

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Estimation et complétion des flux élémentaires manquants du tableau entrées-
sorties multirégional EXIOBASE**

ELLIOT MULLER

Département de génie chimique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie chimique

Mai 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Estimation et complétion des flux élémentaires manquants du tableau entrées-sorties multirégional EXIOBASE

présenté par **Elliot MULLER**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Louise DESCHÊNES, présidente

Réjean SAMSON, membre et directeur de recherche

Manuele MARGNI, membre et codirecteur de recherche

Guillaume MAJEAU-BETTEZ, membre et codirecteur de recherche

Annie LEVASSEUR, membre

DÉDICACE

*« When the last tree has been cut down, the last fish caught, the last river poisoned, only then will
we realize that one cannot eat money. »*

Proverbe amérindien

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche Réjean Samson de m'avoir permis d'intégrer le CIRAIG et de travailler sur ce sujet de maîtrise et qui m'a encadré avec bienveillance tout au long de ce processus. Merci à Manuele Margni, mon codirecteur qui m'a prodigué ses conseils avisés à tous les moments charnières de ce projet, quel que soit l'heure ou l'endroit du monde où il se trouvait. Et merci infini à Guillaume qui a été présent à chaque instant de cette maîtrise. Sans ton expertise, tes conseils, tes encouragements, ta confiance, ta bonne humeur, ton abnégation et ta motivation, je n'aurais jamais pu terminer ce projet.

Merci ensuite à toute l'équipe du CIRAIG dont le travail et la passion contribueront sans aucun doute à sauver le monde. Merci à tous les membres de Polycarbonate qui prouvent jour après jour qu'avec de l'ambition et du travail, rien n'est impossible. Une pensée particulière à Laure et Catherine, vous êtes tout simplement les modèles de ce que j'aspire à devenir, à Hassana et Elsa qui m'ont plus d'une fois donné le courage de persévérer grâce à leur gentillesse et leur affection, à Maxime dont l'aide et les techniques de motivation toutes personnelles m'ont été indispensables et dont les avis très tranchés ont été la source de débats passionnés et vivifiants, à Julien W., Ivan et Geoffrey pour l'ambiance du bureau qui allie à la perfection les moments sérieux et ceux qui le sont un peu moins, à Julien P. pour les sorties mémorables au CC, sans oublier Andrea, Anne-France, Aisha, Anders, Hugo, Manel, Théo, Nolwenn, Léo et Solène.

Merci à toutes les merveilleuses rencontres montréalaises : Maya pour tout et en particulier pour m'avoir permis de survivre à ce dernier mois et Anaëlle pour ton sourire, ton enthousiasme et parce que vous êtes les meilleures colocataires imaginables ; Nicolas parce que tu ne réalises certainement pas à quel point tu m'as permis d'avancer ; Corentin et PJ pour les excursions et les discussions ; Camille pour tes massages (c'est bientôt l'heure de la libération pour toi aussi !) ; Tangui pour ta philosophie ; Sophie et Robin pour votre regard sur la vie (et votre canapé) ; Jeanne-Marie pour tes accès de folie ; Tim et Marie pour les soirées pizzas-jeux de société ; Bastien pour m'avoir accompagné dans les plus beaux voyages de ce continent ; Tcheyne, Clément, Léa, Andréa, Victor, Quentin, Marie, Ilana, Rémi, Loïc, Gabrielle...

Enfin, merci à tous ceux qui m'ont encouragé par-delà les mers : mes parents qui ont su braver les difficultés de la communication à distance pour m'apporter leur soutien sans faille ; ma petite sœur Clémentine qui aura appris deux langues étrangères et aura commencé une brillante carrière avant

même que je termine mes études ; ma grande sœur Marion qui est une source d'inspiration infinie ; mon frère Romain que j'ai toujours admiré ; Mamie Moun et Mamita avec qui j'ai beaucoup de moments à rattraper et Ric et Mic que j'espère rendre fier depuis un continent un peu plus lointain que l'Europe. Et merci à mon autre famille, celle que l'on choisit, Adélaïde, Amandine, Antoine, Blanche, Margaux et Adrien, parce que je suis là grâce à vous.

RÉSUMÉ

Réduire les effets des actions de la société sur l'environnement apparaît pour la majorité de la communauté scientifique comme indispensable. Pour ce faire, il est nécessaire de faire le lien entre ces actions et leurs impacts environnementaux potentiels afin de permettre aux consommateurs et aux décideurs de choisir parmi les meilleures solutions implémentables. Plusieurs outils permettent d'effectuer ces études. Parmi ces outils, les Analyses du Cycle de Vie (ACV) et les Analyses Input-Output (AIO) font partie des plus généralement utilisés. Le premier permet d'étudier de manière détaillée des produits ou des services spécifiques alors que le second se base sur des données économiques et est plus adapté à des analyses à grande échelle. Chacune de ces méthodes possède des avantages et des inconvénients mais elles souffrent toutes les deux de problèmes de troncature. Ces troncatures sont cependant différentes et complémentaires. L'ACV néglige des sources d'émissions comme par exemple celles liées à certains services nécessaires tout au long de la vie d'un produit. Ceci vient du fait que pour permettre une ACV, qui est par nature très détaillée, des frontières doivent être posées afin de délimiter l'ensemble des processus du système étudié dont les impacts sur l'environnement vont être pris en compte. Or, notamment pour des raisons de temps d'analyse et de manque de données nécessaires, ces frontières ne peuvent pas inclure la totalité des activités ayant lieu au cours du cycle de vie de l'objet de l'étude. La troncature de l'AIO vient du fait qu'elle ne prend généralement en compte qu'un nombre limité de vecteurs d'impacts (ressources naturelles ou émissions vers l'environnement). Ce problème de couverture est encore plus important dans le cadre d'analyses IO environnementales multirégionales, c'est-à-dire se basant sur des Extensions Environnementales de tables Input-Output Multi-Régionales (MREEIO) qui décrivent séparément plusieurs régions économiques et les échanges ayant lieu entre elles. En effet, ces dernières ne peuvent contenir que les vecteurs d'impacts inventoriés par chacune des bases de données utilisées afin de décrire chacune des régions, pour des raisons d'homogénéité des données. Afin de pallier à ces troncatures, des études visent à combiner ces deux analyses. Typiquement, une AIO servira de complément à une ACV, c'est ce qu'on appelle une ACV hybride. La complétion des AIO en revanche n'est que rarement adressée. Cette maîtrise vise ainsi à analyser les problèmes de troncature des MREEIO sur lesquelles se basent les calculs des AIO et à proposer un cadre méthodologique permettant de les limiter. Le MREEIO étudié dans le cadre de ce projet est celui d'EXIOBASE. EXIOBASE est basé sur une table Input-Output Multi-Régionale

(MRIO) couvrant l'ensemble du monde, divisé en diverses régions et qui c'est l'un des (MR)EEIO les plus utilisés actuellement.

Pour répondre à ce double objectif, une première analyse qualitative a d'abord été menée afin de guider les pistes de recherche pour la suite de l'étude. Cette analyse a mis en avant le fait qu'EXIOBASE semblait avoir un problème de troncature pour les substances liées aux catégories d'impacts de disparition de la couche d'ozone et de la toxicité et dans une plus faible mesure pour les catégories réchauffement climatique et smog. Une analyse quantitative a ensuite été réalisée. Pour cela, un premier cadre méthodologique général permettant de compléter les MREEIO à l'aide d'autres bases de données environnementales a été proposé. Ce cadre a ensuite été adapté à un EEIO national américain, USEEIO, qui a donc été utilisé afin de produire un complément pour les émissions de l'EEIO d'EXIOBASE, tout d'abord uniquement pour la région États-Unis, puis extrapolé pour les différentes régions du monde. Un code informatique, développé dans le cadre de ce mémoire, a ainsi permis de compléter l'extension environnementale d'EXIOBASE. Ce code est conçu pour être facilement compréhensible, utilisable et adaptable afin qu'un utilisateur puisse relativement aisément se l'approprier pour produire son propre complément d'EEIO et effectuer ses propres analyses. Une fois le MREEIO complété, il a été comparé la version originale de l'EE d'EXIOBASE à travers plusieurs études d'impacts menées à l'aide de la méthode de caractérisation Traci, permettant de convertir des inventaires d'émissions en impacts environnementaux. Cette analyse quantitative a confirmé les résultats de l'analyse qualitative préliminaire tout en les précisant. Ainsi, l'impact de disparition de la couche d'ozone est bien totalement négligé par une étude menée avec EXIOBASE car aucune des émissions ayant un impact sur cette catégorie ne sont inventoriées dans son extension environnementale (EE). De manière globale, en regardant l'ensemble de l'économie, les émissions directes des différents secteurs industriels, recensées dans l'EE d'EXIOBASE, sous-estiment également grandement l'écotoxicité aquatique. La toxicité humaine liée à des substances cancérigènes est aussi sous-estimée tout comme les impacts des émissions directes sur la toxicité humaine liée à des substances non cancérigènes ainsi que sur le smog, même si ces dernières le sont de façon beaucoup plus limitée. La catégorie changement climatique semble quant à elle principalement affectée par des problèmes d'agrégation des émissions plutôt que par des problèmes de troncature. Même si certaines catégories d'impact semblent peu affectées par ces problèmes de couverture au niveau de l'économie dans son ensemble, certains secteurs de cette économie peuvent l'être. C'est le poids économique limité de

ces secteurs dans l'économie qui ne permet pas d'observer ces effets à un niveau global. Ainsi, le MREEIO complété que nous avons produit au cours de cette maîtrise nous a permis d'estimer une part significative des impacts des secteurs agricoles, d'extraction et de transformation d'hydrocarbures et de minéraux, du transport ainsi que certains autres secteurs de production ou de service dans plusieurs catégories d'impacts environnementaux, auparavant négligés. Lorsqu'on ne regarde plus uniquement les émissions directes mais également les émissions sur l'ensemble de la chaîne de valeur, donc en se plaçant dans une perspective plus proche de celle adoptée en ACV, on observe qu'en dehors des aires de protections liées à la toxicité, la contribution relative des impacts négligés perd de l'importance par rapport à ceux déjà pris en compte et ceci pour la quasi-totalité des secteurs et pour toutes les autres catégories d'impact. Ces différentes troncatures sont en réalité dues principalement à un nombre limité de substances parmi lesquelles le 1,1,1-trichloroéthane, le bromométhane et les CFC pour la disparition de la couche d'ozone, les pesticides, le cyanure et l'acide sulfurique pour l'écotoxicité aquatique et enfin les aldéhydes et en particulier le formaldéhyde et l'acroléine pour la toxicité humaine. En ce qui concerne le réchauffement climatique, les problèmes identifiés viennent presque exclusivement de l'agrégation de certaines substances, les HFC et les PFC, qui sont uniquement inventoriées sous cette appellation générale au sein d'EXIOBASE. Notre analyse avec ces deux familles de substances désagrégées n'a cependant pas permis de faire apparaître de grandes s pour cette catégorie d'impact par rapport à une analyse prenant en compte ces deux familles agrégées. La prise en compte de ces quelques substances manquantes permettrait donc de grandement améliorer la couverture de l'extension environnementale d'EXIOBASE en termes d'évaluation des impacts environnementaux. Dans l'attente de l'ajout de ces émissions à l'EE d'EXIOBASE, la méthodologie que nous présentons au cours de ce mémoire permet d'augmenter le nombre de substances couvertes par un MREEIO et donc de réduire sa troncature et d'améliorer les analyses IO et hybrides menées avec ses extensions environnementales, même si cela implique un haut niveau d'incertitudes pour les émissions concernées. Le MREEIO complété que nous avons produit permet a minima d'identifier, au cours d'AIO ou d'analyses hybrides menées à l'aide d'EXIOBASE, certains points où des impacts risquent d'être sous-estimés.

ABSTRACT

For most of the scientific community, reducing the environmental effects caused by the society's actions is essential. In order to help consumers and decision makers choose the best of several implementable solutions to protect the environment, a link must be made between society's actions and their potential associated environmental impacts. Up to now, these studies are performed using several tools. Among those, Life Cycle Assessment (LCA) and Input-Output Analysis (IOA) are two of the most used ones. On the one hand, LCA allows detailed studies regarding specific products and services. On the other hand, IOA is based upon economic data and used for large scaled analysis. Both have several assets and drawbacks but are affected by the same issue: data truncation. However, these truncations are not the same but complementary. LCA neglects some sources of emissions, such as services, along the life cycle of the studied product. Indeed, to perform LCA, which is a very detailed analysis, boundaries need to be determined. They delineate the processes of the studied life cycle which environmental impacts are going to be accounted for to calculate the total impact of the studied product or service. This limited scope cannot include all the activities of the studied product's life cycle, mostly because of time-consuming and missing data issues. IOA only considers a limited number of impact factors (natural resources or environmental emissions) which is what causes its truncation. This coverage issue is even bigger for multi-regional environmental IO analysis, which are based upon Multi-Regional Environmentally Extended IO tables (MREEIO). These tables describe distinct economic regions and the exchanges between them. Because of data homogeneity issues, MREEIO tables can only contain the impact factors which are inventoried in every region. In order to tackle both those truncation issues, some analysis aim at combining IOA and LCA. Usually, IOA data are being used to complement LCA in what is called Hybrid-LCA. IOA completeness improvement is still rarely addressed. This is why this master project aims at analyzing MREEIO tables' truncation issues and offer a methodological framework to lower them. This project studies a specific MREEIO: EXIOBASE, which covers the whole world and is currently widely used.

