \mathbf{y} = \mathbf{E} \times \mathbf{Y} \times \mathbf{1}_{(R,1)} \quad (1)$$

L'équation 1 est une égalité comptable : à l'échelle mondiale, les émissions de GES \mathbf{e} sont entièrement attribuées à la demande finale \mathbf{y} . La deuxième égalité permet de voir que les émissions mondiales peuvent être décomposées en la somme des empreintes de chaque pays. En effet, la matrice $\mathbf{E} \times \mathbf{Y}$ contient R colonnes, qui donnent la décomposition des empreintes carbonées des pays selon l'origine des émissions : le coefficient en ligne i, r de la colonne s est le total des émissions générées par la branche i, r pour satisfaire la demande finale du pays s . De plus $\mathbf{y} = \mathbf{Y} \times \mathbf{1}_{(R,1)} = \sum_s \mathbf{y}^s$ où \mathbf{y}^s est le vecteur de demande finale du pays s . Ainsi on a l'équation suivante :

$$\mathbf{e} = \sum_s \mathbf{E} \times \mathbf{y}^s = \sum_s \mathbf{E} \mathbf{C}^s \quad (2)$$

En position i, r du vecteur $\mathbf{E} \mathbf{C}^s$ se trouvent les émissions de la branche i de la région r nécessaires pour satisfaire la demande finale de la région s . Cette décomposition de l'empreinte met en avant la contribution de chaque branche \times pays à l'empreinte, qui est $[\mathbf{E} \mathbf{C}^s]_i^r$. L'empreinte carbone du pays s est alors :

$$ec^{FRA} = \sum_{i,r} [\mathbf{E} \mathbf{C}^s]_i^r. \quad (3)$$

Il est aussi possible de calculer les émissions qui proviennent de la région r dans l'empreinte carbone : $\sum_i [\mathbf{E} \mathbf{C}^s]_i^r$. Dans le reste de ce document de travail, nous nous référerons à ces $[\mathbf{E} \mathbf{C}^{FRA}]_i^r$ comme la décomposition ou ventilation de l'empreinte carbone de la France selon le pays et/ou la branche d'origine. C'est une décomposition qui retrace la contribution de chaque branche de l'économie mondiale à l'empreinte française. Le formalisme développé ici permet de retrouver une deuxième manière de décomposer l'empreinte. Elle consiste à attribuer à la branche j du pays s l'ensemble des émissions incorporées dans ses propres produits. Autrement dit, la contribution de j, s à l'empreinte française est l'ensemble des émissions générées en amont de j, s ainsi que par j, s pour concourir à la demande finale française. Les calculs sont détaillés en Annexe D. Cette décomposition de l'empreinte fournit une méthode de calcul de l'empreinte simple si l'on dispose d'une base qui présente l'empreinte carbone des produits consommés. C'est par exemple l'approche utilisée par l'ADEME dans son calculateur personnalisé d'empreinte carbone (<https://impactco2.fr/>).

1.3 Approche du dernier pays d'importation

Parfois, l'empreinte carbone est estimée sans recourir à un TIES, mais uniquement à partir de données nationales. Cela aboutit à une estimation biaisée de la partie importée de l'empreinte carbone. En effet, les données nationales enregistrent le flux de commerce correspondant au

dernier pays d'importation, sans garder de trace de la chaîne de valeur en amont. Ce biais est mis en évidence par la comparaison de deux modes de calcul de l'empreinte carbone : l'approche en chaîne de valeur et l'approche en dernier pays d'importation.

Dans l'approche en chaîne de valeur mondiale (*global value chain*, GVC), présentée ci-dessus, l'utilisation du TIES permet de décomposer l'origine d'un produit importé de manière fine, en tenant compte des différents pays et branches qui ont participé à sa production. Nous comparons cette approche à une approche en dernier pays d'importation (*last country of import*, LCI). Pour le calcul de l'empreinte carbone, l'approche GVC est donc plus réaliste, au sens où elle décompose de manière plus fiable l'empreinte carbone importée : elle permet de connaître les pays où ont eu lieu les émissions de GES pour chaque étape de la production. A l'inverse, l'approche LCI repose sur l'hypothèse que toutes les émissions liées à la production du bien importé ont eu lieu dans le pays d'où il est importé, quand bien même certaines étapes polluantes de sa production auraient eu lieu dans d'autres pays. L'approche LCI nécessite des données moins détaillées que l'approche GVC : il suffit de connaître les flux économiques entre le pays étudié et chacun de ses partenaires économiques, mais pas entre des pays tiers.

Afin de calculer les émissions importées du pays r par la France dans l'approche LCI, nous procédons comme suit :

- A partir du TIES, nous extrayons la demande finale française intérieure $\mathbf{y}^{FRA,FRA}$.
- En la multipliant par $(I - A^{FRA,FRA})^{-1}$, nous obtenons les consommations intermédiaires nécessaires pour satisfaire cette demande finale.
- Soit $A^{r,FRA}$ la matrice qui renseigne les consommations intermédiaires en importations, divisées par la production française. En multipliant par cette matrice, nous obtenons les importations françaises de consommations intermédiaires depuis le pays r : $A^{r,FRA} \times (I - A^{FRA,FRA})^{-1} \times \mathbf{y}^{FRA,FRA}$
- A ces importations destinées aux consommations intermédiaires françaises, il nous faut ajouter les importations directement destinées à la demande finale française. Il s'agit du vecteur $\mathbf{y}^{r,FRA}$, que nous pouvons directement extraire du TIES. En l'ajoutant aux éléments mentionnés ci-dessus, nous obtenons l'ensemble des produits importés par la France du pays r , tant pour ses consommations intermédiaires que pour sa demande finale.
- Nous construisons ensuite un « TES intérieur fictif » $A^{r,r}$ pour le pays r en supposant qu'il vit en autarcie. Pour ce faire, pour le pays r , nous réattribuons à la partie intérieure du TIES les composantes importées par ce même pays afin de créer une situation fictive d'autarcie. Cela revient à sommer les termes de ses TES intérieur et importé qui figurent dans le TIES.
- Nous en déduisons la matrice $(I - A^{r,r})^{-1}$ que nous multiplions par la matrice de l'ensemble des importations françaises depuis le pays r . Le résultat nous donne la quantité totale de biens produits dans le pays r destinés aux exportations vers la France, en supposant que ces exportations ont été entièrement produites dans le pays r via ce TES fictif.
- Enfin, en prémultipliant par le vecteur des intensités d'émissions dans le pays r , \hat{c}^r , nous calculons toutes les émissions ayant eu lieu dans le pays r pour des produits exportés vers la France, en supposant que ces exportations ont été entièrement produites dans le pays r .

Cette méthode est résumée par la formule suivante, pour l'empreinte de la France qui provient

du pays r :

$$E_r^{France} = \hat{c}^r \times (I - A^{r,r})^{-1} \times [A^{r,FRA} \times (I - A^{FRA,FRA})^{-1} \times \mathbf{y}^{FRA,FRA} + \mathbf{y}^{r,FRA}]$$

1.4 La méthode de calcul de l’empreinte carbone française par le SDES

La méthode employée actuellement en France pour le calcul de l’empreinte carbone est développée et mise en application par le Service des données et études statistiques du Ministère de la Transition Écologique (SDES) (Baude et al., 2022). Cette méthode ne s’appuie pas sur un TIES et correspond plutôt à une approche dite SRIO (single-region input-output), c’est-à-dire que seule la structure entrées-sorties de la France est prise en compte, et non celle des autres pays. Les importations sont supposées avoir l’intensité d’émissions de la zone géographique desquelles elles proviennent. C’est donc une méthode LCI. La méthode du SDES présente une autre différence avec l’approche TIES : les économies autres que la France sont regroupées en 10 zones géographiques, tandis que l’approche TIES peut en présenter parfois plus de 40. Ces zones représentent l’ensemble des pays du monde qui sont regroupés par critères géographiques. Parmi ces zones, certaines ne regroupent que des pays de l’UE ; les autres zones sont supposées avoir la même structure économique que l’UE, et des intensités en émissions qui sont calculées à partir des intensités européennes, et corrigées à l’aide de variables connues comme l’intensité en GES du PIB, du kWh ou la valeur ajoutée de l’agriculture.

Enfin, le SDES utilise les émissions des industries françaises issues des inventaires nationaux : elle est la plus précise possible sur le calcul des émissions intérieures associées à l’empreinte carbone. En revanche, la méthodologie TIES semble pouvoir améliorer le calcul des émissions importées en ce qu’elle permet d’attribuer ces émissions aux pays dans lesquels elles ont réellement eu lieu, ce qui est notamment pertinent lorsqu’il y a une forte variabilité des intensités d’émissions entre pays. Dans cette étude, nous ne répliquons pas la méthode employée par le SDES, mais nous comparons néanmoins l’empreinte qui en ressort avec les résultats de la méthode TIES.

1.5 L’approche SNAC

L’approche TIES permet une lecture fine des flux de GES internationaux, mais les bases TIES présentent des écarts aux données nationales. Il existe un ensemble de méthodes qui permettent de modifier des données TIES pour qu’elles soient fidèles aux données nationales d’un pays donné. Ces approches sont qualifiées de SNAC (*Single National Accounts Consistent*). Une première version du SNAC consiste à favoriser les données nationales et à utiliser les données des TIES pour calculer l’intensité en émissions des importations, que l’on appelle “SNAC simplifiée”. La seconde consiste à modifier les données d’un TIES afin d’y imposer les données nationales, quitte à ajuster le reste du TIES. Cette approche est appelée “SNAC-TIES” (*Single National Accounts Consistent TIES*, ou TIES en accord avec les données nationales).

L’approche SNAC simplifiée Cette procédure est décrite par Palm et al. (2019), reprise par Eurostat (Brown et al., 2021) et citée comme piste intéressante par Tukker et al. (2018). Elle étend la méthodologie de calcul d’empreinte carbone de la France par le SDES (Baude et al., 2022). Elle consiste à utiliser un TES national, et à y renseigner un vecteur d’émissions importées calculé à partir d’un TIES couplé avec une base d’émissions. Plus précisément, c’est la même méthode que celle utilisée par le SDES, mais le vecteur des intensités d’émissions est

un contenu moyen en émissions de GES des importations : $c' = (\mathbf{e} \times \mathbf{L})'$.⁵

L'approche SNAC-TIES Cette approche remplace les données d'un pays au sein du TIES par ses données nationales, avant de recalculer les autres cellules du TIES pour en assurer les équilibres comptables. Cette approche SNAC a déjà été expérimentée notamment en Belgique (Hambÿe et al. (2018)), aux Pays-Bas (Edens et al. (2015)) et en Grande-Bretagne (Owen et al. (2014)). Les méthodes de recalcul, ou calage, sont multiples. En général, elles utilisent un algorithme RAS (raking algorithm if scaling), une procédure d'ajustements proportionnels itératifs (ou ajustement de biproportion).

Ces approches permettent de construire des bases TIES qui sont plus cohérentes avec des données nationales. Elles présentent cependant au moins deux inconvénients. Le nouveau TIES construit est spécifique au pays duquel on a sourcé les statistiques nationales ; comparer des empreintes nécessite d'avoir autant de TIES que de pays. Cela conduit à un deuxième écueil : dès les ajustements nécessaires pour harmoniser les données nationales et le TIES, on perd en comparabilité entre le TIES initial et le SNAC-TIES. Ainsi, des flux qui n'impliquent pas le pays peuvent se retrouver modifiés, et différemment selon le pays à partir duquel l'approche SNAC se construit. Cette procédure n'est donc pas sans risque, et il convient de documenter l'ampleur des ajustements réalisés avant son utilisation pour le calcul de l'empreinte. C'est ce que nous faisons en implémentant une approche SNAC-TIES en Annexe H.

5. Une condition mentionnée par Tukker et al. (2018) pour que le SNAC simplifié soit une approximation acceptable de l'estimation SNAC complète est que les émissions incorporées dans les produits importés ne dépendent pas trop des exportations françaises, ce qui est le cas dès lors que les exportations françaises in fine réimportées (après intégration dans la chaîne de valeur mondiale) sont assez faibles. Tukker et al. (2018) montrent que cette condition est satisfaite pour la France, où les exportations réimportées ne représentent que 0,5% des importations.

2 Comparaison des TIES

2.1 Quels critères de comparaison ?

Pour être en mesure de comparer les TIES, il convient de préciser quels sont les paramètres à prendre en compte dans l’appréciation de la qualité d’une base TIES. Ces critères répondent à un objectif de calcul pérenne et régulier de l’empreinte carbone. En effet, le passage d’un calcul ponctuel à un processus de production régulier et encadré nécessite de prendre en compte des dimensions d’appréciation supplémentaires. Nous définissons un ensemble de critères en adaptant le code de bonnes pratiques de la statistique publique européenne⁶. Ceux-ci valent aussi bien pour les TIES que pour les bases d’émissions auxquels ils sont couplés.

Couverture.

- Le nombre de pays présents dans la base doit permettre d’assurer une bonne représentativité des zones d’importations françaises. Il faut notamment veiller à ce que les pays regroupés dans la zone “reste du monde” ne comptent pas des acteurs importants dans les chaînes de production internationales.
- La nomenclature mobilisée par la base doit être suffisamment fine pour identifier les émissions des principaux produits émetteurs, et être compatible avec la nomenclature des émissions intérieures de la France.

Pérennité.

- La base TIES et la base d’émissions doivent idéalement être issues de la même organisation, pour que les concepts et champs soient bien cohérents entre eux.
- La base sélectionnée doit offrir suffisamment de garanties à court et moyen termes qui assurent sa pérennité, et que son choix ne puisse pas être remis en cause pour des motifs méthodologiques légitimes. Il est par exemple préférable que celle-ci soit produite par un organisme international dont la neutralité n’est pas contestable.
- Il faut s’assurer de la pérennité de la mise à disposition de la base (engagement des producteurs). Mieux vaut éviter par exemple l’utilisation d’une base dont l’actualisation est conditionnée à l’attribution de budgets de recherche spécifiques dont la pérennité pourrait être remise en cause. Les bases institutionnelles (Eurostat, OCDE, etc.) fournissent plus de garanties à ce niveau.

Annualité.

- La base doit être mise à jour annuellement, ou sa projection doit être disponible. Dans le cas d’une projection, on veillera à ce que l’année de base de la projection ne soit pas trop ancienne. Les données doivent être les plus récentes possibles.
- La base doit être stable dans le temps : *a minima* les éventuelles révisions doivent être rétropolées afin de pouvoir recalculer toute la série. Il y a souvent à ce niveau un arbitrage entre le souci de stabilité d’un côté, et la mise à jour avec des informations nouvelles (concepts nouveaux) d’autre part.
- Les séries doivent disposer d’une chronologie suffisante sur le passé afin de pouvoir identifier des tendances de moyen terme. Une dizaine d’années serait souhaitable.

6. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/quality/european-quality-standards/european-statistics-code-of-practice>

Transparence et reproductibilité.

- Des écarts peuvent apparaître entre les données nationales fournies par les comptabilités nationales et les données nationales figurant dans le TIES. Ces écarts doivent pouvoir être justifiés et expliqués auprès des utilisateurs. Une liste des principaux écarts pourrait par exemple être diffusée. La méthodologie de construction du TIES doit être accessible et doit justifier les choix opérés. Tout manque d’information à ce niveau peut légitimement susciter la réticence des utilisateurs.
- Le processus de construction doit pouvoir être reproduit par un utilisateur extérieur. Les programmes doivent idéalement être ouverts, s’appuyer le plus possible sur des données publiques (non-propriétaires) et le calcul doit être retraçable, sinon reproductible.

La présente étude s’appuie sur ces critères pour identifier la base TIES qui semble la plus adaptée au calcul de l’empreinte carbone. Toutefois, une veille serait nécessaire afin de quantifier dans quelle mesure ces critères continuent d’être respectés et évoluent dans les autres bases de données disponibles.

2.2 Présentation des TIES

Les bases de données TIES sont construites à partir des tableaux d’entrées et sorties (TES) symétriques. Un TES national contient une partie intérieure et une partie importée. La partie importée ne ventile pas les importations par pays d’origine ; de même, la partie exportée n’est pas ventilée par pays de destination. Tout l’enjeu de la construction d’un TIES consiste alors à rapprocher ces TES nationaux avec des bases de données sur le commerce international, afin de construire un tableau d’entrées et sorties international cohérent. Dans ce processus de création du TIES, les données initiales peuvent donc être modifiées afin de garantir la cohérence interne du TIES, notamment les équilibres emplois-ressources ou l’égalité des flux miroirs entre exportateurs et importateurs⁷.

Nous retenons cinq bases TIES dans cette étude : Exiobase (Stadler et al., 2018), ICIO (Inter-Country Input-Output) dans sa version de 2021 (OECD, 2021), Figaro (Full International and Global Accounts for Research in input-Output analysis) dans sa version de 2021 (Rémond-Tiedrez and Rueda-Cantucho, 2019), Eora 26 (Lenzen et al., 2012, 2013), et enfin Wiod (World Input-Output Database) dans sa version de 2016 (Timmer et al., 2015)⁸. Ces TIES diffèrent notamment selon leur mode de production, leur couverture géographique et temporelle, et par leur nomenclature d’activités (voir Tableau 1 et Encadré 2.2). Ils sont tous construits selon le principe territorial : l’activité économique enregistrée pour la France est celle qui a lieu sur le territoire français, et non par l’ensemble des personnes françaises dans le monde. Wiod et Exiobase ne sont pas diffusées annuellement, contrairement aux autres bases. Celles-ci, ainsi qu’Eora 26, sont construites par des organismes de recherche, et non par des institutions dont c’est une partie du mandat ; leur pérennité est donc moins assurée. Figaro et ICIO, en revanche, sont produits respectivement par Eurostat et l’OCDE. Les années récentes d’Exiobase sont par ailleurs construites sur des projections à partir d’une année de référence. En plus d’ajouter des hypothèses statistiques à la construction de la base, cette procédure jette un doute sur la représentativité de la base. Le TIES Figaro présente une nomenclature d’activités plus agrégée que les autres bases sur certains pays, tandis qu’Eora 26 n’a que 26 branches d’activités, dont la structure est éloignée des nomenclatures d’activités française et européenne. ICIO est construit

7. Pour plus de détails sur le passage de TES à un TIES, voir l’Annexe C.1.

8. Toutes les bases TIES ont été téléchargées à l’été 2021, à l’exception d’ICIO21, en novembre 2021.

autour de 67 zones géographiques, soit l'une des plus grandes désagréations géographiques, avec 45 branches d'activités. En se fondant sur les critères de couvertures et du mode de production et de diffusion, le choix de TIES se porterait sur Figaro et ICIO. Il convient à présent de comparer leur contenu.

TABLEAU 1 – Couverture des bases TIES

	Figaro 2	Wiod 2016	ICIO 21	Exiobase 3	Eora 26
Producteur	Eurostat	Wiod	OCDE	Exiobase	Eora
Nombre de branches	64-30,21-17	56	45	163	26
Nombre de produits	64-30,21-17	–	–	200	26
Nombre de pays/zones	46	44	67	49	189
Années disponibles	2010-2019	2000-2014	1995-2018	1995-2020	1990-2021
Annualité de la diffusion	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Résidence ou territorial	T	T	T	T	T

Note : Figaro 2 est diffusé à un niveau 64 branches et produits jusqu'en 2017, puis 21 pour les années 2018 et 2019. Cette base ne couvre pour certains pays que 30 branches et produits, puis 17 en 2018-2019.

Encadré : Origines et caractéristiques des TIES utilisés.

EXIOBASE : EXIOBASE est un TIES spécialisé dans l'environnement, qui est développé parallèlement à des bases environnementales pour les émissions atmosphériques, l'utilisation de l'eau, l'utilisation des sols, l'extraction de matériaux et les impacts sur la biodiversité. Le développement de la base a été mené par un consortium d'universités et d'instituts de recherche européens. La version la plus récente, Exiobase 3, dispose d'une série chronologique de TIES allant de 1995 à 2011, projetées jusqu'en 2020. Exiobase 3 s'appuie sur les versions précédentes d'Exiobase en utilisant des tableaux des ressources et des emplois rectangulaires dans une classification de 163 industries par 200 produits comme principaux éléments de base.

Eora : Eora est un TIES à très haute résolution spatiale et sectorielle, d'initiative privée. Dans sa version payante, il comporte plus de 15,000 branches dans 190 pays, avec une série chronologique complète pour 1990-2021. Cette base dispose de 2,720 indicateurs environnementaux couvrant notamment les émissions de gaz à effet de serre, la pollution atmosphérique, l'utilisation de l'énergie, les besoins en eau, ou encore l'occupation des sols. Nous utilisons la version d'Eora disponible gratuitement, Eora26, qui est à un niveau de classification de 26 branches. Eora26 présente l'inconvénient majeur pour notre analyse d'être en NACE Rev.1 alors que tous les autres TIES sont en NACE Rev.2, et qu'il n'existe pas de table de passage pour établir des comparaisons de bonne qualité.

Wiod : La World Input-Output Database (Wiod) couvre 43 pays et une région "reste du monde", avec un détail sectoriel de 56 industries différentes. Wiod est né d'un projet financé par la Commission européenne, mené par un consortium d'universités européennes. Elle s'appuie sur des données brutes provenant des instituts nationaux de statistique (INS) et de UN COMTRADE, et couvre la période 2000-2014.

OCDE-ICIO 2021 : Le tableau d'entrées-sorties inter-pays (ICIO) de l'OCDE a été construit pour la première fois dans le cadre du projet conjoint OCDE-OMC sur le commerce en valeur ajoutée (TiVA). La version mise à jour de 2021 est un tableau d'entrées-sorties symétrique couvrant 45 industries dans 66 pays et le reste du monde pour les années 1995-2018. Les émissions de CO₂ basées sur la production par les industries ICIO sont directement estimées à partir des données de l'AIE sur le CO₂ provenant de la combustion de combustibles (IEA (2015)).

FIGARO Ed.2021 : FIGARO est l'abréviation de "Full International and Global Accounts for Research in input-Output analysis" (comptes internationaux et mondiaux complets pour la recherche en analyse des entrées-sorties). Figaro a vu le jour au sein d'Eurostat pour contribuer à l'analyse des conséquences de la mondialisation et être l'outil de référence sur les sujets de compétitivité, croissance, productivité, emploi et empreinte environnementale. Les tableaux Figaro présentent la relation entre les économies de l'UE, du Royaume-Uni et des États-Unis à un niveau détaillé de 64 industries et 64 produits. Les données Figaro pour les autres pays partenaires de l'UE proviennent des données sous-jacentes de la base de données TiVA de l'OCDE et couvrent 30 industries/produits (ex : Chine, Russie, Japon, etc.), conformément à la classification de 36 industries de l'OCDE. Les tableaux FIGARO sont mis à jour sur une base annuelle avec la dernière année de référence disponible (par exemple, les données pour 2020 en 2022). Les données des tableaux Figaro sont disponibles de 2010 à 2019.

Note : L'édition 2022 de Figaro (<https://ec.europa.eu/eurostat/web/esa-supply-use-input-tables/figaro>), postérieure à cette étude, donne accès à un niveau 64 produits pour toutes les années (2010 à 2020) sans distinction. Eurostat a par ailleurs diffusé en 2022 des résultats d'empreinte, incluant une base d'émissions sur la période 2010-2019, et s'appuyant sur les comptes d'émissions atmosphériques (UE27, Royaume-Uni, Norvège, Suisse et Turquie) et des estimations par Eurostat des émissions de CO₂ pour les 15 entités géographiques restantes (14 pays et le "reste du monde").

2.3 Cylindrage

Pour être en mesure de les comparer, nous avons effectué un travail de cylindrage des TIES, qui consiste à exprimer leurs données dans un référentiel commun (voir Encadré 2.3). Nous commençons par convertir les montants en euros courants, certaines bases étant en dollars. Nous utilisons le taux de change euro-dollar annuel moyen fourni par Eurostat. Nous choisissons les variantes des TIES en branches plutôt qu'en produits. L'utilisation d'un TIES en produits plutôt qu'en branche ne modifie que peu la structure de production et des importations et conduit naturellement à des empreintes carbone différentes bien que très proches. Nous détaillons ces différences en Annexe F. Qu'il soit en branches ou en produits, un TIES décrit la même réalité avec un prisme différent. Les bases d'émissions sont quant à elles nativement en branches, étant issues des procédés d'inventaire. Nous transformons ensuite les TIES afin qu'ils aient les mêmes zones géographiques et branches d'activités. Pour ce faire, nous agrégeons branches et pays aux niveaux communs à toutes les bases, soit 44 zones et 17 branches. Agréger un TIES conduit à perdre une partie de l'information qu'il contient : nous en explorons les conséquences en Section 5.2 et en Annexe G. Cela nécessite également d'exprimer les données dans une même nomenclature. La nomenclature de pays et zones géographiques est commune à toutes les bases considérées. En revanche, elles diffèrent sur la classification des branches d'activités.

Encadré : Données de TIES cylindrées

Nous définissons comme cylindrée un ensemble de TIES ayant les caractéristiques communes suivantes :

- Même niveau d'agrégation pays \times branches/produits
- Même nomenclature de branches/produits
- Même(s) année(s)
- Même format de tableaux au sein du TIES
- Même système de mesure (en volume ou en valeur, même monnaie)

Ce cylindrage assure que les données sont interchangeables entre TIES. Ceci permet par exemple de réaliser facilement des comparaisons ou des simulations. Les données d'émissions doivent elles aussi respecter ce cylindrage.

Il convient donc de se ramener à une nomenclature commune pour tous les TIES et les bases d'émissions. Nous choisissons la NACE Rev.2. : plusieurs bases utilisent déjà cette nomenclature ; elle est récente et donc reflète au mieux l'économie actuelle ; la nomenclature d'activité française en découle. Ainsi, cette classification permettra des comparaisons directes avec les données nationales. Pour cela, nous avons mobilisé des tables de passage existantes ou que nous avons construites nous-même. Le niveau A17 est le niveau le plus détaillé auquel il est possible de comparer les cinq TIES dont nous disposons⁹. Les TIES Figaro, Wiod et ICIO sont déjà diffusés en NACE Rev.2. Quant à Exiobase 3, il n'est pas diffusé en NACE Rev.2 mais propose des tables de passage entre la nomenclature native d'Exiobase (200 produits et 163 branches) et la nomenclature d'usage d'Eurostat (64 produits, compatible NACE rev.2). Toutefois ces tables de passage n'indiquent pas de pondération, mais seulement les postes concernés (sous forme binaire) par les ventilations, la rendant impropre à la réallocation de montants. Nous avons ainsi construit une table de passage pondérée (par la production de l'année 2010 issue du TIES Figaro 2) qui est détaillée pour chaque pays européen, et qui pour les autres pays reprend la pondération moyenne de l'Union Européenne, issue des tables par pays. Les émissions d'Exiobase 3 sont ainsi ventilées à plus de 99,9%. Le 0,1% résiduel est dû à des imprécisions dans la table de passage,

9. Détail des catégories dans la Table A.1.

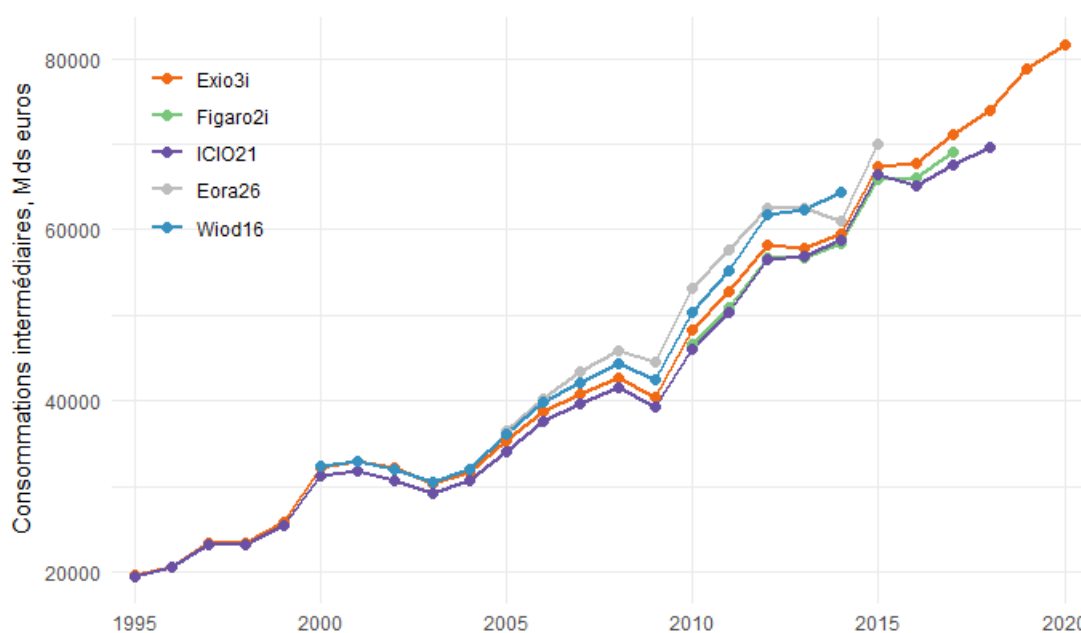
et il est reventilé au prorata des émissions afin d’assurer un calage des données. Cet exercice a été également réalisé avec la nomenclature à 55 produits de l’OCDE, dans sa dernière version d’ICIO 2021. Les deux tables de passage sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

2.4 Comparaison

Nous comparons les TIES sur leurs trois blocs constitutifs : le tableau d’entrées intermédiaires (TEI), le vecteur de production par branche×pays, et le tableau de demande finale par les pays adressée aux autres branche×pays.

Comparaison des TEI La Figure 1 présente les différences entre TEI sous forme de totaux des entrées intermédiaires, entre 1995 et 2020. Figaro, ICIO et Exiobase proposent des totaux proches, tandis que Wiod et Eora présentent des écart avec ces trois TIES de parfois 10%. Les écarts entre ces totaux semblent stables voire aller croissants au fil du temps pour Wiod. Nous pouvons aller plus loin en comparant directement la structure par branche des TIES. Pour faciliter la comparaison, nous agrégeons tous les pays en un total mondial et nous montrons les différences par case du TEI en Figure B.1, en Annexe. Cette comparaison confirme la proximité entre Figaro et ICIO, mais fait apparaître des différences notables sur certaines cases du TEI avec Exiobase et avec Wiod. Sur certaines cases du TEI, l’écart absolu entre deux TIES peut atteindre jusqu’à 1100 milliards d’euros (soit 1% de la production totale mondiale).

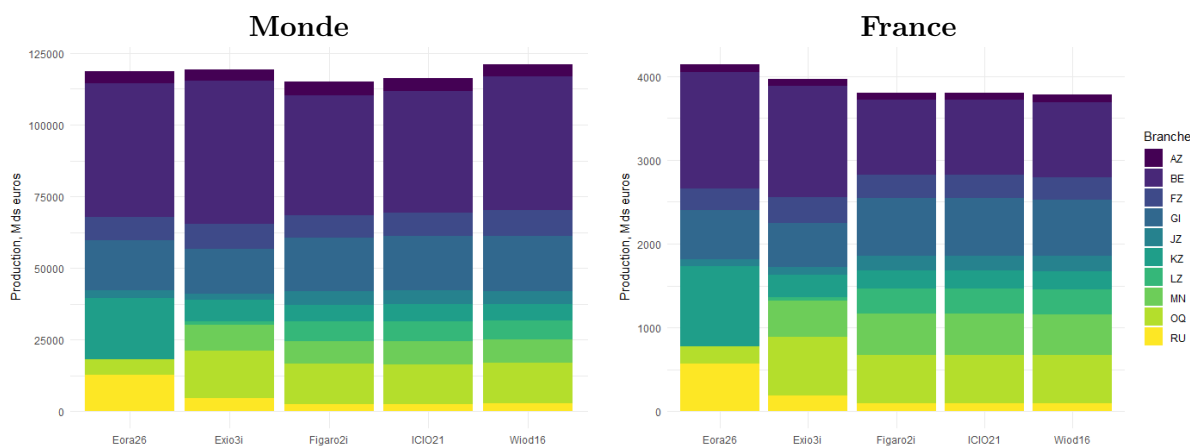
GRAPHIQUE 1 – Total des consommations intermédiaires selon le TIES



Note : Cette figure présente la somme des cases du TEI de la France en milliards d’euros courants, selon les 5 TIES.

Comparaison de la production Le graphique 2 présente la répartition de la production totale selon les 17 branches de la nomenclature A17, pour les différents TIES. La comparaison est effectuée pour le total mondial d'une part et pour la France d'autre part. La structure de la production semble relativement proche entre les TIES Figaro, Wiod et ICIO pour la France et le monde. Des divergences apparaissent avec Exiobase, principalement sur les services (JZ, LZ et RU notamment). Eora semble systématiquement s'écarter des autres TIES, notamment sur la structure de production de la France.

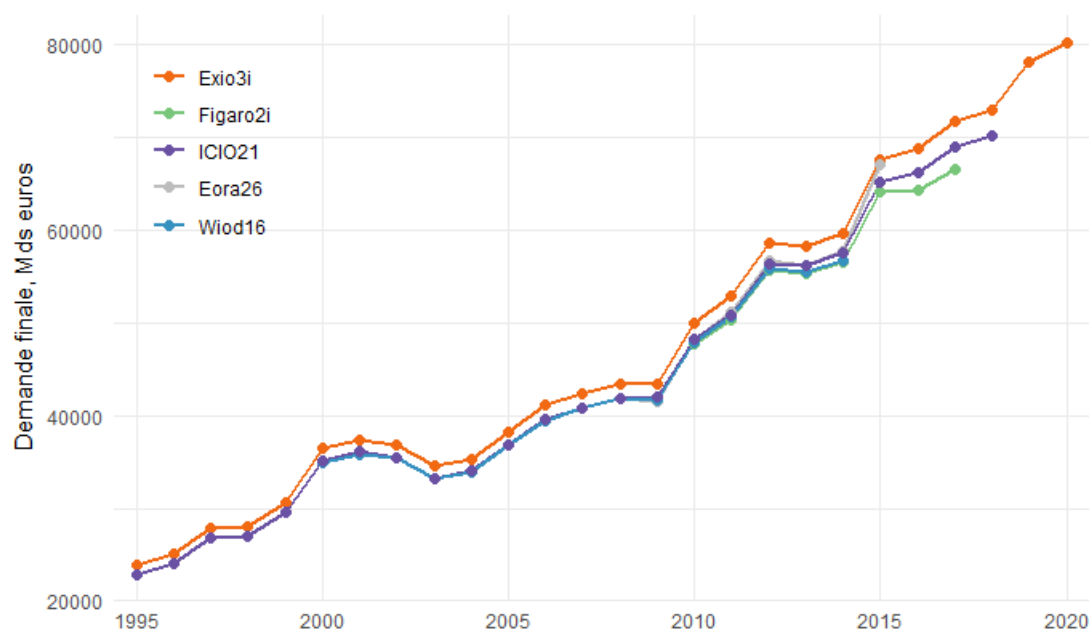
GRAPHIQUE 2 – Production par branche selon le TIES



Note : Cette figure présente les totaux de production en milliards d'euros courants par branche d'activité, dans le monde dans son ensemble et en France, selon les 5 TIES. Nomenclature A10, données de 2014.

Comparaisons des demandes finales Le principal déterminant de l'empreinte carbone d'un pays réside dans sa demande finale en biens et services, qui est la clé de répartition des émissions entre les différents pays. Toute différence de structure au sein de la demande finale entre deux TIES peut impacter le niveau de l'empreinte calculée. La Figure 3 présente le niveau de la demande finale française entre 1995 et 2020 pour chaque TIES. Les courbes suivent les mêmes évolutions et les écarts sont relativement constants au cours du temps. Les données de Figaro, ICIO et Wiod sont très proches, tandis qu'Exiobase présente la plus haute demande finale. L'écart relatif atteint environ 5% entre Exiobase et Figaro. La similarité des évolutions laisse envisager une certaine robustesse dans l'analyse des trajectoires d'évolution d'empreintes.

GRAPHIQUE 3 – Total de la demande finale selon le TIES



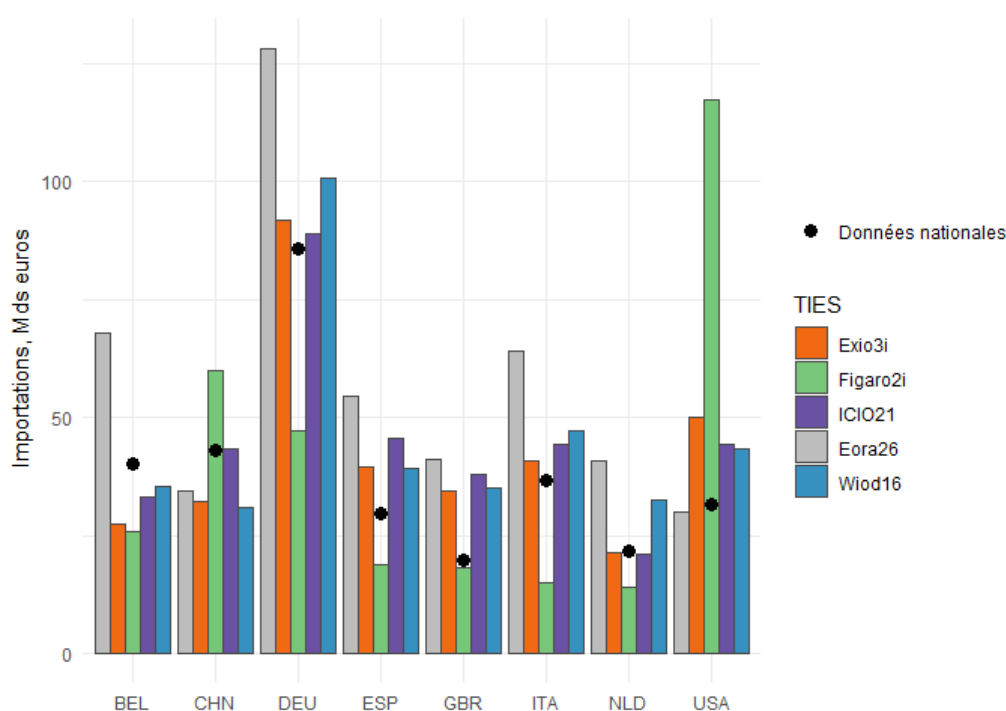
Note : Cette figure présente la demande finale totale de la France en milliards d’euros courants selon les 5 TIES. Les suffixes “i” font référence à la version “branches” des TIES.