To address both those goals, a preliminary qualitative analysis was conducted in order to guide the rest of the study. This analysis showed that EXIOBASE seemed to suffer some truncation issue regarding substances that affect ozone depletion and toxicity. At a lower degree, some emissions affecting global warming and smog formation seemed missing as well. A quantitative analysis was then performed. To do so, we provided a general methodological framework to complement

MREEIO with various environmental databases. This framework was then adapted to produce a complement for EXIOBASE's Environmental Extensions (EE) using the emissions inventoried in an American EEIO: USEEIO. This complement was first generated for the US region and then expanded for the rest of the world covered by EXIOBASE. A computer code was developed during this project to complement EXIOBASE's EE. It was designed to be easily understandable, usable and customizable so that users can build their own EE complement and conduct various analysis with it. Once complemented, the MREEIO was compared to EXIOBASE's original EE to quantify its truncation. To do so, multiple impact scores were calculated using both versions of the MREEIO and the Traci characterization method to translate emission inventories into environmental impacts. This quantitative analysis confirmed and refined the preliminary results. It showed that impacts upon ozone depletion are completely neglected when using EXIOBASE's EE because none of the emissions affecting this impact category are inventoried in it. Globally, when studying the whole economy, direct emissions of all the industrial sectors included into EXIOBASE's EE underestimate greatly aquatic ecotoxicity. Carcinogenic substances' effects on human health is also underestimated as well as non-carcinogenic effects and smog, even though those two are better considered. Climate change seems to be mainly affected by aggregation instead of truncation issues. But even if some impact categories do not appear to be heavily affected on a global scale, the truncation problem can be huge when only examining some of the industrial sectors. It is because the economic weight of those sectors is limited, that these issues cannot be seen on a larger scale. Thus, the complemented MREEIO produced during this project allowed us to estimate previously neglected environmental impacts of agricultural sectors, hydrocarbons and minerals extraction and transformation, transport and several production or service sectors. When considering not only direct emissions but also emissions all along the value chain, in a way similar to the one used in LCA, we can see that only toxicity categories are affected by the truncation issues. For almost all of the sectors of the other categories, the share of the total impacts due to the neglected emissions is reduced compared to the one already inventoried by EXIOBASE. All those truncations are mainly caused by a limited number of substances: 1,1,1-trichloroethane, bromomethane and the CFC for ozone depletion, pesticides, cyanide and sulfuric acid for aquatic ecotoxicity and aldehydes (especially formaldehyde and acrolein) for human toxicity. The identified problems concerning global warming are almost entirely due to the aggregation of the HFC and PFC that are only inventoried under those two general names in EXIOBASE's EE. We

conducted another analysis with those two families disaggregated that did not lead to different results than the first one. Therefore, taking into account a few missing substances would allow EXIOBASE's EE to provide a much better impact evaluation cover. But before those emissions are added to it, the methodology presented in this paper can help widen MREEIO's emissions cover. Even though this operation will increase uncertainties, it will also reduce the MREEIO's truncation and improve IOA and Hybrid-LCA based upon its data. The complemented MREEIO produced will at least allow for the identification of the spots of IOA or hybrid-LCA where calculated impact scores could be underestimated.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	IX
TABLE DES MATIÈRES	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XVI
LISTE DES FIGURES	XVIII
LISTE DES ÉQUATIONS.....	XXVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXVII
LISTE DES ANNEXES	XXIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Analyses du Cycle de Vie	4
2.2 Analyses Input-Output	10
2.3 Analyses hybrides	15
2.4 EXIOBASE	17
2.5 Méthodes de caractérisation	20
2.6 Incertitudes en analyses environnementales	22
CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	26
3.1 Problématique.....	26
3.2 Objectifs de recherche.....	26
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....	28
4.1 Analyse préliminaire : Évaluation qualitative de la couverture d'EXIOBASE	28

4.2	Présentation du cadre d'analyse mis en place	29
4.2.1	Choix de la source des données complémentaire.....	30
4.2.2	Choix des émissions à intégrer au complément	32
4.2.3	Gestion du degré divers d'agrégation entre le système de classification des secteurs industriels d'EXIOBASE et celui de la source de données complémentaires	35
4.2.4	Intégration des émissions complémentaires au sein de l'EE d'EXIOBASE	35
4.2.5	Calcul des facteurs de caractérisation utilisés pour quantifier le nouveau MREEIO complété	35
4.2.6	Analyse et amélioration du complément.....	36
4.3	Approche mathématique suivie pour analyser le MREEIO complété	37
4.3.1	Présentation des matrices principales utilisées.....	38
4.3.2	Équations utilisées pour obtenir les différents résultats recherchés pour l'analyse du MREEIO complété.....	40
4.4	Démarche suivie pour permettre la transparence de l'étude	44
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		45
5.1	Résultats de l'analyse qualitative	45
5.2	Cas d'application de la méthodologie générale de complétion d'un MREEIO : complétion de l'EE d'EXIOBASE.....	47
5.2.1	Cas d'application : choix de la source des données complémentaire	47
5.2.2	Cas d'application : choix des émissions à intégrer au complément.....	48
5.2.3	Cas d'application : gestion du degré divers d'agrégation entre le système de classification des secteurs industriels d'EXIOBASE et celui de USEEIO	51
5.2.4	Cas d'application : intégration des émissions complémentaires au sein de l'EE d'EXIOBASE.....	54
5.2.5	Cas d'application : calcul des facteurs de caractérisation utilisés pour quantifier le nouveau MREEIO complété	57

5.2.6	Cas d'application : analyse et amélioration du complément.....	60
5.3	Calcul des scores d'impact à partir du MREEIO complété produit au cours du cas d'application.....	60
5.3.1	Analyse des impacts de l'économie dans son ensemble	60
5.3.2	Portrait détaillé du MREEIO complété et différences avec l'EE d'EXIOBASE.....	65
5.3.3	Étude d'un secteur spécifique à l'aide du MREEIO complété : «Hôtels et restaurants ».....	89
5.4	Transparence de la démarche suivie et production d'un code informatique pour compléter un MREEIO et analyser un MREEIO complété	96
CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE		101
6.1	Analyse des scores d'impact calculés et quantification de la troncature d'EXIOBASE.....	101
6.1.1	Écotoxicité aquatique dans l'eau douce	101
6.1.2	Effets cancérigènes sur la santé humaine	102
6.1.3	Effets non cancérigènes sur la santé humaine	103
6.1.4	Changement climatique global et formation de smog.....	103
6.1.5	Pluies acides et eutrophisation	104
6.1.6	Diminution de la couche d'ozone et effets respiratoires sur la santé humaine	105
6.1.7	Bilan général sur les émissions manquantes	105
6.2	Sources d'incertitudes de l'étude	107
6.2.1	Incertitudes liées aux données utilisées.....	107
6.2.2	Incertitudes liées à l'intégration des données complémentaires	109
6.2.3	Incertitudes liées à l'extension du complément depuis la région US vers le reste du monde.....	111
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		112

7.1	Contributions et avancées permises par l'étude	112
7.2	Pistes d'amélioration	114
7.3	Recommandations	116
BIBLIOGRAPHIE		118
ANNEXES		125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Récapitulatif des complémentarités entre ACV et AEE(MR)IO.	17
Tableau 5.1 : Analyse qualitative de la complétude de l'EE d'EXIOBASE pour chacune des catégories d'impact prises en compte dans Traci.....	47
Tableau 5.2 : Liste des émissions de USEEIO non incluses dans le MREEIO complété.....	51
Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (<i>extraits de USEEIO et EXIOBASE</i>)	77
Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (<i>extraits de USEEIO et EXIOBASE</i>)	83
Tableau 6.1 : Récapitulatif des troncatures de chacun des catégories d'impact. Les substances en gras sont celles qui contribuent principalement à chacune des catégories d'impact considérées.	106
Tableau 6.2 : Facteurs de caractérisation pour des émissions dans l'air urbain, pour la catégorie d'impacts écotoxiques pour trois substances et trois méthodes d'impact. Les unités sont indiquées pour chaque colonne.	109
Tableau A.1 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine du traitement de l'eau et secteur correspondant dans USEEIO.....	125
Tableau A.2 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine de la production d'électricité et secteur correspondant dans USEEIO.	125
Tableau A.3 : Liste des secteurs de USEEIO dans le domaine de la production d'électricité.....	126
Tableau A.4 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine du traitement des déchets et secteur correspondant dans USEEIO.....	126
Tableau B.1 : Données statistiques concernant la part de chacun des secteurs de l'économie mondiale due aux données du complément, pour chaque catégorie d'impact.	128
Tableau B.2 : Données statistiques concernant la part de chacun des secteurs de l'économie américaine due aux données du complément, pour chaque catégorie d'impact.	128

Tableau C.1 : Principales émissions participant à chacune des catégories d'impact, classées en fonction du pourcentage de l'impact de chaque catégorie leur étant attribuable (1). Les émissions provenant du complément sont sur fond bleu. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	131
Tableau C.2 : Principales émissions participant à chacune des catégories d'impact, classées en fonction du pourcentage de l'impact de chaque catégorie leur étant attribuable (2). Les émissions provenant du complément sont sur fond bleu. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	132
Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	138
Tableau E.1 : Évolution de la place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs contribuant le plus à l'impact de chaque catégorie, dans une perspective consommateur. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	148
Tableau I.1 : Unités utilisées pour chaque catégorie d'impact.	164

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Description des étapes d'une ACV d'après les normes ISO 14040-44.	5
Figure 4.1 : Présentation de la méthode générale utilisée dans cette étude	29
Figure 4.2 : Algorithme de décision pour la prise en compte de chaque émission de la source de données d'émissions complémentaires dans le complément d'EE d'EXIOBASE.	34
Figure 5.1 : Schémas illustrant les deux manières de répartir les émissions complémentaires des secteurs de USEEIO vers ceux d'EXIOBASE.....	54
Figure 5.2 : Schéma de la répartition des émissions de USEEIO vers EXIOBASE.....	55
Figure 5.3 : Répartition des impacts de l'ensemble de l'économie des États-Unis selon l'EEIO ayant fourni les données (entre EXIOBASE et le complément), ceci pour chacune des catégories d'impact, en pourcentage.	61
Figure 5.4 : Répartition des impacts de l'ensemble de l'économie mondiale selon l'EEIO ayant fourni les données (entre EXIOBASE et le complément), ceci pour chacune des catégories d'impact, en pourcentage.	62
Figure 5.5 : Distribution des secteurs industriels des États-Unis en fonction de la part de leur impact associé due aux données provenant du complément, pour chaque catégorie. Les segments externes présentent le premier et le neuvième décile, la boîte centrale va du premier au troisième quartile, la barre verte représente la médiane et le triangle la moyenne des données.	63
Figure 5.6 : Distribution des secteurs industriels du monde entier en fonction de la part de leur impact associé due aux données provenant du complément, pour chaque catégorie. Les segments externes présentent le premier et le neuvième décile, la boîte centrale va du premier au troisième quartile, la barre verte représente la médiane et le triangle la moyenne des données.1	64
Figure 5.7 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie OD, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>).....	66

Figure 5.8 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie GCC, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>).....	66
Figure 5.9 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie HHC, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>).....	67
Figure 5.10 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie FAE, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>).....	67
Figure 5.11 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	69
Figure 5.12 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	70
Figure 5.13 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	71
Figure 5.14 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	71
Figure 5.15 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	72
Figure 5.16 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	72
Figure 5.17 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	75
Figure 5.18 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE, en perspective consommateur, dans EXIOBASE. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	75

- Figure 5.19 : Répartition des impacts des émissions directes du secteur *Hotels and restaurants* aux États-Unis, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.90
- Figure 5.20 : Répartition des émissions selon leur contribution aux impacts des émissions directes du secteur *Hotels and restaurants* pour la catégorie d'impact HHC. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*).....90
- Figure 5.21 : Répartition des impacts du secteur *Hotels and restaurants*, en perspective consommateur, aux États-Unis, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.91
- Figure 5.22 : Principales émissions contribuant à la catégorie d'impact FAE pour le secteur *Hotels and restaurants*, en approche consommateur, dans le MREEIO complété. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*).....92
- Figure 5.23 : Principales émissions contribuant à la catégorie d'impact HHC pour le secteur *Hotels and restaurants*, en approche consommateur, dans le MREEIO complété. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*).....92
- Figure 5.24 : Étapes du cycle de vie les plus impactantes du secteur *Hotels and restaurants*, avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)94
- Figure 5.25 : Étapes du cycle de vie les plus impactantes du secteur *Hotels and restaurants*, avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)95
- Figure 5.26 : Impression d'écran du code permettant de répartir les coefficients d'émissions des secteurs de USEEIO vers ceux du MREEIO complété, pour la région US.97

- Figure 5.27 : Impression d'écran de la partie du code permettant de produire la matrice de concordance entre la classification industrielle de USEEIO et celle d'EXIOBASE, tout en excluant les industries que nous avons décidé de ne plus agréger dans un second temps.98
- Figure 5.28 : Impressions d'écran de la fonction permettant de produire un vecteur de production totale à partir d'un vecteur de demande finale et en suivant l'équation de Leontief.98
- Figure 5.29 : Impression d'écran de la fonction permettant d'étudier les principales étapes du cycle de vie de la production d'un secteur spécifique contribuant aux impacts d'une catégorie d'impact donnée.99
- Figure 5.30 : Impression d'écran de la fonction permettant de calculer l'effet du complément en calculant la part des impacts directs de chaque secteur du MREEIO complété qui est due au complément. 100
- Figure C.1 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie AR, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)..... 129
- Figure C.2 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie Eutrophisation, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*) 129
- Figure C.3 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie HHN, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)..... 130
- Figure C.4 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie SF, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)..... 130
- Figure D.1 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE).... 133
- Figure D.2 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE) 133

Figure D.3 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	134
Figure D.4 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE) ..	134
Figure D.5 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact OD avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	135
Figure D.6 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHRE avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)....	135
Figure D.7 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)....	136
Figure D.8 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	136
Figure D.9 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)....	137
Figure D.10 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	137
Figure E.1 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	144
Figure E.2: Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	144
Figure E.3 Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	145

Figure E.4 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHRE, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	145
Figure E.5 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	146
Figure E.6 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	146
Figure E.7 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact OD, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	147
Figure E.8 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	147
Figure F.1 : Étapes du cycle de vie, sommées sur l'ensemble des pays, les plus impactantes du secteur <i>Hotels and restaurants</i> , avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	154
Figure F.2 : Étapes du cycle de vie, sommées sur l'ensemble des pays, les plus impactantes du secteur <i>Hotels and restaurants</i> , avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	155
Figure F.3 : Régions du monde d'où proviennent le plus d'impacts liés au cycle de vie du secteur <i>Hotels and restaurants</i> , avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces pays calculés avec l'EE d'EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)	156
Figure F.4 : Régions du monde d'où proviennent le plus d'impacts liés au cycle de vie du secteur <i>Hotels and restaurants</i> , avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact	

par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces pays calculés avec l'EE d'EXIOBASE. (<i>données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE</i>)	157
Figure G.1 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Mexique, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	158
Figure G.2 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Canada, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	158
Figure G.3 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Royaume-Uni, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	159
Figure G.4 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, en Chine, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	159
Figure G.5 : Répartition des impacts de l'économie totale du Mexique, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	160
Figure G.6 : Répartition des impacts de l'économie totale du Canada, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	160
Figure G.7 : Répartition des impacts de l'économie totale du Royaume-Uni, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	161
Figure G.8 : Répartition des impacts de l'économie totale de la Chine, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.	161
Figure H.1 : Comparaison des inventaires des émissions en commun entre USEEIO et EXIOBASE, sur la totalité de l'économie américaine, pour les émissions produites en quantité supérieure	

dans EXIOBASE que dans USEEIO. Plus la valeur se rapproche de 100 % plus les deux inventaires sont proches.162

Figure H.2 : Comparaison des inventaires des émissions en commun entre USEEIO et EXIOBASE, sur la totalité de l'économie américaine, pour les émissions produites en quantité supérieure dans USEEIO que dans EXIOBASE. Plus la valeur se rapproche de 100 % plus les deux inventaires sont proches.163

LISTE DES ÉQUATIONS

(1)	41
(2)	41
(3)	41
(4)	41
(5)	41
(6)	42
(7)	42
(8)	55

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ACV-A	ACV Attributionnelle
ACV-C	ACV Conséquentielle
AIO	Analyse Entrée-Sortie (Input-Output) (toujours environnementales dans ce mémoire)
CAS	(numéro de la substance chimique enregistré auprès du) Chemical Abstract Service
(MR)EE(IO)	Extension Environnementale (de tableau Entrée-Sortie Multirégional)
FC	Facteur de Caractérisation
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
IO	Entrée-Sortie (Input-Output)
MRIO	Entrée-Sortie Multirégionale (Multi-Regional Input-Output)
UF	Unité Fonctionnelle

Notations mathématiques

Z	Matrice technologique
A	Matrice des coefficients techniques
F	Matrice des émissions directes
S	Matrice des coefficients d'émission
x	Vecteur de production totale
y	Vecteur de demande finale
e	Vecteur de sommation (composé de 1)
I	Matrice identité
L	Matrice de Leontief
C	Matrice des facteurs de caractérisation
H	Matrice des impacts
\hat{v}	Matrice ayant le vecteur v pour diagonale
tM	Transposée de la matrice M

Substances chimiques

CFC	Chlorofluorocarbure
HCFC	Hydrochlorofluorocarbures
HFC	Hydrofluorocarbure
PAH	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)
PCB	Polychlorobiphényles
PCDD_F	Polychlorobenzodioxines et Polychlorodibenzofuranes
PFC	Perfluorocarbure
PM _x	Particule fine (Particulate Matter) dont le diamètre est inférieur à x micromètres
(NM)VOC	Composé Organique Volatil Non Méthanique ((Non-Methane) Volatile Organic Compound)

Catégories d'impact

AR	Pluies Acides (Acid Rain)
E	Eutrophisation (Eutrophication)
FAE	Écotoxicité Aquatique dans l'Eau douce (Freshwater Aquatic Ecotoxicity)
GCC	Changement Climatique Global (Global Climate Change)
HHC	Effets Cancérogènes sur la Santé humaine (Human Health Cancer)
HHN	Effets Non cancérogènes sur la Santé humaine (Human Health Noncancer)
HH-RE	Effets Respiratoires sur la Santé Humaine (Human Health - Respiratory Effects)
OD	Diminution de la couche d'ozone (Ozone Depletion)
SF	Formation de Smog (Smog Formation)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Secteurs exclus du couplage entre USEEIO et exiobase	125
Annexe B – Données statistiques complémentaires de l’effet du complément sur les différents secteurs industriels	128
Annexe C – Émissions les plus impactantes pour l’économie dans son ensemble.....	129
Annexe D – Secteurs les plus impactants en approche producteur	133
Annexe E – Secteurs les plus impactants en approche consommateur	144
Annexe F – Étapes les plus impactants du cycle de vie du secteur « Hôtels et restaurants »	154
Annexe G – Analyses complémentaires en dehors des États-Unis	158
Annexe H – Comparaison des inventaires des émissions communes de USEEIO et d’Exiobase	162
Annexe I – Unités d’impact pour chaque catégorie	164

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les questions environnementales sont de plus en plus présentes dans la société actuelle, que ce soit au niveau politique, industriel ou social. La nécessité pour notre société dans son ensemble de réduire nos impacts sur l'environnement est de plus en plus apparente. Ces impacts peuvent se manifester d'un grand nombre de manières, réparties en catégories d'impact ou aires de protection (réchauffement climatique, disparition de la couche d'ozone, déplétion des ressources, diminution de la biodiversité ou encore effets sur la santé humaine par exemple). C'est l'Homme qui, à travers son action (émissions de diverses substances, utilisation de matières fossiles ou minérales, modification de l'usage sols...) est la cause d'une partie de ces impacts. Il est nécessaire de faire prendre conscience au consommateur du poids que ces décisions peuvent avoir sur l'environnement. Chaque choix de consommation a des effets liés à l'utilisation d'un produit ou service (émissions d'une voiture, d'une centrale thermique, rejets de substances toxiques dans les rivières...) et d'autres causés en amont ou en aval de cette utilisation (choix des matières premières, émissions utilisées lors de sa production, rejets dans l'environnement lors de la fin de vie d'un produit...) et ces effets sont influencés par de très nombreux paramètres (physiques, chimiques, économiques, sociaux...). Pour cette raison, il est indispensable de mesurer, d'étudier et de prévoir les impacts de ces différentes décisions ainsi que des mesures prises pour lutter contre ces mêmes impacts afin d'éviter de simplement les transférer vers un autre moment de la vie d'un produit, vers un produit ou service annexe, vers une autre région du monde ou vers une autre catégorie d'impact, ceci afin que le décideur ou le consommateur puisse faire ses choix en réelle connaissance de cause.

De nombreux outils ont été développés dans ce but. Parmi ceux-ci, les Analyses du Cycle de Vie (ACV) et les Analyses Input-Output (AIO) permettent de calculer les de toute la chaîne de valeur de produits ou de services consommés et ce sur différentes aires de protection. Ces méthodes utilisent des approches et des données très différentes pour apporter diverses informations sur les effets de l'Homme sur son environnement. Elles sont toutes les deux confrontées à la difficulté de couvrir toutes les chaînes de valeurs et tous les vecteurs d'impacts entrant en jeu dans le cycle de vie d'un produit afin de permettre une analyse exhaustive de tous ses impacts. L'ACV permet, à travers une étude détaillée de prendre en compte un très grand nombre d'émissions vers l'environnement causées par l'ensemble du cycle de vie d'un produit mais est limitée dans sa capacité à couvrir toutes les chaînes de valeurs. L'AIO, puisqu'elle se base sur une description

complète de l'ensemble des activités d'une région, parvient à inclure l'intégralité des processus intervenant dans le cycle de vie de l'objet de l'étude mais ne couvre qu'un nombre limité d'émissions. Les points forts et les points faibles de ces deux études sont donc en partie complémentaires. C'est pourquoi certaines études essaient de combiner ces deux types d'outils afin de combler les troncatures qui leur sont inhérentes. On appelle ces études des analyses hybrides. Elles consistent en général à compléter une ACV à partir de données provenant d'une AIO. Ceci permet donc ce bénéficié à la fois de la meilleure couverture des émissions et des ressources de l'ACV tout en réduisant sa troncature des chaînes de valeurs grâce aux données de l'AIO.

L'objectif de cette maîtrise est d'étudier l'importance des problèmes de complétude au sein d'un MREEIO et de proposer un cadre méthodologique permettant de les réduire. Pour cela, une première analyse qualitative a été menée, suivie d'une analyse quantitative. Cette seconde étude a pu être réalisée en complétant un MREEIO à partir d'une base de données environnementales annexe, à l'aide d'un code informatique, puis en effectuant diverses analyses afin de comparer l'EEIO avec et sans son complément. Ce travail s'inscrit dans un projet plus large visant à combiner les données Input-Output et les données ACV.

Le chapitre 2 de ce mémoire propose une revue de littérature permettant de comprendre le contexte général dans lequel s'inscrit ce mémoire et le manque dans l'état des connaissances actuelles qu'il essaye de combler. Le chapitre 3 présente la problématique et les objectifs principaux et secondaires de cette maîtrise ainsi que l'analyse préliminaire ayant permis de confirmer la nécessité de réaliser cette étude et de guider nos choix de recherche. Le chapitre 4 décrit l'ensemble de la méthodologie suivie au cours de ce projet, tout d'abord pour mener la première analyse qualitative, puis la méthodologie générale sur laquelle s'est basée notre démarche de complétion d'un MREEIO ainsi que la façon dont nous avons analysé ce MREEIO complété afin d'en déduire les problèmes de troncatures du MREEIO original. Enfin, ce chapitre 4 décrit le souci de transparence qui a guidé l'ensemble de cette étude et les manières de l'assurer. Le chapitre 5 présente les différents résultats de cette maîtrise : tout d'abord les conclusions de l'analyse qualitative préliminaire concernant la troncature du MREEIO étudié en particulier, EXIOBASE, puis le cas d'application de la méthode générale de réduction des troncatures d'un MREEIO présentée dans la partie précédente. Ce chapitre se poursuit en proposant les résultats des différents calculs d'impacts menés afin d'analyser le MREEIO complété à l'aide de notre cas d'application. Enfin, le chapitre

Résultats se termine en présentant brièvement le code informatique que nous avons produit afin de mener la majeure partie de notre étude et qui nous a permis de répondre à l'exigence de transparence de ce travail. Le chapitre 6 contient d'une part l'interprétation des résultats obtenus à l'aide du MREEIO complété, qui nous a permis de réellement quantifier les troncatures d'EXIOBASE, et d'autre part une discussion sur les incertitudes présentes tout au long de notre étude. Enfin, le chapitre 7 revient sur l'ensemble des contributions de notre recherche, propose des pistes d'amélioration pour ce projet ainsi que quelques recommandations.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Analyses du Cycle de Vie

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil couramment utilisé afin d'évaluer les impacts potentiels d'un produit ou d'un service sur l'environnement. Le principe d'une ACV est de prendre en compte l'intégralité des sources d'impacts, tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Le cycle de vie est l'ensemble des étapes intervenant entre le début de la conception du produit et sa fin de vie (extraction des matières premières, production, transport, utilisation, fin de vie comme par exemple recyclage ou incinération...). Alors que certaines ACV, qualifiées d'ACV du berceau à la tombe ou *cradle-to-grave*, prennent en compte l'intégralité de ces étapes, d'autres se limitent à certaines d'entre elles en s'arrêtant au début ou à la fin d'une de ces étapes, ce sont les ACV du berceau à la porte (*cradle-to-gate*), de la porte à la porte (*gate-to-gate*) ou de la porte à la tombe (*gate-to-grave*). Par exemple, une ACV du berceau au tombeau d'une voiture prendra à la fois en compte les émissions des émissions produites directement par la combustion de son carburant au cours de son utilisation mais également les impacts liés à l'extraction des métaux nécessaires à la production de la carrosserie, à la transformation du pétrole en combustible utilisable par le véhicule, à la mise en décharge de la voiture en fin de vie, voire à l'entretien des routes sur lesquelles elle se déplace.