En Figure B.2, nous présentons le détail de la demande finale française décomposée par branche. Des écarts relatifs importants apparaissent entre TIES, mais leur importance en écart absolu est plus faible. Eora semble en désaccord avec les autres TIES sur certains branches. Eora et Exiobase sont les TIES qui attribuent le plus une demande finale éloignée de celle enregistrée dans le TES national. La demande finale est la somme de la demande intérieure et la demande importée. Pour la France, la demande finale intérieure est très proche d’un TIES à l’autre, tant en niveau qu’en structure. Cette proximité s’explique par le mode de construction des TIES : la demande finale intérieure décomposée par branche est déjà présente dans les TES nationaux utilisés pour construire les TIES. En revanche, la demande finale importée dans les TES nationaux est agrégée, sans détail sur le pays de provenance. Ainsi, la demande finale importée sera recalculée pour chaque TIES. Elle présente des écarts en niveau beaucoup plus importants, avec près de 20% d’écart entre le total le plus élevé et le plus faible en 2014. Le TIES de Figaro semble être celui qui s’éloigne le plus des autres TIES (Figure B.3), attribuant pour la France beaucoup plus de demande finale provenant des États-Unis que les autres TIES, mais bien moins provenant d’Allemagne ou du reste du monde. Ces différences proviennent pour partie des ajustements effectués lors de la création des TIES afin de rendre cohérents les échanges extérieurs, et donc le bouclage inter-pays. Ici, les différences ne peuvent pas s’expliquer par des différences de nomenclature, mais bien par le mode de construction du TIES.

Comparaison des importations totales Comme noté ci-dessus, la décomposition de la demande finale importée par pays d’origine varie fortement d’un TIES à l’autre et les données de Figaro ont tendance à s’écarter des données des autres TIES. L’une des hypothèses possibles

pour expliquer cet écart serait que, à niveau d'importations donné, la répartition des importations entre consommation intermédiaire et demande finale varie d'un TIES à l'autre. Les écarts observés au niveau des importations destinées à la demande finale pourraient être compensés par des écarts au niveau des importations destinées aux consommations intermédiaires. La Figure 4 montre la ventilation des importations totales de la France (pour consommation intermédiaire et demande finale) par pays de provenance, ainsi que le niveau des importations depuis ce pays donné par les douanes françaises. On constate que Figaro et Eora s'éloignent fortement des estimations des autres TIES. Ces différences dans la ventilation des importations peuvent avoir un impact significatif sur l'empreinte carbone totale de la France : si un TIES ventile les importations françaises en surestimant la part des importations en provenance de pays fortement émetteurs, alors l'empreinte carbone calculée à partir de ce TIES sera plus élevée.

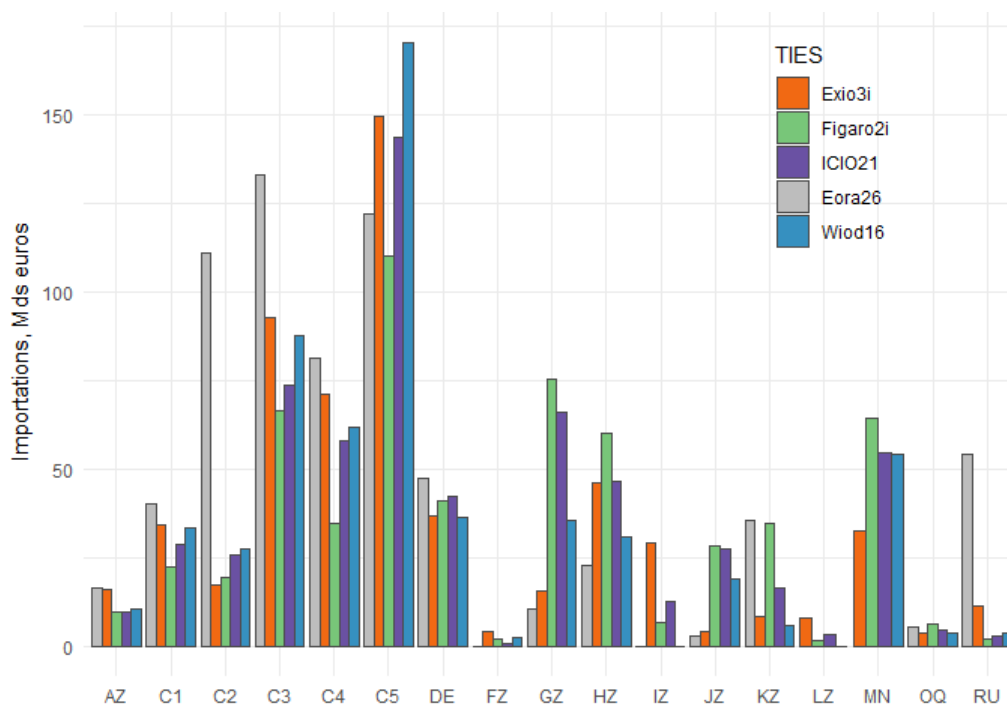
GRAPHIQUE 4 – Importations par pays d'origine selon le TIES



Note : Cette figure présente le total des importations directes de la France par pays de provenance selon les 5 TIES en milliards d'euros courants, ainsi que la valeur des importations fournies par les douanes françaises (points noirs). Données de 2014.

Plus encore que la décomposition des importations par pays d'origine, la décomposition des importations par branche pourrait influencer sur le résultat du calcul d'empreinte, en raison des fortes disparités des intensités d'émissions de GES entre branches. Il est donc également crucial de comparer la décomposition des importations par branche telle qu'elle apparaît dans chaque TIES, ce qui est montré en Figure 5. Exiobase présente des montants d'importations supérieurs à ceux des autres bases pour les biens manufacturés (C), de même avec Figaro pour les services (à partir de G). Eora, à nouveau, s'éloigne fortement des autres bases, notamment sur C2, C3 et RU.

GRAPHIQUE 5 – Importations par branche d’activités d’origine selon le TIES



Note : Cette figure présente le total des importations de la France par branche d’origine selon les 5 TIES en milliards d’euros courants. Nomenclature A17, données de 2014.

Pourquoi de tels écarts ? La ventilation des importations par pays d’origine et par branche diffère fortement d’un TIES à l’autre, ainsi qu’entre les TIES et les données nationales. Comment expliquer ces divergences, et quelles conclusions en tirer quant au choix du TIES le plus pertinent ? Comme expliqué précédemment, pour ventiler les importations d’un pays, les constructeurs de TIES utilisent des données de commerce international, comme Comtrade ou Comext. Ces données présentent toutefois des faiblesses et des incohérences, qui nécessitent des retraitements. Les données de commerce transmises par les pays peuvent présenter les défauts suivants :

- Asymétries : une asymétrie désigne une situation où les importations d’un pays depuis un partenaire commercial ne sont pas égales aux exportations déclarées par ce partenaire commercial vers le pays considéré, au-delà de la différence dues aux coûts de transport et d’assurance (correction CAF-FOB). Ces asymétries peuvent être dues à des erreurs ou des oublis dans la saisie des données, ou à des flux commerciaux ayant un caractère confidentiel pour l’un des deux pays seulement.
- Quasi-transit : le quasi-transit désigne les importations destinées à être réexportées sans avoir été transformées sur le territoire national. L’enregistrement du quasi-transit par les douanes peut brouiller les données de commerce international. Ainsi, en ignorant le problème de quasi-transit, on risque par exemple de surestimer les importations portugaises de pétrole provenant d’Espagne, alors qu’une grande partie de ce pétrole provient en réalité d’Algérie et ne fait que transiter par l’Espagne.

Lors de la construction d’un TIES, des retraitements sont donc mis en place pour tenir compte du quasi-transit et des asymétries, afin d’obtenir un panorama globalement cohérent des flux économiques entre pays. Les divergences entre TIES s’expliquent donc par ces modes de retraitement, spécifiques à chaque producteur de TIES. Le degré de similitude dans la ventilation des

importations entre les données d'un TIES et les données nationales n'est donc pas un critère central pour évaluer la pertinence d'un TIES. Ces écarts résultent en effet d'un travail de re-traitement et de mise en cohérence des données de commerce entre pays. Le TIES idéal aurait donc une ventilation des importations différente de celle figurant dans les données purement nationales. Ainsi le fait qu'Exiobase se rapproche davantage que Figaro des données nationales françaises ne permet pas d'affirmer qu'Exiobase est un meilleur candidat que Figaro. Une comparaison plus poussée des algorithmes utilisés pour effectuer ces retraitements serait nécessaire pour évaluer la qualité de chacun de ces TIES. Toutefois, il apparaît que la base TIES Eora s'éloigne systématiquement des autres TIES, notamment par la nomenclature d'activités qui lui propre. Aussi, nous choisissons de ne pas poursuivre la comparaison avec cette base.

3 Comparaison des bases d'émissions

3.1 Niveaux d'émissions

Les bases d'émissions de GES que nous utilisons sont celles produites par les mêmes organismes que les TIES. La construction d'une base d'émissions repose sur l'utilisation de principalement deux sources de données : des facteurs d'émissions et des données d'activité. Les données d'activité renseignent le volume de production de la branche (pour une branche de l'industrie), et les facteurs d'émissions mesurent les GES émis par unité produite. Ces facteurs dépendent notamment de l'utilisation d'énergie¹⁰. Les émissions de GES d'une branche sont alors calculées en analysant le processus de production de la branche et en associant à chaque partie de la production un facteur d'émissions. Les bases d'émissions internationales utilisées ici sont construites principalement à partir de deux sources de facteurs d'émissions et de données d'activité : la base EDGAR¹¹, développée conjointement par Eurostat, et le modèle TEAM.

Les bases d'émissions couvrent des champs d'émissions, géographiques et temporels différents¹². Le tableau 2 présente les différents GES recensés dans les bases d'émissions et les années pour lesquelles les données sont disponibles¹³.

Les bases d'émissions ne couvrent pas toutes les mêmes pays. Tandis qu'Eora et Exiobase couvrent l'ensemble des pays du monde (quitte à agréger certains pays dans des zones pour Exiobase), Eurostat et TecO₂ se limitent à un petit nombre de pays : les pays européens pour Eurostat, les pays de l'OCDE et les pays européens hors OCDE pour TecO₂. Ces deux dernières bases ne couvrent ainsi qu'une petite fraction des émissions mondiales, ce qui réduit la précision d'un calcul d'empreinte carbone en chaîne de valeur mondiale¹⁴. Nous excluons la base d'émissions de Wiod car, datant de 2012 au moment des travaux¹⁵, ses données nous paraissent trop anciennes pour mener des comparaisons jusqu'aux années récentes. Par ailleurs, si les bases d'Eurostat et TecO₂ sont restreintes à un petit nombre de pays et d'années, elles sont considérées

10. Les facteurs d'émissions peuvent ainsi différer d'un pays à l'autre et évoluer au cours du temps.

11. <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>

12. Les données d'émissions présentées ici se limitent aux émissions liées à la production. Elles n'incluent donc pas les émissions directes des ménages (principalement chauffage et transport).

13. Toutes les bases d'émissions ont été téléchargées à l'été 2021.

14. La base d'émissions d'Eurostat couvre les émissions dans l'air (*air emission accounts*), qui ne représentent pas l'ensemble des émissions de GES. Depuis la rédaction de ce document de travail, une nouvelle base d'émissions a été mise au point par Eurostat, qui couvre l'ensemble des pays du monde et des émissions de CO₂.

15. Depuis, le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC) a publié des données utiles sur la consommation d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone par industrie et par pays pour la période 2000-2016, en parfaite cohérence avec la version 2016 de WIOD (https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/economic-environmental-and-social-effects-globalisation_en)

comme fiables, mises à jour annuellement, basées sur des données publiques (celles transmises à l'ONU dans le cadre de l'inventaire), et soumises à des retraitements dont la procédure est transparente.

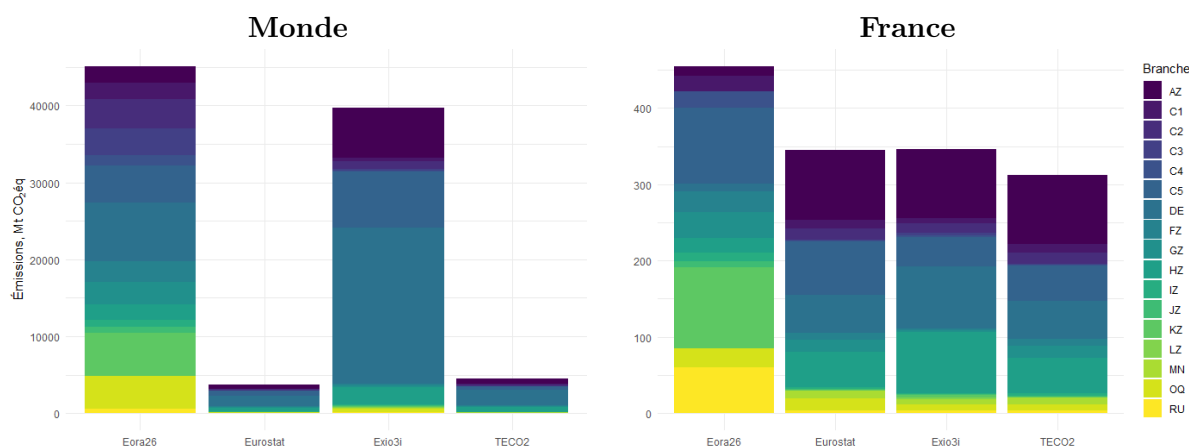
TABLEAU 2 – Couverture des bases d'émissions

	Eurostat	Wiod 12	TECO2	Eora 26	Exiobase 3
Couverture GES	Total	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄	CO ₂	Total	Total
Nombre de branches	64-30,21-17	35	67	26	163
Nombre de produits	64-30,21-17	–	–	–	200
Nombre de pays/zones	33	40 + RDM	69	189	49 + RDM
Années disponibles	2010-2019	1995-2009	2010-2019	2005-2015	1995-2020
TIES correspondant	Figaro 2	Wiod	ICIO21	Eora 26	Exiobase 3

Note : La couverture GES "Total" comprend les sept substances considérées comme gaz à effets de serre dans le format AEA : CO₂, N₂O, CH₄, SF₆, NF₃, les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures ou hydrocarbures perfluorés (PFC). Le terme "RDM" désigne un agrégat des pays pour lesquels la base ne dispose pas de données. En fonction de la couverture géographique de la base, ce "reste du monde" regroupe des pays différents.

La Figure 6 ci-dessous représente le total des émissions répertoriées dans chaque base pour l'année 2014. Il apparaît que les bases Eurostat et TecO₂ ne mesurent qu'une faible part des émissions mondiales de GES, du fait de l'absence de données sur certains des principaux émetteurs. Les émissions totales enregistrées dans Exiobase et Eora présentent un écart significatif (supérieur à 10%), alors que ces deux bases sont censées couvrir l'ensemble des régions du monde et l'ensemble des GES. L'empreinte carbone d'un pays peut donc différer d'une base d'émissions à l'autre uniquement par cet écart de périmètre géographique.

GRAPHIQUE 6 – Emissions par branches d'activité selon la base d'émissions



Note : Cette figure présente les totaux d'émissions en MtCO₂eq par branche d'activité, pour l'ensemble du monde et pour la France, selon les 4 bases d'émissions. Nomenclature A17, données de 2014.

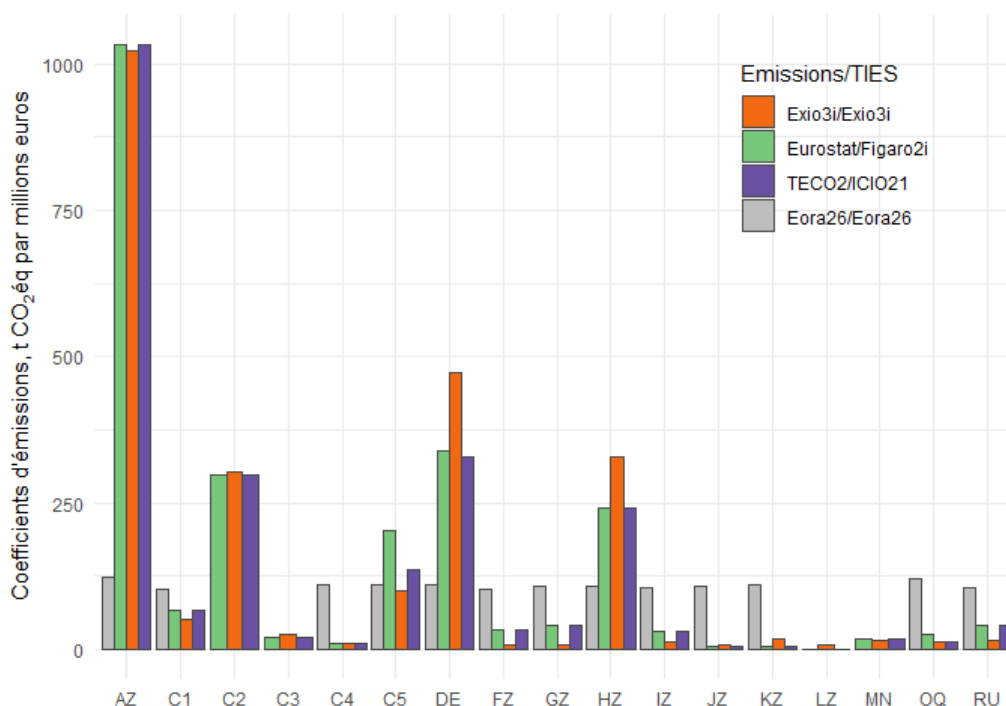
Cependant, même au sein d'un pays donné, les bases d'émissions peuvent fournir des informations différentes. La Figure 6 présente les totaux d'émissions par branche en France, selon la base choisie. Les données d'Eurostat et d'Exiobase semblent très proches, à la fois en niveau et en structure. Les données de TecO₂ sont légèrement plus faibles mais présentent une structure similaire. Les émissions de la base Eora s'éloignent sensiblement de celles des autres bases, tant en niveau qu'en structure. Ces écarts peuvent s'expliquer par des différences dans les données

sources utilisées par les organismes chargés de la production des bases d'émissions, voire par le fait que certaines années sont extrapolées.

3.2 Coefficients d'émissions

Les émissions de GES entrent dans le calcul de l'empreinte carbone sous la forme de coefficients d'émission, les GES émis par euro de production (les c_i^r introduits en 1.2). La comparaison des coefficients d'émissions permet d'identifier à quel point une branche nationale est intensive en émissions de GES, comparativement aux autres branches du pays et aux mêmes branches des autres pays. Elle permet aussi d'identifier certaines erreurs dans les données, par exemple si un coefficient d'émissions pour une branche d'un pays s'écarte trop de ceux des autres pays. Si une erreur dans la comptabilisation de la production d'une branche rend celle-ci très faible, alors le ratio sera très élevé. La Figure 7 présente les coefficients d'émissions des branches d'activité française pour chacun des couples base d'émissions/TIES. Les bases Eurostat/Figaro et Tec_{CO2}/ICIO présentent des coefficients proches, et dans une moindre mesure Exiobase, qui s'en écarte sur les branches DE et HZ. Quant à Eora, ses résultats divergent de ceux des autres bases.

GRAPHIQUE 7 – Coefficients d'émissions par branche d'activité selon le couple TIES/base d'émissions



Note : Cette figure présente les coefficients d'émissions c_i^r selon différents couples TIES/base d'émissions, pour la France. Nomenclature A17, données de 2014.

Dans ce qui suit, nous allons procéder à des comparaisons de calcul d'empreinte carbone d'un TIES à l'autre. Compte tenu des différences entre bases d'émissions évoquées ici, nous choisissons de fixer les données d'émissions et de ne faire varier que le TIES. Si de prime abord Tec_{CO2} et Eurostat séduisent par leur fiabilité, elles ne couvrent qu'une petite partie des émissions mondiales. Les émissions d'Exiobase semblent moins fiables mais présentent une structure proche de celle d'Eurostat, tout en couvrant un champ temporel et un champ géographique plus larges.

Pour ces raisons, nous choisissons cette base comme référence. Il conviendra alors de la combiner avec des TIES qui ne sont pas construits initialement pour cet usage. Mais, premièrement, Exiobase utilise une nomenclature d’activités très détaillée, ce qui facilite les passages vers les nomenclatures des autres TIES. Ensuite, dans le cas du couple Figaro-Exiobase, seuls deux pays du TIES Figaro sont absents de la base émissions : l’Argentine et l’Arabie Saoudite. Dans les calculs effectués sur le couple Figaro-Exiobase, les coefficients d’émissions de ces deux pays seront donc remplacés respectivement par ceux des zones “Reste de l’Amérique latine” et “Reste du Moyen-Orient” (zones géographiques utilisées par Exiobase). Enfin, vingt pays du TIES ICIO sont absents de la base d’émissions Exiobase : leurs coefficients d’émissions sont également imputés. Toutefois, notons que Exiobase n’est que rarement mise à jour, et utilise des méthodes de projections pour les données relatives aux années les plus récentes. Il conviendra d’interpréter les résultats de ces années avec précaution. On pourrait imaginer combiner Exiobase avec une base d’émissions plus fiable sur ces dernières années, comme celle d’Eurostat. Cette dernière pourrait par exemple être complétée par les données Exiobase pour les pays non-européens. Dans un souci de clarté, nous ne mènerons pas cet exercice.

4 Calcul d’empreinte carbone

Comment ces différences entre TIES présentées en Section 2 se reflètent-elles dans les calculs d’empreinte ?

4.1 Calculs croisés TIES-Émissions

Dans un premier temps, nous effectuons des calculs d’empreinte combinant toutes les paires TIES et Emissions disponibles pour une même année. Pour ce faire, nous agrégeons toutes les données à une nomenclature commune, A17. Lorsque des coefficients d’émissions sont manquants, nous les remplaçons par les coefficients moyens calculés pour les mêmes branches des autres pays dans la même base. Ces coefficients manquants concernent une part importante des pays des bases Eurostat et TecO₂, en raison de leur périmètre géographique restreint. Nous effectuons ces calculs croisés pour mesurer l’empreinte carbone de la France en 2014, et comparons le résultat à celui publié par le SDES, qui servira de montant de référence, dans le tableau 3.

TABLEAU 3 – Empreinte carbone par habitant de la France

	Base d’émissions		
	Eurostat	TECO2	Exiobase 3
Figaro 2	7.7	7.0	9.6
Wiod 16	8.7	7.9	8.9
ICIO21	8.1	7.3	9.6
Exiobase 3	7.5	6.8	9.4

Note : TIES en lignes, bases d’émissions en colonnes. En tCO_{2eq} par habitant. Année 2014, hors émissions directes des ménages. L’empreinte hors émissions directes des ménages fournie par le SDES en 2014 est de 9.1tCO_{2eq}.

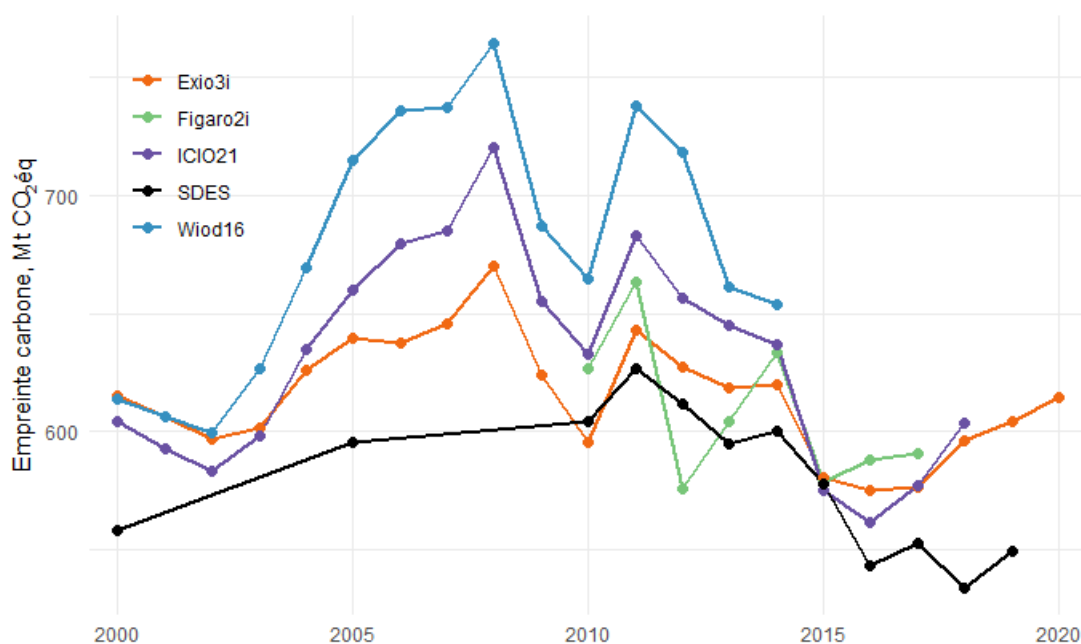
L’empreinte calculée à partir des bases d’émissions d’Eurostat et TecO₂ est systématiquement plus faible que celle calculée à partir de la base d’émissions d’Exiobase 3. En effet, ces bases présentent un nombre restreint de zones géographiques, qui se trouvent être particulièrement

sobres en émissions (pays européens ou de l'OCDE en grande partie). Ainsi, l'imputation des coefficients manquants dans les autres pays se fait à partir de coefficients peu élevés, sous-estimant l'intensité en émissions de pays absents de la base. L'empreinte calculée avec Exiobase est donc naturellement plus élevée. Elle est même supérieure à celle du SDES, ce qui montre que la prise en compte des chaînes de valeur internationales influe sur l'empreinte carbone. Pour combiner bases d'émissions et TIES, chaque TIES est agrégé au niveau A17; comme nous le verrons plus loin, le niveau auquel les branches sont agrégées peut biaiser le calcul d'empreinte. Ainsi, la comparaison de niveaux d'empreinte d'un TIES à l'autre est compliquée par l'agrégation. Nous comparons donc ensuite les profils temporels des empreintes.

4.2 Comparaison des TIES en évolution

La Figure 8 présente les empreintes carbone de la France entre 2000 et 2020 calculées avec les différents TIES, en fixant la base d'émissions, celle d'Exiobase (voir Section 3). Nous ajoutons les résultats diffusés par le SDES.

GRAPHIQUE 8 – Evolution de l'empreinte carbone de la France selon la méthode TIES



Note : Cette figure présente l'évolution de l'empreinte carbone de la France entre 2000 et 2020, hors émissions directes des ménages, calculée avec la méthode TIES, selon les 4 TIES. Base d'émissions d'Exiobase.

Les empreintes calculées sont similaires en tendance et dans une moindre mesure en niveau. Les écarts en niveau peuvent atteindre jusqu'à 150MtCO₂éq en 2012 entre Wiod et Figaro. Wiod fournit une empreinte systématiquement plus élevée que les autres TIES. Ceci peut être dû à l'importance des importations de biens manufacturés dans Wiod. L'empreinte la plus proche de celle du SDES, à la fois en niveau et en tendance, est celle calculée à partir du TIES d'Exiobase. La cohérence entre les résultats d'Exiobase et du SDES est maximale sur la période 2010-2015. Une divergence se produit après 2015, qui s'explique probablement par le fait que les données

du TIES Exiobase sur les dernières années sont des projections. Le TIES Figaro présente des fluctuations plus erratiques. Enfin, ICIO fournit une empreinte un peu au-dessus de la moyenne des TIES. Le fait que l’empreinte SDES est systématiquement plus faible peut s’expliquer par plusieurs facteurs : elle utilise une approche SRIO, les données des zones économiques hors UE (TES et coefficients d’émissions) sont approximées à partir des données de l’UE, et le nombre de zones géographiques est plus faible, pouvant entraîner une perte d’information. Ces différents facteurs seront explorés en Section 5.

4.3 Décomposition par pays

La Figure B.4 décompose l’empreinte de la France en 2014 selon l’origine géographique des émissions des GES, suivant la décomposition établie par l’équation 2. Nous ramenons les différents TIES à un périmètre géographique commun, le plus détaillé possible (40 pays et le reste du monde). L’origine des émissions qui constituent l’empreinte semble être similaire selon les TIES Exiobase, ICIO et Wiod. Seul le TIES Figaro s’écarte significativement de la moyenne des TIES. De manière générale, les écarts d’empreinte importée reflètent ici, à base d’émissions fixée, les différences dans la ventilation des importations françaises d’un TIES à l’autre. Par exemple, l’empreinte française importée des Etats-Unis et de la Chine est plus importante en utilisant Figaro, puisque les importations venant des Etats-Unis et de la Chine sont plus élevées que dans les autres TIES. Ceci explique aussi en partie que le profil de l’empreinte calculée à partir de Figaro s’écarte de ceux issus d’autres TIES. La Chine est le pays qui contribue le plus à l’empreinte carbone française : en moyenne sur les 4 TIES, sa part est de 12% en 2014 (72 sur 636 MtCO₂éq).

4.4 Décomposition par branches

De même que l’approche TIES permet de mesurer la contribution de chaque pays à l’empreinte de la France, elle permet de calculer la contribution de chaque branche d’activités à l’empreinte de la France (voir équation 2). Par exemple, la consommation française sollicite la branche du transport pour acheminer les biens de consommation jusqu’au consommateur mais également indirectement par les activités de transport tout au long de la chaîne de valeur des biens consommés en France, ce qui génère des émissions de GES à de multiples étapes. Nous reportons en Figure B.5 la décomposition de l’empreinte carbone importée, selon la branche émettrice. Il en ressort tout d’abord que les émissions sont générées principalement par cinq grandes branches d’activités (Agriculture, Cokéfaction et Raffinage, Industrie chimique et métallurgie, Industries extractives, Transport). Ensuite, les bases TIES sont proches dans les émissions qu’elles attribuent à ces branches, mis à part ICIO sur les industries extractives (DE). Les écarts entre empreintes se situent donc dans la répartition géographique des émissions et l’ampleur des émissions issues des industries extractives.

4.5 Décomposition de l’évolution

Ces différences entre TIES sur le calcul de l’empreinte évoluent d’une année à l’autre, sous l’effet de différents facteurs : croissance démographique, innovations technologiques, composition du panier de biens et services consommés. Pour séparer la contribution de chacun de ces facteurs à l’évolution de l’empreinte carbone, nous utilisons une méthode de décomposition structurelle (SDA, pour Structural Decomposition Analysis). Ce type de méthode permet de décomposer comptablement l’évolution d’une grandeur en fonction de l’évolution de ses composantes. Nous

nous inspirons de Dietzenbacher et al. (2020) pour l’appliquer au calcul de l’empreinte carbone. Nous séparons quatre facteurs : la croissance démographique, commune à toutes les bases ; l’intensité en GES, c’est-à-dire les coefficients d’émission ; la demande par habitant, c’est-à-dire le niveau de demande finale ; et enfin la réorganisation de la structure de production à l’échelle mondiale, que nous appelons “structure entrées-sorties”. Une explication détaillée est fournie en Annexe E. Les résultats sont présentés en Figure B.6. Les montants obtenus doivent être interprétés avec précaution : les TIES étant exprimés en valeur, la comparaison de montants entre deux années inclut l’inflation. Néanmoins, il reste possible de comparer les TIES entre eux, et des différences dans les contributions des facteurs apparaissent. Entre 2010 et 2014, d’un TIES à l’autre, les conclusions générales de cet exercice sont similaires. Tout d’abord, la croissance démographique contribue à augmenter l’empreinte carbone, et du même taux d’un TIES à l’autre. Ensuite, la baisse de l’intensité en GES de l’appareil productif qui concourt à servir la demande finale française a un poids plus fort selon les TIES Figaro et Wiod. Les changements de géographie de la production, reflétés par la structure entrées-sorties, ont une contribution à l’empreinte plus faible selon ICIO et Exiobase que Figaro et Wiod. La croissance de la demande par habitant a un effet plus fort selon Exiobase. Les deux facteurs de demande, la croissance démographique et la croissance de la richesse par habitant, ont eux poussé à augmenter les émissions de GES liées à la consommation. Ils reflètent les différences déjà soulignées en section 2. Par exemple, la contribution de la géographie des chaînes de valeurs mondiales est bien plus forte lorsque la SDA est menée à partir du TIES Figaro, dont les données de commerce international sont retravaillées et assez différentes de celles retenues par les autres TIES, tant en niveau que dans leur ventilation entre pays.

5 Variantes dans le calcul de l’empreinte carbone

Dans cette section, nous cherchons à mesurer les écarts de mesures d’empreinte carbone que peuvent induire un changement de méthode de calcul à partir de données TIES.

5.1 Branches et produits

Tout d’abord, nous avons jusqu’à présent utilisé des TIES et bases d’émissions sous format branches. Toutefois, certains sont aussi diffusés sous format produits. Un TIES au format branche comptabilise toute la production des entreprises dont l’activité principale est dans une branche donnée, tandis que le format produit répartit l’activité des entreprises selon ses différents produits. Ces deux formats diffèrent dans la mesure où certaines entreprises d’une branche d’activité peuvent produire des produits d’une autre branche. Quelles en sont les conséquences pour l’empreinte carbone ? La Figure B.7 présente l’évolution de l’empreinte française selon les quatre couples TIES-base d’émissions, selon que les bases sont en format produit ou branche. Le calcul est fait avec les versions branche et produit du TIES et de la base d’émissions d’Exiobase. Tout d’abord, il apparaît que les empreintes françaises calculées avec les données en branche×branche sont supérieures à celles calculées avec les données en produit×produit, alors qu’elles sont a priori censées mesurer la même chose¹⁶. Ensuite, à format d’émissions donné, passer d’un TIES en branches à un TIES en produits ne modifie que très légèrement l’empreinte, possiblement parce que le TES français de la comptabilité nationale en branche×branche est déjà très proche de celui en produit×produit ; l’empreinte ressort légèrement plus élevée avec le TIES produits, ce qui découle des écarts entre les TIES produits et branches : par exemple, l’agriculture (AZ) est beaucoup plus importante dans le TIES produits (voir Section F pour une comparaison). Enfin, à TIES donné, utiliser une base d’émissions en produit ou en branche génère un écart nettement plus élevé. Utiliser un TIES en branches avec des émissions en produits (ou vice-versa) constitue un calcul impropre. Notons que ces conclusions ne sont a priori pas généralisables à tous les pays.

5.2 Effets d’agrégation

Ensuite, nous évaluons les conséquences sur l’empreinte du regroupement de branches d’activités en branches plus larges (Lenzen, 2011, Steen-Olsen et al., 2014). Des explications sur la méthodologie et les figures sont en Annexe G. Certaines bases sont diffusées à un niveau plus détaillé que d’autres ; et le calcul avec une nomenclature peu détaillée est plus rapide (30 minutes contre 1 seconde entre Exiobase 163 et Exiobase au format A17 avec nos codes). Cependant, cette agrégation engendre un biais qui peut être élevé : pour les données d’Exiobase, la classification au niveau A10 fournit une empreinte de la France 10 à 15% plus élevée que la plus fine (163 branches) (voir Figure G.1). De plus, ces écarts ne sont pas stables au cours du temps : la tendance d’évolution de l’empreinte calculée depuis le niveau A10 diffère de celle calculée depuis le niveau à 163 branches. Le même biais émerge lorsque ce sont les zones géographiques qui sont agrégées. Dans le cas extrême où le monde n’est constitué que de la France et d’un reste du monde, l’empreinte de la France augmente de 17%. C’est un effet dû à ce que l’on agrège des entités économiques relativement hétérogènes (Stadler et al., 2014), et au fait que le TIES résultant est aveugle de la complexité du réseau de production. Des agrégations en dix zones

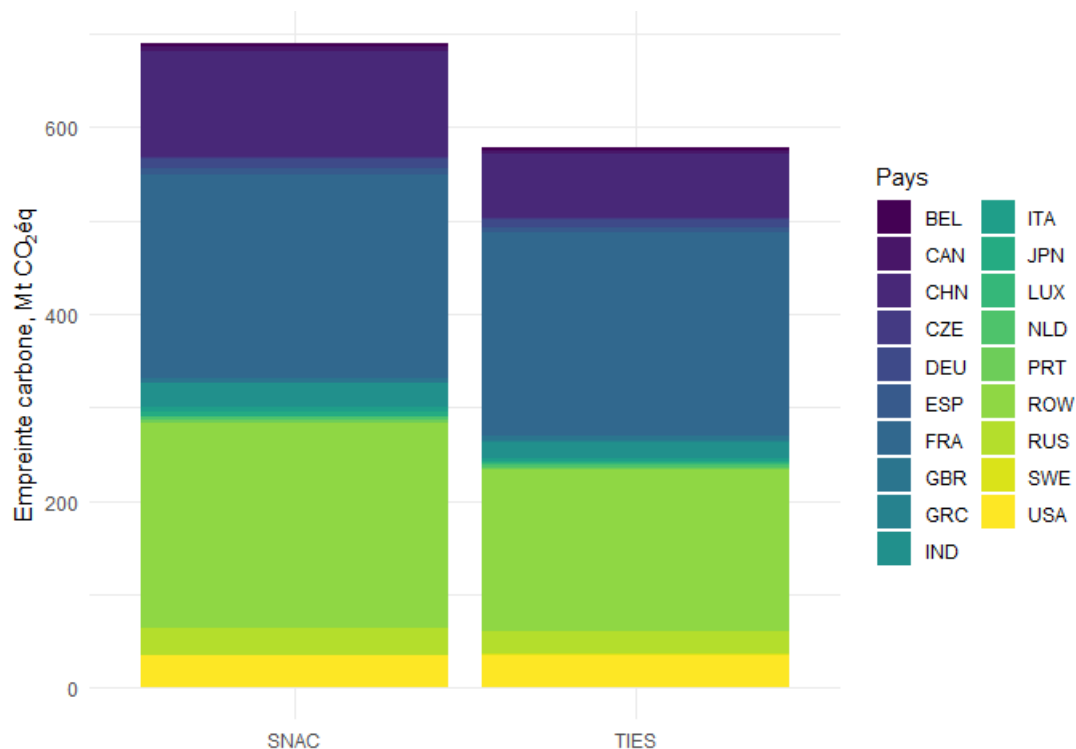
16. Comme le calcul d’empreinte carbone ventile les émissions mondiales de GES, si l’empreinte carbone ressort supérieure en branche×branche qu’en produit×produit pour la France, la relation est forcément inversée pour d’autres pays.

géographiques produisent des biais entre 2 et 5%, alors même que ces zones peuvent contenir des pays très différents (Figure G.4). Lorsque l'on agrège uniquement les pays qui ne sont pas les dix principaux partenaires commerciaux de la France, dont le poids dans l'empreinte française est faible, ce biais est réduit autour de +2% (Figure G.3). De même, l'agrégation de pays dans les zones géographiques utilisées par le SDES modifie l'empreinte jusqu'à 2%. Ceci nous amène à conclure qu'un TIES qui comprendrait les détails des principaux partenaires commerciaux de la France ou qui regrouperait les pays en zones économiquement homogènes suffirait à estimer convenablement l'empreinte carbone. Intégrer à ce TIES un nombre croissant de pays modifierait peu le résultat.

5.3 Approche SNAC

L'approche SNAC, introduite en section 1, vise à rapprocher données nationales et TIES. Nous avons implémenté la version proposée par Owen et al. (2014), qui ne nécessite pas d'information spécifique sur le pays au-delà des données du TIES et des données du TES national. Nous avons utilisé un algorithme de calage sur marges "MR-GRAS", issu de Temursho et al. (2021), qui est une extension de la technique RAS généralisée (GRAS) à un cadre multirégional (MR) (voir Annexe H). Nous l'appliquons au TIES Figaro pour la France. Il apparaît que la demande finale importée s'en retrouve largement modifiée. En particulier, l'importation de biens manufacturés augmente, surtout depuis la Chine et l'agrégat reste du monde. En conséquence, ce TIES fournit pour la France une empreinte carbone de près de 20% plus élevée qu'avant réconciliation, portée par les émissions originaires de Chine et du reste du monde (Figure 9). De plus, une partie de ces 20% peuvent toutefois venir du fait que notre algorithme SNAC ne corrige pas de certaines étapes intermédiaires entre le TES symétrique et le TIES : la ventilation de la correction territoriale, et la valorisation CAF/FAB des imports/exports.¹⁷

17. Depuis la rédaction de ce document de travail, une version mise à jour du TIES Figaro a été publiée. Une partie de ces 20% d'écart pourrait être résorbée suite à cette révision. Nous travaillons actuellement à appliquer la méthode SNAC simplifiée à la nouvelle version de Figaro, ainsi que d'autres versions de l'approche SNAC.



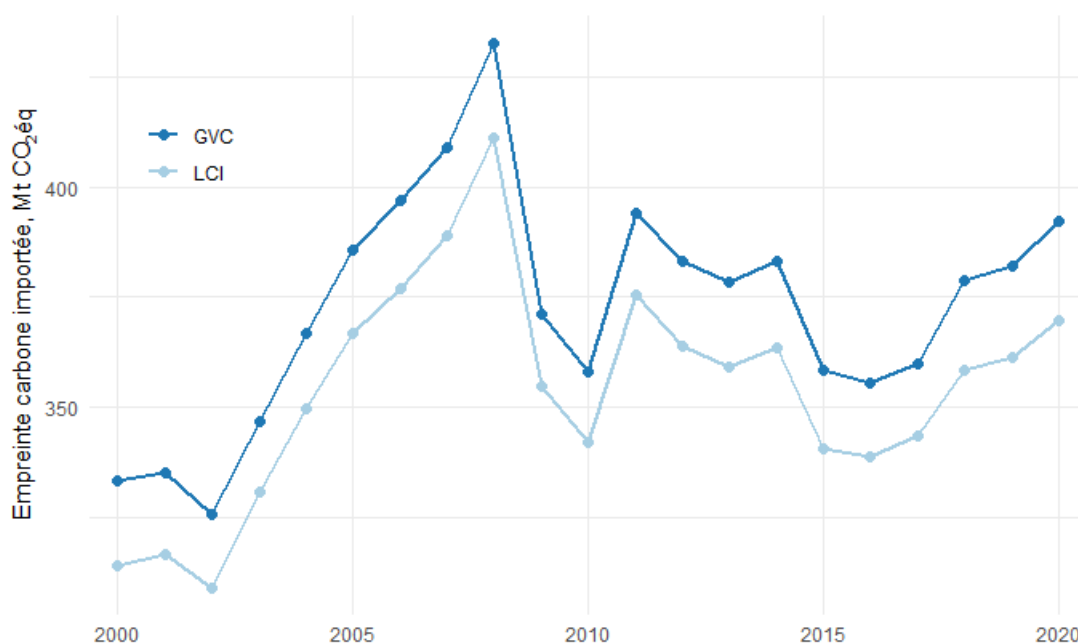
GRAPHIQUE 9 – Empreinte carbone SNAC et TIES initial

Note : Cette figure présente les empreintes carbone calculées pour l'année 2017 avec le TIES Figaro2 en branches (à gauche) et modifié par l'approche SNAC (à droite), ventilées par pays d'origine des émissions.

5.4 Approche du dernier pays d'importation

Enfin, nous implémentons la méthode du dernier pays d'importation (LCI) décrite en Section 1. Pour un même couple TIES – base émissions, nous calculons l'empreinte carbone de la France en approche GVC et LCI. La Figure 10 présente la partie importée de l'empreinte carbone sur plusieurs années successives. Cette comparaison montre que l'approche LCI conduit à sous-estimer l'empreinte carbone importée de la France de 5% en moyenne. L'écart entre les deux approches reste assez stable au cours du temps, entre 15 et 20MtCO₂eq. Cet écart peut être bien plus important lorsque l'on ventile l'empreinte par pays d'origine des émissions. Les émissions importées depuis les pays avec lesquels la France commerce peu mais qui exportent beaucoup vers les partenaires économiques directs de la France sont mécaniquement plus élevées dans l'approche GVC. Par exemple, le Canada et le Mexique (qui fournissent les Etats-Unis), mais aussi le Brésil et la Russie (Figure B.8).

GRAPHIQUE 10 – Empreinte carbone importée en GVC ou LCI



Note : Cette figure présente l’empreinte carbone importée de la France calculée avec le TIES et la base d’émissions d’Exiobase selon l’approche GVC (TIES complet) ou l’approche LCI (voir Section 1).

6 Robustesse du calcul d’empreinte : une méthode de bootstrap

La Section 4 a fait ressortir les différences relatives entre empreintes calculées avec différents TIES. Cependant, il est difficile de dire lequel parmi eux aboutit à l’empreinte la plus proche de la réalité. Nous savons à présent que les différents retraitements pour construire un TIES peuvent conduire à des structures économiques variées, et que celles-ci influenceront sur le calcul de l’empreinte. Les écarts à la réalité émergent à plusieurs niveaux. Tout d’abord, les mesures de production, de consommations intermédiaires, de demande finale et d’émissions sont sujettes à des erreurs de mesure. Ensuite, la manière même de classer les activités économiques et les zones géographiques peut biaiser les mesures, de la même manière que l’agrégation (Section 5). Enfin, chaque méthode de retraitement de ces données sources pour former un tout cohérent mène à un TIES qui peut s’écarter de la réalité. Même avec une collection de TIES issus de données identiques et avec la même couverture géographique et d’activités, on aboutit à autant d’empreintes différentes. Dans cette partie, nous proposons une méthode pour évaluer l’incertitude autour de l’empreinte carbone qui émerge des erreurs de mesure et de ces retraitements.

Pour prendre en compte l’incertitude autour de la qualité des données, Moran and Wood (2014) ont développé une méthode d’analyse par rééchantillonnage, qui est un bootstrap paramétrique (méthode de Monte Carlo). Les méthodes de Monte Carlo sont courantes dans l’analyse de sensibilité de l’empreinte carbone à la qualité des données sources. Par exemple, Lenzen et al. (2010) estiment avec une probabilité de 89% que l’empreinte carbone du Royaume-Uni a bien augmenté entre 1994 et 2004.

Pour prendre en compte la pluralité des TIES disponibles, nous avons développé une nouvelle méthode de bootstrap. Elle est non-paramétrique, et consiste à construire une empreinte carbone qui prend en compte l'information disponible dans l'ensemble des TIES. Cette méthode permet d'évaluer la robustesse des évaluations réalisées pour un TIES donné et de juger si ces dernières sont en accord avec l'ensemble des autres TIES. Ces deux méthodes de bootstrap reposent sur des hypothèses théoriques d'indépendance. Nous suivons les recommandations de la littérature et considérons ces hypothèses respectées ; nous les discutons en détail en Annexe I.

Enfin, ces deux sources d'incertitudes, autour de la qualité des données et en lien avec la pluralité des TIES disponibles, influent l'une sur l'autre. Pour les étudier conjointement, nous avons implémenté une méthode qui hybride les deux précédentes. Ces effets combinés correspondent à une prise en compte élargie des facteurs d'incertitude.

De ces trois méthodes, nous obtenons une distribution d'empreintes carbone à partir desquelles il est possible de construire des intervalles de confiance, non seulement pour l'empreinte totale mais également pour l'empreinte importée par pays ou branche d'origine des émissions. Placer le résultat d'empreinte d'un seul TIES dans ces intervalles permet de positionner les résultats de ce TIES par rapport aux résultats des autres, et fournit donc une forme d'indicateur de confiance pour chaque TIES relativement au "consensus des TIES" sélectionnés.

Le principe de simulation en bootstrap utilisé ici consiste à répéter un grand nombre de fois les deux étapes suivantes : construire fictivement un TIES à partir d'un ensemble de TIES, puis calculer une empreinte carbone à partir de ce TIES fictif et d'une base d'émissions fixée (Exiobase 3). Nous avons réalisé un bootstrap de 10.000 itérations sur un ensemble de quatre TIES composé de Figaro 2, Wiod 2016, ICIO 2021, Exiobase 3, tous en version branches. Les données pour l'année 2014 ont été agrégées au format A17 (17 branches) afin d'être cylindrées. Le plus petit dénominateur en termes de pays permet de retenir 42 pays. Les autres pays disponibles dans chaque base ont été agrégés au sein d'un reste du monde.

6.1 Méthode (1) : bootstrap non-paramétrique inter-TIES

Méthode Cette première méthode utilise l'information contenue dans tous les TIES disponibles pour le calcul de l'empreinte. La procédure est la suivante :

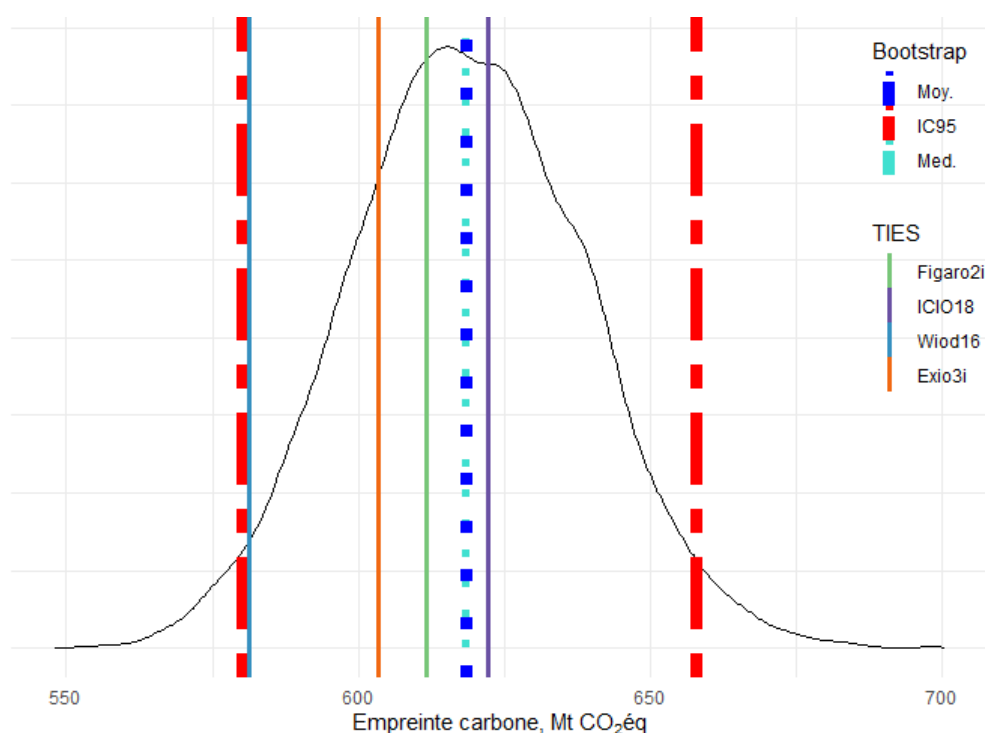
1. Sélectionner une collection de TIES cylindrés
2. Construire un TIES fictif qui prend pour chaque case des consommations intermédiaires et de la demande finale une valeur choisie de façon aléatoire parmi les TIES sélectionnés (pour cette même case). La production est recalée mécaniquement par équilibre comptable
3. Calculer l'empreinte avec ce TIES construit
4. Répéter 10.000 fois

On dispose ainsi d'un grand nombre de calculs d'empreintes dont on peut analyser la distribution. On peut ainsi juger du positionnement des résultats de chaque TIES par rapport à la moyenne et la médiane du consensus formé par l'ensemble des TIES sélectionnés (Moran and Wood, 2014). Notons que le choix aurait pu être fait de faire varier aussi la base d'émissions ; une autre variante du bootstrap pourrait aussi être de ne faire varier que les bases d'émissions pour un TIES donné. On note toutefois un paramètre important à prendre en compte : la procédure de bootstrap s'appuie sur un certain nombre de TIES sans pondération particulière relative à une éventuelle "qualité" des TIES. Chaque TIES pèse donc de manière équivalente sur les moyennes

et les intervalles de confiance calculés. Les résultats peuvent ainsi varier lorsque l'on enlève par exemple un TIES à l'analyse.

Résultats La figure 11 présente la distribution des empreintes simulées pour la France, en positionnant les bornes de l'intervalle de confiance "inter-TIES" à 95 %, ainsi que le positionnement de chaque TIES par rapport à celui-ci. En 2014, l'empreinte de la France se situe autour de 620MtCO₂eq en moyenne, entre 580 et 660MtCO₂eq à 95%. En moyenne sur tous les pays présents dans la base, Exiobase et ICIO sont les TIES qui s'approchent le plus du consensus formé par les quatre TIES considérés. Wiod est situé à la limite de l'intervalle de confiance à 95%. Cela peut être dû à la présence de quelques cases du TIES Wiod qui sont "extrêmes" : chaque case du TIES simulé est tirée de Wiod avec probabilité 1/4, et deux cases données de Wiod sont tirées avec probabilité 1/16 = 6,25%. La présence de deux coefficients extrêmes pourrait provenir d'un transfert entre deux cases : par exemple, les deux se compensent dans le total de la production mais une partie de la production de l'une a été attribuée à l'autre. Par ailleurs, cela ne remet pas nécessairement en cause Wiod pour le calcul d'empreinte ; le tableau L.1 présente ces résultats pour l'ensemble des pays et Wiod se trouve en moyenne éloigné de la borne inférieure de l'intervalle de confiance. Ce tableau permet d'identifier que, relativement à la moyenne des 10.000 simulations, l'intervalle de confiance (IC) à 95 % pour la France est de 12 %. L'IC de l'Allemagne est lui aussi de 12 %, celui de la Chine ou encore de la Grande-Bretagne est de 10 % et celui des Etats-Unis de seulement 6 %. L'IC de plus petits pays est en général plus étalé, par exemple il est de 23 % pour la Belgique, de 32 % pour l'Irlande, ou au maximum de 64 % pour le Luxembourg. L'intervalle de confiance issu de la méthode de bootstrap est de 19% en moyenne.

GRAPHIQUE 11 – Bootstrap (1) : Distribution de l'empreinte carbone de la France



Note : Cette figure présente la distribution des résultats de calculs d'empreinte de la France réalisés sur 10.000 tirages de l'algorithme de bootstrap inter-TIES. Base d'émissions d'Exiobase, 2014.

Si l'on s'intéresse plus précisément à l'empreinte de la France, il est utile de distinguer l'empreinte intérieure de l'empreinte importée, et même au-delà d'identifier cette empreinte importée par pays de provenance. Les méthodes de bootstrap employées permettent d'identifier les incertitudes affectant ces indicateurs. La Figure I.1 en Annexe présente la distribution inter-TIES de l'empreinte intérieure, dont on remarque notamment que Figaro est très proche de la moyenne inter-TIES (donc du consensus des TIES). On remarque notamment que les données intérieures des TES symétriques utilisées par Eurostat pour construire Figaro sont très peu modifiées, et que la plupart des ajustements portent plutôt sur les importations. L'intervalle de confiance autour des émissions intérieures est estimé par cette méthode à 5 %, et celui autour des émissions importées de la France est estimé à 9 %. Si l'on détaille les émissions importées de la France par pays de provenance, on observe une dispersion assez forte selon le pays, avec par exemple un intervalle de confiance dont les bornes sont situés à 21 % de la moyenne pour l'Espagne, 21 % pour l'Allemagne et la Chine, et 25 % pour les Etats-Unis (voir Table I.2).

La méthode de calcul de l'empreinte carbone permet, outre l'identification des pays de provenance, de déterminer aussi la ventilation par branche d'émission, que celle-ci soit intérieure ou importée. L'identification des émissions par branche est relativement précise pour les émissions intérieures de la France, avec des intervalles de confiance généralement autour de 10 %, sauf pour les produits C5 et DE pour lesquelles l'intervalle de confiance dépasse les 50 % (voir Figure I.2 et Table I.3). Les intervalles de confiances sont beaucoup plus importants concernant les émissions importées, dépassant tous les 30 % et allant jusqu'à presque 100 %. On mesure à ce niveau la fragilité des informations par branches importées (détail Table I.4).

Enfin, nous séparons l'incertitude sur la demande finale de celle sur les consommations intermédiaires. Pour cela, nous appliquons la méthode non-paramétrique en ne faisant varier que la demande finale ou les consommations intermédiaires. La séparation des composantes du calcul est notamment décrite dans Percoco et al. (2006).¹⁸ Il apparaît que la demande finale contribue en général plus aux incertitudes sur le calcul de l'empreinte que les consommations intermédiaires (Figure I.3, Table I.5). Ce diagnostic rejoint les observations faites sur le rôle important de la demande finale dans le calcul d'empreinte (Section 2).

6.2 Méthode (2) : bootstrap paramétrique

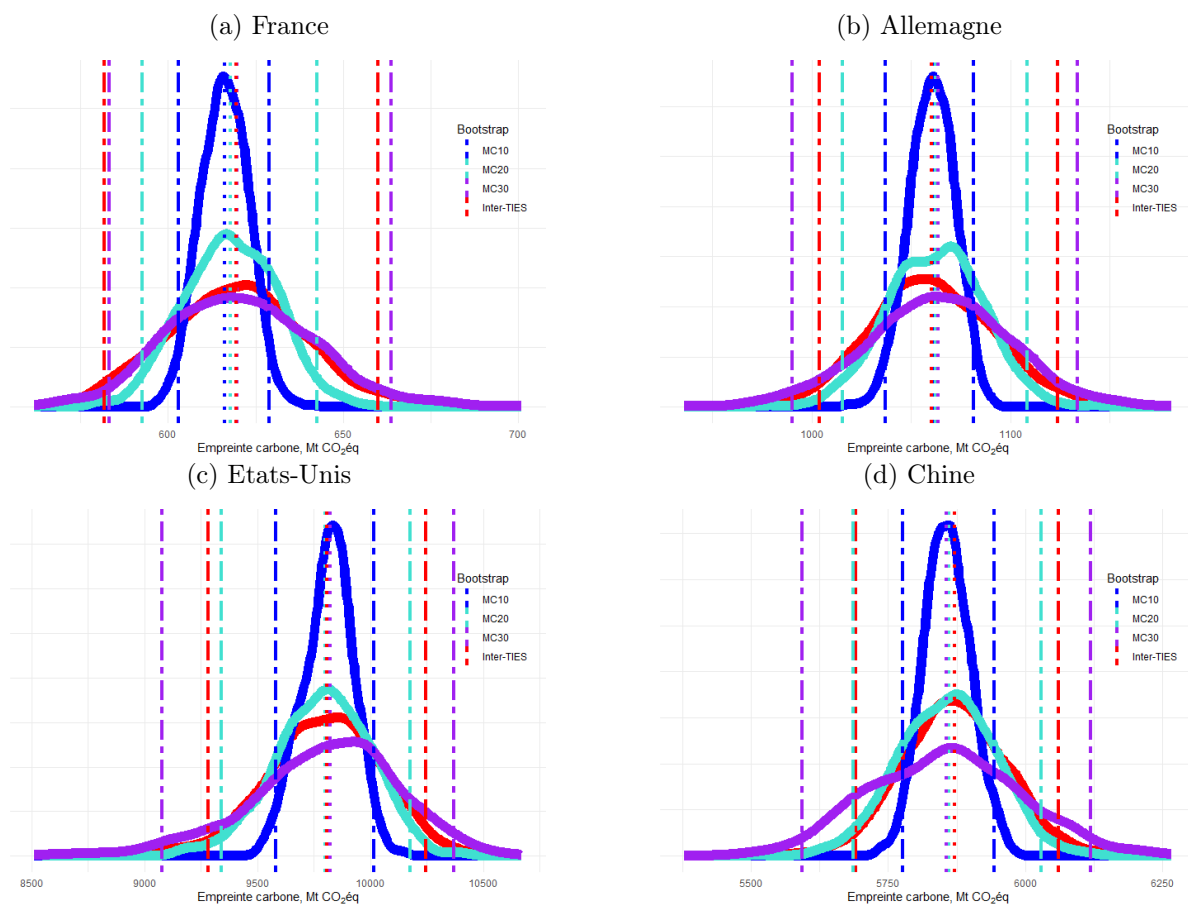
Méthode Moran and Wood (2014) développent une méthode pour estimer l'incertitude liée à la qualité des données sources. Elle consiste à perturber les coefficients du TIES par un facteur multiplicatif, qui est tiré aléatoirement dans une loi normale de variance donnée. Nous reproduisons ici cet exercice à partir du TIES moyen : chaque case de consommation intermédiaire et de demande finale est la moyenne des quatre valeurs correspondantes des TIES. Nous multiplions chaque case de ce TIES par un coefficient différent, tiré dans une gaussienne, de moyenne 1 et d'écart-type de 10 %, 20 %, ou 30 %. La production est ajustée mécaniquement par équilibre comptable. Nous répétons cette procédure 10.000 fois. Cela donne un intervalle de confiance lié à l'incertitude sur les données.

Résultats La Figure 12 présente les distributions des 10.000 empreintes carbone qui résultent de ce bootstrap pour les empreintes totales de la France, de l'Allemagne, des Etats-Unis et de la Chine. On y ajoute les intervalles issus de la méthode (1). Il apparaît que dans la majorité

18. Cette méthode aurait aussi pu être réalisée avec un bootstrap paramétrique de type Monte-Carlo. Nos résultats sur la méthode hybride (voir 6.3) nous incitent à nous concentrer sur la méthode non-paramétrique.

des cas les intervalles de confiance inter-TIES sont compris entre les bornes des intervalles de confiance de Monte-Carlo à 20 % et à 30 %. La littérature sur le sujet (Moran and Wood, 2014) estime que l'incertitude autour des données sourcées peut être répliquée par des perturbations de l'ordre de 10%. Ainsi, il apparaît que cette incertitude sur la donnée source entraîne moins de variabilité dans l'empreinte carbone que celle résultant de la variabilité d'un TIES à l'autre. Le tableau détaillant ces intervalles de confiance pour davantage de pays est présent en Annexe I (Tableau I.6). Il confirme que les écarts inter-TIES sont dans la majorité des cas plus importants que l'incertitude liée aux données sources.

GRAPHIQUE 12 – Bootstrap (2) par pays



Note : Ces graphes présentent les distributions des résultats de calcul d'empreinte carbone pour la France, l'Allemagne, les Etats-Unis et la Chine après 10.000 tirages selon l'algorithme de bootstrap paramétrique. Les lignes en pointillés verticales correspondent aux bornes des intervalles de confiance à 95 % des bootstraps représentés de la même couleur. TIES moyen, base d'émissions d'Exiobase, 2014.

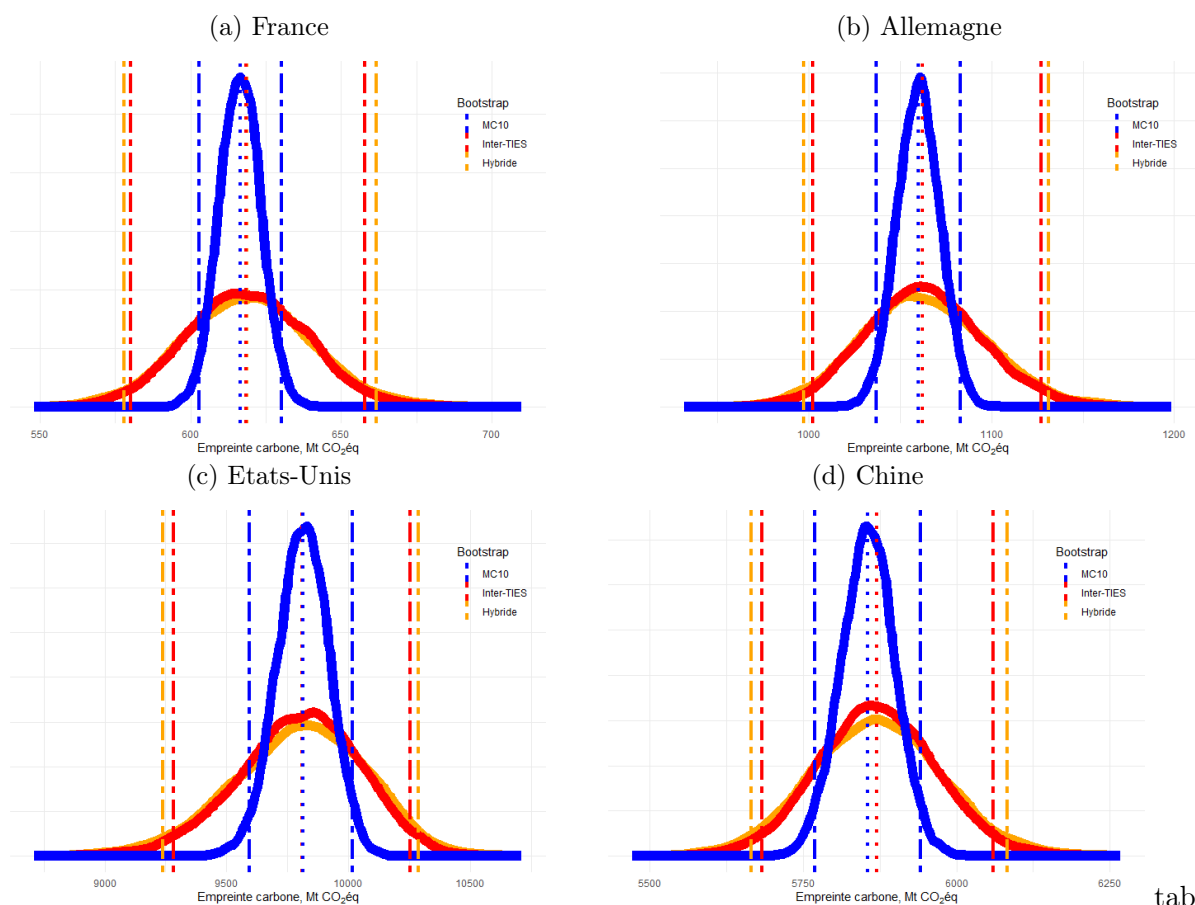
6.3 Méthode (3) : bootstrap hybride

Méthode Nous avons conduit l'analyse de bootstrap paramétrique à partir d'une moyenne des TIES. Cependant, la grande variabilité des empreintes d'un TIES à l'autre a été établie par la première méthode de bootstrap. Pour tenir compte de ces deux sources d'incertitude, nous avons implémenté une méthode hybride. A chaque tirage, on sélectionne pour chaque case du TIES une case aléatoire parmi celles correspondantes dans les 4 TIES, qui est dans un second temps perturbée par un facteur multiplicatif paramétrique tiré dans une loi gaussienne (d'écart-type

de 10 %). Ces deux étapes correspondent à celles qui ont été présentées précédemment, mais se retrouvent combinées ici.

Résultats Les résultats présentés en Figure 13 sur l’empreinte totale de plusieurs pays mettent en évidence que ce bootstrap hybride n’est pas fondamentalement différent du bootstrap inter-TIES : les intervalles de confiance sont légèrement supérieurs mais restent très proches. Ceci est confirmé sur un échantillon comprenant davantage de pays (Tableau I.7). Cela peut s’expliquer par le fait que les tirages de Monte-Carlo sont par nature très centrés, donc sur un grand nombre de simulations (10.000 réalisées ici) le second tirage paramétrique tend à se centrer sur le premier tirage inter-TIES. Le léger étalement supplémentaire de la méthode hybride confirme que le bootstrap hybride ajoute de l’incertitude par rapport au seul bootstrap inter-TIES. Ces résultats semblent établir que ce n’est pas l’incertitude liée aux données sources qui a le plus grand impact sur l’empreinte carbone, mais plutôt la variabilité entre TIES. Ainsi, nous préférons la méthode de bootstrap inter-TIES pour évaluer l’incertitude autour d’un calcul d’empreinte carbone.

GRAPHIQUE 13 – Bootstrap (3) par pays



Note : Ces graphes présentent les distributions des résultats de calcul d’empreinte carbone pour la France, l’Allemagne, les Etats-Unis et la Chine après 10.000 tirages selon les trois méthodes de bootstrap. Les lignes en pointillés verticales correspondent aux bornes des intervalles de confiance à 95 % des bootstraps représentés de la même couleur. Voir Tableau I.7.

Conclusion

La lutte contre le dérèglement climatique passe par une mesure fiable de l'impact environnemental anthropique. Quantifier l'empreinte carbone d'un pays est ainsi crucial pour mener les politiques climatiques adaptées à cet objectif. Face au nombre de possibilités quant à sa méthode de calcul et aux données mobilisables, nous comparons la fiabilité, la représentativité et les biais des différents TIES et bases d'émissions. Pour pérenniser le calcul de l'empreinte carbone, il apparaît nécessaire de se fonder sur des données publiques, transparentes dans leur construction, et dont la production est régulière. Le choix d'un TIES et d'une base d'émissions se fait également au regard de la cohérence de ses composantes avec les autres TIES et les données nationales. Pour calculer l'empreinte carbone de la France, nous préconisons l'utilisation du TIES Figaro (produit par Eurostat), couplé à la base d'émissions Exiobase 3. Nous montrons que l'empreinte carbone calculée avec un TIES qui comprendrait les détails des principaux partenaires commerciaux de la France ou qui regrouperait les pays en zones économiquement homogènes suffirait à estimer convenablement l'empreinte carbone. En revanche, agréger les branches d'activités en grands secteurs d'activité peut conduire à modifier l'empreinte de 15%. L'incertitude sur le calcul de l'empreinte qui provient des différences de méthodes entre TIES est plus forte que celle issue des données sources, au sein d'un TIES.

Références

- Baude, Manuel, Aurore Colin, Clara Calipel, Jérôme Duvernoy, and Alexis Fousard**, “Chiffres clés du climat, Édition 2022,” Technical Report, Ministère de la Transition Écologique 2022.
- Bourgeois, Alexandre and Antonin Briand**, “Le modèle Avionic : la modélisation input/output des comptes nationaux,” Technical Report, Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques 2019.
- Brown, N., M. Berglund, M. Bivered, M. Gray, and S. Nakamura**, “Producing environmental accounts with environmentally extended input output analysis — 2021 edition,” in “Statistical working papers,” Eurostat, 2021.
- Bullard, C.W. and A.V. Sebald**, “Monte Carlo Sensitivity Analysis of Input-Output Models,” *The Review of Economics and Statistics*, 1988, p. 708–712.
- Citepa**, “Rapport national d’inventaire / Format Secten, juillet 2021,” Technical Report, Citepa 2021.
- Dawkins, Elena, Daniel Moran, Viveka Palm, Richard Wood, and Ida Björk**, “The Swedish footprint : A multi-model comparison,” *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209, 1578–1592.
- Dietzenbacher, Erik and Bart Los**, “Structural decomposition techniques : sense and sensitivity,” *Economic Systems Research*, 1998, 10 (4), 307–324.
- , **Viktoras Kulionis, and Filippo Capurro**, “Measuring the effects of energy transition : A structural decomposition analysis of the change in renewable energy use between 2000 and 2014,” *Applied Energy*, 2020, 258, 114040.

- Edens, Bram, Rutger Hoekstra, Daan Zult, Oscar Lemmers, Harry Wilting, and Ronghao Wu**, “A method to create carbon footprint estimates consistent with national accounts,” *Economic Systems Research*, 2015, 27 (4), 440–457.
- Günlük-Şenesen, G and John M Bates**, “Some experiments with methods of adjusting unbalanced data matrices,” *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 1988, 151 (3), 473–490.
- Hambÿe, Caroline, Bart Hertveldt, and Bernhard Michel**, “Does consistency with detailed national data matter for calculating carbon footprints with global multi-regional input–output tables? A comparative analysis for Belgium based on a structural decomposition,” *Journal of Economic Structures*, 2018, 7 (1), 1–22.
- IEA**, “CO2 Emissions from Fuel Combustion,” 2015.
- IPCC**, “Emissions Trends and Drivers,” in “Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022.
- Johnson, Robert C**, “Trade in intermediate inputs and business cycle comovement,” *American Economic Journal : Macroeconomics*, 2014, 6 (4), 39–83.
- Junius, Theo and Jan Oosterhaven**, “The solution of updating or regionalizing a matrix with both positive and negative entries,” *Economic Systems Research*, 2003, 15 (1), 87–96.
- Lenzen, Manfred**, “Aggregation versus disaggregation in input–output analysis of the environment,” *Economic Systems Research*, 2011, 23 (1), 73–89.
- , **Daniel Moran, Keiichiro Kanemoto, and Arne Geschke**, “Building Eora : a global multi-region input–output database at high country and sector resolution,” *Economic Systems Research*, 2013, 25 (1), 20–49.
- , **Keiichiro Kanemoto, Daniel Moran, and Arne Geschke**, “Mapping the structure of the world economy,” *Environmental science & technology*, 2012, 46 (15), 8374–8381.
- , **Richard Wood, and Blanca Gallego**, “Some comments on the GRAS method,” *Economic systems research*, 2007, 19 (4), 461–465.
- , – , and **Thomas Wiedmann**, “Uncertainty analysis for multi-region input–output models— a case study of the UK’s carbon footprint,” *Economic Systems Research*, 2010, 22 (1), 43–63.
- Moran, Daniel and Richard Wood**, “Convergence between the Eora, WIOD, EXIOBASE, and OpenEU’s consumption-based carbon accounts,” *Economic Systems Research*, 2014, 26 (3), 245–261.
- OECD**, “OECD Inter-Country Input-Output Database,” 2021.
- Owen, Anne**, *Techniques for Evaluating the Differences in Multiregional Input-Output Databases*, Springer, 2017.
- , **Kjartan Steen-Olsen, John Barrett, Thomas Wiedmann, and Manfred Lenzen**, “A structural decomposition approach to comparing MRIO databases,” *Economic Systems Research*, 2014, 26 (3), 262–283.