La méthode ACV est décrite formellement par les normes ISO 14040-44. Elle divise cette analyse en quatre étapes (Figure 2.1) (International Organization for Standardization (ISO), 2006b, 2006a).

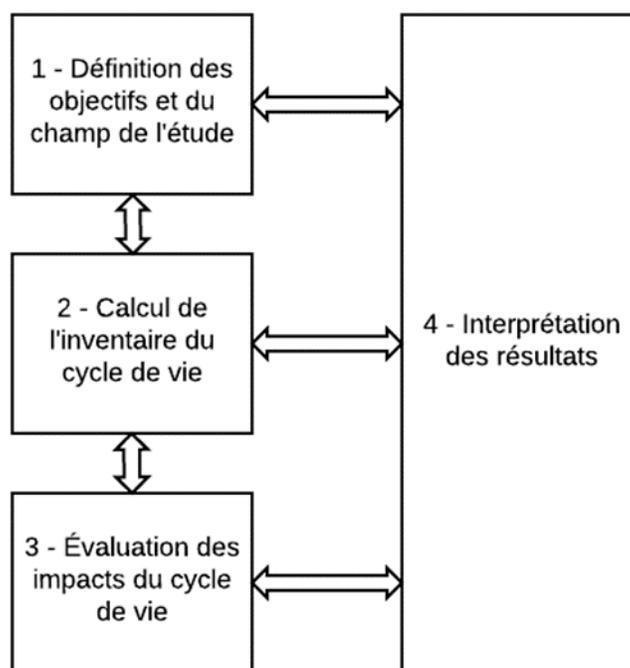


Figure 2.1 : Description des étapes d'une ACV d'après les normes ISO 14040-44.

La première étape consiste à établir le cadre de l'étude. C'est-à-dire à définir pourquoi l'analyse doit être menée, à quoi est-ce qu'elle va servir et à qui est-ce que cette ACV est destinée, en particulier est-ce qu'elle vise à être présentée au grand public ? C'est également au cours de cette étape que seront définis tous les éléments cruciaux caractérisant cette étude, au nombre de 12 d'après la norme ISO (fonction et unité fonctionnelle du système étudié, frontières du système, règles d'allocation pour les processus multifonctionnels, catégories d'impact étudiées, hypothèses de l'étude, type de revue critique pour l'étude, type et format du rapport...). La définition de la fonction et de l'unité fonctionnelle sont cruciales. La fonction est la description précise de l'élément réellement analysé par l'ACV qui doit inclure toutes les exigences de l'étude (ensemble des fonctionnalités recherchées, emplacement géographique ou temporel spécifique, durée de vie...) et l'unité fonctionnelle est sa quantification, par exemple « Transporter 1 passager sur 1 km » pour analyser les impacts de l'utilisation d'un véhicule. Tous les autres services potentiellement remplis par le véhicule (chauffage, protection des intempéries, musique...) sont appelés fonctions secondaires. Elles pourront être prises en compte à travers des règles d'allocation pouvant permettre de réduire les impacts de la fonction principale puisqu'elles évitent l'utilisation

de produits ou services complémentaires. L'Unité Fonctionnelle (UF) permet de normaliser les résultats de l'ACV. De plus, lorsqu'une ACV est utilisée afin de comparer deux produits, c'est cette UF qui permet de rendre une réelle comparaison possible puisqu'elle doit être identique pour les deux produits comparés.

Un autre aspect extrêmement important de cette première étape est la définition des frontières du système étudié. Celles-ci décrivent l'ensemble des processus apparaissant tous le long du cycle de vie et pris en compte ou non dans l'analyse menée. Certains processus dont les impacts sont considérés comme pouvant être négligeables devant les autres étapes du cycle de vie étudié car généralement faibles (typiquement les services comme par exemple le marketing) ou car ils sont très éloignés des étapes principales du système (par exemple l'extraction des minéraux ayant permis la production de machines elles-mêmes utilisées dans la fabrication d'autres machines de la ligne de production de la voiture étudiée) peuvent ainsi être écartés de l'étude. Dans le cas d'analyses comparatives, des processus identiques entre les différents produits comparés peuvent également ne pas être considérés.

La deuxième étape est la production de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV). Elle consiste à recenser l'ensemble des échanges entre le système étudié et l'environnement qui ont lieu afin que l'UF puisse être réalisée. Tous ces échanges sont appelés flux élémentaires et apparaissent à la frontière entre la technosphère (formée par toutes les structures et activités humaines) et l'écosphère (formée par la nature donc par exemple les êtres vivants ou encore les ressources comme les minéraux, les ressources fossiles, les terres ou les océans). Ces flux élémentaires sont constitués des ressources prélevées de l'écosphère (eau, terres, minéraux...) et des émissions produites par l'ensemble des processus du système étudié y étant rejetées (pesticides dans les terres, CO₂ dans l'air ou fertilisants dans l'eau par exemple). Ils sont quantifiés à partir du calcul intermédiaire des flux économique, c'est-à-dire des flux prenant place entre les différents processus du système à l'étude. L'énergie produite pour alimenter des machines, les kilomètres parcourus pour la livraison de pièces détachées ou les pièces détachées elles-mêmes sont des exemples de flux économiques. Le calcul de ces flux économiques et élémentaires s'effectue en suivant une approche ascendante ou *bottom-up* c'est-à-dire en allant du spécifique vers le général : quelles sont les émissions directes produites par la réalisation de la fonction principale étudiée, de quels flux économiques a besoin le processus principal pour réaliser l'UF et en quelle quantité, de quels processus élémentaires proviennent ces flux économiques et ainsi de suite. On sépare en général l'ensemble des processus du système en

deux sous-ensembles. Les processus d'avant-plan sont très spécifiques au produit ou au service étudié et leurs données (paramètres internes comme le rendement par exemple mais aussi flux économiques et élémentaires qui y sont reliés) sont recherchées directement par l'analyste et parfois difficiles à obtenir notamment pour des raisons de confidentialité de données industrielles. Les processus d'arrière-plan sont plus généraux et sont utilisés soit par manque de données spécifiques soit tout simplement parce qu'il est impossible pour l'analyste d'obtenir des informations sur l'intégralité des processus les plus éloignés du cycle de vie (Frischknecht, 1998). Les données de ces processus d'arrière-plan sont en général tirées de bases de données dont une des plus souvent utilisées est *ecoinvent* (Wernet et al., 2016a). Une description plus poussée d'*ecoinvent* sera proposée plus loin dans cette revue de littérature.

La troisième étape de la méthodologie ACV est l'analyse des impacts environnementaux causés par la réalisation de l'UF. Ces impacts peuvent concerner différents éléments de l'environnement, appelés aires de protection. C'est pourquoi on répartit ces impacts en catégories d'impacts. Les catégories d'impacts que l'étude souhaite considérer doivent être choisies au cours de la première étape de l'analyse. On les divise en deux grandes classes : les impacts orientés problèmes (ou midpoints) qui sont des impacts intermédiaires comme l'acidification terrestre ou aquatique, l'eutrophisation, l'écotoxicité ou encore le réchauffement climatique ; et les impacts orientés dommages qui agrègent certains des premiers impacts en impacts plus généraux comme les effets sur la santé humaine ou sur les écosystèmes. Le calcul de ces impacts environnementaux se fait en multipliant les flux élémentaires compris dans l'ICV précédemment formé par les facteurs de caractérisation (FC) qui indiquent l'impact d'une quantité donnée de ressource ou d'émission sur la catégorie qu'il caractérise. Ces facteurs de caractérisation sont décrits dans des méthodes d'impacts comme ReCiPe (Goedkoop et al., 2013), IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) ou encore Traci (Bare, 2011). Une description plus approfondie des méthodes d'impact sera effectuée plus loin dans cette revue de littérature.

Enfin, la dernière étape de la méthodologie ACV est la phase d'interprétation des résultats. C'est au cours de cette phase que les résultats de l'étape précédente sont utilisés afin d'apporter une réponse à la question posée par l'étude, typiquement choisir entre deux produits ou services comparés ou mettre en avant les étapes du cycle de vie d'un objet impactant le plus l'environnement. Des analyses de sensibilité, qui étudient la robustesse des conclusions face aux incertitudes des modèles et des hypothèses utilisées tout au long de l'étude, ainsi que des analyses

d'incertitudes sur les résultats eux-mêmes peuvent également être menées au cours de cette étape. Une partie spécifique de cette revue de littérature portera sur les différents types d'incertitudes pouvant intervenir au cours d'une telle étude (2.6). Suite à ces différentes analyses, des conclusions et des recommandations concernant le travail mené peuvent être fournies par l'analyste. Toute la méthodologie est censée être itérative, c'est-à-dire que les analyses menées au cours de cette étape d'interprétation peuvent par exemple conduire à adapter l'unité fonctionnelle, à compléter l'ICV ou à changer de méthode d'impact.

En se basant sur cette norme unique, différents types d'ACV peuvent être menées. Les ACV peuvent être comparatives (c'est-à-dire qui essayent d'analyser entre plusieurs façons de répondre à l'unité fonctionnelle, laquelle aura de moins d'impact) ou non (par exemple une simple description des processus les plus impactants du système étudié, autrement appelés points chauds). Elles peuvent être attributionnelles (ACV-A) ou conséquentielles (ACV-C). Les ACV-A sont les plus souvent utilisées et se placent dans une situation stable sur laquelle les choix testés au cours de l'ACV n'auront aucune conséquence. Les ACV-C prennent en compte les conséquences, notamment économiques, de certains choix effectués pour l'étude qui peuvent à leur tour être la cause de nouveaux impacts ne provenant pas directement du système étudié (Zamagni, Guinée, Heijungs, Masoni, & Raggi, 2012). Par exemple, le remplacement des carburants fossiles par des biocarburants va d'une part accaparer certaines terres agricoles donc causer de la déforestation afin d'en créer de nouvelles et d'autre part faire baisser la demande en pétrole, donc son prix, ce qui pourrait causer une augmentation de l'extraction d'hydrocarbures afin de combler la perte de chiffre d'affaires des sociétés pétrolières. Enfin, les ACV économiques (Swarr et al., 2011) et sociales (Benoît et al., 2013) se développent de plus en plus et permettent de prendre en compte d'autres aspects du développement durable que l'environnement.

Une des directions de la recherche actuelle dans le domaine de l'ACV est le développement de la régionalisation, c'est-à-dire la prise en compte des zones géographiques d'émissions ou de consommation des ressources sur les impacts finaux calculés afin de réduire les incertitudes spatiales des résultats obtenus. Elle peut prendre place au niveau de l'inventaire ou de l'évaluation des impacts. La régionalisation de l'inventaire consiste à prendre en compte la localisation géographique des processus faisant partie du système étudié par l'ACV ainsi que la région où les flux élémentaires sont émis ou extraits. La régionalisation de l'évaluation des impacts permet de considérer les effets réels des flux élémentaires sur un milieu spécifique lié à une zone

géographique et non plus d'utiliser uniquement des FC généraux moyens valables pour l'air, l'eau ou le sol de manière uniforme dans le monde (Potting & Hauschild, 2006).

Comme évoqué plus haut, une grande partie des flux élémentaires et des flux économiques utilisés dans les ACV proviennent de bases de données comme *ecoinvent*. La version 3 d'*ecoinvent* a été publiée en 2013 et représente la base de données ICV mondiale la plus complète à ce jour. Elle est principalement formée de données provenant de résultats d'ACV indépendants qui sont ensuite soumis par ces analystes et intégrés à *ecoinvent*. Ces résultats sont en général spécifiques à des zones géographiques données mais peuvent ensuite être moyennés et extrapolés pour les rendre applicables à d'autres régions du monde ou à des données moyennes valables pour n'importe quelle région. *ecoinvent* recouvre un très grand nombre d'activités industrielles, de produits et de services (plus de 16 000 dans la version 3.5) mais comme ces données dépendent d'analyses externes qui doivent lui être proposées, un certain nombre d'industries ne sont pas prises en compte dans cette base de données. De plus, même si la régionalisation a été améliorée dans la troisième version d'*ecoinvent*, la plupart des régions du monde ne disposent pas de valeurs spécifiques pour l'ensemble des processus. En revanche, cette base de données couvre un très grand nombre de flux élémentaires (4243 dans la version 3.5 et 1345 sans prendre en compte les compartiments d'émissions) qui, combinés à des méthodes d'impacts, permettent de très bien décrire les effets sur l'environnement des procédés recensés. De plus, *ecoinvent* fournit des informations sur les incertitudes de ses données par le biais de matrices pedigree (*ecoinvent*, 2018; Wernet et al., 2016b).

Pour conclure, l'ACV offre de nombreux avantages. Tout d'abord, c'est un outil qui permet des analyses extrêmement personnalisables et spécifiques à condition d'avoir accès aux données nécessaires. Les paramètres internes à chaque processus peuvent facilement être modifiés afin de tester différentes hypothèses et des flux élémentaires ou économiques peuvent être ajoutés à l'étude sans difficulté particulière s'ils sont disponibles. De plus, beaucoup de logiciels comme SimaPro ou OpenLCA sont utilisables, ce qui rend cet outil extrêmement accessible. Enfin, la grande personnalisation des données d'avant-plan et l'existence de bases de données d'arrière-plan comprenant des inventaires de flux élémentaires très détaillés comme *ecoinvent*, permettent à l'ACV d'offrir une large couverture des émissions vers l'environnement et de l'utilisation des ressources qui sont induites par les systèmes étudiés. Ceci permet une bonne évaluation des différents impacts environnementaux causés par les processus pris en compte dans ce système.

En revanche, cette méthode comporte aussi plusieurs inconvénients. En effet, elle est très appropriée pour des études à petite échelle mais pas vraiment à grande échelle, notamment parce qu'elle sous-entend une approche linéaire de l'économie (Yang & Heijungs, 2019). Elle est aussi très dépendante des choix de l'analyste (méthodes d'allocation, unité fonctionnelle, frontières du système...) (Margareta Lundin, Magnus Bengtsson, & Molander, 1999; Matheys et al., 2007; Svanes, Vold, & Hanssen, 2011). Surtout, elle comprend souvent un très grand nombre de troncatures dans son inventaire de flux élémentaires dues à des processus négligés du système de produit (parce que leurs impacts sont typiquement considérés comme négligeables comme les services ou les technologies de l'information ou parce que les processus sont trop éloignés de l'avant-plan pour avoir individuellement un fort impact) (Majeau-Bettez, Strømman, & Hertwich, 2011). Ces troncatures sont particulièrement présentes pour les données de l'arrière-plan issues de bases de données comme *ecoinvent* qui souffrent en plus de troncatures de problèmes d'incertitudes technologiques, géographiques et temporelles car elles se basent sur des résultats d'ACV parfois éloignés du processus pour lequel on les applique. Ceci est encore plus problématique quand ces valeurs sont appliquées à l'avant-plan par manque de données spécifiques. Il est estimé que ces troncatures peuvent représenter entre 20 % et 50 % des résultats d'une ACV (Ferrão & Nhambiu, 2009; Junnila, 2006; Lenzen, 2000; Lenzen & Dey, 2000; Norris, 2002; Rowley, Lundie, & Peters, 2009). Il a été avancé que ces problèmes de troncatures pouvaient se compenser dans le cadre d'ACV comparatives car les systèmes comparés comportaient les mêmes troncatures d'arrière-plan. Cependant, Lenzen (2002) a démontré que changer le niveau global des troncatures d'arrière-plan d'une étude comparative en ACV pouvait mener à l'inversion des conclusions de cette étude. Il a entre autres prouvé cette situation dans le cas de l'évolution de l'impact sur le réchauffement climatique de la production d'électricité par deux centrales solaires différentes, ce qui prouve que même pour des systèmes de produits très semblables, ces problèmes de couverture des processus d'arrière-plan ne se compensent pas. C'est dans l'objectif de compléter ces troncatures que des analyses hybrides AVC-AIO ont été développées (Suh et al., 2004). Ces analyses seront abordées plus tard dans cette revue de littérature (2.3).

2.2 Analyses Input-Output

Les Analyses Input-Output (AIO) sont un autre outil couramment utilisé pour calculer les impacts environnementaux de l'activité humaine. Les AIO se basent sur des tables Input-Output (IO) qui

sont des descriptions de l'économie d'une région donnée. Ces tables, développées à l'origine par Leontief (W. W. Leontief, 1936) pour réaliser des analyses purement économiques, sont produites à partir des inventaires nationaux qui regroupent l'ensemble des échanges économiques entre les différents secteurs industriels d'une région, pour une année donnée. Pour produire ces inventaires nationaux, les gouvernements récoltent l'ensemble des données économiques de ses industries (c'est-à-dire le montant et le destinataire des achats et les ventes réalisés par chacune des industries). Ces industries sont ensuite agrégées en secteurs industriels en suivant par exemple des classifications industrielles déjà existantes comme NAICS (Statistics Canada, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) & Economic Classification Policy Committee (ECPC), 2017) ou ISIC (United Nations, 2008) puis un processus itératif leur est appliqué afin de faire en sorte que les échanges économiques vérifient un certain nombre d'équilibres comme par exemple le PIB total du pays concerné. Toutes ces données monétaires sont regroupées au sein de matrices technologiques (Z) qui peuvent être normalisées (A). Les différentes matrices et vecteurs utilisés par les AIO sont décrits plus en détail dans la partie méthodologie de ce mémoire (4.3.1). Ainsi, la matrice des coefficients techniques décrit, pour chaque secteur industriel agrégé, l'ensemble des intrants qu'il doit utiliser afin de produire une unité de production. Par exemple, le secteur de la restauration en Allemagne utilise 0,3 euro du secteur de l'agroalimentaire et 0,2 euro du secteur énergétique afin de produire 1 euro de service. Ces tables IO ont ensuite été complétées avec des Extensions Environnementales (EE) pour former des EEIO (W. Leontief, 1970). Les EE sont formées à partir d'inventaires nationaux variés décrivant les émissions ou les ressources utilisées par les différentes industries d'une région ou d'autres données annexes qui sont extrapolées afin d'obtenir des valeurs d'émissions (par exemple calculer des émissions de CO₂ à partir de la consommation d'énergie fossile). Après d'autres processus itératifs permettant de faire respecter à ces valeurs de nouveaux équilibres (équilibres massiques entre les entrées d'hydrocarbure et les sorties de CO₂ par exemple), ces valeurs de flux élémentaires sont à leur tour réparties entre les différents secteurs industriels et forment des matrices de coefficients environnementaux normalisées (S) ou non (F). Ainsi la matrice S indique la masse de chacune des émissions (ou des ressources) prises en compte par l'EEIO qui est produite (ou consommée) directement lors de la production d'une unité monétaire de chacun des secteurs industriels qui composent les colonnes de la matrice. Une meilleure description de ces matrices est disponible dans la partie méthodologie de ce mémoire (4.3.1). En plus des données environnementales, des données concernant les heures de

travail nécessaires dans chacun des secteurs industriels sont fournies, soit en données monétaires soit en données physiques (Wood et al., 2013). Ces informations permettent entre autres de prendre en compte une partie des impacts sociaux de l'économie.

Un certain nombre de pays possèdent un ou plusieurs EEIO nationaux, à l'image de CEDA (Suh, 2009) ou USEEIO (Yang, Ingwersen, Hawkins, Srocka, & Meyer, 2017) pour les États-Unis, de Open IO-Canada pour le Canada (CIRAIG, 2012) ou encore de CEEIO pour la Chine (Liang et al., 2017). Des EEIO décrivant plusieurs pays différents existent aussi, ce sont des MREEIO basés sur des tables MRIO comme par exemple EORA (Lenzen, Moran, Kanemoto, & Geschke ISA, 2013), WIOD (Dietzenbacher, Los, Stehrer, Timmer, & de Vries, 2013) ou EXIOBASE (Stadler et al., 2018). Les MRIO se basent sur divers inventaires nationaux et internationaux afin de produire leurs matrices technologiques et environnementales, les données non comprises dans des inventaires sont extrapolées à partir d'autres sources ou d'autres pays. Typiquement, les régions pour lesquelles le moins d'informations sont disponibles sont agrégées dans les ensembles de pays (RoW, c'est-à-dire *Rest of the World* ou reste du monde). Mais même pour les pays possédant le plus d'informations, afin d'obtenir une certaine homogénéité dans les inventaires de flux élémentaires, il est nécessaire de les réduire au plus petit dénominateur commun, c'est-à-dire de ne prendre en compte que les ressources et les émissions inventoriées dans la quasi-totalité des régions du MRIO. Si les ressources sont généralement assez bien prises en compte dans l'ensemble des inventaires nationaux, ce n'est pas le cas pour les émissions et ceci implique automatiquement un nombre très limité de substances inventoriées dans les MRIO. Ainsi WIOD ne recense que 8 émissions différentes (CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, SO_x, CO, NMVOC et NH₃) (Genty, Arto, & Neu, 2012) et EXIOBASE, qui est pourtant reconnu comme le plus complet des MRIO, ne contient que 32 substances différentes dans ses inventaires d'émissions pour sa version 2 (EXIOBASE, 2015a). Les EEIO nationaux en revanche ne sont pas soumis à cet impératif du plus petit dénominateur commun et certains peuvent donc recenser plus de substances (865 substances distinctes pour USEEIO par exemple (Ingwersen & Yang, 2017)). Les MRIO ont deux avantages. Tout d'abord, ils permettent la comparaison de deux régions distinctes, chacune caractérisée par des échanges entre chaque secteur industriel de son économie et des technologies qui lui sont propres. Ensuite, les MREEIO permettent de représenter correctement les secteurs industriels participant au cycle de vie du produit étudié, même si ceux-ci appartiennent à une région différente de celle du secteur principal qui produit l'objet de l'étude. En effet dans le cadre d'EEIO régionaux, tous les produits

importés participant au cycle de vie du produit étudié sont supposés reposer sur la même technologie que leur équivalent domestique, c'est l'hypothèse de « mirror economy ». Avec un MREEIO, ces produits reposeront sur les technologies propres à la région dont ils proviennent, ce qui permet une meilleure estimation de leurs impacts (A. Tukker et al., 2014). Afin d'analyser les impacts globaux réels sur l'environnement de politiques nationales, l'apport des MREEIO semble donc extrêmement important. Enfin, tous les EEIO et les MREEIO sont construits selon des méthodologies propres. Par exemple, ils ne suivent pas tous les mêmes classifications industrielles, ce qui fait que certains proposent une vue beaucoup détaillée de l'économie que d'autres (35 secteurs industriels pour WIOD 2013 contre 163 pour EXIOBASE et 389 pour USEEIO) (Timmer, Dietzenbacher, Los, Stehrer, & de Vries, 2015; Wood et al., 2014; Yang, Ingwersen, et al., 2017).

L'AIO est utilisée afin d'étudier des impacts de régions ou de secteurs entiers de l'économie et de choix généraux de consommations qui peuvent être faits à l'intérieur de ces régions ou secteurs. Elles adoptent une approche descendante (ou top-down) c'est-à-dire qu'elles partent d'une situation très générale décrite dans les tables EEIO avant d'adapter ces dernières à leur étude pour décrire une situation plus spécifique. Elles consistaient auparavant exclusivement à des analyses du berceau à la porte puisqu'il n'était pas possible d'étudier les phases d'usage ou de fin de vie des produits analysés mais uniquement leur cycle de vie jusqu'à leur achat par le consommateur final. Cependant, des extensions permettant de prendre en compte le cycle de vie au complet sont maintenant courantes (Nakamura & Kondo, 2002 b; Schmidt et al., 2012). Les résultats des AIO sont obtenus à travers des multiplications matricielles qui permettent de calculer des inventaires de flux élémentaires qui sont ensuite multipliés par des facteurs de caractérisation d'une méthode choisie afin de parvenir à des valeurs d'impacts environnementaux. Le détail de ces calculs est explicité dans la partie méthodologie (0).

Tout comme les ACV, les AIO présentent plusieurs avantages et inconvénients. Le premier des avantages est qu'elles permettent des analyses à grande échelle sur l'économie de toute une région, en prenant en compte les volumes de chacun des secteurs dans l'économie, c'est-à-dire l'importance relative de chacun de ces secteurs d'un point de vue économique. Par extension, ceci permet de connaître l'importance relative de leurs impacts environnementaux par rapport à ceux du reste de la région. Elles utilisent des données moyennes alors que les valeurs comprises dans les bases de données d'ACV sont parfois trop spécifiques. Par exemple analyse cherchant à modéliser les impacts de la production d'une voiture moyenne utilisera les données du secteur automobile

dans son ensemble pour une AIO alors qu'une ACV devra extrapoler ces impacts à partir de ceux de la production d'une voiture spécifique ou d'une moyenne de plusieurs voitures spécifiques si la base de données ACV qu'elle utilise en couvre plusieurs. Les AIO possèdent également une certaine stabilité car elles vérifient des équilibres financiers. Elles peuvent donc être liées à d'autres modèles plus flexibles comme les modèles d'équilibres généraux (Peters, Andrew, & Lennox, 2011). Elles incluent une partie d'informations sur les impacts sociaux de l'économie en contenant des données sur l'emploi et la valeur ajoutée apportée par les travailleurs. Enfin et surtout, elles représentent l'économie dans son entièreté donc ne connaissent aucune troncature de processus industriels.