- , **Richard Wood, John Barrett, and Andrew Evans**, “Explaining value chain differences in MRIO databases through structural path decomposition,” *Economic Systems Research*, 2016, 28 (2), 243–272.
- Palm, Viveka, Richard Wood, Mårten Berglund, Elena Dawkins, Göran Finnveden, Sarah Schmidt, and Nancy Steinbach**, “Environmental pressures from Swedish consumption—A hybrid multi-regional input-output approach,” *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228, 634–644.
- Percoco, Marco, Geoffrey JD Hewings, and Lanfranco Senn**, “Structural change decomposition through a global sensitivity analysis of input–output models,” *Economic Systems Research*, 2006, 18 (2), 115–131.
- Quandt, Richard E**, “Probabilistic errors in the Leontief system,” *Naval Research Logistics Quarterly*, 1958, 5 (2), 155–170.
- Rémond-Tiedrez, Isabelle and JM Rueda-Cantuche**, *Full international and global accounts for research in input-output analysis (FIGARO)*, Eurostat, 2019.
- Serrano, Mònicaa and Erikb Dietzenbacher**, “Responsibility and trade emission balances : two approaches for the same concept,” in “International Input Output Meeting on Managing the Environment” 2008.
- Stadler, Konstantin, Kjartan Steen-Olsen, and Richard Wood**, “The ‘rest of the world’—estimating the economic structure of missing regions in global multi-regional input–output tables,” *Economic Systems Research*, 2014, 26 (3), 303–326.
- , **Richard Wood, Tatyana Bulavskaya, Carl-Johan Södersten, Moana Simas, Sarah Schmidt, Arkaitz Usubiaga, José Acosta-Fernández, Jeroen Kuenen, Martin Bruckner et al.**, “EXIOBASE 3 : Developing a time series of detailed environmentally extended multi-regional input-output tables,” *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22 (3), 502–515.
- Steen-Olsen, Kjartan, Anne Owen, Edgar G Hertwich, and Manfred Lenzen**, “Effects of sector aggregation on CO2 multipliers in multiregional input–output analyses,” *Economic Systems Research*, 2014, 26 (3), 284–302.
- Temursho, Umed, Jan Oosterhaven, and M Alejandro Cardenete**, “A multi-regional generalized RAS updating technique,” *Spatial Economic Analysis*, 2021, 16 (3), 271–286.
- Timmer, Marcel P, Erik Dietzenbacher, Bart Los, Robert Stehrer, and Gaaitzen J De Vries**, “An illustrated user guide to the world input–output database : the case of global automotive production,” *Review of International Economics*, 2015, 23 (3), 575–605.
- Tukker, Arnold, Arjan de Koning, Anne Owen, Stephan Lutter, Martin Bruckner, Stefan Giljum, Konstantin Stadler, Richard Wood, and Rutger Hoekstra**, “Towards robust, authoritative assessments of environmental impacts embodied in trade : Current state and recommendations,” *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22 (3), 585–598.
- , **Richard Wood, and Sarah Schmidt**, “Towards accepted procedures for calculating international consumption-based carbon accounts,” *Climate Policy*, 2020, 20 (sup1), S90–S106.

- Usubiaga, Arkaitz and José Acosta-Fernández**, “Carbon emission accounting in MRIO models : The territory vs. the residence principle,” *Economic Systems Research*, 2015, 27 (4), 458–477.
- West, G**, “A Stochastic Analysis of an Input-Output Model,” *Econometrica*, 1986, 54 (2), 363–374.
- World Bank**, *World development report 2020 : Trading for development in the age of global value chains*, The World Bank, 2019.
- Yamano, Norihiko and Joaquim Guilhoto**, “CO2 emissions embodied in international trade and domestic final demand,” 2020.

Annexes

A Tableaux supplémentaires

TABLEAU A.1 – Intitulés de la nomenclature d'activité A17

AZ	Agriculture, sylviculture et pêche
DE	Industries extractives, énergie, eau, gestion des déchets et dépollution
C1	Fabrication de denrées alimentaires, de boissons et de produits à base de tabac
C2	Cokéfaction et raffinage
C3	Fabrication d'équipements électriques, électroniques, informatiques ; fabrication de machines
C4	Fabrication de matériels de transport
C5	Fabrication d'autres produits industriels
FZ	Construction
GZ	Commerce ; réparation d'automobiles et de motocycles
HZ	Transports et entreposage
IZ	Hébergement et restauration
JZ	Information et communication
KZ	Activités financières et d'assurance
LZ	Activités immobilières
MN	Activités scientifiques et techniques ; services administratifs et de soutien
OQ	Administration publique, enseignement, santé humaine et action sociale
RU	Autres activités de services

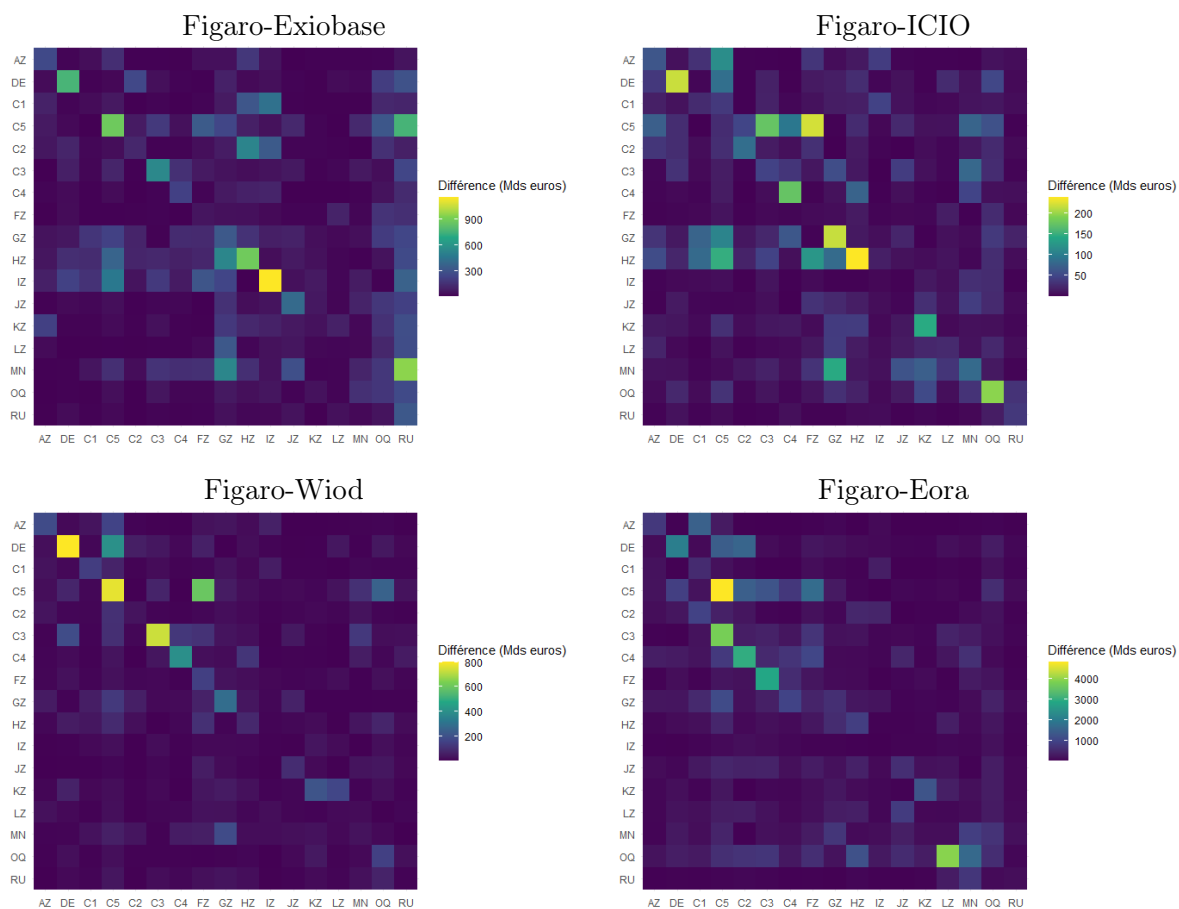
TABLEAU A.2 – Codes pays

BEL	Belgique
CAN	Canada
CHN	Chine
DEU	Allemagne
ESP	Espagne
FRA	France
GBR	Royaume-Uni
GRC	Grèce
IND	Inde
ITA	Italie
JPN	Japon
LUX	Luxembourg
NLD	Pays-Bas
POL	Pologne
PRT	Portugal
ROW	Reste du monde
RUS	Russie
SWE	Suède
USA	Etats-Unis

Note : Nomenclature ISO3.

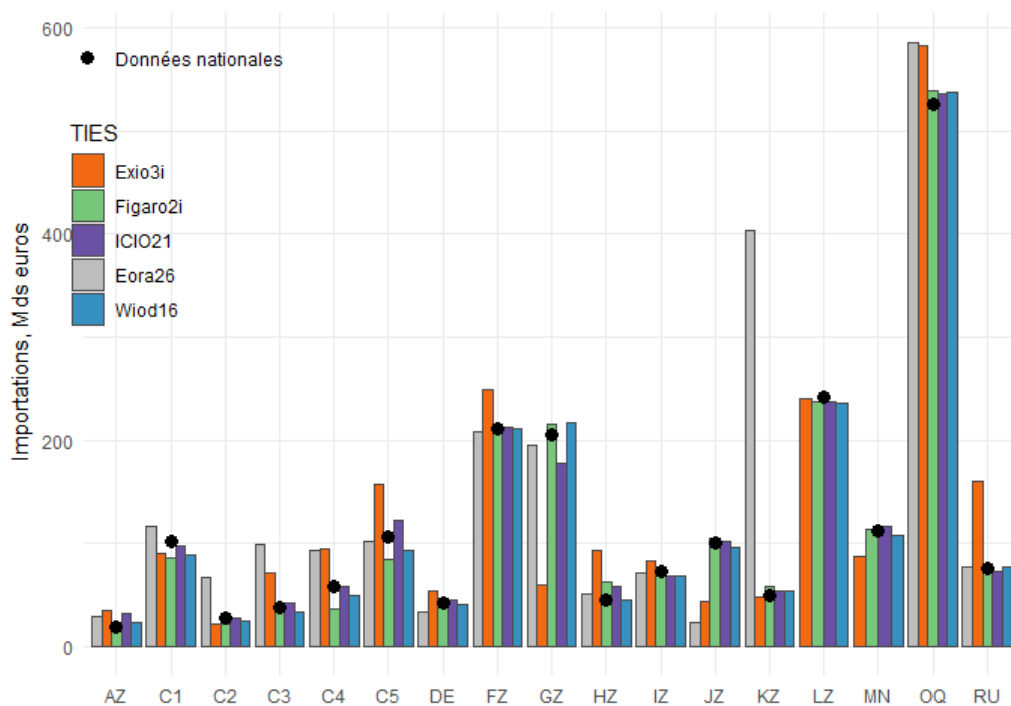
B Figures supplémentaires

GRAPHIQUE B.1 – Structure par branche du TEI : comparaison entre deux TIES



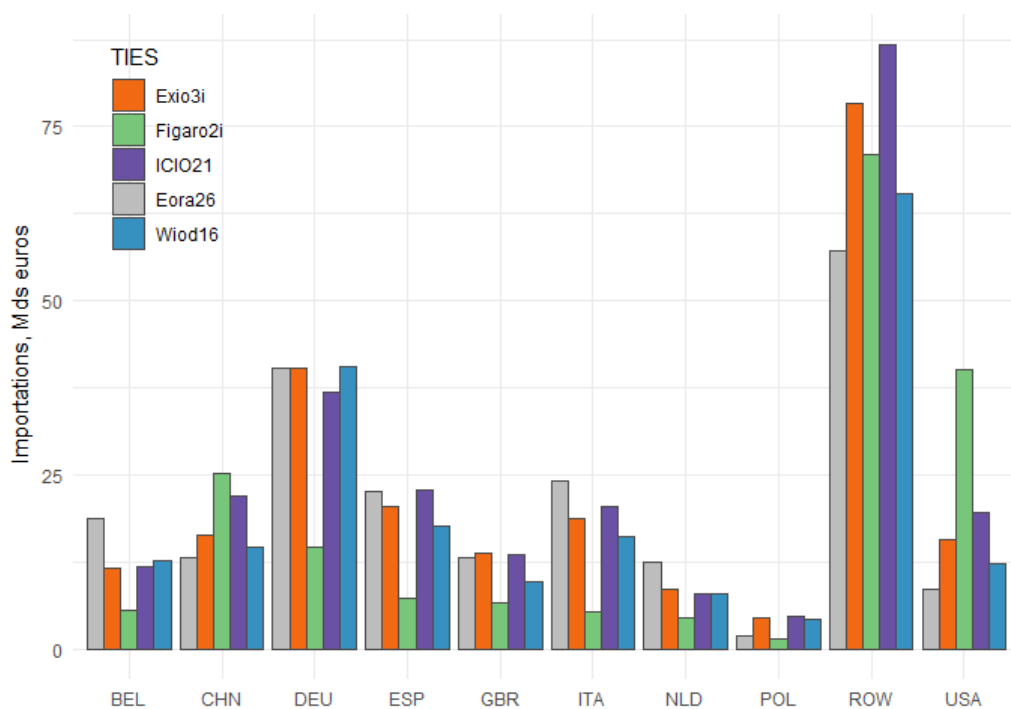
Note : Cette figure présente la différence entre une cellule du TEI issu de Figaro et du TEI issu d'un des quatre autres TIES. Un montant positif signifie que la cellule Figaro est plus grande. Le TEI est le TEI mondial. Nomenclature A17, données de 2014.

GRAPHIQUE B.2 – Demandes finales par branche selon le TIES



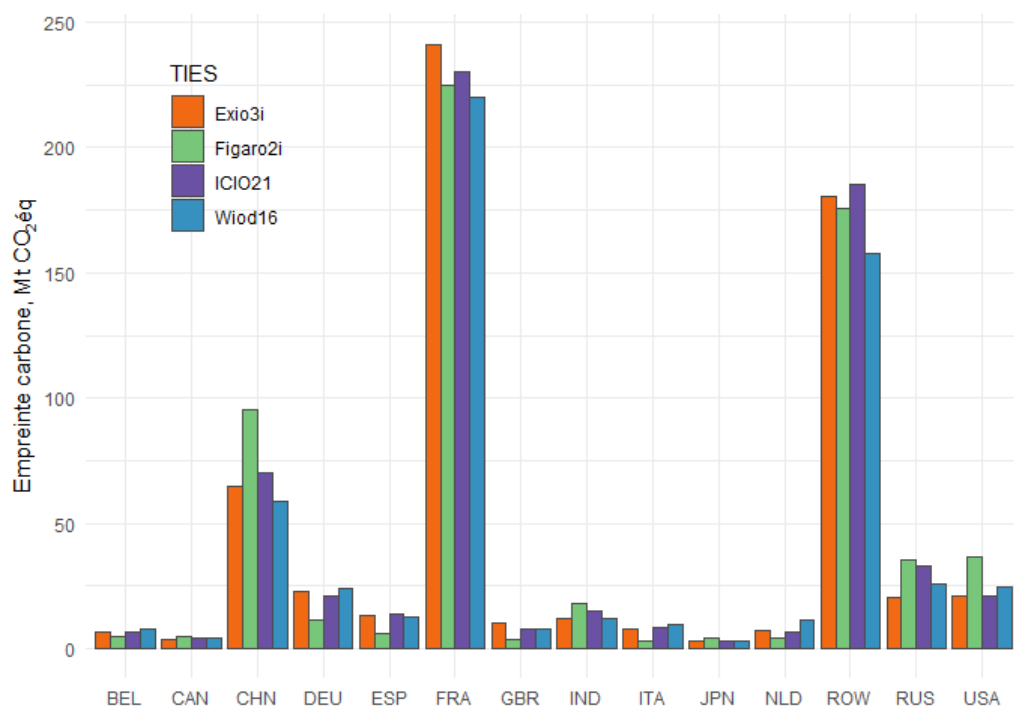
Note : Cette figure présente le montant de demande finale par branche en milliards d'euros courants pour la France selon le TIES. Les points noirs correspondent aux données nationales, telles qu'elles apparaissent dans le TES symétrique de l'Insee. Nomenclature A17, données de 2014.

GRAPHIQUE B.3 – Demandes finales importées par pays d'origine selon le TIES



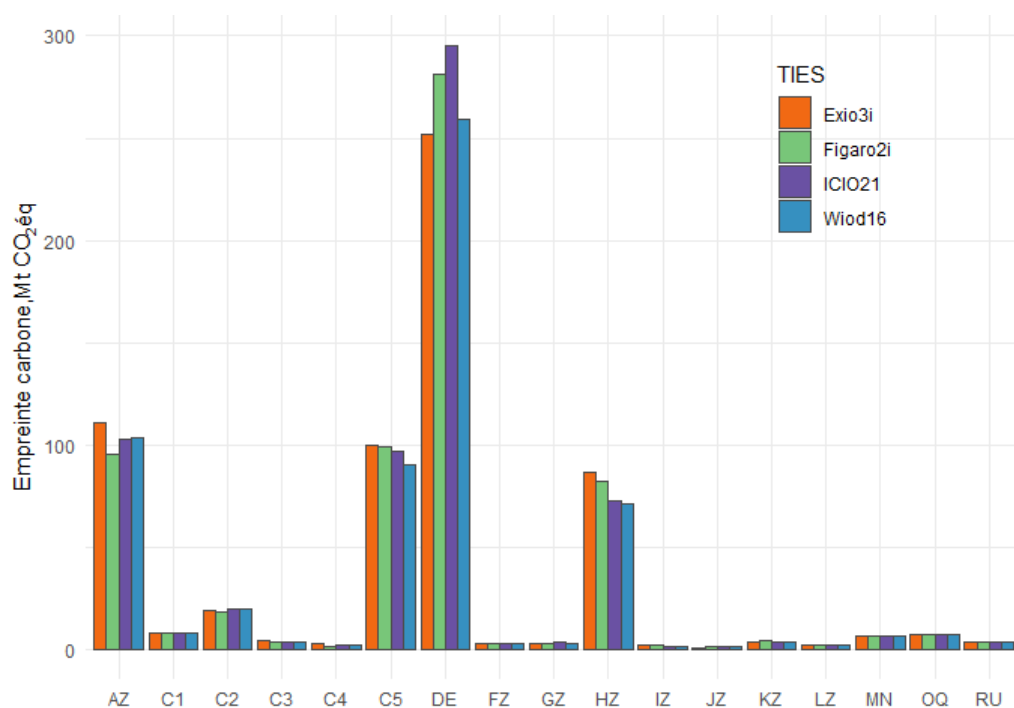
Note : Cette figure présente le montant de demande finale importée par pays de provenance en milliards d'euros courants pour la France selon le TIES. Nomenclature A17, données de 2014.

GRAPHIQUE B.4 – Empreinte carbone importée par pays émetteur selon le TIES



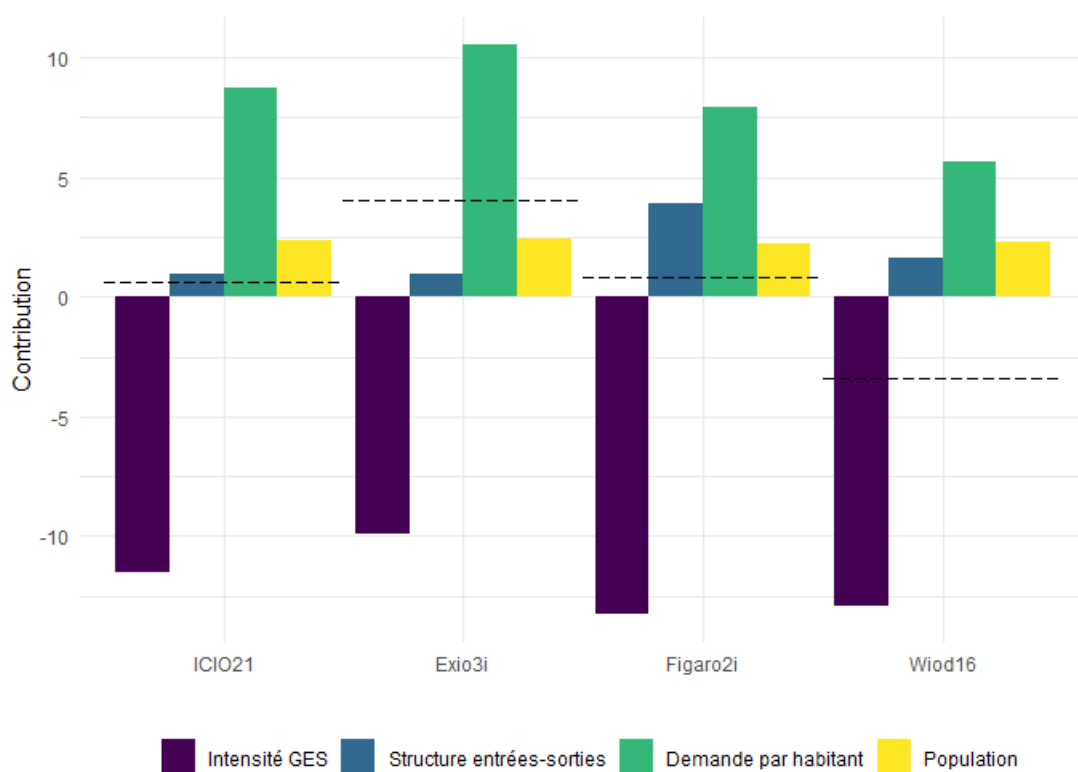
Note : Cette figure présente le montant de l’empreinte carbone française importée en MtCO₂éq par pays d’origine des émissions selon le TIES. Base d’émissions Exiobase, 2014.

GRAPHIQUE B.5 – Empreinte carbone importée par branche émettrice selon le TIES



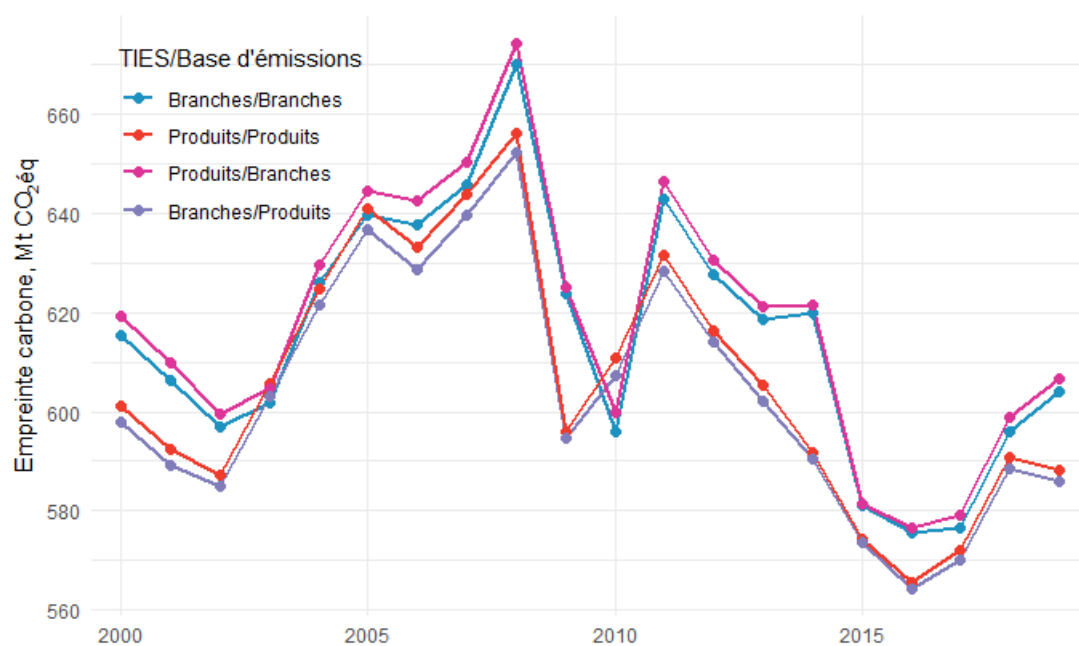
Note : Cette figure présente le montant de l’empreinte carbone française importée en MtCO₂éq par branche d’origine des émissions selon le TIES. Base d’émissions Exiobase, 2014.

GRAPHIQUE B.6 – Décomposition structurelle de l’empreinte carbone selon le TIES, 2010-2014



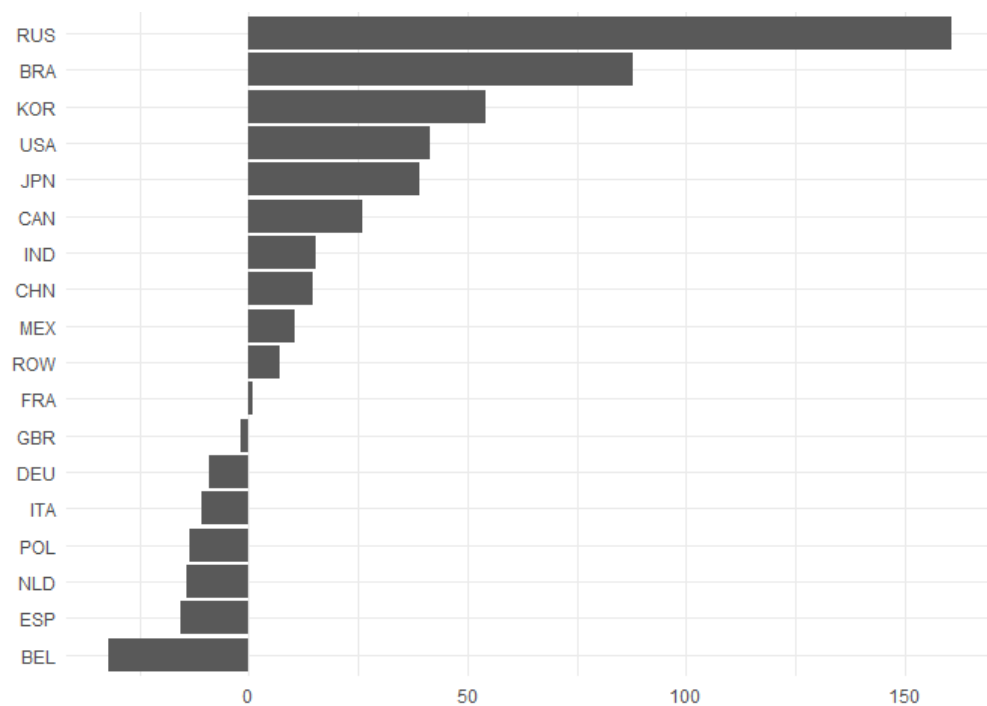
Note : Cette figure présente les contributions (en points de pourcentage) des différents facteurs à l’évolution de l’empreinte carbone de la France entre 2010 et 2014 (voir équation E.1). L’évolution de l’empreinte est représentée en pointillés noirs.

GRAPHIQUE B.7 – Evolution de l’empreinte carbone, bases en produits et en branches



Note : Cette figure présente l'évolution de l'empreinte carbone de la France calculée avec le TIES et la base d'émissions d'Exiobase, en croisant les versions en produits et en branches. Les données sont converties en nomenclature A17 avant calcul d'empreinte.

GRAPHIQUE B.8 – Variations dans l'origine de l'empreinte carbone en GVC par rapport à LCI



Note : Cette figure montre les variations de la ventilation de l'empreinte carbone par pays d'origine des émissions lors du passage d'une approche LCI à une approche GVC, pour la France en 2017.

C Description et construction d'un TIES

Le MRIO est un assemblage de TES nationaux destiné à construire un TES mondial au sein duquel toutes les interactions entre pays sont représentées (pour un ensemble de pays donné et pour un ensemble de branches données). Nous détaillons ici le procédé de construction d'un TIES à partir d'une collection de TES, avant d'en décrire la structure.

C.1 Des TES nationaux aux TIES

Le TES national en France est produit annuellement dans une approche branche (en colonne) \times produit (en ligne), et les emplois finaux sont valorisés au prix d'acquisition. La valorisation au prix d'acquisition signifie notamment que les dépenses de consommation des ménages incluent les marges de commerce et de transport, et que la production inclut les impôts nets de subvention sur les produits. Le TES national est ensuite passé dans un format dit symétrique, c'est-à-dire qu'il n'est plus en branche \times produit mais en produit \times produit et intégralement au prix de base. Ce TES symétrique est obtenu en multipliant le TEI (tableau des entrées intermédiaires) par la transposée de la matrice de production en structure. La valorisation au prix de base implique que les marges de commerce et de transport sont réattribuées aux produits "commerce" et "transport". Ce type de TES symétrique est utilisé dans les modélisations input-output, notamment pour le calcul de l'empreinte carbone. C'est au sein du TES symétrique que les coefficients techniques reflètent au mieux la structure de production. Eurostat collecte et diffuse les TES symétriques de tous les pays européens. Ces TES symétriques peuvent être assemblés pour construire un TIES.

C.2 Réconciliation des TES

La construction d'un TIES ne consiste donc pas seulement en la simple juxtaposition des TES symétriques des différents pays : elle les réconcilie. En pratique, la somme des importations d'un pays donné est rarement égale à la somme des exportations vers ce pays depuis ses partenaires commerciaux. De plus, les TES symétriques ne sont pas initialement conçus pour renseigner l'origine et la destination des produits importés et exportés. La construction du TIES nécessite donc le concours d'autres données de flux commerciaux (par exemple, la base COMTRADE), dont les concepts ne sont pas directement compatibles avec ceux de la comptabilité nationale.

La construction des flux inter-pays au sein d'un TIES doit suivre deux principes majeurs, sur lesquels les méthodes diffèrent et qui seront donc sources d'écarts entre TIES.

- Les données de commerce international doivent être corrigées des importations réexportées (quasi-transit). En théorie, les concepts du SNA 2008 (System of National Account), et en particulier l'introduction du travail à façon, devaient supprimer les importations réexportées. En pratique, cette hypothèse d'absence d'importations réexportées n'est pas toujours vérifiée. Ainsi, les données des TIES montrent parfois des exportations excédant la production nationale. Par ailleurs, si les statistiques douanières excluent le transit, elles n'excluent pas toutes les formes d'importations réexportées : (1) les biens importés stockés, sans que l'importateur ne connaisse encore la destination finale du produit, sont comptabilisés par les douanes alors que le produit peut être *in fine* réexporté ; (2) le bien

importé peut être livré à un commerçant résident qui le réexporte par la suite (auquel cas il y a changement de propriétaire).

- Dans le cas des émissions carbonees, certaines émissions sont difficilement attribuables à un pays donné. C’est le cas par exemple des “bunkers” aériens et maritimes qui sont des zones de ravitaillement en pétrole internationales, comme dans le cas de ports ravitaillant des bateaux sous des pavillons variés. Les corrections liées à ces attributions correspondent à l’articulation entre un principe dit “territorial” et un principe “résidentiel” (voir [Usubiaga and Acosta-Fernández \(2015\)](#)).

Ces différentes méthodes dans la construction des MRIO, associées à des données manquantes ou partielles pour certains pays, à des niveaux d’agrégation variables et à des concepts (SNA) ou nomenclatures parfois hétérogènes, expliquent pourquoi les MRIO diffèrent potentiellement les uns des autres. Ainsi, la réconciliation inter-*TES* qui préside à la construction d’un MRIO implique que ces données finales pour un pays donné sont rarement égales aux données nationales.

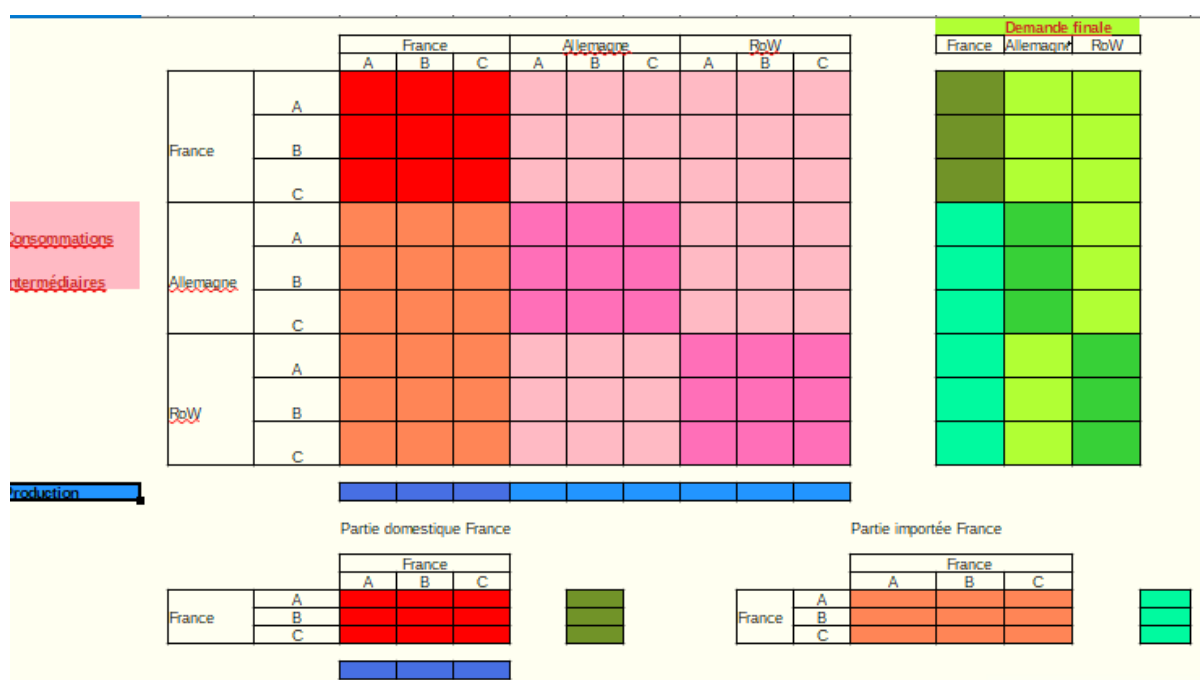
C.3 Structure et lecture d’un TIES

La Figure C.1 présente la structure d’un TIES en regard de celle d’un *TES* symétrique. Le *TES* symétrique présente le tableau des entrées-sorties entre branches françaises, le vecteur qui renseigne la production de chaque branche, ainsi que la demande finale de la France adressée à chaque branche de la production française. De plus, il recense pour chaque branche les importations destinées aux consommations intermédiaires (CI) et à la demande finale. Par exemple, il indique les importations de voitures pour satisfaire la demande finale française, ou les importations de composants de voitures qui sont des intrants de l’industrie automobile française. En revanche, le *TES* symétrique ne renseigne pas sur l’origine géographique de ces importations. Reconstruire l’origine de ces importations incombe au constructeur de TIES, et ce pour chacun des pays inclus dans le TIES. La Figure C.1 montre que l’on obtient ainsi deux matrices. La première matrice est le tableau des consommations intermédiaires international, une matrice symétrique avec autant de lignes que de branches \times pays. La partie diagonale par bloc correspond aux CI domestiques, et tous les blocs hors diagonale correspondent aux CI importées. La seconde matrice est composée d’autant de vecteurs de demande finale qu’il y a de pays dans la base, et ces vecteurs comportent autant de lignes que de branches \times pays. Enfin, un TIES doit présenter en ligne un équilibre ressources-emplois : la somme des utilisations des produits d’une branche (en consommations intermédiaires ou demande finale) est égale à la production de cette branche. La production est renseignée par un vecteur qui comporte autant de lignes que de branches \times pays.

La Figure C.2 présente une version agrégée du TIES ICIO 2021 ([OECD, 2021](#)) pour l’année 2018, avec 5 zones géographiques (France, Reste de l’UE, États-Unis, Chine, et Reste du Monde) et 4 branches (Agriculture et Industrie, Énergie, Services Abtriés, et Services exposés). Le TIES correspondant comporte donc trois blocs : le vecteur de production (de taille 20×1), la matrice de consommations intermédiaires (20×20), et la matrice de demande finale (20×5). La production de la branche Agriculture et Industrie française est de 831 millions d’euros, dont 207 sont destinés à satisfaire directement la demande finale française. 171 millions sont exportés pour la demande finale à l’étranger, et 199 millions sont exportés en tant que consommations intermédiaires de branches à l’étranger. Le TIES permet également de retrouver la valeur ajoutée de chaque

branche dans chaque pays. Par exemple, la branche Énergie des États-Unis utilise 15 millions de consommations intermédiaires de services produits par le reste du monde. Au total, cette branche consomme 899 millions d’euros, pour une production de 1542 millions d’euros, correspondant à une valeur ajoutée de

Enfin, la demande finale est résumée à un vecteur colonne par pays ; toutefois ce total de demande finale est la somme de plusieurs agrégats : consommation des ménages, des administrations publiques ou des ISBLSM, Investissement (FBCF), objets de valeur et variations de stocks. Ainsi parler d’empreinte des ménages est souvent erroné : les chiffres officiels d’empreinte carbone concernent l’ensemble de la demande finale et non uniquement les dépenses de consommation des ménages. Il est bien sûr possible d’affecter à la consommation des ménages une partie de cette empreinte, liée à sa pondération dans le total de la demande finale, mais ce n’est pas le chiffre généralement retenu dans les empreintes diffusées.



GRAPHIQUE C.1 – Présentation des formats d’une base multirégionale TIES (en haut) et d’un TES symétrique pour un pays donné décomposé en partie intérieure et importée (en bas)

D Calcul de l’empreinte carbone à l’aide d’un TIES

D.1 Compléments sur le calcul d’empreinte

L’empreinte carbone de la France selon l’équation 2 se décompose comme la somme des émissions générées dans chaque branche×pays pour produire ce qui va concourir aux biens consommés par les Français. On peut voir le vecteur \mathbf{y}^{FRA} comme $\hat{\mathbf{y}}^{FRA} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)}$, et on obtient

$$\mathbf{EC}^{FRA} = \mathbf{E} \times \hat{\mathbf{y}}^{FRA} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)} = \mathbf{M} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)}$$

La matrice M contient en M_{ij}^{rs} les émissions de la branche i du pays r nécessaires pour satisfaire la demande finale française en produit j du pays s . Cette matrice M est représentée en Figure D.2. La somme totale des coefficients de cette matrice donne l’ensemble des émissions générées pour satisfaire la demande finale de la France, c’est-à-dire l’empreinte carbone hors émissions directes des ménages. Cette sommation peut se faire par colonnes ou par lignes.