Du côté des inconvénients des AIO, on peut citer en premier lieu que les données comprises dans les EEIO sont valables pour une année donnée. Cela pouvait causer auparavant des incertitudes temporelles car les inventaires de données étant peu fréquents, les AIO se basaient souvent sur des informations économiques et technologiques dépassées. C'est de moins en moins le cas car différents EEIO proposent maintenant des tableaux pour de nombreuses années consécutives, ce qui permet de développer des séries temporelles afin de modéliser l'évolution technologique dans le temps et donc d'estimer les technologies même pour des années non couvertes par les EE (Stadler et al., 2018). Même si cela peut présenter certains avantages, le fait que l'ensemble des données comprises dans les EEIO soient des données moyennes empêche de réaliser des analyses sur des produits spécifiques. Les IO sont divisés entre un nombre restreint de secteurs industriels qui agrègent un très grand nombre d'industries d'où proviennent des produits et services extrêmement variés. Ainsi au sein d'une AIO, une voiture électrique et une voiture à moteur à combustion auront exactement les mêmes impacts par dollar, malgré le fait qu'elles n'aient absolument pas les mêmes émissions ou les mêmes matériaux entrant dans leur composition. Ceci limite les études pouvant être menées à l'aide d'une AIO, par exemple l'étude de l'électrification des secteurs du transport d'une région, sauf si l'analyste modifie largement les tables d'origine. Cette hypothèse d'homogénéité des technologies et des produits se double d'une hypothèse d'homogénéité des prix (un produit sera vendu au même prix quel que soit l'acheteur) qui est très simplificatrice et entraîne d'autres incertitudes sur les résultats. L'utilisation de données monétaires peut aussi entraîner des inconvénients, par exemple l'effet de l'inflation des prix sur les résultats et surtout le fait que toutes les activités sans valeur monétaire recensée par l'état ne sont pas prises en compte dans les AIO (comme par exemple le travail au noir ou les activités bénévoles). Enfin, un des principaux

inconvénients de ces analyses est le problème de couverture des flux élémentaires consommés ou émis par les différents secteurs des EEIO qui a été explicité plus haut dans cette partie. Cette troncature systématique peut entraîner une sous-estimation des impacts calculés pour plusieurs aires de protection même si elles ne sont pas toutes affectées de manière homogène. Comme expliqué précédemment, ces problèmes de couvertures des émissions sont à relativiser pour certains EEIO nationaux mais par pour tous (CEEIO indique ainsi décrire 30 types de polluants différents mais certains comme la suie, la demande chimique en oxygène ou les déchets médicaux ne sont pas des substances chimiques classiquement inventoriées et donc prises en compte par les méthodes de caractérisation) (Liang et al., 2017). En revanche, ils touchent tous les MREEIO, c'est pourquoi rares sont les études qui analysent d'autres catégories d'impacts que le réchauffement climatique, l'utilisation d'énergie, de matériaux, de terres ou d'eau (Beylot et al., 2019). Le constat de cette existence de troncature au sein des MREEIO a mené à réaliser la maîtrise présentée dans ce mémoire afin d'évaluer les problèmes de couverture des MREEIO et de proposer une manière de les compléter.

2.3 Analyses hybrides

Les paragraphes précédents ont montré qu'un grand inconvénient de la méthode ACV était la troncature d'une partie des processus censés composer les systèmes étudiés. Or un des principaux avantages des AIO est justement sa prise en compte de l'ensemble des secteurs de l'économie. Des outils appelés analyse hybride ont donc été développés afin de combiner ces deux méthodes en complétant les troncatures de l'ACV avec des données venant d'EEIO (Bullard, Penner, & Pilati, 1978; Joshi, 1999; Lenzen & Crawford, 2009; Nakamura & Kondo, 2002a; Suh & Huppes, 2005).

Il n'existe pas encore de méthodologie faisant consensus parmi la communauté pour réaliser ce type d'analyses. C'est pourquoi de nombreuses méthodes plus ou moins différentes ont été développées au cours des dernières années, que (Crawford, Bontinck, Stephan, Wiedmann, & Yu, 2018) répartissent en quatre catégories : tiered analysis, path exchange, matrix augmentation et integrated hybrid analysis. Ces méthodes donnent une importance variable aux données de l'AIO ou de l'ACV et se rapprochent donc de l'une ou de l'autre qu'elles complètent avec des données provenant de la seconde. La difficulté principale de ces analyses est de bien agencer la frontière entre ACV et AIO afin de ne pas oublier de donnée, sans quoi l'hybridation serait incomplète, mais également de ne pas compter deux fois des données identiques (par exemple avec des données sur

la production d'électricité prises en compte dans l'arrière-plan de l'ACV mais aussi dans l'EEIO) (Strømman, Peters, & Hertwich, 2009; Strømman & Solli, 2008). Récemment, des démarches ont été entreprises afin à la fois de définir une méthodologie universelle à adopter pour réaliser des analyses hybrides, à l'image des ACV, mais aussi de réaliser une hybridation globale des bases de données ACV comme *ecoinvent*, afin de résoudre le problème de troncature de l'arrière-plan des ACV pour tous les analystes le désirant sans qu'ils aient eux-mêmes à réaliser l'hybridation (Crawford et al., 2018; Stephan, Crawford, & Bontinck, 2019; Strømman et al., 2009; Suh & Lippiatt, 2012; Bo P. Weidema, 2011).

Plusieurs éléments limitent l'application globale des analyses ACV hybrides, malgré leurs avantages apparents. Tout d'abord, ces analyses sont encore peu répandues dans la communauté ACV, qui est elle-même souvent distincte de la communauté IO, ce qui en l'absence de méthodologie générale pour les analyses hybrides, n'encourage pas les différents analystes à les appliquer. Dans la même idée, contrairement aux ACV et de plus en plus souvent aux AIO, aucun logiciel ne permet encore de les appliquer facilement. De plus, toujours à cause de cette absence de consensus sur les règles à appliquer pour réaliser une analyse hybride, les résultats de ces dernières peuvent être extrêmement dépendants des choix des analystes (choix internes à l'ACV à compléter, types d'hybridation choisis, degré d'hybridation mis en place, estimation des prix...). Certains chercheurs avancent aussi que les problèmes d'agrégation internes aux AIO sont supérieurs aux problèmes de troncature des ACV, ce qui annulerait l'intérêt des analyses hybrides. (Yang, Heijungs, & Brandão, 2017) Mais cette hypothèse est contredite par d'autres résultats. (Pomponi & Lenzen, 2018) Enfin, même si ces analyses permettent de lutter contre la troncature des processus industriels internes aux ACV, elles ne résolvent pas le problème de manque de couverture systématique des flux élémentaires des tables EEIO et en particulier MREEIO. Une analyse hybride se contentera donc de compléter des données incomplètes avec d'autres données également incomplètes, tout particulièrement pour les impacts toxiques (Suh & Huppes, 2002). Pour certaines catégories d'impact bien représentées par les flux élémentaires compris dans les MREEIO comme le réchauffement climatique ou l'eutrophisation, ces hybridations peuvent effectivement couvrir en grande partie les troncatures d'inventaire liées à l'exclusion d'une partie des chaînes de valeurs hors des frontières du système étudié par l'ACV. En revanche pour d'autres aires de protections qui sont impactées par des flux élémentaires très peu recensés par les extensions environnementales des MRIO comme l'écotoxicité, on peut supposer que l'hybridation

n'apporte en réalité que peu aux résultats. Ce problème est particulièrement important pour les analyses hybrides qui utilisent des données de MREEIO comme EXIOBASE qui souffrent beaucoup plus de ces troncatures que certains EEIO nationaux.

Cette maîtrise vise donc à lutter contre cet autre type de troncature, interne aux MREEIO, en quantifiant ces problèmes de couverture et en complétant ces tables avec les flux élémentaires, et plus particulièrement les émissions, qui leur manquent.

Le Tableau 2.1 présente un résumé des caractéristiques des ACV et des AEE(MR)IO qui les rendent complémentaires et expliquent le développement des analyses hybrides ainsi que la nécessité de cette maîtrise.

Tableau 2.1 : Récapitulatif des complémentarités entre ACV et AEE(MR)IO.

	ACV	AEE(MR)IO	
Échelle des analyses	Analyses spécifiques	Analyses à grande échelle (secteurs industriels, régions du monde...)	
Type de données	Données précises	Données moyennes et agrégées (homogénéité des technologies et des prix)	
Couverture des chaînes de valeur	Troncature systématique de procédés industriels	Modélisation complète des chaînes de valeur (hors données non monétaires)	Troncature adressée à travers les analyses hybrides
Couverture des flux élémentaires	Large couverture de flux élémentaires	Troncature de flux élémentaires	Troncature adressée dans ce mémoire

2.4 EXIOBASE

EXIOBASE est un MRIO développé dans l'objectif de proposer une vision de l'économie détaillée, en particulier au niveau de secteurs d'industrie primaire (agriculture, extractions, énergie...) et permettant une analyse poussée des problématiques environnementales à travers des Extensions Environnementales (EE) bien plus complètes, avec 32 différentes substances inventoriées comme

émissions (EXIOBASE, 2015a), que les autres MREEIO disponibles comme WIOD 2013 (8 émissions) (Dietzenbacher et al., 2013) ou GTAP (uniquement CO₂, CH₄, N₂O et les gaz fluorés) (Irfanoglu & van der Mensbrugge, 2015). Cette grande couverture des flux élémentaires, relativement aux autres MREEIO, est la raison pour laquelle cette maîtrise a utilisé EXIOBASE comme objet d'analyse des problèmes de troncature environnementale des AIO.

La version 2 d'EXIOBASE a été produite dans le cadre du projet CREEA, financé par la Commission Européenne et publiée en 2014. Elle fait suite à la première version produite dans le cadre du projet EXIOPOL et publiée en 2012 et précède la troisième version, issue du projet DESIRE et publiée en 2015. Les principales avancées de la version 2 par rapport à la première version sont d'une part l'ajout de régions Reste du Monde permettant une vision plus détaillée des échanges internationaux (le nombre de régions étudiées est ainsi passé de 44 à 48, dont 43 pays spécifiques et 5 Restes du Monde regroupant divers pays de grandes régions comme l'Afrique, l'Europe de l'Est ou l'Amérique latine) et d'autre part une description beaucoup plus précise des secteurs industriels (129 produits et industries pour la version 1 contre 200 produits et 163 industries pris en compte dans la version 2). La deuxième version met également à jour les données utilisées en prenant les valeurs de l'année 2007 alors que la première version était valable pour l'année 2000. La version 3 ajoute la région Croatie, propose des données annuelles entre 1995 et 2014, des tables physiques et plus seulement économiques, un plus grand détail pour la provenance des émissions dans l'inventaire et un plus grand nombre de ressources étudiées (Stadler et al., 2018; Wood et al., 2014). Malheureusement, cette version n'était pas encore disponible au commencement de ce travail de recherche, ce qui est la raison pour laquelle nous n'avons pas pu l'utiliser.

La version utilisée dans le cadre de ce mémoire est la version 2.2 et les tables utilisées sont les tables par industries et non par produits. Dans la suite de ce mémoire, sauf précision, c'est donc à cette version que nous nous référerons en évoquant EXIOBASE. De plus, nous nous intéressons uniquement aux émissions et non aux ressources car les ressources ne sont typiquement pas considérées comme souffrant de troncatures dans les MREEIO.

La classification industrielle d'EXIOBASE se base sur la classification NACE 1.1 (Europa - RAMON, 2002) de l'Union Européenne elle-même directement reliée à la classification ISIC 3.1 de l'ONU (United Nations, 2008). Certains des secteurs de NACE 1.1 qui étaient les responsables

des plus grands impacts sur l'environnement et pour lesquels les émissions des différentes industries le composant étaient très hétérogènes ont ensuite été désagrégés en de nombreux secteurs plus spécifiques et composés d'industries aux impacts potentiels plus homogènes afin de permettre des études plus précises et détaillées. C'est le cas notamment les secteurs de l'agriculture et de l'alimentation, de l'extraction et de la transformation des minéraux et des hydrocarbures, de la production d'électricité, des transports et des déchets (Wood et al., 2013). Grâce à ce haut niveau de détail, EXIOBASE est actuellement le MREEIO qui permet les analyses les plus précises au niveau industriel devant, par exemple, EORA (26 secteurs communs à toutes les régions malgré un détail allant jusqu'à 511 secteurs pour certains pays mais ne permettant pas une analyse homogène au niveau mondial) (Lenzen et al., 2013) ou WIOD (35 secteurs) (Dietzenbacher et al., 2013). EXIOBASE propose par contre une résolution assez faible en ce qui concerne les différentes régions prises en compte avec 48 régions différentes, alors que GTAP 8.1 en décrit 134 et EORA 187 (Lenzen et al., 2013; Wood et al., 2013). Cependant, ce problème est relativement négligeable puisque les 43 pays spécifiquement détaillés dans EXIOBASE couvrent 90 % du PIB mondial et la très grande majorité de l'empreinte carbone du monde (Arnold Tukker et al., 2014).

Les données ayant permis de produire EXIOBASE sont diverses. Les échanges économiques sont basés sur les inventaires de Eurostat pour les pays de l'Union Européenne et sur des tables IO nationales pour 16 autres pays. Ces données sont ensuite harmonisées (par exemple pour traiter les taxes de la même manière entre les différents pays ou les achats de résident d'un pays donné à l'étranger) puis certains détails sont ajoutés pour les secteurs désagrégés à l'aide d'hypothèses ou de multiples données annexes comme les inventaires de la FAO ou d'AgroSAM pour l'agriculture ou encore de l'IEA pour l'énergie. Diverses opérations sont ensuite mises en place afin d'assurer le respect de certains bilans, par exemple économiques, en particulièrement pour les échanges internationaux, et pour produire des tables MRIO symétriques (industrie par industrie et produit par produit). En ce qui concerne les données environnementales et sociales, elles sont extraites de nombreuses sources nationales ou internationales (FAOSTAT, Aquastat, LABBORSTA...) ou estimées à partir d'autres données concernant des activités industrielles ou des consommations énergétiques. Par exemple, les informations concernant l'énergie extraites des bases de données de l'IEA servent à estimer des valeurs d'émissions pour différents pays. Pour les pays ne disposant pas d'informations spécifiques, les valeurs ont été déduites de valeurs mondiales ou extrapolées depuis d'autres pays considérés comme proches et pour lesquels plus de détails étaient disponibles.