- À ligne fixée (i,r), le total des cellules de toutes les colonnes correspond à l’ensemble des émissions de la branche×pays de la ligne (i,r) qui sont générées par l’ensemble de la production qui concourt à servir la demande finale de la France. Elle s’écrit $\mathbf{EC}^{FRA} = \mathbf{M} \times \mathbf{1}_{(R \times n, 1)}$. C’est la décomposition privilégiée dans ce document de travail (**approche production**). Dans cette décomposition de l’empreinte, on calcule la contribution à l’empreinte de chaque branche×pays à partir du rôle joué par cette branche×pays dans chacune des chaînes de valeur qui mène à la demande finale.
- À colonne fixée (j,s), le total des cellules de toutes les lignes correspond à l’ensemble des émissions induites par la demande finale française des produits dont l’étape finale de production se situe dans la branche×pays de la colonne (j,s) (**approche consommation**). Cette approche donne le contenu carbone de chaque poste de consommation. Ici, on a $\tilde{\mathbf{EC}}^{FRA} = \mathbf{1}_{(1, R \times n)} \times \mathbf{M}$. Dans cette décomposition de l’empreinte, on calcule l’empreinte de chaque produit qui constitue la demande finale. C’est l’approche usuelle lorsque l’on calcule son empreinte à partir de ses consommations (voir par exemple le simulateur de l’ADEME <https://impactco2.fr/>).
- Ces deux décompositions sont exactes (pas de double compte des émissions).

D.2 Calcul de l’empreinte carbone en pratique

Nous exposons ici le calcul d’empreinte carbone fondé sur un TIES, à l’aide d’un TIES à un niveau très agrégé, néanmoins réaliste. Il est issu du TIES ICIO de l’OCDE dans sa version 2021, avec pour millésime l’année 2018. Nous utilisons les données d’émissions d’Exiobase 3 sous le même format. Les données sont agrégées en 5 zones géographiques (France, Reste de l’UE, Etats-Unis, Chine, Reste du monde) et 4 branches (Agriculture et Industrie, Energie, Services exposés et Services abrités). Les services abrités sont par exemple composés du bâtiment, de l’hébergement restauration, des loyers, ou encore des services administratifs. Les services exposés sont par exemple constitués des transports, des télécoms, ou encore des services financiers.

La Figure C.2 présente le TIES pour l’année 2018, c’est-à-dire le vecteur de production x_i^r , la matrice des consommations intermédiaires $\mathbf{Z} = (z_{ij}^{rs})$ et les différents vecteurs de demande finale des pays \mathbf{y}^{rs} , avec à sa droite les émissions par branches \mathbf{e} . La Figure D.1 représente les coefficients d’émission sous forme diagonale $\hat{\mathbf{c}}$.

La matrice M est représentée en Figure D.2 pour la France. La case [4; 5] de cette matrice présente une valeur de 129. Cela signifie que la demande finale française en produits de la branche

‘agriculture-industrie’ de l’Union Européenne (hors France) génère 129 tCO₂eq par la production de ‘services exposés’ français que cette branche nécessite. Au total, la branche ‘services exposés’ français génère 74,511 tCO₂eq pour satisfaire la demande finale française, directement (pour 43,336 tCO₂eq) ou en étant intégrée à d’autres processus de production ; c’est l’approche production. La demande finale française en biens produits par la branche ‘agriculture-industrie’ de l’Union Européenne (hors France) engendre des émissions de 56,266 tCO₂eq, directement (pour 23,387 tCO₂eq) ou indirectement par ses consommations intermédiaires ; c’est l’approche consommation.

Enfin, il est possible de croiser les pays d’utilisation des émissions avec les pays ou branches de provenance de ces émissions. La Figure D.3 présente la part de l’empreinte de chaque pays qui provient de chaque pays en ligne (panel haut), ou de chaque branche (panel bas).

e/p*(I-A)-1*Format_FRA : lecture 'ligne' et 'colonne' FRA : lecture 'ligne' et 'colonne' (sommes en jaune) avec la demande finale de la France mise sous forme diagonal dans le produit matriciel

		FRA			FRA			FRA			USA			USA			CHN			CHN			ROW		
		AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV	AGR_INDU	ENR	SERV
FRA	AGR_INDU	43 621	597	14 553	2 230	428	5	33	30	7	0	1	1	10	0	0	1	37	2	6	5	61 567			
FRA	ENR	4 806	34 029	14 196	4 127	82	4	10	15	1	0	0	0	2	0	0	0	8	1	2	2	57 287			
FRA	SERV_ABRT	386	85	15 169	481	9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	16 133			
FRA	SERV_EXPO	4 714	1 084	25 153	45 358	129	3	20	46	2	0	0	0	3	0	0	0	11	1	3	4	74 511			
UE_OTHERS	AGR_INDU	6 048	643	9 509	1 862	23 387	103	666	586	50	2	7	5	72	0	4	4	260	15	42	33	43 300			
UE_OTHERS	ENR	4 234	1 332	9 361	2 976	9 296	7 537	1 712	2 009	35	5	9	8	72	0	4	5	270	58	56	82	39 061			
UE_OTHERS	SERV_ABRT	197	28	441	118	397	14	658	104	2	0	0	0	2	0	0	0	9	1	2	2	1 977			
UE_OTHERS	SERV_EXPO	1 527	281	5 109	2 233	2 622	105	672	4 889	13	1	4	6	20	0	1	2	79	10	22	37	17 633			
USA	AGR_INDU	1 051	110	1 325	282	370	7	33	38	2 645	14	99	69	52	0	3	3	247	12	32	27	6 420			
USA	ENR	1 373	1 854	3 222	1 078	712	155	94	147	859	2 356	447	328	120	1	6	9	517	213	92	157	13 739			
USA	SERV_ABRT	27	5	54	17	13	0	2	3	28	2	83	12	2	0	0	7	1	1	1	1	259			
USA	SERV_EXPO	176	46	546	283	117	5	21	57	117	13	76	454	8	0	1	1	36	5	9	15	1 985			
CHN	AGR_INDU	3 831	503	7 270	1 671	1 886	37	180	184	201	6	35	29	15 461	6	480	470	1 300	63	194	149	33 907			
CHN	ENR	2 397	410	4 796	1 212	1 190	31	120	140	122	4	22	19	8 830	118	467	754	891	78	151	161	21 914			
CHN	SERV_ABRT	50	7	105	26	25	1	3	3	3	0	0	0	136	0	107	16	17	1	3	2	503			
CHN	SERV_EXPO	171	29	454	166	87	2	11	21	8	0	2	2	445	1	47	361	55	4	11	14	1 890			
ROW	AGR_INDU	8 525	1 614	14 227	3 093	4 704	123	395	397	574	19	73	57	1 173	1	53	58	31 578	412	1 484	949	69 510			
ROW	ENR	16 504	39 855	38 065	11 932	10 184	3 053	1 376	1 776	522	364	152	118	2 853	18	135	190	13 548	21 401	2 668	3 460	168 175			
ROW	SERV_ABRT	178	101	454	123	100	8	12	16	9	1	1	1	20	0	1	1	250	27	595	75	1 973			
ROW	SERV_EXPO	856	464	2 877	1 320	527	39	92	223	34	5	9	12	87	0	5	8	983	153	363	2 899	10 957			
		100 674	83 077	166 886	78 565	56 266	11 235	6 112	10 685	5 230	2 791	1 021	1 125	29 369	145	1 316	1 833	50 105	22 458	5 734	8 076				

GRAPHIQUE D.2 – Matrice M

Pays	Branche	TOTAL	FRA	UE_OTHERS	USA	CHN	ROW
TOTAL	AGR_INDU	37,7%	33,4%	28,8%	30,1%	42,8%	39,4%
TOTAL	ENRJ	52,0%	46,7%	56,0%	58,7%	49,8%	50,3%
TOTAL	SERV_ABRIT	3,4%	3,2%	3,6%	3,3%	3,2%	3,5%
TOTAL	SERV_EXPO	6,9%	16,6%	11,6%	7,9%	4,1%	6,8%
		TOTAL	FRA	UE_OTHERS	USA	CHN	ROW
FRA	TOTAL	0,8%	32,6%	1,4%	0,2%	0,1%	0,2%
UE_OTHERS	TOTAL	8,0%	15,9%	53,2%	2,6%	0,9%	2,5%
USA	TOTAL	11,0%	3,5%	2,9%	60,6%	0,9%	2,8%
CHN	TOTAL	27,7%	9,1%	7,4%	8,6%	81,7%	7,8%
ROW	TOTAL	52,5%	39,0%	35,1%	27,9%	16,5%	86,6%

GRAPHIQUE D.3 – Emissions générées par la demande finale (en colonne) de chaque pays : structure par branches de provenance et par pays de provenance

E Analyse de décomposition structurelle

L’empreinte carbone d’un pays varie d’une année sur l’autre. Une forte croissance démographique peut faire croître l’empreinte, mais une innovation technologique qui rend le système productif plus sobre en énergie et en émissions la ferait baisser. Le panier de biens et services consommés peut lui-même évoluer. Pour séparer la contribution de chacun de ces facteurs à l’évolution de l’empreinte carbone, il existe un ensemble de méthodes appelées méthodes de décomposition structurelle (SDA, pour *Structural Decomposition Analysis*). Ces méthodes permettent de décomposer comptablement l’évolution d’une grandeur en fonction de l’évolution de ses composantes. Nous nous inspirons de [Dietzenbacher et al. \(2020\)](#) pour appliquer ces méthodes au calcul de l’empreinte carbone.

E.1 Méthode

Nous reprenons les notations introduites dans la partie méthodologique 1, avec lesquelles l’empreinte carbone de la France s’écrit :

$$CFP_{FRA} = \mathbf{c} \times \mathbf{L} \times \mathbf{y}^{\cdot, FRA} = \mathbf{c} \times \mathbf{L} \times \frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{Pop_{FRA}} \times Pop_{FRA},$$

avec Pop_{FRA} la population française et $\frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{Pop_{FRA}}$, la demande finale par habitant. L’évolution de l’empreinte entre deux années est donc l’évolution du produit de ces quatre termes. Il est aussi possible de décomposer $\frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{Pop_{FRA}} = \frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{DF_{FRA}} \times \frac{DF_{FRA}}{Pop_{FRA}} \times Pop_{FRA}$ où DF_{FRA} est la demande finale totale de la France. $\frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{DF_{FRA}}$ est un vecteur qui représente le panier de consommation de la demande finale. Cette décomposition renseignerait sur la contribution de changements de panier de consommation, de demande finale par habitant, et de la croissance démographique.

En notant $\Delta^{SDA}(X)$ ce qu’aurait été l’évolution de l’empreinte si aucun des quatre facteurs n’avait changé sauf le facteur X, nous cherchons à calculer les membres de droite de l’équation :

$$\Delta^{SDA}(\mathbf{cLy}) = \Delta^{SDA}(\mathbf{c}) + \Delta^{SDA}(\mathbf{L}) + \Delta^{SDA}\left(\frac{\mathbf{y}^{\cdot, FRA}}{Pop_{FRA}}\right) + \Delta^{SDA}(Pop_{FRA}) \quad (\text{E.1})$$

Une telle décomposition n’est cependant pas unique. S’il n’y avait que deux facteurs, il n’y aurait que deux décompositions possibles. Dans ces décompositions, l’évolution de l’empreinte serait la somme pondérée des évolutions des facteurs explicatifs. Il y aurait deux pondérations possibles, menant donc à deux décompositions. De manière générale, il existe $n!$ manières de décomposer l’évolution d’un produit à n facteurs selon l’évolution de chacun de ces facteurs. Et les contributions de chaque facteur peuvent varier d’une décomposition à l’autre. Dans ce qui suit, nous nous appuyons sur les travaux de [Dietzenbacher and Los \(1998\)](#) qui montrent qu’une très bonne approximation de l’évolution est la moyenne de deux décompositions (qualifiées de polaires) particulières. Pour un produit à trois facteurs, $A = B * C * D$, les décompositions polaires de l’évolution de A entre $t = 0$ et $t = 1$ sont les suivantes :

$$\begin{aligned} (1) & : (B_1 - B_0)C_1D_1 + B_0(C_1 - C_0)D_1 + B_0C_0(D_1 - D_0) \\ (2) & : (B_1 - B_0)C_0D_0 + B_1(C_1 - C_0)D_0 + B_1C_1(D_1 - D_0) \end{aligned}$$

et on obtient la variation de A en faisant la demi-somme des deux décompositions. En regroupant

les termes, on définit alors les contributions de chacun des produits de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\Delta^{SDA}(B) &= \frac{1}{2} \left[(B_1 - B_0)C_1D_1 + (B_1 - B_0)C_0D_0 \right] \\ \Delta^{SDA}(C) &= \frac{1}{2} \left[B_0(C_1 - C_0)D_1 + B_1(C_1 - C_0)D_0 \right] \\ \Delta^{SDA}(D) &= \frac{1}{2} \left[B_0C_0(D_1 - D_0) + B_1C_1(D_1 - D_0) \right]\end{aligned}$$

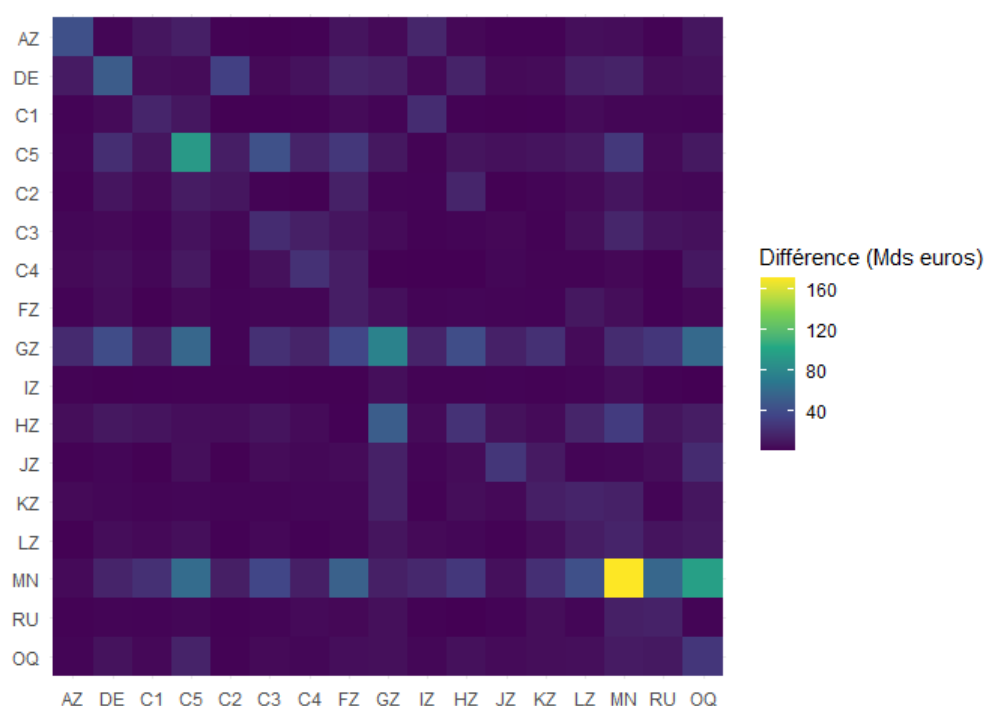
Nous suivons le même principe pour la décomposition à quatre facteurs de l'équation [E.1](#).

F Comparaison des approches en produits et en branches

Les TIES utilisent généralement des données exprimées en branches plutôt qu'en produits. Toutefois, certains TIES (Figaro et Exiobase) fournissent à la fois des tables en branches et des tables en produits. De même, les données d'émissions sont le plus souvent exprimées en branches car c'est nativement dans cette nomenclature que sont déterminées les émissions au sein des inventaires nationaux (par référence aux émissions dégagées par les processus de production). Exiobase fournit également des données d'émissions en produits.

Structure du TEI Adopter une approche en produits plutôt qu'en branches modifie la structure du TIES, en particulier pour certaines branches. Commençons par comparer la structure du TEI au niveau mondial, entre un TIES en produits et son équivalent en branches. Nous utilisons pour cela les TIES Exiobase, qui existent à la fois en produits et en branches. La comparaison des structures des TEI (Figure F.1) révèle un écart important au niveau des branches MN, qui correspondent aux activités spécialisées, scientifiques et techniques, ainsi qu'aux services administratifs et de soutien. Cet écart est toutefois très faible rapporté à la production mondiale.

GRAPHIQUE F.1 – Différences de structure du TEI en branches et en produits

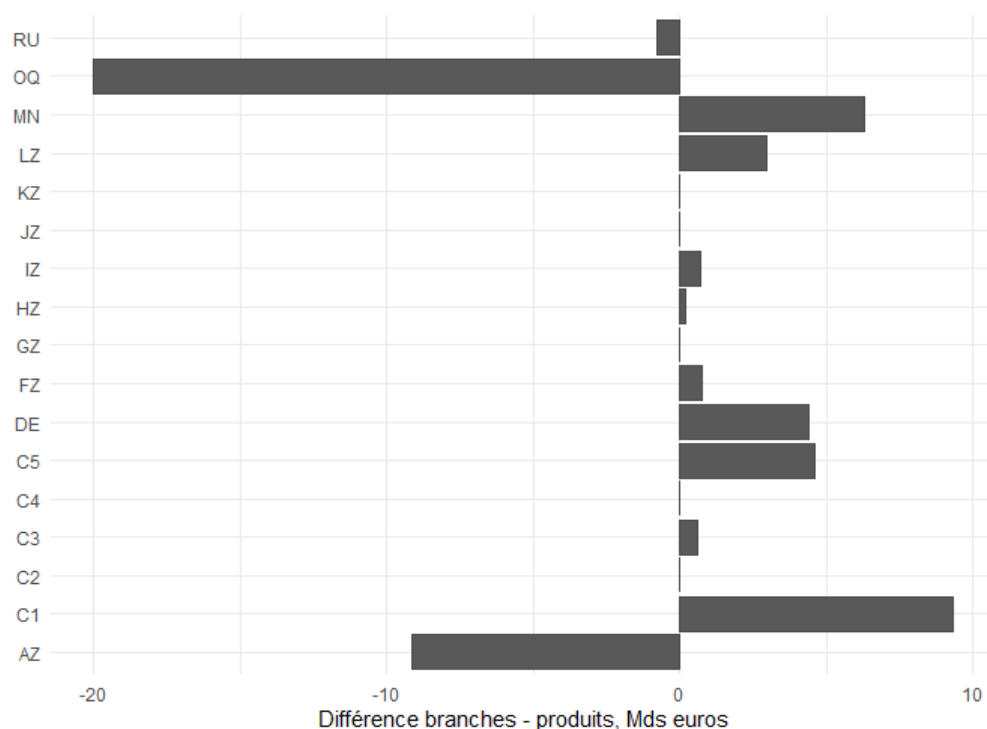


Note : Cette figure présente l'écart entre le tableau des entrées intermédiaires d'Exiobase au format branches et celui au format produits, en 2014 et en nomenclature A17. Ce TEI est la somme des TEI de chaque zone géographique. Une valeur positive signifie plus d'entrées intermédiaires dans la version branche que dans la version produits.

Production La Figure F.2 présente les différences de niveau entre la production de chaque branche et du produit correspondant, au niveau A17, en France. On constate que l'approche en produits conduit à une production plus élevée dans la branche C1 (agroalimentaire) qui semble

provenir de la branche AZ (agriculture)¹⁹ et plus faible dans la branche OQ (qui regroupe des services publics et non-marchands).

GRAPHIQUE F.2 – Différences entre la production en branches et en produits



Note : Cette figure présente l'écart entre la production totale en 2014 des branches française de la version branche d'Exiobase avec sa version produits, en nomenclature A17. Une valeur positive signifie davantage de production dans la version branche que dans la version produits.

Importations La Figure F.3 présente les différences de niveau entre les importations qui proviennent de chaque branche et du produit correspondant, au niveau A17, en France. Une valeur positive signifie que la France importe plus de cette branche que de ce produit. Il apparaît que certaines importations carbonées (C1 à C5) sont plus élevées en branches qu'en produits (C1 à C5), tandis que d'autres le sont moins (AZ et DE). A priori, l'empreinte peut ainsi augmenter ou diminuer. Notons également que la France importe 10 milliards d'euros de plus de la branche GZ (commerce) que de produits.

19. C'est la production viticole qui est transférée.

GRAPHIQUE F.3 – Différences entre les importations en branches et en produits



Note : Cette figure présente l'écart entre les importations en 2014 des branches française de la version branche d'Exiobase avec sa version produits, en nomenclature A17. Une valeur positive signifie davantage d'importations dans la version branche que dans la version produits.

G Effets d'agrégation

Les calculs d'empreinte carbone peuvent être effectués à différents niveaux d'agrégation, en fonction du niveau de détail de la nomenclature utilisée ou des zones géographiques considérées. La littérature input-output est riche en démonstrations de ces effets d'agrégation (voir [Steen-Olsen et al. \(2014\)](#) pour une synthèse) dont l'origine vient des effets de structure entre les niveaux détaillés hétérogènes et les niveaux agrégés en moyenne. Dans cette partie, nous étudions comment le niveau d'agrégation modifie le résultat du calcul d'empreinte carbone.

G.1 Effets d'agrégation de branches

Dans tous les travaux présentés ici, les comparaisons entre TIES se basent sur une nomenclature commune et agrégée, la NACE au niveau A17. Dans ce qui suit, nous comparons le montant de l'empreinte selon que son calcul résulte d'un TIES en A17 ou à des niveaux plus fins. Il s'agit d'un côté d'effectuer un calcul d'empreinte avec un TIES et une base émissions dans leur nomenclature initiale (la plus détaillée dont nous disposons), et de l'autre d'agréger ce TIES et cette base d'émissions en utilisant une table de passage vers une nomenclature moins détaillée avant de renouveler le calcul d'empreinte. Le TIES se prêtant le mieux à ce type d'étude est celui d'Exiobase. Il possède en effet une nomenclature très détaillée (163 industries ou 200 produits), ainsi qu'une base d'émissions dans le même format. Cela rend possible de multiples agrégations, aux niveaux A138, A64, A17 et A10 de la Nomenclature d'Activités Française (NAF).

Dans le graphique [G.1](#), nous calculons l'empreinte carbone de la France avec les données TIES et les émissions d'Exiobase aux différents niveaux d'agrégation, et nous les comparons aux résultats du SDES. Les courbes obtenues suivent les mêmes évolutions, avec des écarts de niveaux assez stables dans le temps. Il apparaît que l'agrégation des branches tend à augmenter l'empreinte carbone pour la France, au moins jusqu'à un certain seuil (la différence entre les niveaux A17 et A10 étant moins nette). La même procédure sur le TIES de Figaro²⁰, fait ressortir que les niveaux les plus agrégés ne sont pas ceux avec l'empreinte la plus élevée. On constate aussi que les différences de niveau dus à l'agrégation changent au cours du temps. Il est cependant difficile de se prononcer sur le niveau d'agrégation qui fournit l'empreinte la plus proche de la réalité ; au mieux, plus les mesures concernent des domaines d'activités restreints, plus ces mesures sont précises, et on peut supposer qu'un niveau désagrégé fournit une empreinte plus proche de la réalité. Sous cette hypothèse, il apparaît qu'utiliser des données agrégées peut surestimer le niveau de l'empreinte pour la France : la classification au niveau A10 fournit une empreinte 10 à 15% plus élevée que la plus fine (163 branches).

20. Le TIES de Figaro présente la particularité de mélanger deux nomenclatures dans sa version d'origine : certains pays (29) possèdent 64 branches, quand d'autres (17) n'en possèdent que 30. La classification « Figaro64ind » correspond donc à un calcul effectué avec cette nomenclature hybride. La base d'émissions utilisée est celle d'Exiobase, que nous avons agrégée au niveau correspondant à celui du TIES.

GRAPHIQUE G.1 – Effets d’agrégation par branches



Note : Cette figure présente l’évolution de l’empreinte carbone de la France d’après le TIES Exiobase (à gauche) ou Figaro (à droite), selon le niveau d’agrégation de la nomenclature d’activité.

G.2 Effets d’agrégation géographique

Disposer d’un plus grand nombre de pays améliore-t-il la précision du calcul d’empreinte ? Se contenter de regrouper les pays par zones géographiques relativement homogènes permet-il d’obtenir une estimation d’empreinte réaliste ? Se restreindre aux principaux partenaires économiques du pays étudié en regroupant les autres pays suffit-il à obtenir une bonne estimation d’empreinte carbone ? Vaut-il mieux agréger les pays en zones géographiques homogènes, ou se restreindre à un petit échantillon de pays ? Les réponses à ces questions permettent de juger de la pertinence d’un TIES pour calculer une empreinte carbone, à partir d’une simple étude des pays y figurant. Ces réponses sont également utiles pour améliorer le temps de calcul de l’empreinte carbone. En effet, plus le nombre de pays/zones est élevé, plus le TIES a une taille importante, et plus le temps de calcul sera élevé. Comme pour la nomenclature des branches, nous pouvons obtenir un TIES et une base d’émissions plus agrégés sur le plan géographique. Ce TIES indique dans ce cas les flux de biens et de services entre zones géographiques, et non plus entre pays. Dans ce qui suit, nous étudions l’effet de différentes agrégations géographiques sur l’empreinte carbone calculée.

Zones géographiques du SDES Dans la méthodologie de l’empreinte carbone du SDES (Baude et al., 2022), les importations françaises sont ventilées par zone géographique, en distinguant 9 grandes zones (voir Table G.2). Nous avons répliqué cette agrégation, et obtenons un TIES décrivant les flux économiques entre onze entités géographiques (les neuf zones géographiques du SDES ainsi que la France et le reste du monde). La base d’émissions est agrégée selon le même principe. L’empreinte carbone calculée avec les zones géographiques du SDES est supérieure à celle calculée avec la nomenclature d’Exiobase (49 pays) entre 2000 et 2019 (Figure G.3). L’écart est parfois important, notamment entre 2000 et 2005 (2,5%), mais se resserre et semble stable à partir de la fin des années 2000.

Principaux partenaires commerciaux Au lieu d’agréger les partenaires commerciaux de la France par zone géographique, une autre approche consiste à conserver uniquement les données des principaux partenaires économiques de la France, et à agréger tous les autres pays au sein

GRAPHIQUE G.2 – Définition des zones géographiques du SDES

Nom de zone	Pays
UE28	Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, République tchèque, Allemagne, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, Royaume-Uni, Grèce, Croatie, Hongrie, Irlande, Italie, Lituanie, Luxembourg, Lettonie, Malte, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Suède
Europe-Russie	Suisse, Norvège, Russie, Turquie
Afrique	Afrique du Sud
Amérique du Nord	Canada, Mexique, États-Unis
Amérique du Sud	Argentine, Brésil
Asie	Chine, Indonésie, Inde
Japon-Corée	Japon, Corée
Moyen-Orient	Arabie saoudite
Océanie	Australie

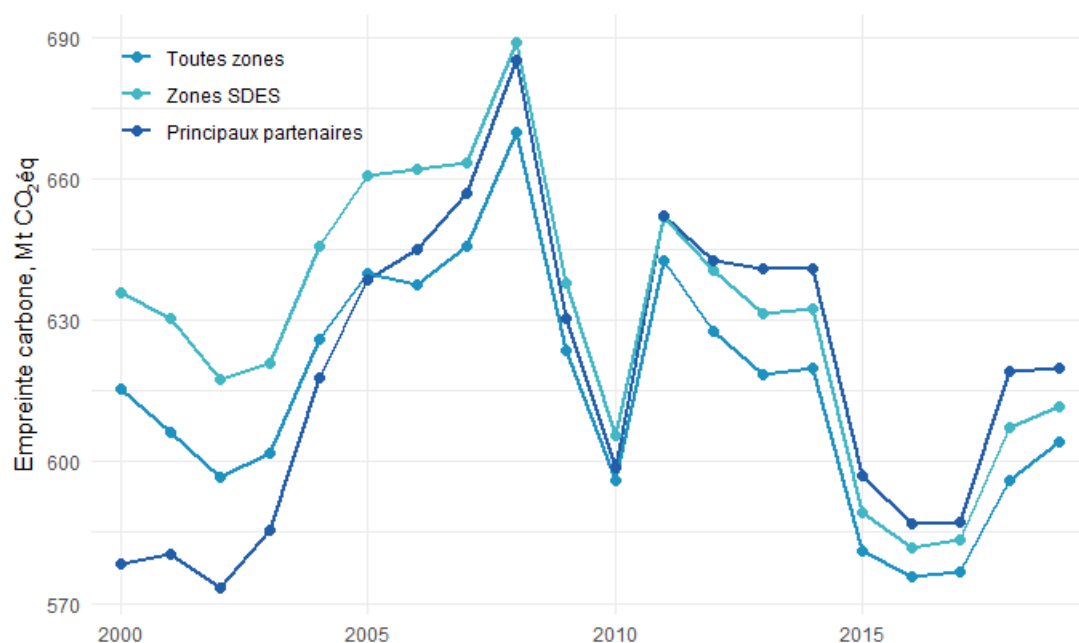
du reste du monde. Les dix principaux partenaires économiques de la France en 2020, à partir du volume total d'échanges commerciaux avec la France sont les suivants : Allemagne, Chine, Italie, Espagne, États-Unis, Belgique, Royaume-Uni, Pays-Bas, Suisse, Pologne.

Avec le TIES et la base d'émissions d'Exiobase, l'agrégation fournit une empreinte de l'ordre de 2,5% plus faible au début des années 2000, et on observe un retournement au cours de la période : l'agrégation géographique entraîne initialement une sous-estimation de l'empreinte, puis finalement une surestimation (Figure G.3). Cette agrégation présente un nombre de zones proche de celle en zones du SDES (11 et 10 respectivement), mais l'agrégation SDES produit des empreintes plus proches des empreintes hors agrégation. Se restreindre aux principaux partenaires commerciaux de la France semble moins donc pertinent qu'agrèger les pays par zones géographiques homogènes.

Zones géographiques arbitraires On peut poser la question de manière plus systématique, en étudiant l'impact sur l'empreinte carbone d'une agrégation en zones géographiques qui ne soient pas forcément homogènes. Nous avons reproduit la démarche précédente en construisant neuf zones géographiques aléatoirement, et comparons l'empreinte carbone calculée avant et après agrégation.

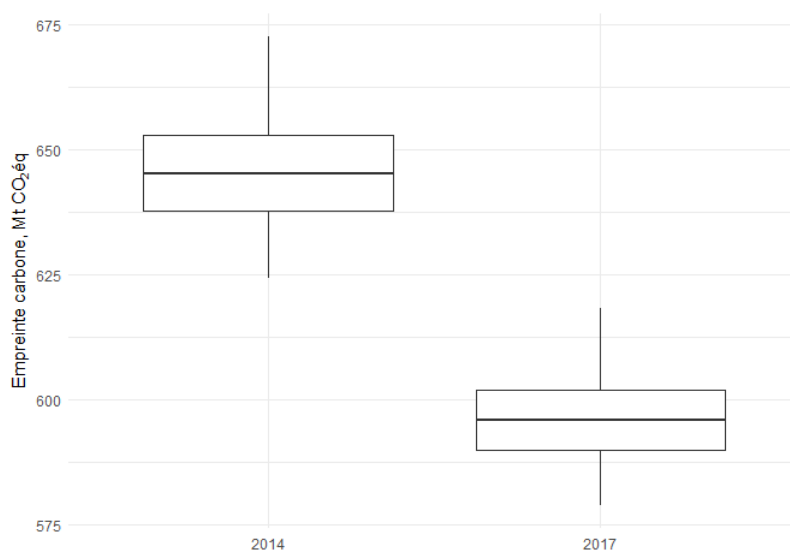
La Figure G.4 montre les écarts de 100 itérations de cette procédure sur le TIES Figaro des années 2014 et 2017, sur le calcul de l'empreinte de la France au niveau A17, par rapport à l'empreinte calculée sur le TIES original. Cette agrégation aléatoire conduit à augmenter modérément les niveaux d'empreinte carbone calculés. En outre, les écarts de niveau semblent être souvent au-delà de 2%, soit plus élevés que les écarts dus à l'agrégation du SDES. Ainsi, si agrèger des pays en zones conduit à une estimation biaisée, l'erreur n'est en général que de l'ordre de 2 à 5%. En outre, le choix de ces zones selon des critères d'homogénéité économique et d'intensités carbone, comme le fait le SDES, peut atténuer ce biais.

GRAPHIQUE G.3 – Effets d’agrégation géographique sur l’empreinte carbone, principaux partenaires commerciaux



Note : Cette figure présente l’empreinte carbone de la France calculée avec le TIES et la base d’émissions d’Exiobase, selon 3 nomenclatures géographiques différentes. “Toutes zones” compte les 49 zones d’Exiobase, “Zones SDES” regroupe ces zones dans les 10 zones utilisées par le SDES, et “Principaux partenaires” regroupe tous les pays qui ne sont pas les 10 principaux partenaires commerciaux de la France en 2020.

GRAPHIQUE G.4 – Effets d’agrégation géographique sur l’empreinte carbone, zones aléatoires



Note : Cette figure présente la distribution des empreintes carbone de la France calculées en agrégeant les autres pays du monde en 9 zones géographiques aléatoires, sur 1000 répétitions, avec le TIES de Figaro et la base d’émissions d’Exiobase. La barre horizontale en gras est située au niveau de l’empreinte calculée avec tous les pays disponibles, sans agrégation. Le haut du rectangle est le 3ème quartile et le bas du rectangle le premier.

G.3 Effets d'agrégation croisés

Le tableau G.1 récapitule le montant de l'empreinte par habitant en France selon le niveau d'agrégation d'activités et géographiques retenus. Choisir d'agréger l'ensemble des pays étrangers en un bloc semble surestimer l'empreinte (+17% sur Exiobase 163), tandis qu'agréger en zones homogènes ou par poids économique altère peu le niveau de l'empreinte.

TABLEAU G.1 – Effets d'agrégation croisés

	Périmètre géographique			
	Complet	SDES 2022	Partenaires	France + ROW
Exio163	7,83	8,10	8,05	9,22
A138	8,05	8,21	8,21	9,30
A64	8,11	8,35	8,26	9,36
A17	8,79	9,29	9,03	10,27
A10	8,79	9,12	8,84	10,26

Note : Empreinte carbone par habitant de la France en tCO_{2eq} , calculée sur l'année 2017 à différents niveaux d'agrégations géographiques (colonnes) et de branches (lignes). Les zones géographiques sont : toutes les zones (Complet), les zones du SDES (SDES 2022), les principaux partenaires commerciaux de la France et un reste du monde (Partenaires), un reste du monde uniquement (France + ROW).

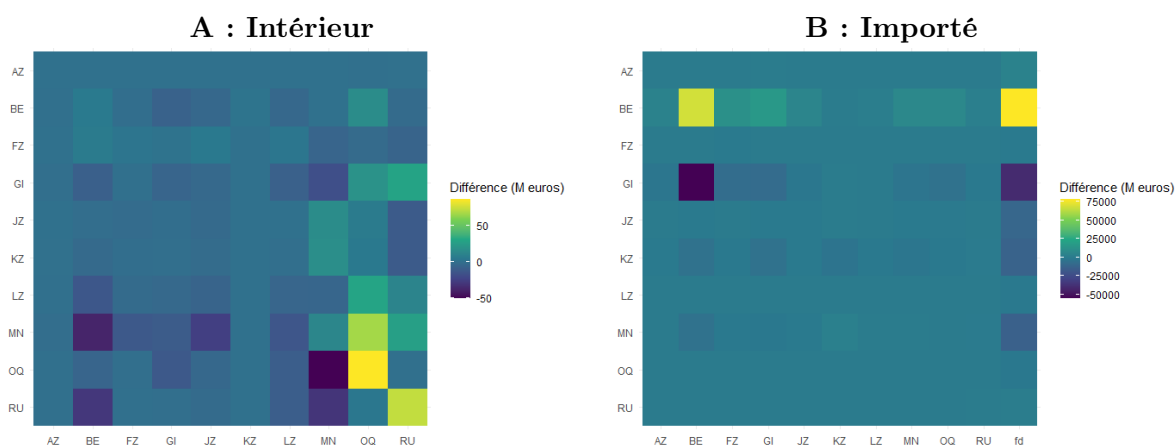
H Conserver les données nationales au sein d'un TIES : l'approche SNAC

La réconciliation des données de commerce extérieur entre les pays présents dans les bases TIES nécessite des ajustements sur les données nationales. Dès lors, les données d'un pays qui sont extraites d'un TIES diffèrent de celles qui ont été produites initialement par ce pays et utilisées pour construire le TIES. Nous montrons ici les différences entre TIES et données nationales avant de détailler une méthode qui permet de réconcilier données nationales avec un TIES donné, dite *Single National Accounts Consistent* (SNAC).

H.1 Comparaison TES national – TES reconstruit issu d'un TIES

Nous commençons par reconstruire le TES national de la France à partir du TIES de Figaro et nous le comparons au TES symétrique transmis à Eurostat par la France. Nous agrégeons les branches au niveau A10. La figure H.1 présente les différences par paire de branches pour l'économie française.

GRAPHIQUE H.1 – Différence entre TEI issu des données nationales et du TIES



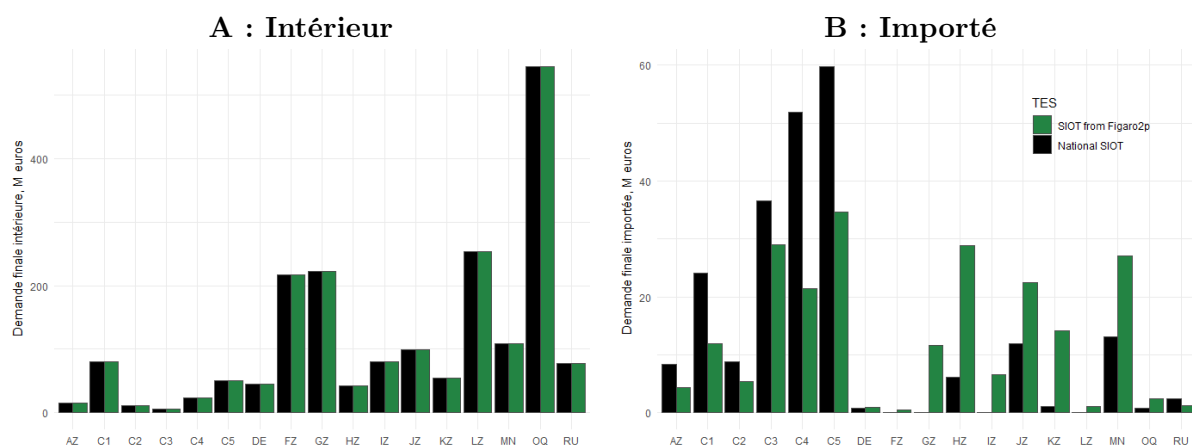
Note : Cette figure présente les différences sur chaque cellule du tableau d'entrées intermédiaires par produit de la France entre celui issu des données nationales et celui issu de Figaro2. En Panel A, la partie intérieure, en Panel B la partie importée. Nomenclature A10, données de 2017, Figaro en format produit.

Les différences sur les flux intérieurs (Panel A) n'excèdent pas 100M€. En revanche, des écarts bien plus importants apparaissent sur les flux importés (Panel B), parfois au-delà de 50Mds €. Par exemple, les importations françaises de produits industriels (BE) sont beaucoup plus élevées dans le TES national que dans celui extrait de Figaro ; c'est l'inverse pour les importations des branches GI (commerce, transport, hébergement-restauration). Le retraitement effectué par Figaro semble donc fortement impacter la structure des importations françaises, par rapport aux données initiales transmises à Eurostat. Les graphiques H.2 présentent une comparaison de la demande finale entre le TIES Figaro et les données nationales de l'Insee. Elles confirment les résultats observés ci-dessus : la demande finale intérieure est quasiment identique, tandis que la demande finale importée présente une structure par produits différente.

Ces écarts proviennent de différentes étapes du processus de construction du TIES. Tout d'abord, les biens sont sujets à du 'quasi-transit' (passage par un pays tiers qui ne devrait pas générer d'enregistrement douanier à l'entrée et à la sortie du territoire mais en génère en pratique)

dont la neutralisation fait l'objet de méthodes assez différentes selon les TIES. Ensuite, les TIES modifient importations et exportations pour les mettre en cohérence au niveau mondial (correction CAF/FAB). Enfin la correction territoriale doit être ventilée.

GRAPHIQUE H.2 – Différence entre demande finale issue de données nationales et de TIES



Note : Cette figure présente les différences entre la demande finale issue des données nationales et celle issue de Figaro2. En Panel A, la partie intérieure, en Panel B la partie importée. Nomenclature A10, données de 2017, Figaro en format produit.

Utiliser un TIES permet d'obtenir des empreintes carbone cohérentes pour l'ensemble des pays décrits dans ce TIES. C'est une approche qui est préconisée par les organismes internationaux. En revanche, si l'empreinte d'un seul pays est l'objet du calcul, et que ce pays dispose d'informations plus précises ou détaillées, il peut être légitime de favoriser les données nationales face à celles d'un TIES, étant donné que l'approche TIES distord les données nationales. Il est par exemple possible de n'utiliser les données des TIES que pour corriger les émissions importées. C'est une approche à dominante 'SRIO' (*single-region input-output*). On peut aussi envisager une approche à dominante 'MRIO' (*multi-region input-output*) qui consiste à conserver les données nationales tout en utilisant le bouclage complet du TIES (MRIO) : c'est l'approche SNAC-TIES (*Single National Accounts Consistent TIES*).

H.2 L'approche SNAC

Le principe consiste à modifier les données d'un TIES afin d'y imposer les données nationales, quitte à ajuster le reste du TIES. On peut en distinguer deux variantes, détaillées ici.

1. On souhaite mobiliser des données nationales plus fines ou plus riches que celles qui ont été réalisées pour la construction du TIES. C'est une approche qui a été utilisée par exemple par la Belgique (Hambÿe et al. (2018)) et les Pays-Bas (Edens et al. (2015)), dans le but notamment de corriger les flux commerciaux ne faisant que transiter par le territoire. En effet, l'intérêt de recourir à cette méthode pour ces pays en particulier est de corriger une des étapes les plus complexes de la création des TIES : la prise en compte du quasi-transit sur le territoire, lié en partie aux plateformes logistiques comme les grands ports qui réalisent des échanges entre pays. Pour ce faire, le processus de construction du SNAC s'approche plus du travail du comptable national car il s'agit de reconstruire le TIES en l'adaptant pour y insérer des informations supplémentaires sur le pays concerné.

Il convient dans cette approche de mobiliser des sources de données sur les échanges extérieurs afin de reconstruire le TIES en l’adaptant aux données nationales.

2. On souhaite imposer les données nationales dans le cadre TIES sans pour autant utiliser des données plus fines. C’est l’approche qui a été utilisée en Grande-Bretagne par [Owen et al. \(2014\)](#). L’approche statistique est différente de la première variante, et le processus de construction du SNAC s’approche plus d’un travail de modélisation économique où l’on doit recalculer sur totaux les données des autres pays du TIES afin d’y insérer les données nationales.

C’est cette deuxième approche que nous implémentons dans la suite de cette section. Elle présente l’avantage d’être répliquable, tandis que la première approche mobilise, par nature, une modélisation propre aux données supplémentaires. L’approche SNAC présente toutefois quelques inconvénients. Le nouveau TIES construit est unique et spécifique au pays. La comparaison des calculs d’empreinte en sera potentiellement plus complexe. Deuxièmement, les ajustements réalisés pour la construction du SNAC-TIES comporteront des informations et une logique de construction différentes de celles des équipes qui ont construit ces TIES initialement. Il y a donc un risque de perte d’information, voire de perte de cohérence, entre le TIES initial et le SNAC-TIES nouvellement construit.

Au-delà d’intégrer les données nationales, la logique de construction d’un SNAC-TIES bénéficie d’un intérêt pratique indiscutable : plutôt que d’intégrer les données nationales d’un pays, on peut envisager d’intégrer les données correspondant à un pays mais issues d’un autre TIES (même format que les données nationales). L’algorithme SNAC permet donc de ‘tracer un pont’ entre TIES, voire de construire des TIES « hybrides », à condition bien sûr de se placer au même niveau d’agrégation en termes de nomenclature de produits et de pays. Une première application peut par exemple être de corriger au sein d’un TIES les données d’un pays qui paraissent erronées en insérant pour ce pays les données issues d’un autre TIES, dans lequel elles semblent plus fiables.

H.3 Le calage sur marges

Tout l’enjeu est d’incorporer à un TIES des données extérieures sans s’écarter des équilibres comptables qui assurent la cohérence du TIES. Pour conserver ces équilibres, il suffit de faire coïncider les totaux par lignes ou colonnes avec les totaux correspondants, renseignés dans le vecteur de production du TIES ou du TES ajouté. Cet exercice est appelé calage sur marges. La littérature input-output présente de nombreux algorithmes de calage sur marges, qui dépendent des domaines d’application. Nous utilisons ici un algorithme de type RAS (raking algorithm if scaling), consistant en une procédure d’ajustements proportionnels itératifs (ou ajustement biproportionnel ou de biproportion).

L’algorithme RAS type consiste à construire une matrice ajustée qui est la plus proche possible d’une matrice initiale mais avec les totaux des lignes et des colonnes calés sur des vecteurs fixés (U et V). Il s’agit d’un algorithme itératif où sont recalculées successivement les lignes et les colonnes. La notion de proximité entre la matrice initiale et la matrice finale impose la définition d’une distance ; certains algorithmes favorisent la biproportion, d’autres la maximisation de l’entropie, ou encore la minimisation de la perte d’information (entropie croisée). Certaines propriétés de ces distances sont nécessaires pour assurer la convergence de la procédure. Ces RAS peuvent être étendus à un nombre quelconque de dimensions.

Un des algorithmes les plus populaires au sein de la communauté des praticiens des modélisations input-output est le RAS généralisé (GRAS). Cet algorithme développé par Günlük-Şenesen and Bates (1988) puis étendu par Junius and Oosterhaven (2003), Lenzen et al. (2007) permet de prendre en compte des éléments positifs et négatifs et de respecter les cases nulles. Toutefois cet algorithme n’est pas directement applicable au contexte multi-régional, qui juxtapose une collection de TES au sein de matrices par bloc, et dont les ventilations doivent respecter certaines règles spécifiques d’agrégation (par branche et pays). Pour y répondre, Temursho et al. (2021) ont développé un algorithme MR-GRAS (pour Multi-Regional - GRAS), qui s’applique à toute matrice partitionnée (ici, par des branches et pays) que l’on cherche à caler sur de nouvelles marges en lignes et en colonnes sous contrainte d’agrégation sans chevauchement. L’algorithme est itératif en ligne puis en colonne, puis selon une troisième dimension de “table d’agrégation”. L’algorithme biproportionnel GRAS et son extension MR-GRAS offrent des propriétés intéressantes : préservation des signes (des variations de stocks peuvent être négatives), préservation des zéros, et ils conduisent à un résultat unique, ce qui assure la reproductibilité du calcul.

Le fonctionnement de cet algorithme, accompagné d’un exemple détaillé et du code Matlab associé sont présentés dans Temursho et al. (2021). Le code Matlab a été recodé en R afin d’être intégré dans les fonctions de notre package²¹.

H.4 Construction d’un SNAC

Nous cherchons à insérer au sein du TIES Figaro le TES symétrique de la France, qui est le TES français utilisé pour construire la base Figaro. Nous choisissons de réaliser cette insertion à un niveau sectoriel A17.

Il se trouve que la production nationale dans Figaro est égale à celle du TES. Nous cherchons à la conserver inchangée autant que possible. En revanche, les totaux des CI et de la demande finale (DF) intérieures et importées sont différents entre le TES et Figaro. Sur ces dimensions, un algorithme de calage est nécessaire. On conservera ainsi par défaut le calage comptable.

1. Tout d’abord, nous transformons les données TES en données sous format TIES. On ne conserve que les blocs colonnes France du TEI et de la demande finale (DF). On intègre directement la partie domestique du TES dans le bloc diagonal correspondant du TIES. La partie importée doit en revanche être ventilée sur les autres éléments des blocs colonnes France du TEI et de la DF. Nous ventilons la DF importée proportionnellement à la structure initiale de Figaro. Pour ventiler les CI importées, il convient de respecter les marges ligne et colonne du TES importé, tout en veillant à ce que la somme de chaque croisement ligne \times colonne corresponde au même croisement du TES. Pour effectuer ce recalage, nous employons l’algorithme MR-GRAS.
2. Pour les marges lignes (par ‘produit’) on recalcule les cibles de marge du TEI et de la DF en faisant la différence entre le TIES Figaro ajusté pour la France et le TIES Figaro initial, car on cherche à se recalculer sur les marges lignes de Figaro. Pour définir les marges colonnes (‘branches’), il s’agit de se recalculer sur le total de Figaro par branche, on procède par simple ventilation proportionnellement aux montants initiaux de Figaro. On a ainsi déterminé les marges de calage qui vont permettre dans l’étape suivante de recalculer le SNAC-TIES.
3. On retire dans cette étape la partie bloc colonne France puis on cale sur marge le TEI (MR-GRAS) et la DF (RAS classique).

21. Nous remercions les auteurs pour la mise à disposition de leur code et leur appui.

4. On réintègre ensuite la partie bloc France au TIES, puis on contrôle que les totaux sont bien ceux de Figaro et que le TES national reconstruit à partir de ce nouveau TIES correspond bien au TES initial de la France.

H.5 Cas où la production est recalée

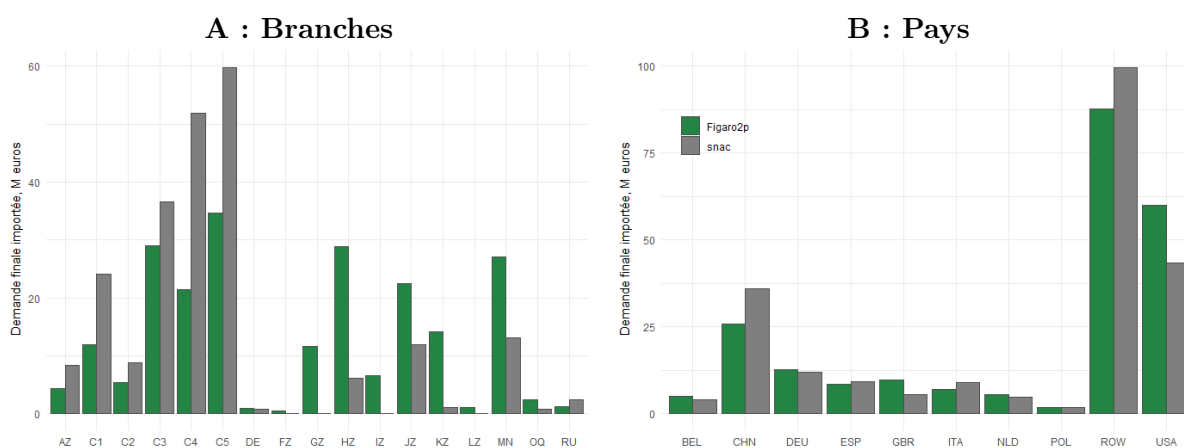
En imposant le TES français au sein de Figaro, on ventile la différence sur les autres pays. Peut-on s'assurer que les équilibres ressource-emplois de ces autres pays sont toujours respectés dans les cas où la production doit être modifiée ? Si la production est modifiée, nous proposons un algorithme un peu modifié :

- On recalcule la production par rapport aux écarts avec la production française
- On répartit les nouveaux écarts sur la production des autres pays entre consommations intermédiaire et finale au prorata de la structure initiale. On obtient un $deltaproduct_{CI}$ et un $deltaproduct_{ef}$
- Pour les décalages de la CI et des DF on enlève les données FRA et on recalcule sur les marges ajustées à la fois des écarts d'origine et des $deltaproduct$. Pour le calage par bloc, on se recalcule sur le total hors FRA que l'on ajuste via un RAS des écarts d'origine et des $deltaproduct$
- On réintègre les données FRA, si bien que les totaux de prod, de CI et des FD de Figaro restent inchangés
- Pour conclure, on a imposé le TES FRA et on a modifié significativement de nombreuses autres données du TIES, mais en respectant les équilibres ressources-emploi et en conservant les marges (total marges du TEI, Prod et FD) de Figaro

H.6 Calcul d'empreinte avec SNAC

Avant de calculer l'empreinte carbone avec le SNAC-TIES, nous mesurons les écarts entre ce nouveau TIES et le TIES initial. La demande finale domestique totale est très proche, comme c'était déjà le cas entre le TES français et le TIES Figaro. En revanche, la ventilation de la demande finale française a été modifiée par l'algorithme MR-GRAS. La Figure H.3 présente cette ventilation par branche d'origine et pays d'origine. Les totaux ne sont pas modifiés : c'est l'objet du calage sur marges. On constate que le SNAC-TIES attribue bien plus de demande finale aux branches manufacturières (C1 à C5), ainsi qu'à la Chine et au reste du monde. Notons que notre algorithme SNAC ne corrige pas de certaines étapes intermédiaires entre le TES symétrique et le TIES (comme la ventilation de la correction territoriale, ou encore la valorisation CAF/FAB des imports/exports), ce qui peut expliquer une partie de ces différences. Les résultats d'empreinte sont présentés dans le corps du texte.

GRAPHIQUE H.3 – Différence des demandes finales importées entre SNAC et TIES initial



Note : Cette figure présente les différences entre la demande finale importée issue du SNAC-Figaro2 et celle issue de Figaro2. En Panel A, la demande finale importée est ventilée selon la branche d’origine, en Panel B selon le pays d’origine. Nomenclature A10, données de 2017, Figaro en format produit.

I Méthodologie et résultats détaillés sur le bootstrap

I.1 Détail de la méthodologie d’une approche par simulation de type bootstrap

La robustesse des évaluations d’empreinte carbone avec un TIES peut être analysée sous deux angles, qui répondent à des questions différentes :

- Sous l’angle de la qualité intrinsèque de la mesure, qui est liée à la qualité des données sources, et notamment à l’incertitude autour de la construction des données. Cela rejoint la question de la qualité de production des TES symétriques par les comptes nationaux des différents pays. En effet, il réside autour des données compilées par les instituts statistiques nationaux une certaine incertitude, liée par exemple aux périmètres des nomenclatures comptables qui ne correspondent pas toujours exactement à ceux des sources mobilisées, ou encore liée à l’incertitude sur certaines sources ‘entreprise’ par exemple sur la constitution des variations de stocks. La littérature relative à ce sujet (voir notamment Bullard and Sebald (1988) et West (1986) et Quandt (1958)) retient une incertitude de l’ordre de 10% pour chaque case du TIES : ce sera notre scénario de référence pour le bootstrap paramétrique.
- Sous l’angle de la différence entre les résultats obtenus à partir des différents TIES disponibles pour réaliser une évaluation d’empreinte carbone. En effet, pour réaliser un exercice donné il est parfois possible de recourir à différents TIES, donc le choix d’un TIES particulier n’est pas neutre sur le résultat trouvé et on peut s’intéresser à la marge d’incertitude qui est liée à ce choix. Or il réside là aussi une incertitude liée au mode de construction des TIES, qui nécessite à la fois des données initiales (avec leurs incertitudes mentionnées dans le point précédent), et l’ajout de surcouches de traitement pour la mise en cohérence de ces sources avec des concepts comptables ou de nomenclature communes. La construction d’un TIES nécessite notamment de réconcilier les informations sur les échanges extérieurs des différents pays afin de rendre toutes les composantes des TES symétriques de tous les pays dans la base compatibles entre eux. Il faut noter à ce stade que

même en présence de données sources qui seraient strictement identiques, la construction d’un même TIES par deux équipes pourrait conduire à des résultats assez différents. En effet, de nombreuses étapes sont nécessaires pour construire un TIES, notamment pour la réconciliation des données de commerce extérieur en prenant en compte le quasi-transit, mais aussi par exemple pour répartir méthodologiquement les émissions liées aux bunker aériens et maritimes, ou encore pour les retraitements des corrections CAF-FAB et de la correction territoriale (qui est non-ventilée au sein de chaque TES symétrique national). Les équipes construisant des TIES ont souvent recours à des sources extérieures pour réaliser des calages ou des répartitions, et emploient des algorithmes variés pour la réconciliation des données. Donc même en présence de sources communes, on peut quand même voir une forme d’aléatoire dans le résultat du TIES. C’est un élément important car il servira d’hypothèse pour évaluer la dispersion des résultats entre TIES.

Ces deux angles ne sont toutefois pas complètement indépendants car les sources de données qui servent à construire les TIES sont parfois communes, donc entachées d’incertitudes liées à leur construction communes pour partie.

I.2 Contexte et principe de la procédure de bootstrap proposée

Principes. Pour répondre à la première question, c’est à dire à la qualité intrinsèque des estimations d’empreinte, [Moran and Wood \(2014\)](#) ont développé une méthode d’analyse de la sensibilité par rééchantillonnage de type bootstrap paramétrique (méthode de Monte Carlo). Les techniques de Monte-Carlo consistent à propager des variables d’entrée aléatoires répétées dans un calcul et à observer l’effet sur la sortie ([Peters, 2007](#)). Elles ont aussi été utilisées pour estimer avec une probabilité de 89% que l’empreinte carbone du Royaume-Uni a bien augmenté entre 1994 et 2004 ([Lenzen et al. \(2010\)](#)).

Pour répondre à la seconde question, c’est-à-dire à l’hétérogénéité liée la disponibilité de plusieurs TIES, nous avons développé une nouvelle méthode s’appuyant sur les principes du bootstrap non-paramétrique. Cette méthode permet d’évaluer la robustesse des évaluations réalisées pour un TIES donné et de juger si ces dernières sont “dans le consensus” de l’ensemble des TIES, c’est-à-dire cohérentes avec les résultats d’un ensemble de TIES.

Si les deux méthodes évoquées ont chacune leur intérêt, on peut vouloir connaître l’ensemble des incertitudes. Pour cela, nous avons développé une méthode hybride qui considère dans un premier temps l’incertitude liée au TIES, puis dans un second temps les incertitudes liées aux données sources de ce TIES. Ces effets combinés correspondent à une prise en compte “maximale” des facteurs d’incertitude, et constituent sûrement à ce titre une borne supérieure des intervalles de confiance entachant les calculs d’empreinte carbone.

Hypothèses. Il existe un débat sur la validité des hypothèses sous-jacentes aux méthodes de Monte-Carlo et au bootstrap non-paramétrique : les données auxquelles on les applique doivent être indépendantes (et normalement distribuées dans le cas de la méthode de Monte-Carlo). C’est un point qui a notamment été soulevé par [Lenzen et al. \(2010\)](#) et qui est remis en cause par [Owen \(2017\)](#) qui considère que « la nature et les contraintes de construction d’une table TIES signifient que ce n’est pas le cas ». On peut en effet imaginer des erreurs systématiques

lors de la construction des TIES, ou des erreurs affectant plus telle ou telle ligne ou colonne, ou encore affectant plus fortement certaines parties du TIES. Owen et al. (2016) propose en complément un méthode de comparaison inter-TIES basée sur une analyse de décomposition structurelle (structural decomposition analysis - SDA) qui attribue la variation des émissions à un ensemble de déterminants dépendants, tels que les coefficients techniques, l'inverse de Leontief et les demandes finales.

Toutefois l'argument d'un risque de non-indépendance des données des TIES peut être discuté. En effet, si les méthodes de construction des TIES s'appuient pour beaucoup sur des recalages, ceux-ci sont réalisés en ligne et en colonne, ce qui limite probablement les effets directement attribuables à une ligne ou à une colonne. Par ailleurs, le nombre d'opérations réalisées lors de la construction d'un TIES sont aussi de nature à effacer les opérations spécifiques à un traitement particulier. Dans la suite de cette partie nous considérerons que les hypothèses de mise en application d'une méthodologie de type bootstrap sont bien réunies.

Mise en oeuvre. Au-delà de la validité des hypothèses théoriques de réalisation d'un bootstrap, sa mise en oeuvre suppose en amont que les différences conceptuelles et "pratiques" entre TIES ont été neutralisées, notamment les systèmes de nomenclature doivent être les mêmes (pas d'adhérence à des SNA différents), et les TIES doivent être "cylindrés" (cf encadré *Cylindrage*, Section 2). Cela implique au préalable un changement de nomenclature vers un niveau très agrégé, dans lequel tous les TIES sont disponibles.

Dans l'approche inter-TIES non-paramétrique, l'information que l'on obtient sur la distribution des résultats d'empreinte carbone lors des simulations permet d'identifier des intervalles de confiance, par exemple à 5% en retirant les 2,5% des observations qui sont aux queues de la distribution. Pour comparer le positionnement relatif de chaque TIES par rapport à cet intervalle de confiance, on peut placer les résultats d'empreinte de chaque TIES pris individuellement au sein de ces intervalles de confiance. On obtient ainsi un indicateur de confiance pour chaque TIES par rapport au 'consensus des TIES' sélectionnés.

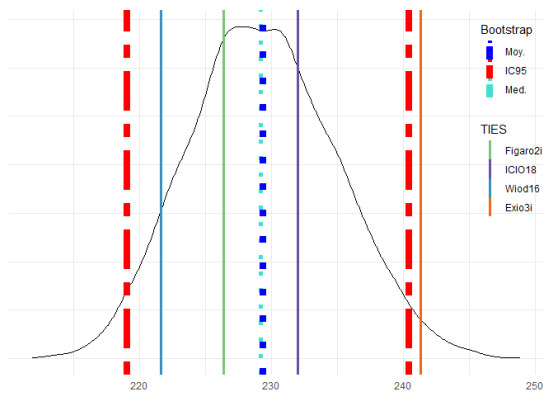
La procédure de bootstrap inter-TIES mobilisée est la suivante :

- Étape 1 : Préparation des données : On sélectionne un ensemble de TIES (par exemple les quatre TIES suivants : Figaro, Wiod, ICIO, Exiobase) qui sont cylindrés (par exemple au niveau A17).
- Étape 2 : À chaque itération du bootstrap, on reconstruit un TIES fictif qui prend pour chaque case des consommations intermédiaires et de la demande finale une valeur aléatoire en niveau pour cette même case au sein des TIES sélectionnés. La production est recalée mécaniquement par équilibre comptable.
- Étape 3 : On réalise un calcul d'empreinte avec ce TIES fictif en utilisant une base d'émissions fixée à l'avance (par exemple celle d'Exiobase 3). Le choix aurait pu être fait de faire varier aussi la base d'émissions. Toutefois, la littérature (notamment Moran and Wood (2014)) considère qu'il est préférable en général de la fixer pour stabiliser le calcul. Une autre variante du bootstrap pourrait aussi être de ne faire varier que les bases d'émissions pour un TIES donné.
- Étape 4 : On dispose de K (par exemple 10.000) calculs d'empreinte dont on peut analyser la distribution et notamment placer les résultats d'empreinte de chaque TIES pris indivi-

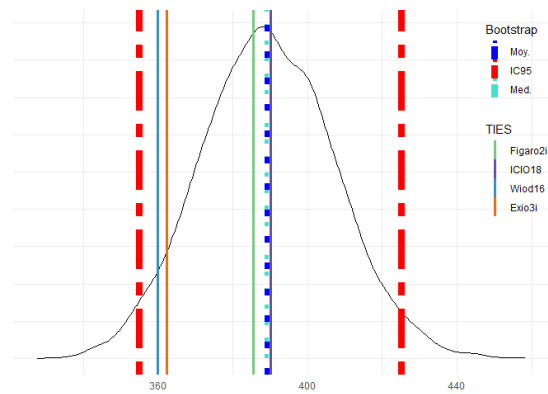
duellement au sein de ces intervalles de confiance. On peut ainsi juger du positionnement des résultats de chaque TIES par rapport à la moyenne et la médiane du consensus formé par l'ensemble des TIES sélectionnés.

I.3 Compléments pour la méthode (1)

GRAPHIQUE I.1 – Bootstrap (1) : Empreintes intérieure et importée de la France



(a) Emissions intérieures de la France (MtCO₂eq)



(b) Emissions importées de la France (MtCO₂eq)

Note : Cette figure présente les résultats de la méthode de bootstrap inter-TIES appliquée à l'empreinte intérieure (à gauche) et à l'empreinte importée (à droite) de la France en 2014.

TABLEAU I.1 – Bootstrap (1) : Positionnement de chaque TIES relativement à la moyenne et intervalles de confiance sur le calcul de l’empreinte par pays

	Inf	Moyenne	Médiane	Sup	Figaro	Icio	Wiod	Exio3
BEL	0.89	1.00	1.00	1.12	0.86	1.07	0.92	1.07
CAN	0.93	1.00	1.00	1.07	1.08	0.97	0.97	0.94
ROW	0.95	1.00	1.00	1.06	0.95	0.88	1.02	0.96
FRA	0.94	1.00	1.00	1.06	0.99	1.01	0.94	0.98
DEU	0.94	1.00	1.00	1.06	0.95	1.04	0.94	1.01
ITA	0.93	1.00	1.00	1.08	0.99	0.98	0.93	1.01
JPN	0.93	1.00	1.00	1.07	1.03	1.02	0.96	0.90
KOR	0.92	1.00	1.00	1.08	1.00	0.99	0.93	0.99
MEX	0.93	1.00	1.00	1.07	1.09	1.01	0.93	0.95
NLD	0.88	1.00	1.00	1.13	0.85	0.99	0.97	1.14
POL	0.95	1.00	1.00	1.06	0.99	1.02	0.95	1.01
ESP	0.94	1.00	1.00	1.06	0.91	1.02	1.00	0.98
GBR	0.95	1.00	1.00	1.05	1.02	0.98	0.99	0.96
USA	0.97	1.00	1.00	1.03	0.98	1.01	0.98	1.00
BRA	0.96	1.00	1.00	1.04	1.02	0.98	0.96	1.00
CHN	0.95	1.00	1.00	1.05	0.99	1.02	0.99	0.98
IND	0.94	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	0.97	1.00
RUS	0.85	1.00	1.00	1.16	0.97	0.98	0.95	1.08
Moy.	0.91	1.00	1.00	1.10	0.98	0.99	0.95	1.01

Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% autour de l’empreinte carbone des pays, selon la méthode de bootstrap inter-TIES et les valeurs des empreintes fournies par les quatre TIES. Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. “Moy.” désigne la moyenne sur l’ensemble des 44 pays. Calculs réalisés pour la France en 2014.

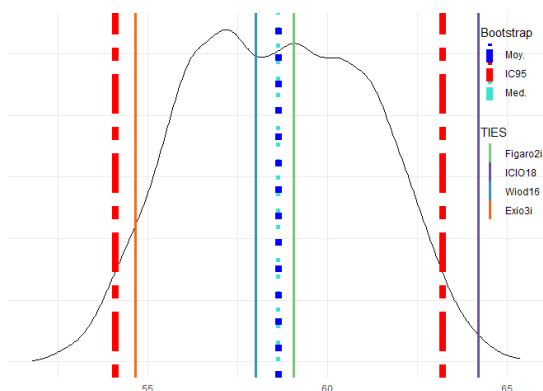
TABLEAU I.2 – Bootstrap (1) : Positionnement de chaque TIES relativement à la moyenne et intervalles de confiance sur le calcul de l’empreinte par pays de provenance

	Inf	Moyenne	Médiane	Sup	Figaro	Icio	Wiod	Exio3
BEL	0.80	1.00	0.99	1.24	0.71	1.00	1.20	1.04
CAN	0.85	1.00	1.00	1.17	1.04	1.01	1.03	0.86
ROW	0.83	1.00	1.00	1.18	0.87	1.00	0.81	0.95
FRA	0.96	1.00	1.00	1.05	0.99	1.01	0.97	1.05
DEU	0.80	1.00	1.00	1.22	0.57	1.05	1.18	1.15
ITA	0.77	1.00	1.00	1.22	0.46	1.19	1.30	1.06
JPN	0.82	1.00	0.99	1.22	1.15	0.86	0.97	0.89
KOR	0.86	1.00	1.00	1.16	1.15	0.98	0.95	0.85
MEX	0.86	1.00	1.00	1.15	0.96	1.04	1.08	0.85
NLD	0.78	1.00	0.99	1.28	0.57	0.89	1.51	0.99
POL	0.81	1.00	1.00	1.18	0.56	1.14	1.24	1.05
ESP	0.79	1.00	1.00	1.21	0.53	1.17	1.11	1.15
GBR	0.79	1.00	0.99	1.25	0.49	1.05	1.07	1.34
USA	0.79	1.00	0.98	1.29	1.40	0.80	0.94	0.83
BRA	0.83	1.00	1.00	1.18	1.07	0.95	1.16	0.78
CHN	0.80	1.00	1.00	1.22	1.30	0.96	0.81	0.88
IND	0.78	1.00	0.99	1.25	1.24	1.03	0.83	0.84
RUS	0.76	1.00	1.00	1.25	1.22	1.14	0.89	0.70
Moy.	0.79	1.00	0.99	1.24	0.90	1.02	1.06	0.97

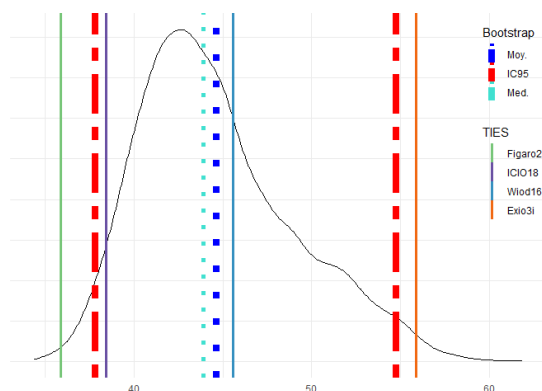
Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% autour de l’empreinte carbone importée par pays de provenance, selon la méthode de bootstrap inter-TIES et les valeurs des empreintes fournies par les quatre TIES. Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. “Moy.” désigne la moyenne sur l’ensemble des 44 pays. Calculs réalisés pour la France en 2014.

GRAPHIQUE I.2 – Bootstrap (1) : Empreinte française intérieure et importée ventilées par branche (A17)

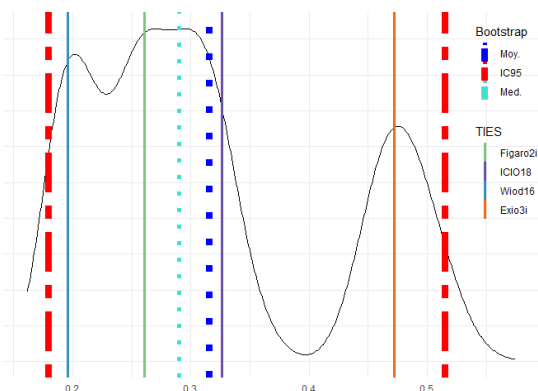
(a) Emissions intérieures de l'agriculture (AZ)



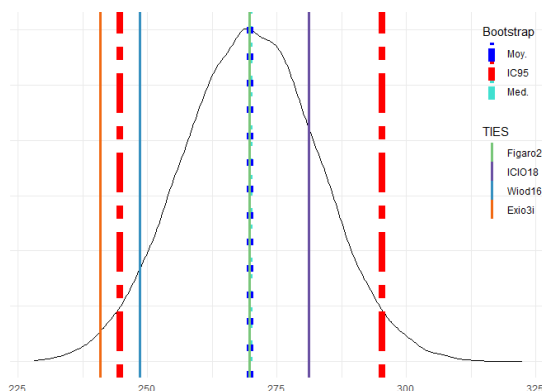
(b) Emissions importées de l'agriculture (AZ)



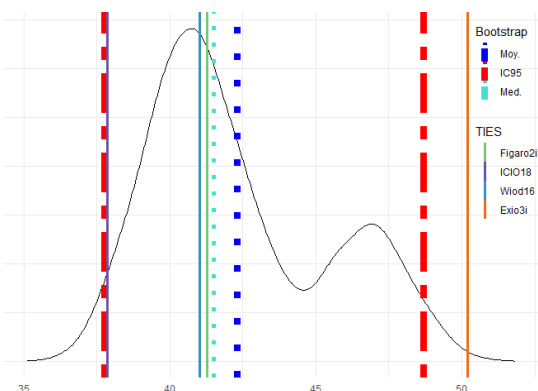
(c) Emissions intérieures de l'énergie (DE)



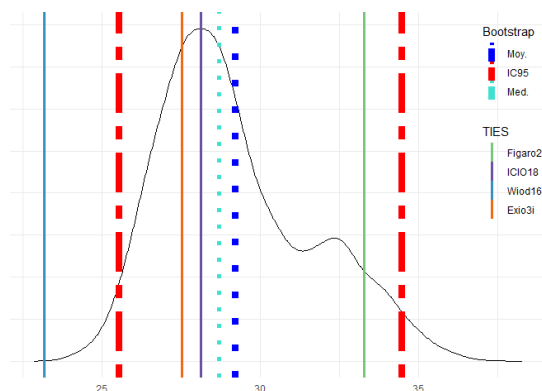
(d) Emissions importées de l'énergie (DE)



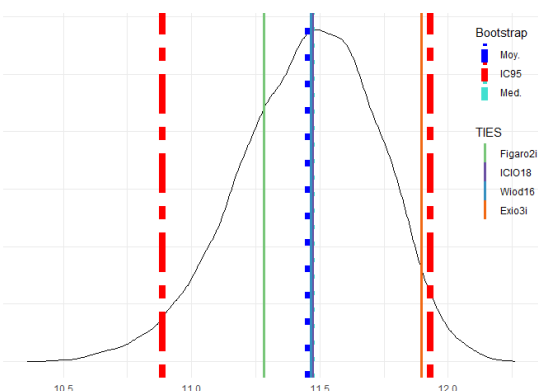
(e) Emissions intérieures du transport (HZ)



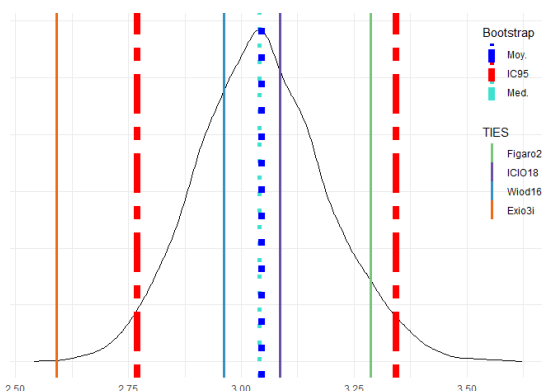
(f) Emissions importées du transport (HZ)



(g) Emissions intérieures activ. sc. et tech. (MN)



(h) Emissions importées activ. sc. et tech. (MN)



Note : En MtCO₂eq. “activ. sc. et tech.” : Activités scientifiques et techniques (MN). 85

TABLEAU I.3 – Bootstrap (1) : Intervalles de confiance sur l’empreinte intérieure par branche d’origine

	Inf	Moyenne	Médiane	Sup	Figaro	Icio	Wiod	Exio3
AZ	0.92	1.00	1.00	1.08	0.98	1.06	0.96	0.91
C1	0.95	1.00	1.00	1.04	0.86	0.90	0.84	0.95
C2	0.94	1.00	1.00	1.05	1.15	1.17	1.10	1.01
C3	0.87	1.00	0.99	1.16	0.87	0.96	0.80	1.10
C4	0.93	1.00	1.00	1.07	0.72	0.70	0.73	0.72
C5	0.53	1.00	0.91	1.67	0.73	1.02	0.40	1.42
DE	0.57	1.00	0.92	1.63	0.68	0.84	0.51	1.22
FZ	0.99	1.00	1.00	1.01	0.94	0.94	0.94	0.92
GZ	0.79	1.00	1.05	1.11	1.27	1.16	1.26	1.21
HZ	0.89	1.00	0.98	1.15	1.13	1.03	1.12	1.37
IZ	0.90	1.00	1.00	1.09	1.08	0.85	1.08	0.80
JZ	0.91	1.00	1.02	1.05	0.90	0.87	0.91	0.92
KZ	0.96	1.00	1.00	1.03	1.09	1.06	1.11	1.13
LZ	0.98	1.00	1.00	1.01	0.81	0.79	0.81	0.80
MN	0.95	1.00	1.00	1.04	1.05	1.06	1.06	1.10
OQ	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	0.93	0.93	0.94
RU	0.94	1.00	1.00	1.06	0.97	0.96	0.99	0.94

Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% autour de la contribution des branches à l’empreinte carbone intérieure de la France, selon la méthode de bootstrap inter-TIES, la médiane, et les valeurs des empreintes fournies par les quatre TIES. Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. Calculs réalisés pour la France en 2014.