Toutes ces données sont par la suite harmonisées et vérifiées en les comparant à des relevés d'émissions nationaux afin de relever et corriger de potentielles erreurs importantes (Wood et al., 2014).

Les difficultés à obtenir des informations détaillées concernant les flux environnementaux de tous les pays sont la raison pour laquelle, même le MRIO le plus complet au niveau de ses Extensions Environnementales qu'est EXIOBASE, peut rencontrer de nombreux problèmes de couverture, en particulier pour les émissions. Ceci explique le besoin de développer des méthodes afin de quantifier ces problèmes de couverture et potentiellement de les réduire. C'est l'objectif de cette maîtrise.

2.5 Méthodes de caractérisation

Une fois les différents flux élémentaires recensés dans des inventaires, que ce soit en ACV ou en AIO, la traduction de ces quantités massiques de ressources ou d'émissions en impacts potentiels sur l'environnement se fait via des méthodes de caractérisation. Chacune de ces méthodes évalue des catégories d'impacts différentes qui peuvent être intermédiaires (réchauffement climatique, acidification, destruction de la couche d'ozone...) ou évaluer des dommages, c'est-à-dire agréger plusieurs impacts intermédiaires ou problèmes (dommages sur la santé humaine, les écosystèmes ou sur la disponibilité des ressources). Certaines méthodes ne proposent que la caractérisation de problèmes, d'autres ne s'intéressent qu'aux dommages et une troisième catégorie prend en compte les deux types de catégories d'impact. Les catégories intermédiaires font appel à des modèles comprenant moins d'incertitudes mais sont moins compréhensibles et faciles à appréhender. À l'inverse, les catégories de dommages permettent une communication plus facile et demandent de considérer un moins grand nombre d'impacts grâce à l'agrégation des impacts intermédiaires mais comprennent beaucoup plus d'incertitudes.

Chaque méthode caractérise des flux élémentaires différents avec certaines couvrant beaucoup plus de substances que d'autres. Elles proposent des facteurs de caractérisations qui, pour chaque catégorie d'impact que la méthode prend en compte, représentent une quantité d'impact par unité de flux élémentaire (kg de substance, L d'eau, m² de terrain...). Beaucoup de flux élémentaires peuvent impacter diverses aires de protections et un facteur de caractérisation leur est donc attribué pour chaque catégorie d'impact. Certaines méthodes différentient les impacts des flux élémentaires

en fonction de l'endroit où il est émis, appelé compartiment d'émission (air, eau ou sol) voire de sous-compartiments (air urbain ou rural, forte ou faible population, terre agricole ou industrielle...). Certaines méthodes proposent également des évaluations différentes de certaines catégories d'impacts, par exemple en fonction de la plage de temps à laquelle on s'intéresse pour les gaz à effet de serre. Un nouveau facteur de caractérisation est donc associé à chacune de ces variations.

Chaque méthode d'impact utilise des modèles potentiellement différents pour calculer ses facteurs de caractérisation et ces modèles peuvent varier au cours du temps. Ceci explique que deux méthodes peuvent fournir des facteurs très différents pour le même flux élémentaire et les mêmes compartiments et sous-compartiments. De plus, depuis quelques années, des méthodes comme IMPACT World + (Bulle et al., 2019) prennent en compte la spatialisation des impacts c'est-à-dire qu'elles proposent un facteur de caractérisation différents au même flux élémentaire en fonction de la zone géographique où il a été émis. Tous ces éléments expliquent que deux méthodes d'impacts voire deux versions de la même méthode d'impact peuvent fournir des résultats très différents à partir du même inventaire de flux élémentaires.

Le choix d'une méthode d'impact peut donc avoir une très grande influence sur l'analyse menée et ses conclusions. Chaque méthode d'impact possède des avantages et des inconvénients mais un grand nombre restent globalement appliquées comme CML (CML - Department of Industrial Ecology, 2001), ReCiPe (Goedkoop et al., 2013), TRACI (Bare, 2011), USETox (Fantke et al., 2017) pour les impacts toxiques ou encore IMPACT World + (Bulle et al., 2019) pour des impacts régionalisés. L'analyste choisit entre ces différentes méthodes en fonction de plusieurs critères comme les catégories d'impacts étudiées, les flux élémentaires pris en compte, les zones géographiques spécifiées, le détail des données, la confiance dans les modèles utilisés...

Devant tant de méthodologies différentes pouvant donner lieu à des analyses très hétérogènes, des regroupements de nombreux professionnels, parties prenantes de l'ACV, regroupés au sein de la Life Cycle Initiative menée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) et la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) travaillent depuis plusieurs années afin d'obtenir un consensus sur de nombreux aspects de l'ACV. En ont découlé entre autres choses la méthode USETox ainsi que des guides concernant la caractérisation des inventaires d'ACV (catégories problème et dommage qui devraient être étudiées, indicateurs conseillés pour

la description de ces impacts, modèles à suivre pour les calculer...) (Margni, Gloria, & Bare, 2008; Sonnemann, Vigon, Rack, & Valdivia, 2013). On peut espérer voir apparaître, dans les années à venir, un fort consensus sur les méthodes de caractérisation des impacts permettant, tout comme le cadre mis en place par les normes ISO 14040-44, une plus grande homogénéité des pratiques et donc des analyses plus comparables et des résultats moins dépendant des décisions prises par les analystes en ce qui concerne l'étape d'évaluation des impacts.

Cette maîtrise n'a pas pour objectif de calculer des impacts environnementaux. Cependant, l'évaluation d'impact intermédiaires a été choisie comme moyen d'évaluer les problèmes de troncature des MREEIO en comparant l'importance relative du manque d'émissions diverses dans les extensions environnementales. Ainsi, la troncature d'une substance émise en grande quantité par l'ensemble des secteurs de l'économie mais causant un impact négligeable dans toutes les catégories d'impacts sera moins grave que celle d'une substance peu émise mais extrêmement impactante à l'échelle de l'économie globale. La méthode d'impact utilisée pour cette étude est Traci et les raisons de ce choix seront explicitées dans la partie méthodologie de ce mémoire.

2.6 Incertitudes en analyses environnementales

Toutes les analyses environnementales, comme les ACV ou les AIO ont pour but de guider les décideurs afin d'effectuer des choix dans le but de réduire certains impacts sur l'environnement. Mais ces études dépendent d'un très grand nombre de facteurs qui influencent tous la justesse et la précision de leurs résultats. Dans un souci de transparence, une évaluation des incertitudes des résultats proposés est donc indispensable. Elle est recommandée par la norme ISO 14040-44 pour les ACV (International Organization for Standardization (ISO), 2006b, 2006a) mais cette norme ne propose pas réellement de pistes pour l'effectuer. Plusieurs guides d'applications de techniques d'ACV s'y intéressent de manière plus approfondie et les logiciels de modélisation comme OpenLCA comprennent des outils d'analyse d'incertitude intégrés (Huijbregts et al., 2001; Igos, Benetto, Meyer, Baustert, & Othoniel, 2019). Dans le cadre des AIO en revanche, peu de lignes directrices existent en raison de l'absence de consensus sur les différentes méthodes d'analyses.

On peut distinguer les incertitudes en deux types : les incertitudes aléatoires, généralement appelées variabilités en ACV, et les incertitudes épistémiques (Steinmann, Hauck, Karupiah, Laurenzi, & Huijbregts, 2014). Les incertitudes aléatoires sont dues à des phénomènes intrinsèques au monde

réel et peuvent être subdivisées en trois catégories : les variabilités spatiales qui concernent le fait qu'un phénomène aura un effet différent en fonction de sa position géographique (caractéristiques chimiques de sols ou de l'eau, température ou humidité pouvant influencer les effets d'une substance, type de population touchée...); les variabilités temporelles causées par le fait que les données utilisées soient généralement des moyennes annuelles ou concernent une année différente de celle pour laquelle on veut l'appliquer malgré le fait que différents paramètres variant avec le temps (courbes de températures, évolution de la législation ou des technologies...) ou la durée observée (effet des gaz à effet de serre par exemple) peuvent affecter grandement les données ; enfin les variabilités entre sources et objets qui expriment le fait que deux éléments censés avoir le même rôle ont en réalité des effets distincts (deux usines produisant les mêmes objets utilisent des technologies différentes, deux métaux sont en réalité composés d'alliages distincts, etc.) qui ne sont pas pris en compte lorsque des données moyennes ou des généralisations d'une donnée spécifique sont utilisées (Huijbregts, 1998).

Les incertitudes épistémiques sont quant à elles liées aux modèles utilisés pour s'approcher de la réalité mais qui en restent toujours écartés. Ceci peut apparaître à travers les paramètres utilisés (rendements théoriques d'une industrie, données d'émissions plus à jour...), les hypothèses simplificatrices (phénomènes négligés, moyennes et agrégation...) ou encore les choix arbitraires faits par les analystes au cours de l'étude (type d'analyse choisie, choix de l'unité fonctionnelle, choix d'une base de données ou d'une méthode de caractérisation plutôt qu'une autre...). (Huijbregts, 1998)

Toutes ces incertitudes ont été décrites dans le cadre d'ACV mais peuvent très bien s'appliquer aux incertitudes d'AOI. Elles peuvent apparaître tout au long de l'analyse, à l'intérieur des bases de données choisies ou à travers la construction du modèle utilisé, de la définition de l'étude à l'interprétation des résultats en passant par chacun des calculs ou des choix intermédiaires. Une partie de ces incertitudes peuvent être réduites, en affinant un modèle ou cherchant des données plus proches du cas étudié par exemple, mais la plupart ne peuvent qu'être étudiées de manière qualitative ou quantitative, pour des raisons de manque de temps ou d'informations entre autres choses.

Plusieurs méthodes sont conseillées et souvent appliquées pour analyser les différentes incertitudes en ACV. Certaines permettent d'obtenir une information sur la justesse et la fiabilité des résultats

d'une étude. D'autres, appelées analyses de sensibilité, ont pour but de montrer l'influence de certains paramètres ou choix de l'étude sur la valeur des résultats obtenus. Les deux méthodes les plus utilisées actuellement, en particulier parce qu'elles sont intégrées dans les logiciels de calcul d'ACV, sont les analyses de sensibilité sur la valeur des données d'entrées ou par scénarios et la méthode de Monte-Carlo (Lloyd & Ries, 2008).

Une approche semi-quantitative, l'approche Pedigree, peut être utilisée afin d'obtenir des informations concernant l'incertitude des résultats d'une étude. Elle peut aussi servir à obtenir des plages de variation ou des distributions probabilistes pour les paramètres d'entrée, utilisables par les deux méthodes précédentes. Cette approche permet de lutter contre le manque d'informations réelles concernant les distributions des données d'entrées, notamment dans les bases de données ACV, en transformant des éléments qualitatifs caractéristiques d'une donnée (fiabilité, complétude, représentativité temporelle, spatiale et technologique) en variance (Bo Pedersen Weidema & Wesnæs, 1996). C'est cette approche qui est mise en œuvre au sein d'*ecoinvent* afin de fournir des informations sur la qualité de ses données (Ciroth, Muller, Weidema, & Lesage, 2016; Muller et al., 2016).

En AIO, les analyses d'incertitudes sont beaucoup moins fréquentes. Ces incertitudes peuvent d'une part provenir des données utilisées pour produire les tables IO ou les extensions environnementales et d'autre part des hypothèses et des choix pris lors de la production ces tables (Vaccara, 1970). Yamakawa & Peters (2009) montrent que les résultats d'analyses générales comprennent moins d'erreurs que pour des analyses plus spécifiques car les surestimations et les sous-estimations valables pour chacune de leurs données se compensent d'une certaine manière. Lenzen, Wood, & Wiedmann (2010) proposent une étude des incertitudes d'une AIO environnementale et multirégionale en s'intéressant à la fois aux incertitudes des données et à celles des modèles. D'autres études ont essayé d'évaluer certaines sources spécifiques d'incertitudes comme les conversions de devises pour les MRIO (Weber & Matthews, 2007), la modélisation des échanges entre régions économiques et l'agrégation des secteurs industriels aux caractéristiques très distinctes (Lenzen, Pade, & Munksgaard, 2004), les agrégations et désagrégations spatiales, de matériaux ou de produits (De Koning et al., 2015) ou encore le choix d'une année de référence pour les données utilisées (Yamakawa & Peters, 2009).

L'estimation des incertitudes des données et des modèles utilisés pour les analyses environnementales fait l'objet de beaucoup d'études mais à l'inverse des ACV, les AIO ne proposent encore que rarement de telles analyses. En tous cas, malgré le grand nombre de sources d'incertitudes potentielles apparaissant dans les AIO et l'existence prouvée de grandes variations possibles de résultats en fonction de la modification de certains paramètres de ces analyses, aucune méthode d'évaluation de ces éléments n'est actuellement généralement adoptée par la communauté IO. À la fin de ce mémoire, nous proposerons donc une revue globale de toutes les incertitudes ayant pu affecter nos résultats ainsi que les méthodes pouvant être appliquées afin de les réduire ou a minima de les évaluer (0).