TABLEAU I.4 – Bootstrap (1) : Intervalles de confiance sur l’empreinte importée par branche d’origine

	Inf	Moyenne	Médiane	Sup	Figaro	Icio	Wiod	Exio3
AZ	0.85	1.00	0.98	1.23	0.84	0.89	1.05	1.30
C1	1.05	1.00	1.00	0.95	0.84	0.87	0.79	0.93
C2	0.91	1.00	1.00	1.10	0.71	0.81	0.84	0.82
C3	1.22	1.00	0.98	0.82	0.87	0.99	0.78	1.14
C4	1.13	1.00	1.00	0.87	0.75	0.60	0.66	0.54
C5	0.90	1.00	1.00	1.10	1.04	1.00	0.93	1.01
DE	0.91	1.00	1.00	1.09	0.97	1.02	0.89	0.86
FZ	0.77	1.00	0.99	1.29	0.75	0.76	1.13	0.91
GZ	0.88	1.00	1.00	1.14	1.04	1.20	0.83	1.01
HZ	0.87	1.00	0.98	1.18	1.23	1.05	0.86	1.03
IZ	0.74	1.00	0.99	1.31	0.94	1.11	0.36	1.89
JZ	0.85	1.00	0.99	1.19	1.15	1.16	0.97	0.64
KZ	0.87	1.00	1.00	1.15	1.24	1.15	0.87	0.88
LZ	0.84	1.00	1.00	1.19	1.05	1.21	0.78	1.27
MN	0.91	1.00	1.00	1.10	1.10	1.04	1.00	0.87
OQ	0.83	1.00	0.99	1.23	1.45	0.90	0.88	0.68
RU	0.71	1.00	0.98	1.37	0.69	0.75	1.04	1.04

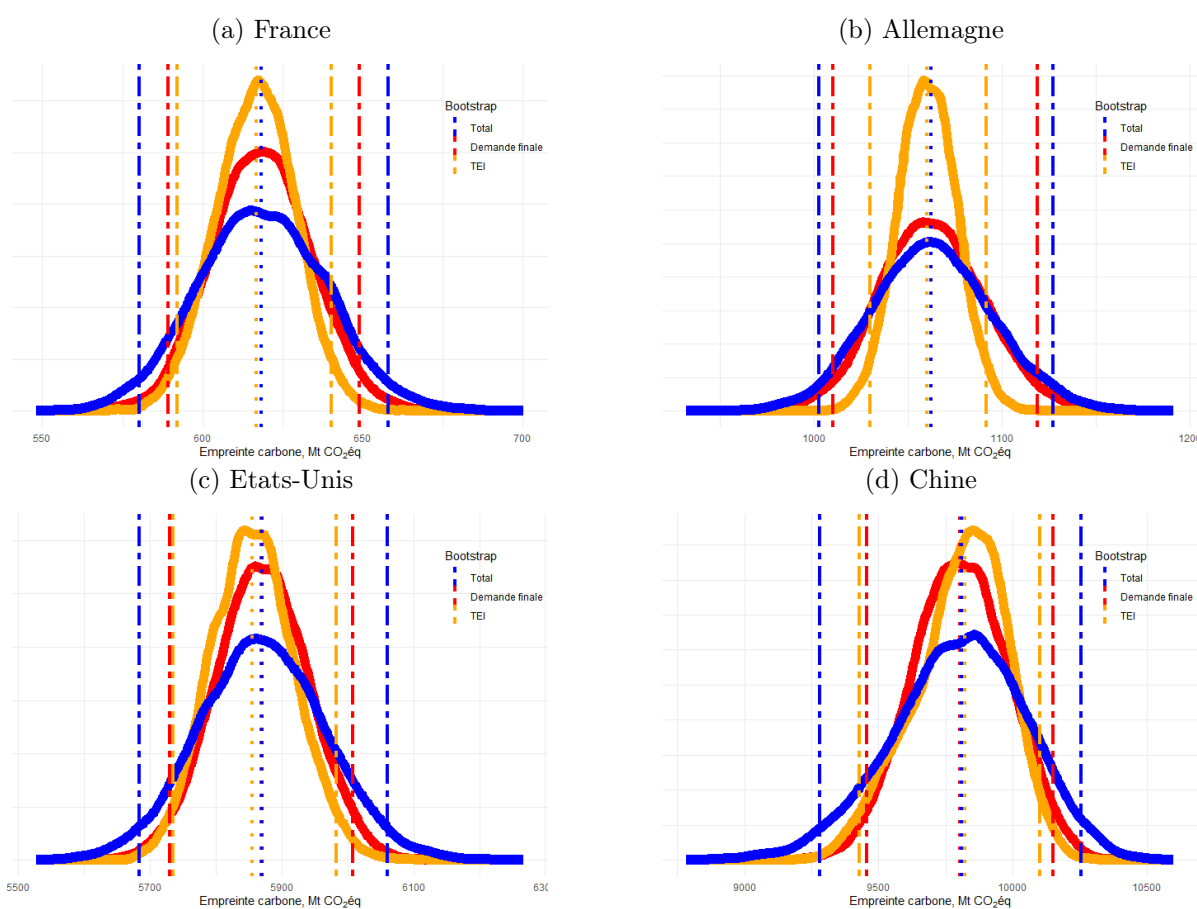
Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% autour de la contribution des branches à l’empreinte carbone importée de la France, selon la méthode de bootstrap inter-TIES, la médiane, et les valeurs des empreintes fournies par les quatre TIES. Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. Calculs réalisés pour la France en 2014.

TABLEAU I.5 – Bootstrap (1) : Contributions des consommations intermédiaires et de la demande finale à l’hétérogénéité des calculs d’empreinte carbone

	Inf	Inf, DF	Inf, TEI	Moyenne	Médiane	Sup, TEI	Sup, DF	Sup
BEL	0.89	0.90	0.95	1.00	1.00	1.04	1.10	1.12
CAN	0.93	0.95	0.96	1.00	1.00	1.04	1.05	1.07
ROW	0.95	0.96	0.97	1.00	1.00	1.03	1.05	1.06
FRA	0.94	0.95	0.96	1.00	1.00	1.03	1.05	1.06
DEU	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00	1.03	1.05	1.06
ITA	0.93	0.95	0.94	1.00	1.00	1.06	1.04	1.08
JPN	0.92	0.96	0.93	1.00	1.00	1.06	1.04	1.07
KOR	0.92	0.95	0.95	1.00	1.00	1.06	1.05	1.08
MEX	0.93	0.94	0.96	1.00	1.00	1.04	1.06	1.07
NLD	0.88	0.90	0.94	1.00	1.00	1.06	1.11	1.13
POL	0.95	0.95	0.97	1.00	1.00	1.03	1.05	1.06
ESP	0.94	0.96	0.96	1.00	1.00	1.03	1.04	1.06
GBR	0.95	0.96	0.97	1.00	1.00	1.02	1.04	1.05
USA	0.97	0.98	0.98	1.00	1.00	1.02	1.02	1.03
BRA	0.96	0.98	0.97	1.00	1.00	1.03	1.02	1.04
CHN	0.95	0.96	0.96	1.00	1.00	1.03	1.04	1.05
IND	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00	1.03	1.04	1.05
RUS	0.85	0.87	0.94	1.00	0.99	1.08	1.14	1.16

Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% des contributions de la demande finale (Inf et Sup, DF) et du Tableau des Entrées Intermédiaires (Inf et Sup, TEI) à l’incertitude inter-TIES (Inf et Sup). Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. Calculs réalisés pour la France en 2014.

GRAPHIQUE I.3 – Bootstrap (1) : Contributions des consommations intermédiaires et de la demande finale à l'hétérogénéité des calculs d'empreinte carbone



Note : Ces graphes présentent les distributions des contributions de la demande finale et du Tableau des Entrées Intermédiaaires au calcul d'empreinte carbone pour la France, l'Allemagne, les Etats-Unis et la Chine après 10.000 tirages selon l'algorithme de bootstrap inter-TIES. Les lignes en pointillés verticales correspondent aux bornes des intervalles de confiance à 95 % des bootstraps représentés de la même couleur.

I.4 Compléments pour la méthode (2)

TABLEAU I.6 – Bootstrap (2) : Positionnement des bornes des intervalles de confiance sur l’empreinte importée par origine, pour le bootstrap inter-TIES et 3 types de Monte-Carlo

	Inf	Inf30	Inf20	Inf10	Moyenne	Médiane	Sup10	Sup20	Sup30	Sup
BEL	0.89	0.93	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12
CAN	0.93	0.92	0.94	0.96	1.00	1.00	1.02	1.06	1.10	1.07
ROW	0.95	0.93	0.96	0.98	1.00	1.00	1.02	1.04	1.06	1.06
FRA	0.94	0.94	0.96	0.97	1.00	1.00	1.02	1.04	1.07	1.07
DEU	0.95	0.93	0.96	0.98	1.00	1.00	1.02	1.04	1.07	1.06
ITA	0.93	0.93	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.04	1.08	1.07
JPN	0.93	0.93	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08	1.07
KOR	0.92	0.92	0.94	0.97	1.00	1.00	1.03	1.06	1.09	1.08
MEX	0.93	0.93	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.05	1.09	1.07
NLD	0.88	0.92	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.05	1.09	1.13
POL	0.95	0.91	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.04	1.06	1.06
ESP	0.94	0.91	0.94	0.97	1.00	1.00	1.02	1.05	1.08	1.06
GBR	0.95	0.94	0.96	0.97	1.00	1.00	1.01	1.04	1.06	1.05
USA	0.97	0.95	0.97	0.98	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.03
BRA	0.96	0.93	0.96	0.98	1.00	1.00	1.02	1.03	1.05	1.04
CHN	0.95	0.93	0.95	0.98	1.00	1.00	1.02	1.04	1.06	1.05
IND	0.94	0.94	0.96	0.98	1.00	1.00	1.02	1.04	1.05	1.05
RUS	0.85	0.92	0.96	0.98	1.00	1.00	1.04	1.06	1.10	1.16

Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% autour de l’empreinte française importée par pays d’origine des émissions, issues du bootstrap paramétrique à 10, 20 et 30% (Inf et Sup, 10/20/30), et du bootstrap inter-TIES (Inf et Sup). Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap inter-TIES. Calculs réalisés pour la France en 2014.

I.5 Compléments pour la méthode (3)

TABLEAU I.7 – Bootstrap (3) : Calcul de l’empreinte par pays en 2014 par bootstrap hybride, inter-TIES, et Monte-Carlo

	Inf, Hyb	Inf, Inter	Inf10	Moyenne	Médiane	Sup10	Sup, Inter	Sup, Hyb
BEL	0.89	0.90	0.97	1.00	1.00	1.02	1.12	1.12
CAN	0.93	0.93	0.97	1.00	1.00	1.02	1.07	1.08
ROW	0.94	0.95	0.98	1.00	1.00	1.02	1.06	1.06
FRA	0.93	0.94	0.97	1.00	1.00	1.02	1.06	1.07
DEU	0.94	0.94	0.97	1.00	1.00	1.02	1.06	1.06
ITA	0.93	0.93	0.97	1.00	1.00	1.02	1.08	1.08
JPN	0.92	0.93	0.97	1.00	1.00	1.02	1.07	1.08
KOR	0.92	0.92	0.97	1.00	1.00	1.02	1.08	1.08
MEX	0.93	0.93	0.97	1.00	1.00	1.02	1.07	1.07
NLD	0.88	0.88	0.97	1.00	1.00	1.02	1.13	1.14
POL	0.94	0.95	0.97	1.00	1.00	1.02	1.06	1.06
ESP	0.94	0.94	0.97	1.00	1.00	1.02	1.06	1.07
GBR	0.95	0.95	0.97	1.00	1.00	1.01	1.05	1.06
USA	0.96	0.97	0.98	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04
BRA	0.96	0.96	0.98	1.00	1.00	1.01	1.04	1.04
CHN	0.94	0.95	0.98	1.00	1.00	1.02	1.05	1.05
IND	0.94	0.94	0.99	1.00	1.00	1.02	1.06	1.06
RUS	0.85	0.85	0.98	1.00	0.99	1.04	1.16	1.17

Note : Cette table présente les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% issues du bootstrap paramétrique à 10% (Inf et Sup, 10), du bootstrap inter-TIES (Inf et Sup, Inter), et du bootstrap hybride (Inf et Sup, Hyb). Toutes ces valeurs sont exprimées par rapport à la moyenne du bootstrap hybride. Calculs réalisés pour la France en 2014.

Liste des documents de travail de la Direction des Études et Synthèses Économiques

ii

G 9001	J. FAYOLLE et M. FLEURBAEY Accumulation, profitabilité et endettement des entreprises	G 9202	J. OLIVEIRA-MARTINS, J. TOUJAS-BERNATE Macro-economic import functions with imperfect competition - An application to the E.C. Trade	G 9311	J. BOURDIEU - B. COLIN-SEDILLOT Les décisions de financement des entreprises françaises : une évaluation empirique des théories de la structure optimale du capital	G 9412	analyse économique des politiques française et allemande J. BOURDIEU - B. CŒURÉ - B. COLIN-SEDILLOT Investissement, incertitude et irréversibilité Quelques développements récents de la théorie de l'investissement
G 9002	H. ROUSSE Détection et effets de la multicolinéarité dans les modèles linéaires ordinaires - Un prolongement de la régression de BELSLEY, KUH et WELSCH	G 9203	I. STAPIC Les échanges internationaux de services de la France dans le cadre des négociations multilatérales du GATT Juin 1992 (1ère version) Novembre 1992 (version finale)	G 9312	L. BLOCH - B. CŒURÉ Q de Tobin marginal et transmission des chocs financiers	G 9413	B. DORMONT - M. PAUCHET L'évaluation de l'élasticité emploi-salaire dépend-elle des structures de qualification ?
G 9003	P. RALLE et J. TOUJAS-BERNATE Indexation des salaires : la rupture de 1983	G 9204	P. SEVESTRE L'économétrie sur données individuelles-temporelles. Une note introductive	G 9313	Équipes Amadeus (INSEE), Banque de France, Métric (DP) Présentation des propriétés des principaux modèles macroéconomiques du Service Public	G 9414	I. KABLA Le Choix de breveter une invention
G 9004	D. GUELLEC et P. RALLE Compétitivité, croissance et innovation de produit	G 9205	H. ERKEL-ROUSSE Le commerce extérieur et l'environnement international dans le modèle AMADEUS (réestimation 1992)	G 9314	B. CREPON - E. DUGUET Research & Development, competition and innovation	G 9501	J. BOURDIEU - B. CŒURÉ - B. SEDILLOT Irreversible Investment and Uncertainty: When is there a Value of Waiting?
G 9005	P. RALLE et J. TOUJAS-BERNATE Les conséquences de la désindexation. Analyse dans une maquette prix-salaires	G 9206	N. GREENAN et D. GUELLEC Coordination within the firm and endogenous growth	G 9315	B. DORMONT Quelle est l'influence du coût du travail sur l'emploi ?	G 9502	L. BLOCH - B. CŒURÉ Imperfections du marché du crédit, investissement des entreprises et cycle économique
G 9101	Équipe AMADEUS Le modèle AMADEUS - Première partie - Présentation générale	G 9207	A. MAGNIER et J. TOUJAS-BERNATE Technology and trade: empirical evidences for the major five industrialized countries	G 9316	D. BLANCHET - C. BROUSSE Deux études sur l'âge de la retraite	G 9503	D. GOUX - E. MAURIN Les transformations de la demande de travail par qualification en France Une étude sur la période 1970-1993
G 9102	J.L. BRILLET Propriétés variantes	G 9208	B. CREPON, E. DUGUET, D. ENCAOUA et P. MOHINEN Cooperative, non cooperative R & D and optimal patent life	G 9317	D. BLANCHET Répartition du travail dans une population hétérogène : deux notes	G 9504	N. GREENAN Technologie, changement organisationnel, qualifications et emploi : une étude empirique sur l'industrie manufacturière
G 9103	D. GUELLEC et P. RALLE Endogenous growth and product innovation	G 9209	B. CREPON et E. DUGUET Research and development, competition and innovation: an application of pseudo maximum likelihood methods to Poisson models with heterogeneity	G 9318	D. EYSSARTIER - N. PONTY AMADEUS - an annual macro-economic model for the medium and long term	G 9505	D. GOUX - E. MAURIN Persistence des hiérarchies sectorielles de salaires: un réexamen sur données françaises
G 9104	H. ROUSSE Le modèle AMADEUS - Troisième partie - Le commerce extérieur et l'environnement international	G 9301	J. TOUJAS-BERNATE Commerce international et concurrence imparfaite : développements récents et implications pour la politique commerciale	G 9319	G. CETTE - Ph. CUNÉO - D. EYSSARTIER - J. GAUTIE Les effets sur l'emploi d'un abaissement du coût du travail des jeunes	G 9505	D. GOUX - E. MAURIN Bis Persistence of inter-industry wages differentials: a reexamination on matched worker-firm panel data
G 9105	H. ROUSSE Effets de demande et d'offre dans les résultats du commerce extérieur manufacturé de la France au cours des deux dernières décennies	G 9302	Ch. CASES Durées de chômage et comportements d'offre de travail : une revue de la littérature	G 9401	D. BLANCHET Les structures par âge importent-elles ?	G 9506	S. JACOBZONE Les liens entre RMI et chômage, une mise en perspective <i>NON PARU</i> - article sorti dans <i>Économie et Prévision</i> n° 122 (1996) - pages 95 à 113
G 9106	B. CREPON Innovation, taille et concentration : causalités et dynamiques	G 9303	H. ERKEL-ROUSSE Union économique et monétaire : le débat économique	G 9402	J. GAUTIE Le chômage des jeunes en France : problème de formation ou phénomène de file d'attente ? Quelques éléments du débat	G 9507	G. CETTE - S. MAHFOUZ Le partage primaire du revenu Constat descriptif sur longue période
G 9107	B. AMABLE et D. GUELLEC Un panorama des théories de la croissance endogène	G 9304	N. GREENAN - D. GUELLEC / G. BROUSSAUDIER - L. MIOTTI Innovation organisationnelle, dynamisme technologique et performances des entreprises	G 9403	P. QUIRON Les déchets en France : éléments statistiques et économiques	G 9601	Banque de France - CEPREMAP - Direction de la Prévision - Érasme - INSEE - OFCE Structures et propriétés de cinq modèles macro-économiques français
G 9108	M. GLAUDE et M. MOUTARDIER Une évaluation du coût direct de l'enfant de 1979 à 1989	G 9305	P. JAILLARD Le traité de Maastricht : présentation juridique et historique	G 9404	D. LADIRAY - M. GRUN-REHOMME Lissage par moyennes mobiles - Le problème des extrémités de série	G 9602	Rapport d'activité de la DESE de l'année 1995
G 9109	P. RALLE et alii France - Allemagne : performances économiques comparées	G 9306	J.L. BRILLET Micro-DMS : présentation et propriétés	G 9405	V. MAILLARD Théorie et pratique de la correction des effets de jours ouvrables	G 9603	J. BOURDIEU - A. DRAZNIEKS L'octroi de crédit aux PME : une analyse à partir d'informations bancaires
G 9110	J.L. BRILLET Micro-DMS	G 9307	J.L. BRILLET Micro-DMS - variantes : les tableaux	G 9406	F. ROSENWALD La décision d'investir	G 9604	A. TOPIOL-BENSAÏD Les implantations japonaises en France
G 9111	A. MAGNIER Effets accélérateur et multiplicateur en France depuis 1970 : quelques résultats empiriques	G 9308	S. JACOBZONE Les grands réseaux publics français dans une perspective européenne	G 9407	S. JACOBZONE Les apports de l'économie industrielle pour définir la stratégie économique de l'hôpital public	G 9605	P. GENIER - S. JACOBZONE Comportements de prévention, consommation d'alcool et tabagie : peut-on parler d'une gestion globale du capital santé ? <i>Une modélisation microéconométrique empirique</i>
G 9112	B. CREPON et G. DUPEAU Investissement en recherche-développement : analyse de causalités dans un modèle d'accélérateur généralisé	G 9309	L. BLOCH - B. CŒURÉ Profitabilité de l'investissement productif et transmission des chocs financiers	G 9408	B. BLOCH, J. BOURDIEU, B. COLIN-SEDILLOT, G. LONGUEVILLE Du défaut de paiement au dépôt de bilan : les banquiers face aux PME en difficulté	G 9606	C. DOZ - F. LENGART Factor analysis and unobserved component models: an application to the study of French business surveys
G 9113	J.L. BRILLET, H. ERKEL-ROUSSE, J. TOUJAS-BERNATE "France-Allemagne Couplées" - Deux économies vues par une maquette macro-économétrique	G 9310	W.J. ADAMS, B. CREPON, D. ENCAOUA Choix technologiques et stratégies de dissuasion d'entrée	G 9409	D. EYSSARTIER, P. MAIRE Impacts macro-économiques de mesures d'aide au logement - quelques éléments d'évaluation		

G 9607	N. GREENAN - D. GUELLEC La théorie coopérative de la firme	G 9713	Bilan des activités de la Direction des Études et Synthèses Économiques - 1996	G 9806	J. ACCARDO - M. JLASSI La productivité globale des facteurs entre 1975 et 1996	G 9912	B. SALANIÉ Une maquette analytique de long terme du marché du travail
G 9608	N. GREENAN - D. GUELLEC Technological innovation and employment reallocation	G 9714	F. LEQUILLER Does the French Consumer Price Index Overstate Inflation?	G 9807	Bilan des activités de la Direction des Études et Synthèses Économiques - 1997	G 9912 Bis	Ch. GIANELLA Une estimation de l'élasticité de l'emploi peu qualifié à son coût
G 9609	Ph. COUR - F. RUPPRECHT L'intégration asymétrique au sein du continent américain : un essai de modélisation	G 9715	X. BONNET Peut-on mettre en évidence les rigidités à la baisse des salaires nominaux ?	G 9808	A. MOUROUGANE Can a Conservative Governor Conduct an Accommodative Monetary Policy?	G 9913	Division « Redistribution et Politiques Sociales » Le modèle de microsimulation dynamique DESTINIE
G 9610	S. DUCHENE - G. FORGEOT - A. JACQUOT Analyse des évolutions récentes de la productivité apparente du travail	G 9716	N. IUNG - F. RUPPRECHT Productivité de la recherche et rendements d'échelle dans le secteur pharmaceutique français	G 9809	X. BONNET - E. DUBOIS - L. FAUVET Asymmetrie des inflations relatives et menus costs : tests sur l'inflation française	G 9914	E. DUGUET Macro-commandes SAS pour l'économétrie des panels et des variables qualitatives
G 9611	X. BONNET - S. MAHFOUZ The influence of different specifications of wages-prices spirals on the measure of the NAIRU: the case of France	G 9717	E. DUGUET - I. KABLA Appropriation strategy and the motivations to use the patent system in France - An econometric analysis at the firm level	G 9810	E. DUGUET - N. IUNG Sales and Advertising with Spillovers at the firm level: Estimation of a Dynamic Structural Model on Panel Data	G 9915	R. DUHAUTOIS Évolution des flux d'emplois en France entre 1990 et 1996 : une étude empirique à partir du fichier des bénéficiaires réels normaux (BRN)
G 9612	Ph. COUR - E. DUBOIS, S. MAHFOUZ, J. PISANI-FERRY The cost of fiscal retrenchment revisited: how strong is the evidence?	G 9718	L.P. PELÉ - P. RALLE Âge de la retraite : les aspects incitatifs du régime général	G 9811	J.P. BERTHIER Congestion urbaine : un modèle de trafic de pointe à courbe débit-vitesse et demande élastique	G 9916	J.Y. FOURNIER Extraction du cycle des affaires : la méthode de Baxter et King
G 9613	A. JACQUOT Les flexions des taux d'activité sont-elles seulement conjoncturelles ?	G 9719	ZHANG Yingxiang - SONG Xueqing Lexique macroéconomique français-chinois, chinois-français	G 9812	C. PRIGENT La part des salaires dans la valeur ajoutée : une approche macroéconomique	G 9917	B. CRÉPON - R. DESPLATZ - J. MAIRESSE Estimating price cost margins, scale economies and workers' bargaining power at the firm level
G 9614	ZHANG Yingxiang - SONG Xueqing Lexique macroéconomique Français-Chinois	G 9720	M. HOUEBINE - J.L. SCHNEIDER Mesurer l'influence de la fiscalité sur la localisation des entreprises	G 9813	A.Th. AERTS L'évolution de la part des salaires dans la valeur ajoutée en France reflète-t-elle les évolutions individuelles sur la période 1979-1994 ?	G 9918	Ch. GIANELLA - Ph. LAGARDE Productivity of hours in the aggregate production function: an evaluation on a panel of French firms from the manufacturing sector
G 9701	J.L. SCHNEIDER La taxe professionnelle : éléments de cadrage économique	G 9721	A. MOUROUGANE Crédibilité, indépendance et politique monétaire Une revue de la littérature	G 9814	B. SALANIÉ Guide pratique des séries non-stationnaires	G 9919	S. AUDRIC - P. GIVORD - C. PROST Évolution de l'emploi et des coûts par qualification entre 1982 et 1996
G 9702	J.L. SCHNEIDER Transition et stabilité politique d'un système redistributif	G 9722	P. AUGERAUD - L. BRIOT Les données comptables d'entreprises Le système intermédiaire d'entreprises Passage des données individuelles aux données sectorielles	G 9901	S. DUCHÈNE - A. JACQUOT Une croissance plus riche en emplois depuis le début de la décennie ? Une analyse en comparaison internationale	G 2000/01	R. MAHIEU Les déterminants des dépenses de santé : une approche macroéconomique
G 9703	D. GOUX - E. MAURIN Train or Pay: Does it Reduce Inequalities to Encourage Firms to Train their Workers?	G 9723	P. AUGERAUD - J.E. CHAPRON Using Business Accounts for Compiling National Accounts: the French Experience	G 9902	Ch. COLIN Modélisation des carrières dans Destinie	G 2000/02	C. ALLARD-PRIGENT - H. GUILMEAU - A. QUINET The real exchange rate as the relative price of nontrables in terms of tradables: theoretical investigation and empirical study on French data
G 9704	P. GENIER Deux contributions sur dépendance et équité	G 9724	P. AUGERAUD Les comptes d'entreprise par activités - Le passage aux comptes - De la comptabilité d'entreprise à la comptabilité nationale - A paraître	G 9904	B. CREPON - N. IUNG Innovation, emploi et performances	G 2000/03	J.-Y. FOURNIER L'approximation du filtre passe-bande proposée par Christiano et Fitzgerald
G 9705	R & D Investment, Patent Life and Patent Value An Econometric Analysis at the Firm Level	G 9801	H. MICHAUDON - C. PRIGENT Présentation du modèle AMADEUS	G 9905	B. CREPON - Ch. GIANELLA Wages inequalities in France 1969-1992 An application of quantile regression techniques	G 2000/04	Bilan des activités de la DESE - 1999
G 9706	M. HOUEBINE - A. TOPIOL-BENSAÏD Les entreprises internationales en France : une analyse à partir de données individuelles	G 9802	J. ACCARDO Une étude de comptabilité générationnelle pour la France en 1996	G 9906	C. BONNET - R. MAHIEU Microsimulation techniques applied to inter-generational transfers - Pensions in a dynamic framework: the case of France	G 2000/05	B. CREPON - F. ROSENWALD Investissement et contraintes de financement : le poids du cycle
G 9707	M. HOUEBINE Polarisation des activités et spécialisation des départements en France	G 9803	X. BONNET - S. DUCHÈNE Apports et limites de la modélisation « Real Business Cycles »	G 9907	F. ROSENWALD L'impact des contraintes financières dans la décision d'investissement	G 2000/06	A. FLIPO Les comportements matrimoniaux de fait
G 9708	E. DUGUET - N. GREENAN Le biais technologique : une analyse sur données individuelles	G 9804	C. BARLET - C. DUGUET - D. ENCAOUA - J. PRADEL The Commercial Success of Innovations An econometric analysis at the firm level in French manufacturing	G 9908	Bilan des activités de la DESE - 1998	G 2000/07	R. MAHIEU - B. SÉDILLOT Microsimulations of the retirement decision: a supply side approach
G 9709	J.L. BRILLET Analyzing a small French ECM Model	G 9805	P. CAHUC - Ch. GIANELLA - D. GOUX - A. ZILBERBERG Equalizing Wage Differences and Bargaining Power - Evidence from a Panel of French Firms	G 9910	Ch. COLIN - F. LEGROS - R. MAHIEU Bilans contributifs comparés des régimes de retraite du secteur privé et de la fonction publique	G 2000/08	C. AUDENIS - C. PROST Déficit conjoncturel : une prise en compte des conjonctures passées
G 9710	J.L. BRILLET Formalizing the transition process: scenarios for capital accumulation			G 9911	G. LAROQUE - B. SALANIÉ Une décomposition du non-emploi en France	G 2000/09	R. MAHIEU - B. SÉDILLOT Équivalent patrimonial de la rente et souscription de retraite complémentaire
G 9711	G. FORGEOT - J. GAUTIÉ Insertion professionnelle des jeunes et processus de déclassement					G 2000/10	R. DUHAUTOIS Ralentissement de l'investissement : petites ou grandes entreprises ? industrie ou tertiaire ?

G 2000/11	G. LAROQUE - B. SALANIÉ Temps partiel féminin et incitations financières à l'emploi	revenus : le cas du "Panel européen des ménages »	G2001/16	J.-Y. FOURNIER - P. GIVORD La réduction des taux d'activité aux âges extrêmes, une spécificité française ?	dans le système de retraite des salariés du privé - Une approche par microsimulation	G2004/04	A. NABOULET - S. RASPILLER Les déterminants de la décision d'investir : une approche par les perceptions subjectives des firmes
G2000/12	Ch. GIANELLA Local unemployment and wages		G2001/17	C. AUDENIS - P. BISCOURP - N. RIEDINGER Existe-t-il une asymétrie dans la transmission du prix du brut aux prix des carburants ?	- Intragenerational distributional analysis in the french private sector pension scheme - A microsimulation approach	G2004/05	N. RAGACHE La déclaration des enfants par les couples non mariés est-elle fiscalement optimale ?
G2000/13	B. CREPON - Th. HECKEL - Informatisation en France : une évaluation à partir de données individuelles - Computerization in France: an evaluation based on individual company data		G2002/01	F. MAGNIEN - J.-L. TAVERNIER - D. THESMAR Les statistiques internationales de PIB par habitant en standard de pouvoir d'achat : une analyse des résultats	Offre de travail féminine et garde des jeunes enfants	G2004/06	M. DUÉE L'impact du chômage des parents sur le devenir scolaire des enfants
G2001/01	F. LEQUILLER - La nouvelle économie et la mesure de la croissance du PIB - The new economy and the measurement of GDP growth		G2002/02	B. SÉDILLOT - E. WALRAET La cessation d'activité au sein des couples : y a-t-il interdépendance des choix ?	F. MAUREL - S. GREGOIR Les indices de compétitivité des pays : interprétation et limites	G2004/07	P. AUBERT - E. CAROLI - M. ROGER New Technologies, Workplace Organisation and the Age Structure of the Workforce: Firm-Level Evidence
G2001/02	S. AUDRIC La reprise de la croissance de l'emploi profite-t-elle aussi aux non-diplômés ?		G2002/03	G. BRILHAULT - Répartition des séries de FBCF et calcul du capital fixe en SEC-95 dans les comptes nationaux français - Retropolation of the investment series (GFCF) and estimation of fixed capital stocks on the ESA-95 basis for the French balance sheets	N. RIEDINGER - E. HAUUVY Le coût de dépollution atmosphérique pour les entreprises françaises : Une estimation à partir de données individuelles	G2004/08	E. DUGUET - C. LELARGE Les brevets accroissent-ils les incitations privées à innover ? Un examen microéconométrique
G2001/03	I. BRAUN-LEMAIRE Évolution et répartition du surplus de productivité		G2002/04	P. BISCOURP - B. CRÉPON - T. HECKEL - N. RIEDINGER How do firms respond to cheaper computers? A microeconomic evidence for France based on a production function approach	P. BISCOURP et F. KRAMARZ Création d'emplois, destruction d'emplois et internationalisation des entreprises industrielles françaises : une analyse sur la période 1986-1992	G2004/09	S. RASPILLER - P. SILLARD Affiliating versus Subcontracting: the Case of Multinationals
G2001/04	A. BEAUDU - Th. HECKEL Le canal du crédit fonctionne-t-il en Europe ? Une étude de l'hétérogénéité des comportements d'investissement à partir de données de bilan agrégées		G2002/05	C. AUDENIS - J. DEROYON - N. FOURCADE L'impact des nouvelles technologies de l'information et de la communication sur l'économie française - un bouclage macro-économique	Bilan des activités de la DESE - 2002	G2004/10	J. BOISSINOT - C. L'ANGEVIN - B. MONFORT Public Debt Sustainability: Some Results on the French Case
G2001/05	C. AUDENIS - P. BISCOURP - N. FOURCADE - O. LOISEL Testing the augmented Solow growth model: An empirical reassessment using panel data		G2002/06	R. MAHIEU - B. SÉDILLOT Départ à la retraite, irréversibilité et incertitude	P. -O. BEFFY - J. DEROYON - N. FOURCADE - S. GREGOIR - N. LAÏB - B. MONFORT Évolutions démographiques et croissance : une projection macro-économique à l'horizon 2020	G2004/11	S. ANANIAN - P. AUBERT Travailleurs âgés, nouvelles technologies et changements organisationnels : un réexamen à partir de l'enquête « REPONSE »
G2001/06	R. MAHIEU - B. SÉDILLOT Bilan des activités de la DESE - 2000		G2003/05	C. AUDENIS - J. DEROYON - N. FOURCADE L'impact des nouvelles technologies de l'information et de la communication sur l'économie française - un bouclage macro-économique	P. AUBERT La situation des salariés de plus de cinquante ans dans le secteur privé	G2004/12	X. BONNET - H. PONCET Structures de revenus et propensions différentes à consommer - Vers une équation de consommation des ménages plus robuste en prévision pour la France
G2001/07	J. Ph. GAUDEMET Les dispositifs d'acquisition à titre facultatif d'annuités viagères de retraite		G2003/06	J.-P. BERTHIER Réflexions sur les différentes notions de volume d'une année fixe ou aux prix de l'année précédente, séries chahées	P. AUBERT - B. CRÉPON Age, salaire et productivité	G2004/13	C. PICART Évaluer la rentabilité des sociétés non financières
G2001/08	B. CRÉPON - Ch. GIANELLA Fiscalité, coût d'usage du capital et demande de facteurs : une analyse sur données individuelles		G2003/07	F. HILD Les soldes d'opinion résumant-ils au mieux les réponses des entreprises aux enquêtes de conjoncture ?	H. BARON - P. O. BEFFY - N. FOURCADE - R. MAHIEU Le ralentissement de la productivité du travail au cours des années 1990	G2004/14	J. BARDAJ - B. SÉDILLOT - E. WALRAET Les retraites du secteur public : projections à l'horizon 2040 à l'aide du modèle de microsimulation DESTINIE
G2001/09	J.-Y. FOURNIER Comparaison des salaires des secteurs public et privé		G2003/08	I. ROBERT-BOBÉE Les comportements démographiques dans le modèle de microsimulation Destinie - Une comparaison des estimations issues des enquêtes Jeunes et Carrières 1997 et Histoire Familiale 1999	P. -O. BEFFY - B. MONFORT Patrimoine des ménages, dynamique d'allocation et comportement de consommation	G2005/01	S. BUFFETEAU - P. GODEFROY Conditions de départ en retraite selon l'âge de fin d'études : analyse prospective pour les générations 1945 à 1974
G2001/10	R. CREPON - R. DESPLATZ Évaluation des effets des dispositifs d'allègements de charges sociales sur les bas salaires		G2003/09	J.-P. ZOYEM La dynamique des bas revenus : une analyse des entrées-sorties de pauvreté	P. BISCOURP - N. FOURCADE Peut-on mettre en évidence l'existence de rigidités à la baisse des salaires à partir de données individuelles ? Le cas de la France à la fin des années 90	G2005/02	C. AFSA - S. BUFFETEAU L'évolution de l'activité féminine en France : une approche par pseudo-panel
G2001/11	J.-Y. FOURNIER Comparaison des salaires des secteurs public et privé		G2003/10	M. LECLAIR - P. PETIT Présence syndicale dans les firmes : quel impact sur les inégalités salariales entre les hommes et les femmes ?	M. LECLAIR - P. PETIT Présence syndicale dans les firmes : quel impact sur les inégalités salariales entre les hommes et les femmes ?	G2005/03	P. AUBERT - P. SILLARD Délocalisations et réductions d'effectifs dans l'industrie française
G2001/12	R.-P. BERTHIER - C. JAULENT R. CONVENEVOLE - S. PISANI Une méthodologie de comparaison entre consommations intermédiaires de source fiscale et de comptabilité nationale		G2003/11	F. HILD Prévisions d'inflation pour la France	P. -O. BEFFY - X. BONNET - M. DARRACQ-PARIES - B. MONFORT MZE: a small macro-model for the euro area	G2005/04	M. LECLAIR - S. ROUX Mesure et utilisation des emplois instables dans les entreprises
G2001/13	P. BISCOURP - Ch. GIANELLA Substitution and complementarity between capital, skilled and less skilled workers: an analysis at the firm level in the French manufacturing industry		G2004/01	J.-P. ZOYEM La dynamique des bas revenus : une analyse des entrées-sorties de pauvreté	P. AUBERT - M. LECLAIR La compétitivité exprimée dans les enquêtes trimestrielles sur la situation et les perspectives dans l'industrie	G2005/05	C. L'ANGEVIN - S. SERRAVALLE Performances à l'exportation de la France et de l'Allemagne - Une analyse par secteur et destination géographique
G2001/14	I. ROBERT-BOBÉE Modelling demographic behaviours in the French microsimulation model Destinie: An analysis of future change in completed fertility		G2004/02	M. LECLAIR Réduction du temps de travail et tensions sur les facteurs de production	M. DUÉE - C. REBILLARD La dépendance des personnes âgées : une projection à long terme	G2005/06	Bilan des activités de la Direction des Études et Synthèses Économiques - 2004
G2001/15	J.-P. ZOYEM Diagnostic sur la pauvreté et calendrier de		G2004/03	E. WALRAET - A. VINCENT - Analyse de la redistribution intragénérationnelle	S. RASPILLER - N. RIEDINGER Régulation environnementale et choix de localisation des groupes français	G2005/07	S. RASPILLER La concurrence fiscale : principaux enseignements de l'analyse économique

G2005/08	C. L'ANGEVIN - N. LAÏB Éducation et croissance en France et dans un panel de 21 pays de l'OCDE	G2006/09	X. BOUTIN - S. QUANTIN Une méthodologie d'évaluation comptable du coût du capital des entreprises françaises : 1984-2002	G2008/01	C. PICART Les PME françaises : rentables mais peu dynamiques	G2009/06	L. DAVEZIES - X. D'HAULTFOEUILLE Faut-il pondérer ? ... Ou l'éternelle question de l'économètre confronté à des données d'enquête
G2005/09	N. FERRARI Prévoir l'investissement des entreprises Un indicateur des révisions dans l'enquête de conjoncture sur les investissements dans l'industrie.	G2006/10	C. AFSA L'estimation d'un coût implicite de la pénibilité du travail chez les travailleurs âgés	G2008/02	P. BISCOURP - X. BOUTIN - T. VERGÉ The Effects of Retail Regulations on Prices Evidence from the Loi Galland	G2009/07	S. QUANTIN - S. RASPILLER - S. SERRAVALLE Commerce intragroupe, fiscalité et prix de transferts : une analyse sur données françaises
G2005/10	P.-O. BEFFY - C. L'ANGEVIN Chômage et boucle prix-salaires : apport d'un modèle « qualifiés/peu qualifiés »	G2006/11	C. LELARGE Les entreprises (industrielles) françaises sont-elles à la frontière technologique ?	G2008/03	Y. BARBESOL - A. BRIANT Economies d'agglomération et productivité des entreprises : estimation sur données individuelles françaises	G2009/08	M. CLERC - V. MARCUS Elasticités-prix des consommations énergétiques des ménages
G2005/11	B. HEITZ A two-states Markov-switching model of inflation in France and the USA: credible target VS inflation spiral	G2006/12	O. BIAU - N. FERRARI Théorie de l'opinion Faut-il pondérer les réponses individuelles ?	G2008/04	O. BLANCHET - F. LE GALLO Des projections démographiques : principaux mécanismes et retour sur l'expérience française	G2009/09	G. LALANNE - E. POULIQUEN - O. SIMON Prix du pétrole et croissance potentielle à long terme
G2005/12	O. BIAU - H. ERKEL-ROUSSE - N. FERRARI Réponses individuelles aux enquêtes de conjoncture et prévision macroéconomiques : Exemple de la prévision de la production manufacturière	G2006/13	A. KOUBI - S. ROUX Une réinterprétation de la relation entre productivité et inégalités salariales dans les entreprises	G2008/05	D. BLANCHET - F. TOUTLEMONDE Évolutions démographiques et déformation du cycle de vie active : quelles relations ?	G2009/10	D. BLANCHET - J. LE CACHEUX - V. MARCUS Adjusted net savings and other approaches to sustainability: some theoretical background
G2005/13	P. AUBERT - D. BLANCHET - D. BLAU The labour market after age 50: some elements of a Franco-American comparison	G2006/14	R. RATHELOT - P. SILLARD The impact of local taxes on plants location decision	G2008/06	M. BARLET - D. BLANCHET - L. CRUSSON Internationalisation et flux d'emplois : que dit une approche comptable ?	G2009/11	V. BELLAMY - G. CONSALES - M. FESSEAU - S. LE LADIER - É. RAYNAUD Une décomposition du compte des ménages de la comptabilité nationale par catégorie de ménage en 2003
G2005/14	D. BLANCHET - T. DEBRAND - P. DOURGNON - P. POLLET L'enquête SHARE : présentation et premiers résultats de l'édition française	G2006/15	L. GONZALEZ - C. PICART Diversification, recentrage et poids des activités de support dans les groupes (1993-2000)	G2008/07	C. LELARGE - D. SRAER - D. THESMAR Entrepreneurship and Credit Constraints - Evidence from a French Loan Guarantee Program	G2009/12	J. BARDAJ - F. TALLET Detecting Economic Regimes in France: a Qualitative Markov-Switching Indicator Using Mixed Frequency Data
G2005/15	M. DUJEE La modélisation des comportements démographiques dans le modèle de microsimulation DESTINIE	G2007/01	D. SRAER Allègements de cotisations patronales et dynamique salariale	G2008/08	X. BOUTIN - L. JANIN Are Prices Really Affected by Mergers?	G2009/13	R. AEBERHARDT - D. FOUGERE - R. RATHELOT Discrimination à l'embauche : comment exploiter les procédures de testing?
G2005/16	H. RAJUI - S. ROUX Étude de simulation sur la participation versée aux salariés par les entreprises	G2007/02	V. ALBOUY - L. LEQUIEN Les rendements non monétaires de l'éducation : le cas de la santé	G2008/09	M. BARLET - A. BRIANT - L. CRUSSON Concentration géographique dans l'industrie manufacturière et dans les services en France : une approche par un indicateur en continu	G2009/14	Y. BARBESOL - P. GIVORD - S. QUANTIN Partage de la valeur ajoutée, approche par données microéconomiques
G2006/01	C. BONNET - S. BUFFETEAU - P. GODEFROY Disparités de retraite de droit direct entre hommes et femmes : quelles évolutions ?	G2007/03	D. BLANCHET - T. DEBRAND Aspiration à la retraite, santé et satisfaction au travail : une comparaison européenne	G2008/10	M. BEFFY - É. COUDIN - R. RATHELOT Who is confronted to insecure labor market labor market transition	G2009/15	I. BUONO - G. LALANNE The Effect of the Uruguay round on the Intensive and Extensive Margins of Trade
G2006/02	C. PICART Les gazelles en France	G2007/04	M. BARLET - L. CRUSSON Quel impact des variations du prix du pétrole sur la croissance française ?	G2008/11	M. ROGER - E. WALRAET Social Security and Well-Being of the Elderly: the Case of France	G2010/01	C. MINODIER Avantages comparés des séries des premières valeurs publiées et des séries des valeurs révisées - Un exercice de prévision en temps réel
G2006/03	P. AUBERT - B. CRÉPON - P. ZAMORA Le rendement apparent de la formation continue dans les entreprises : effets sur la productivité et les salaires	G2007/05	C. PICART Flux d'emploi et de main-d'œuvre en France : un réexamen	G2008/12	C. AFSA Analyser les composantes du bien-être et de son évolution	G2010/02	V. ALBOUY - L. DAVEZIES - T. DEBRAND Health Expenditure Models: a Comparison of Five Specifications using Panel Data
G2006/04	J.-F. OUVARD - R. RATHELOT Demographic change and unemployment: what do macroeconomic models predict?	G2007/06	V. ALBOUY - C. TAVAN Massification et démocratisation de l'enseignement supérieur en France	G2008/13	M. BARLET - D. BLANCHET - T. LE BARBANCHON Microsimuler le marché du travail : un prototype	G2010/03	C. KLEIN - O. SIMON Le modèle MÉSANGE réestimé en base 2000
G2006/05	D. BLANCHET - J.-F. OUVARD Indicateurs d'engagements implicites des systèmes de retraite : chiffrages, propriétés analytiques et réactions à des chocs démographiques types	G2007/07	T. LE BARBANCHON The Changing response to oil price shocks in France: a DSGE type approach	G2009/01	P.-A. PIONNIER Le partage de la valeur ajoutée en France, 1949-2007	G2010/04	M.-É. CLERC - É. COUDIN L'IPC, miroir de l'évolution du coût de la vie en France ? Ce qu'apporte l'analyse des courbes d'Engel
G2006/06	G. BIAU - O. BIAU - L. ROUVIERE Nonparametric Forecasting of the Manufacturing Output Growth with Firm-level Survey Data	G2007/08	T. CHANEY - D. SRAER - D. THESMAR Collateral Value and Corporate Investment Evidence from the French Real Estate Market	G2009/02	Laurent CLAVEL - Christelle MINODIER A Monthly Indicator of the French Business Climate	G2010/05	N. CECRENAUD - P.-A. CHEVALLIER Les seuils de 10, 20 et 50 salariés : impact sur la taille des entreprises françaises
G2006/07	C. AFSA - P. GIVORD Le rôle des conditions de travail dans les absences pour maladie	G2007/09	J. BOISSINOT Consumption over the Life Cycle: Facts for France	G2009/03	H. ERKEL-ROUSSE - C. MINODIER Do Business Tendency Surveys in Industry and Services Help in Forecasting GDP Growth? A Real-Time Analysis on French Data	G2010/06	R. AEBERHARDT - J. POUGET Hierarchical Positions - Evidence on French Full-Time Male Workers from a matched Employer-Employee Dataset
G2006/08	P. SILLARD - C. L'ANGEVIN - S. SERRAVALLE Performances comparées à l'exportation de la France et de ses principaux partenaires Une analyse structurelle sur 12 ans	G2007/11	R. RATHELOT - P. SILLARD Zones Franches Urbaines : quels effets sur l'emploi salarié et les créations d'établissements ?	G2009/04	P. GIVORD - L. WILNER Les contrats temporaires : trappe ou marchepied vers l'emploi stable ?		
		G2007/12	V. ALBOUY - B. CRÉPON Aléa moral en santé : une évaluation dans le cadre du modèle causal de Rubin	G2009/05	G. LALANNE - P.-A. PIONNIER - O. SIMON Le partage des fruits de la croissance de 1950 à 2008 : une approche par les comptes de surplus		

G2010/07	S. BLASCO - P. GIVORD Les trajectoires professionnelles en début de vie active : quel impact des contrats temporaires ?	G2011/06	L'impact des perturbations financières de 2007 et 2008 sur la croissance de sept pays industrialisés	G2013/09	J.-B. BERNARD - G. CLÉAUD Oil price: the nature of the shocks and the impact on the French economy
G2010/08	Méthodes économétriques pour l'évaluation de politiques publiques	G2011/07	P. CHARNOZ - É. COUDIN - M. GAINI Wage inequalities in France 1976-2004: a quantile regression analysis	G2013/10	G. LAME Was there a « Greenspan Conundrum » in the Euro area?
G2010/09	P.-Y. CABANNES - V. LAPÈGUE - E. POULIQUEN - M. BEFFY - M. GAINI Quelle croissance de moyen terme après la crise ?	G2011/08	M. CLERC - M. GAINI - D. BLANCHET Recommendations of the Stiglitz-Sen-Fitoussi Report: A few illustrations	G2013/11	P. CHONÉ - F. EVAÏN - L. WILNER - E. YILMAZ Introducing activity-based payment in the hospital industry: Evidence from French data
G2010/10	I. BUONO - G. LALANNE La réaction des entreprises françaises à la baisse des tarifs douaniers étrangers	G2011/09	M. BACHELET - M. BEFFY - D. BLANCHET Projeter l'impact des réformes des retraites sur l'activité des 55 ans et plus : une comparaison de trois modèles	G2013/12	C. GRISLAIN-LETREMY Natural Disasters: Exposure and Underinsurance
G2010/11	R. RATHÉLOT - P. SILLARD L'apport des méthodes à noyaux pour mesurer la concentration géographique - Application à la concentration des immigrés en France de 1968 à 1999	G2011/10	C. LOUVOT-RUNAVOT L'évaluation de l'activité dissimulée des entreprises sur la base des contrôles fiscaux et son insertion dans les comptes nationaux	G2013/13	P.-Y. CABANNES - V. COTTET - Y. DUBOIS - C. LELARGE - M. SICISIC French Firms in the Face of the 2008/2009 Crisis
G2010/12	M. BARATON - M. BEFFY - D. FOUGÈRE Une évaluation de l'effet de la réforme de 2003 sur les départs en retraite - Le cas des enseignants du second degré public	G2011/11	A. SCHREIBER - A. VICARD La tertiarisation de l'économie française et le ralentissement de la productivité entre 1978 et 2008	G2013/14	A. POISSONNIER - D. ROY Household Satellite Account for France in 2010. Methodological issues on the assessment of domestic production
G2010/13	D. BLANCHET - S. BUFFETEAU - E. CRENNER S. LE MINEZ Le modèle de microsimulation Destinie 2 : principales caractéristiques et premiers résultats	G2011/12	M.-É. CLERC - O. MONSO - E. POULIQUEN Les inégalités entre générations depuis le baby-boom	G2013/15	G. CLÉAUD - M. LEMOINE - P.-A. PIONNIER Which size and evolution of the government expenditure multiplier in France (1980-2010)?
G2010/14	D. BLANCHET - E. CRENNER Le bloc retraites du modèle Destinie 2 : guide de l'utilisateur	G2011/13	C. MARBOT - D. ROY Évaluation de la transformation de la réduction d'impôt en crédit d'impôt pour l'emploi de salariés à domicile en 2007	G2014/01	M. BACHELET - A. LEDUC - A. MARINO Les biographies du modèle Destinie II : rebasage et projection
G2010/15	M. BARLET - L. CRUSSON - S. DUPUCH - F. PUECH Des services échangés aux services échangeables : une application sur données françaises	G2011/14	P. GIVORD - R. RATHÉLOT - P. SILLARD Place-based tax exemptions and displacement effects: An evaluation of the Zones Franches Urbaines program	G2014/02	B. GARBINTI L'achat de la résidence principale et la création d'entreprises sont-ils favorisés par les donations et héritages ?
G2010/16	M. BEFFY - T. KAMIONKA Public-private wage gaps: is civil-servant human capital sector-specific?	G2011/15	X. D'HAULTFOEUILLE - P. GIVORD - X. BOUTIN The Environmental Effect of Green Taxation: the Case of the French "Bonus/Malus"	G2014/03	N. CECHRENAUD - P. CHARNOZ - M. GAINI Evolution of the volatility of revenues salariaux du secteur privé en France depuis 1988
G2010/17	P.-Y. CABANNES - H. ERKEL-ROUSSE - G. LALANNE - O. MONSO - E. POULIQUEN Le modèle Mésange réestimé en base 2000 Tome 2 - Version avec volumes à prix chaînés	G2011/16	M. BARLET - M. CLERC - M. GARNEO - V. LAPÈGUE - V. MARCUS La nouvelle version du modèle MZE, modèle macroéconométrique pour la zone euro	G2014/04	P. AUBERT Modalités d'application des réformes des retraites et prévisibilité du montant de pension
G2010/18	R. AEBERHARDT - L. DAVEZIES Conditional Logit with one Binary Covariate: Link between the Static and Dynamic Cases	G2011/17	R. AEBERHARDT - I. BUONO - H. FADINGER Learning, Incomplete Contracts and Export Dynamics: Theory and Evidence form French Firms	G2014/05	C. GRISLAIN-LETREMY - A. KATOSKY The Impact of Hazardous Industrial Facilities on Housing Prices: A Comparison of Parametric and Semiparametric Hedonic Price Models
G2011/01	T. LE BARBANCHON - B. OURLIAC - O. SIMON Les marchés du travail français et américain face aux chocs conjoncturels des années 1986 à 2007 : une modélisation DSGE	G2012/01	P. GIVORD - S. QUANTIN - C. TREVIEN A Long-Term Evaluation of the First Generation of the French Urban Enterprise Zones	G2014/06	J.-M. DAUSSIN-BENICHOU - A. MAUROUX Turning the heat up. How sensitive are households to fiscal incentives on energy efficiency investments?
G2011/02	C. MARBOT Une évaluation de la réduction d'impôt pour l'emploi de salariés à domicile	G2012/02	N. CECHRENAUD - V. COTTET Politique salariale et performance des entreprises	G2014/07	C. LABONNE - G. LAMÉ Credit Growth and Capital Requirements: Binding or Not?
G2011/03	L. DAVEZIES Modèles à effets fixes, à effets aléatoires, modèles mixtes ou multi-niveaux : propriétés et mises en œuvre des modélisations de l'hétérogénéité dans le cas de données groupées	G2012/03	P. FÉVRIER - L. WILNER Do Consumers Correctly Expect Price Reductions? Testing Dynamic Behavior	G2014/08	C. GRISLAIN-LETREMY et C. TREVIEN The Impact of Housing Subsidies on the Rental Sector: the French Example
G2011/04	M. ROGER - M. WASMER Heterogeneity matters: labour productivity differentiated by age and skills	G2012/04	M. GAINI - A. LEDUC - A. VICARD School as a shelter? School leaving-age and the business cycle in France	G2014/09	M. LEQUIEN et A. MONTAUT Croissance potentielle en France et en zone euro : un tour d'horizon des méthodes d'estimation
G2011/05	J.-C. BRICONGNE - J.-M. FOURNIER V. LAPEGUE - O. MONSO De la crise financière à la crise économique	G2012/05	M. GAINI - A. LEDUC - A. VICARD people entering into a tough labour market	G2014/10	B. GARBINTI - P. LAMARCHE Les hauts revenus éparpillent-ils davantage ?
		G2012/06	P. AUBERT - M. BACHELET Disparités de montant de pension et redistribution dans le système de retraite français	G2014/11	D. AUDENAERT - J. BARDAJIL - R. LARDEUX - M. ORAND - M. SICISIC Wage Resilience in France since the Great Recession
		G2012/07	R. AEBERHARDT - P. GIVORD - C. MARBOT An Unconditional Quantile Regression Approach	G2014/12	F. ARNAUD - J. BOUSSARD - A. POISSONNIER - H. SOUAL
		G2012/08	A. EIDELMAN - F. LANGUMIER - A. VICARD Prélèvements obligatoires reposant sur les ménages : des canaux redistributifs différents en 1990 et 2010		
		G2012/09	O. BARGAIN - A. VICARD Le RMI et son successeur le RSA découragent-ils certains jeunes de travailler ? Une analyse sur les jeunes autour de 25 ans		
		G2012/10	C. MARBOT - D. ROY Projections du coût de l'APA et des caractéristiques de ses bénéficiaires à l'horizon 2040 à l'aide du modèle Destinie		
		G2012/11	A. MAUROUX Le crédit d'impôt déglé au développement durable : une évaluation économétrique		
		G2012/12	V. COTTET - S. QUANTIN - V. RÉGNIER Coût du travail et allègements de charges : une estimation au niveau établissement de 1996 à 2008		
		G2012/13	X. D'HAULTFOEUILLE - P. FÉVRIER - L. WILNER Demand Estimation in the Presence of Revenue Management		
		G2012/14	D. BLANCHET - S. LE MINEZ Joint macro/micro evaluations of accrued-to-date pension liabilities: an application to French reforms		
		G2013/01- F1301	T. DEROYON - A. MONTAUT - P.-A. PIONNIER Utilisation rétrospective de l'enquête Emploi à une fréquence mensuelle : apport d'une modélisation espace-état		
		G2013/02- F1302	C. TREVIEN Habiter en HLM : quel avantage monétaire et quel impact sur les conditions de logement ?		
		G2013/03	A. POISSONNIER Temporal disaggregation of stock variables - The Chow-Lin method extended to dynamic models		
		G2013/04	P. GIVORD - C. MARBOT Does the cost of child care affect female labor market participation? An evaluation of a French reform of childcare subsidies		
		G2013/05	G. LAME - M. LEQUIEN - P.-A. PIONNIER Interpretation and limits of sustainability tests in public finance		
		G2013/06	C. BELLEGO - V. DORTET-BERNADET La participation aux pôles de compétitivité : quelle incidence sur les dépenses de R&D et l'activité des PME et ETI ?		
		G2013/07	P.-Y. CABANNES - A. MONTAUT - P.-A. PIONNIER Évaluer la productivité globale des facteurs en France : l'apport d'une mesure de la qualité du capital et du travail		
		G2013/08	R. AEBERHARDT - C. MARBOT Evolution of instability on the French Labour Market During the Last Thirty Years		

G2014/13	Computing additive contributions to growth and other issues for chain-linked quarterly aggregates H. FRAISSE - F. KRAMARZ - C. PROST Labor Disputes and Job Flows	G2015/15	C. GEAY - M. KOUBI - G de LAGASNERIE Projections des dépenses de soins de ville, construction d'un module pour Desimie	G2017/03	A. CAZENAVE-LACROUTZ - F. GODET L'espérance de vie en retraite sans incapacité sévère des générations nées entre 1960 et 1990 : une projection à partir du modèle Destinie	G2018/08	A. BAUER - B. GARBINTI - S. GEORGES-KOT Financial Constraints and Self-Employment in France, 1945-2014
G2014/14	How does fuel taxation impact new car purchases? An evaluation using French consumer-level dataset P. GIVORD - C. GRISLAIN-LETRÉMY - H. NAEGELE	G2015/16	J. BARDAJ - J.-C. BRICONGNE - B. CAMPAGNE - G. GAULLIER Compared performances of French companies on the domestic and foreign markets	G2017/04	J. BARDAJ - B. CAMPAGNE - M.-B. KHDER - Q. LAFFETER - O. SIMON (Insee) A.-S. DUFERNEZ - C. ELEZAAR - P. LEBLANC - E. MASSON - H. PARTOUCHE (DG-Trésor) Le modèle macroéconométrique Mésange : reestimation et nouveautés	G2018/09	P. BEAUMONT - A. LUCIANI Prime à l'embauche dans les PME : évaluation à partir des déclarations d'embauche
G2014/15	Durée passée en carrière et durée de vie en retraite : quel partage des gains d'espérance de vie ? A. POISSONNIER The walking dead Euler equation Addressing a challenge to monetary policy models	G2015/17	C. BELLÉGO - R. DE NIJS The redistributive effect of online piracy on the box office performance of American movies in foreign markets	G2017/05	J. BOUSSARD - B. CAMPAGNE Fiscal Policy Coordination in a Monetary Union at the Zero-Lower-Bound	G2018/10	M. TELLÉGO - V. DORTET-BERNADET - M. TÉPAU Comparaison de deux dispositifs d'aide à la R&D collaborative public-privé
G2015/01	Indicateurs de rendement du système de retraite français Y. DUBOIS - A. MARINO	G2015/18	J.-B. BERNARD - L. BERTHET French households financial wealth: which changes in 20 years?	G2017/06	A. CAZENAVE-LACROUTZ - F. GODET Effects of the one-day waiting period for sick leave on health-related absences in the French central civil service	G2018/11	R. MONIN - M. SUAREZ CASTILLO Réplication et rapprochement des travaux d'évaluation de l'effet du CICE sur l'emploi en 2013 et 2014
G2015/02	The impacts of Urban Public Transportation: Evidence from the Paris Region S. T. LY - A. RIEGERT Measuring Social Environment Mobility	G2016/01	M. POULHÉS Fenêtre sur Cour ou Chambre avec Vue ? Les prix hédoniques de l'immobilier parisien	G2017/07	P. CHARNOZ - M. ORAND Qualification, progrès technique et marchés de travail locaux en France, 1990-2011	G2018/12	A. CAZENAVE-LACROUTZ - F. GODET - V. LIN L'introduction d'un gradient social dans la mortalité au sein du modèle Destinie 2
G2015/03	Quel est l'impact du système d'indemnisation maladie sur la durée des arrêts de travail pour maladie ? M. A. BEN HALIMA - V. HYAFIL-SOLELHAC M. KOUBI - C. REGAERT	G2016/02	D. BLANCHET - E. CAROLI - C. PROST - M. ROGER Health capacity to work at older ages in France	G2017/08	K. MILIN Modélisation de l'inflation en France par une approche macrosectorielle	G2019/01	M. ANDRÉ - A.-L. BIOTTEAU Effets de moyen terme d'une hausse de TVA sur le niveau de vie et les inégalités : une approche par microsimulation
G2015/04	Disparités de rendement du système de retraite dans le secteur privé : approches intergénérationnelle et intragénérationnelle B. CAMPAGNE - V. ALHENC-GELAS - J.-B. BERNARD No evidence of financial accelerator in France	G2016/03	B. CAMPAGNE - A. POISSONNIER Structural reforms in DSGE models: a case for sensitivity analyses	G2017/09	C.-M. CHEVALIER - R. LARDEUX Homeownership and labor market outcomes: disentangling externality and composition effects	G2019/02	A. BOURGEOIS - A. BRIAND Le modèle Avionic : la modélisation Input/Output des comptes nationaux
G2015/05	Elasticités des recettes fiscales au cycle économique : étude de trois impôts sur la période 1979-2013 en France J.-M. DAUSSIN-BENICHOU, S. IDMACHICHE, A. LEDUC et E. POULIQUEN Les déterminants de l'attractivité de la fonction publique de l'État	G2016/04	Y. DUBOIS et M. KOUBI Relèvement de l'âge de départ à la retraite : quel impact sur l'activité des seniors de la réforme des retraites de 2010 ?	G2017/10	P. BEAUMONT Time is Money: Cash-Flow Risk and Export Market Behavior	G2019/03	A. GODZINSKI - M. SUAREZ CASTILLO Short-term health effects of public transport disruptions: air pollution and viral spread channels
G2015/06	Effet des aides publiques sur l'emploi en R&D dans les petites entreprises S. GEORGES-KOT Annual and lifetime incidence of the value-added tax in France	G2016/05	A. NAOUAS - M. ORAND - I. SLIMANI HOUTI Les entreprises employant des salariés au Smic : quelles caractéristiques et quelle rentabilité ?	G2018/01	S. ROUX - F. SAVIGNAC SMEs' financing: Divergence across Euro area countries?	G2019/04	M. AEBERHARDT - F. HATIER - M. LECLAIR - B. PENTINAT - J.-D. ZAFAR L'économie numérique fausse-t-elle le partage volume-prix du PIB ?
G2015/07	La modulation du montant de pension selon la durée de carrière et l'âge de la retraite : quelles disparités entre assurés ? V. DORTET-BERNADET - M. SICSIC Effet des aides publiques sur l'emploi en R&D dans les petites entreprises	G2016/06	M. PAK - A. POISSONNIER Accounting for technology, trade and final consumption in employment: an Input-Output decomposition	G2018/02	C.-M. CHEVALIER - A. LUCIANI Computerization, labor productivity and employment: impacts across industries vary with technological level	G2019/05	A. CAZENAVE-LACROUTZ - E. YILMAZ Dans quelle mesure les incitations tarifaires et la procédure de mise sous accord préalable ont-elles contribué au développement de la chirurgie ambulatoire ?
G2015/08	Les déterminants de l'attractivité de la fonction publique de l'État P. AUBERT La modulation du montant de pension selon la durée de carrière et l'âge de la retraite : quelles disparités entre assurés ?	G2016/07	D. FOUGÈRE - E. GAUTIER - S. ROUX Understanding Wage Floor Setting in Industry-Level Agreements: Evidence from France	G2018/03	R. MONIN - M. SUAREZ CASTILLO L'effet du CICE sur les prix : une double analyse sur données sectorielles et individuelles	G2019/06	J.-P. CLING - S. EGHBAL-TEHERANI - M. ORZONI - C. PLATEAU The Differences between EU Countries for Sustainable Development Indicators: It is (mainly) the Economy!
G2015/09	Effet de l'activité et des prix sur le revenu salarial des différentes catégories socioprofessionnelles J.-B. BERNARD - Q. LAFFÈTER	G2016/08	T. BLANCHET - Y. DUBOIS - A. MARINO - M. ROGER Patrimoine privé et retraite en France	G2018/04	R. LARDEUX Who Understands The French Income Tax? Bunching Where Tax Liabilities Start	G2019/07	P. CHONÉ - L. WILNER Competition on Unobserved Attributes: The Case of the Hospital Industry
G2015/10	Annual and lifetime incidence of the value-added tax in France M. POULHÉS Are Enterprise Zones Benefits Capitalized into Commercial Property Values? The French Case	G2016/09	Y. DUBOIS - M. KOUBI Règles d'indexation des pensions et sensibilité des dépenses de retraites à la croissance économique et aux choix démographiques	G2018/05	C.-M. CHEVALIER Financial constraints of innovative firms and sectoral growth	G2019/08	P. PORA - L. WILNER Child Penalties and Financial Incentives: Exploiting Variation along the Wage Distribution
G2015/11	Effet de l'activité et des prix sur le revenu salarial des différentes catégories socioprofessionnelles J.-B. BERNARD - Q. LAFFÈTER	G2017/01	D. FOUGÈRE - E. GAUTIER - S. ROUX Level Agreements: Evidence from France	G2018/06	R. S.-H. LEE - M. PAK Pro-competitive effects of globalisation on prices, productivity and markups: Evidence in the Euro Area	G2019/09	E. GAUTIER - S. ROUX - M. SUAREZ CASTILLO Do Minimum Wages make Wages more Rigid ? Evidence from French Micro Data
G2015/12	Effet de l'activité et des prix sur le revenu salarial des différentes catégories socioprofessionnelles J.-B. BERNARD - Q. LAFFÈTER	G2017/02	Y. DUBOIS - M. KOUBI Règles d'indexation des pensions et sensibilité des dépenses de retraites à la croissance économique et aux choix démographiques	G2018/07	C.-M. CHEVALIER Consumption inequality in France between 1995 and 2011	G2019/10	M. ANDRÉ - A. SIREY-JOL

G2019/11	Imposition des couples et des familles : effets budgétaires et redistributifs de l'impôt sur le revenu K. MOHKAM – O. SIMON L'empreinte matière de l'économie française : une analyse par matière et catégorie de produits	G2020/11	P. AGHION – A. BERGÉAUD M. LEQUIEN – M. J. MELTZ The Heterogeneous Impact of Market Size on Innovation: Evidence from French Firm-Level Exports	2021/04	M. ANDRÉ – O. MESLIN Et pour quelques appartements de plus : Étude de la propriété immobilière des ménages et du profil redistributif de la taxe foncière	2023/09	J. SILHOL – L. WILNER Teachers' desired mobility to disadvantaged schools: Do financial incentives matter?
G2019/12	S. BUNEL – B. HADJIBEYLI Évaluation du crédit d'impôt innovation	G2020/12	L. GALIANA – B. SAKAROVITCH F. SÉMÉCURBE – Z. SMOREDA Residential segregation, daytime segregation and spatial frictions : an analysis	2022/05	S. GEORGES-KOT – D. GOUX – E. MAURIN The value of leisure synchronization	2023/12	P. AGHION - C. ANTONIN - S. BUNEL - X. JARAVEL Modern Manufacturing Capital, Labor Demand, and Product Market Dynamics: Evidence from France
G2019/13	C. BONNET – F. GODET – A. SOLAZ Gendered economic determinants of couple formation over 50 in France	G2020/13	A. BAUER – J. BOUSSARD Market Power and Labor Share	2022/06	N. BECHICHI – M. FABRE – T. OLIVIA Projections de la population active à l'horizon 2080	2023/13	R. LAFROGNE-JOUSSIER – J. MARTIN – I. MEJEAN Cost Pass-Through and the Rise of Inflation
G2019/14	P. GIVORD – M. SUAREZ CASTILLO Excellence for all? Heterogeneity in high schools' value-added	G2020/14	A. BAUER – J. BOUSSARD – D. LASHKARI Information Technology and Returns to Scale	2022/11	S. QUANTIN – C. WELTER-MÉDÉE Estimation des montants manquants de versements de TVA : exploitation des données du contrôle fiscal	2023/14	A. BOURGEOIS – F. GERVOIS - R. LAFROGNE-JOUSSIER Forces et fragilités des tableaux internationaux entrées-sorties pour le calcul de l'empreinte carbone
G2020/01	J. SILHOL – B. VENTÉLOU Les zones d'intervention prioritaire reflètent-elles des écarts de pratiques des médecins généralistes ?	G2020/15	V. LIN – O. MESLIN Hausse des prix immobiliers et mesure du niveau de vie	2022/14	L. BLOCH – B. FAVETTO – A. LAGOUGE – F. SEDILLOT Inégalités de rendements et de patrimoine en France en 2017		
G2020/02	B. BOUCHTENIK – R. LARDEUX The Take-Up of Unemployment Benefit Extensions	G2021/01	N. BECHICHI – G. THEBAULT Students' Preferences, Capacity Constraints and Post-Secondary Achievements in a Non-Selective System	2022/15	H. GENIN – S. SCOTT Un portrait de la r'etention de main-d'oeuvre dans l'industrie française : analyse à partir des enquêtes mensuelles de conjoncture		
G2020/03	J-M. GERMAIN A Welfare Based Estimate of "Real Feel GDP" for Europe and the USA	G2021/02	B. BUREAU – A. DUQUERROY J. GIORGI – M. LÉ – S. SCOTT – F. VINAS Une année de crise COVID : impact sur la dynamique des entreprises en France	2023/02	D. GOUX – E. MAURIN On the seventh day you shall do not any work : the winners and losers of Sunday work deregulation		
G2020/04	J. BOUSSARD – R. LEE Competition, Profit Share and Concentration	G2021/03	B. BUREAU – A. DUQUERROY J. GIORGI – M. LÉ – S. SCOTT – F. VINAS L'impact de la crise sanitaire sur la situation financière des entreprises en 2020 : une analyse sur données individuelles	2023/03	P. AGHION – A. BERGÉAUD – M. LEQUIEN – M. MELTZ – T. ZUBER Opposing firm-level responses to the China shock: Output competition versus input supply		
G2020/05	P. PORA Keep Working and Spend Less? Collective Childcare and Parental Earnings in France	G2021/04	A. GODZINSKI – M. SUAREZ CASTILLO Disentangling the effects of air pollutants with many instruments	2023/04	L. GALIANA – L. WILNER Private Wealth over the Life-Cycle: A Meeting between Microsimulation and Structural Approaches		
G2020/06	R. MONIN – M. SUAREZ CASTILLO Product Switching, market power and distance to core competency	2021/01	S. QUANTIN – S. BUNEL – C. LENOIR Évaluation du dispositif Jeune entreprise innovante (JEI) Un exemple d'application du modèle d'analyse de sensibilité de Rosenbaum	2023/06	M. HILLION – E. MAUGENDRE L'effet du « jour de carence » sur les absences pour maladie ordinaire, la santé perçue et le recours aux soins à court- terme		
G2020/07	L. WILNER How do citizens perceive centralization reforms? Evidence from the merger of French regions	2021/02	L. GOBILLON – D. MEURS – S. ROUX Differences in positions along a hierarchy : Counterfactuals based on an assignment model	2023/07	M. ANDRÉ- J-M GERMAIN – M. SICSIC 'Do I get my money back?': A Broader Approach to Inequality and Redistribution in France With a Monetary Valuation of Public Services		
G2020/08	L. WILNER The persistence of subjective well-being: permanent happiness, transitory misery?	2021/03	N. BECHICHI – J. GRENET – G. THEBAULT Ségrégation à l'entrée des études supérieures en France et en région parisienne : quels effets du passage à Parcoursup ?	2023/08	R. LAFROGNE-JOUSSIER – J. MARTIN – I. MEJEAN Supply shocks in supply chains: Evidence from the early lockdown in China		
G2020/09	J-M. GERMAIN – T. LELLOUCH Comptabilité économique de la soutenabilité climatique						
G2020/10	A. BAUER – M. ROTEMBERG Tax avoidance in French Firms: Evidence from the Introduction of a Tax Notch						