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

3.1 Problématique

La revue de littérature présentée dans la partie précédente a permis de mettre en évidence les problèmes de troncature des analyses ACV classiques, qui concernent principalement un manque de prise en compte de certains secteurs industriels (services, technologies de l'information, équipements...). Pour faire face à ce problème, des analyses hybrides ont été mises en place, notamment à l'aide de bases de données Input-Output et de leurs extensions environnementales. Ces EE recensent les quantités de ressources extraites et de substances émises par l'économie décrite dans la table IO vers l'écosphère, soit l'équivalent des flux élémentaires de l'ACV. Or il existe une critique récurrente concernant une mauvaise couverture de certaines catégories d'impact de la part des principaux MREEIO, en raison du nombre limité de substances qu'ils inventorient dans leurs extensions environnementales. On peut alors poser la question de recherche suivante :

Existe-t-il un problème de couverture au sein des extensions environnementales des MREEIO et si oui, comment se manifeste-t-il et comment le résoudre ?

Nous allons donc poser l'hypothèse de recherche suivante :

Compléter les extensions environnementales d'un MRIO par des données d'émissions provenant de sources externes va permettre d'améliorer la couverture de l'inventaire et influencer de manière significative les scores d'impact dans plusieurs catégories.

3.2 Objectifs de recherche

Deux objectifs de recherche complémentaires guident cette maîtrise :

- Évaluer de façon qualitative et quantitative l'ampleur du problème de couverture des extensions environnementales d'EXIOBASE dans les catégories d'impact traditionnellement considérées en ACV.
- Proposer une méthode permettant d'améliorer cette couverture afin de la rendre commensurable, en termes d'évaluation des impacts environnementaux, à une des principales bases de données utilisées en ACV, *ecoinvent*.

Ce double objectif principal se divise suivant les prochains objectifs secondaires :

1. Prévoir les éventuels problèmes de couverture de l'EE d'EXIOBASE et les limites qu'ils imposent lors du calcul des scores d'impact de différentes catégories d'impact, via une analyse qualitative préliminaire.
2. Développer une méthode générale, sous la forme d'un algorithme, visant à compléter un MREEIO avec des flux environnementaux provenant d'autres bases de données puis l'appliquer au cas particulier d'un EEIO national américain, USEEIO, afin de créer un complément aux extensions environnementales d'EXIOBASE.
3. Quantifier le problème de couverture de l'EE d'EXIOBASE en comparant les scores d'impact environnemental calculés avec les deux versions de l'EE d'EXIOBASE : la version originale et la version complétée avec des émissions tirées des extensions environnementales de USEEIO.
4. Permettre au plus grand nombre d'utiliser et de modifier nos données et notre algorithme en fonction de leurs besoins en adoptant une démarche transparente tout au long de ce travail.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Analyse préliminaire : Évaluation qualitative de la couverture d'EXIOBASE

Notre premier sous-objectif consiste à réaliser une analyse qualitative de la couverture d'EXIOBASE, afin d'obtenir une première validation de ses problèmes de complétude et de visualiser les principales catégories d'impact touchées par ces derniers. Ceci a pour but de guider le reste de la méthodologie et de nous aider à prioriser les efforts de recherche qui vont suivre. Cette section présente cette étude préliminaire.

Comme expliqué dans la revue de littérature, l'extension environnementale d'EXIOBASE ne prend en compte qu'un nombre très réduit d'émissions. Ceci nous pousse à supposer que les résultats des calculs d'impacts des activités humaines sur certaines aires de protection sont sous-estimés en utilisant EXIOBASE. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons procédé à une première analyse qualitative. Nous avons alors comparé les substances inventoriées dans l'EE d'EXIOBASE et celles caractérisées par une méthode d'impact pour vérifier quelles étaient les substances contribuant à une catégorie d'impact qui n'étaient pas prises en compte par EXIOBASE. Si une substance ayant un fort facteur de caractérisation pour une catégorie donnée, comme par exemple le méthane pour la catégorie réchauffement climatique, était absente de l'EE, alors nous en avons déduit que cette catégorie d'impact risquait d'être mal évaluée en se basant sur l'EE d'EXIOBASE et donc que cette EE présentait un problème de troncature relatif à cette aire de protection.

Nous avons choisi de travailler avec la méthode d'impact Traci 2.1. Cette méthode décrit un large spectre de catégories d'impact intermédiaires et caractérise de très nombreuses émissions. De plus, plus tard dans ce document, nous expliquerons pourquoi nous avons décidé de travailler avec des données américaines pour tenter de compléter l'EE d'EXIOBASE (5.2). Traci étant une méthode d'impact développée spécialement pour un environnement américain, elle semble donc totalement adaptée à cette étude préliminaire.

Pour chacune des catégories d'impact de Traci, nous avons comparé la liste des facteurs de caractérisation pris en compte par cette méthode à la liste des vecteurs d'impacts inventoriés dans EXIOBASE. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la section 5.1.

4.2 Présentation du cadre d'analyse mis en place

Afin de tenter de quantifier et de résoudre ces problèmes de complétude, nous avons cherché à ajouter des émissions manquantes à EXIOBASE. Nous avons également cherché à étudier d'éventuels problèmes dus à certaines agrégations des substances inventoriées dans l'extension environnementale d'EXIOBASE. Pour ce faire, nous avons développé une méthodologie générale, valable pour n'importe quel MREEIO à compléter en utilisant n'importe quelle source de données environnementales complémentaires. Ceci correspond au deuxième sous-objectif. Cette méthode est résumée dans la Figure 4.1.

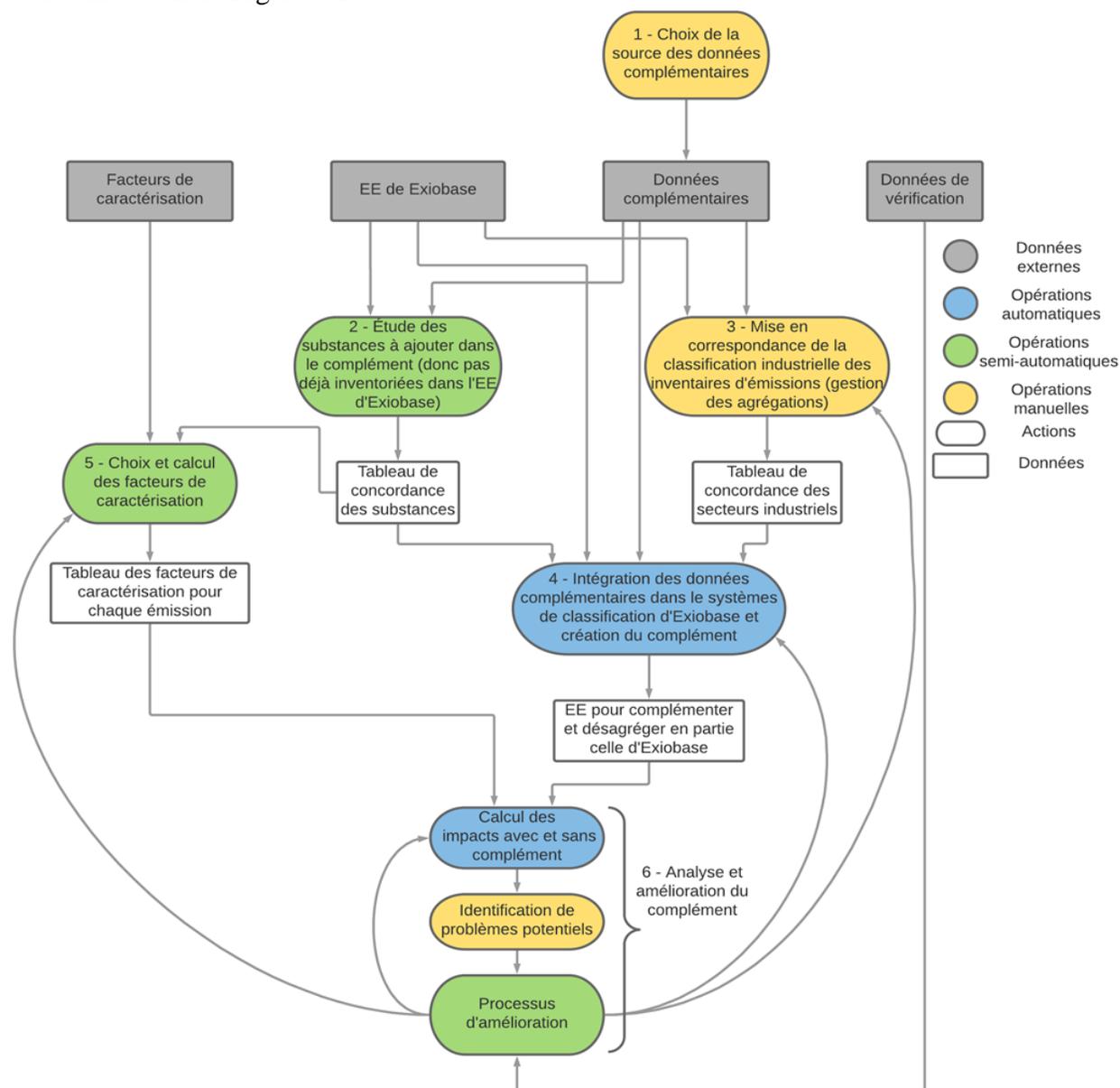


Figure 4.1 : Présentation de la méthode générale utilisée dans cette étude

Une fois la source des données complémentaires choisie, il faut l'intégrer au sein d'EXIOBASE. Tout d'abord, dans le cadre de ce projet, il a été décidé d'ajouter uniquement à l'EE d'EXIOBASE les émissions qui lui manquent. Pour cela, la première étape est de comparer les substances prises en compte par EXIOBASE et celles de la base de données complémentaires afin de ne pas ajouter certaines étant déjà comptabilisées. Ensuite, la deuxième étape est de répartir ces nouvelles émissions entre les différents secteurs industriels d'EXIOBASE, il faut donc développer un tableau de correspondance entre le système de répartition des données complémentaires et celui d'EXIOBASE (division en 163 secteurs industriels pour EXIOBASE). Une fois cette correspondance explicitée, il ne reste plus qu'à répartir les émissions du complément vers EXIOBASE en suivant une méthode spécifique. Ceci permet d'obtenir un MREEIO complété.

Il est alors possible d'évaluer la couverture de ce nouveau MREEIO. Pour ce faire, nous avons décidé de passer par le calcul de différents impacts avec et sans le complément afin d'avoir une idée de l'importance du complément dans les résultats obtenus et donc du niveau des problèmes de troncature de l'EE d'EXIOBASE. Avant de pouvoir effectuer ces calculs, il est nécessaire d'obtenir des facteurs de caractérisation pour toutes les émissions recensées dans le MREEIO complété. Une fois ces facteurs de caractérisation obtenus, nous pouvons les utiliser afin d'effectuer différentes analyses qui permettent d'une part d'avoir une idée des problèmes de couverture d'EXIOBASE et d'autre part de faire apparaître de potentiels problèmes pouvant être dus aux différentes décisions prises tout au long de la production de ce complément. Cela nous offre la possibilité d'améliorer notre complément itérativement, en revenant sur certaines des étapes précédemment détaillées pour les améliorer.

Toutes ces différentes étapes sont détaillées dans les sous-sections suivantes puis toute cette méthodologie est explicitée dans la section 5.2 dans un cas d'application qui a été utilisé pour quantifier les problèmes de couverture de l'EE d'EXIOBASE.

4.2.1 Choix de la source des données complémentaire

La première étape de la méthodologie générale de la Figure 4.1, est de choisir quelle base de données utiliser afin de compléter les extensions environnementales d'EXIOBASE. Quatre types de bases de données peuvent être choisis.

Tout d'abord d'autres MREEIO mondiaux comme EORA ou WIOD pourraient être utilisés pour compléter l'EE d'EXIOBASE. Ceux-ci possèdent l'avantage d'être également régionalisés avec des données valant pour différents pays et d'être divisés en différents secteurs industriels (ou commodités) donc selon une structure équivalente à celle d'EXIOBASE. Cependant, comme documenté dans la revue de littérature, ces MREEIO souffrent de problèmes de troncatures des émissions encore plus importants qu'EXIOBASE et les substances qu'ils considèrent sont déjà incluses dans l'EE que nous souhaitons compléter. De plus, les classifications des secteurs industriels varient aussi d'un MRIO à un autre donc un tableau de correspondance devrait de toute manière être mis en place afin d'ajouter les données complémentaires à l'EE d'EXIOBASE. Cette dernière limitation est cependant présente pour chaque base de données complémentaire envisagée.

Ensuite, la base de données complémentaire pourrait être un autre EEIO national comme par exemple CEDA pour les États-Unis ou Open IO Canada pour le Canada. Beaucoup de pays n'ont pas développé d'EEIO national au moins aussi détaillé que l'EE d'EXIOBASE donc il ne serait pas possible de trouver un EEIO pour chaque pays compris dans EXIOBASE. Par exemple, CEEIO pour la Chine ne propose que 30 émissions différentes. On pourrait cependant utiliser un EEIO national prenant en compte plus d'émissions qu'EXIOBASE, l'extrapoler pour estimer les émissions de pays aux technologies relativement proches et faire de même pour toutes les régions d'EXIOBASE. Le principal avantage de cette méthode est que les données des EEIO sont également répertoriées par industries ou commodités de la même manière que EXIOBASE. De plus, certains EEIO nationaux, comme CEDA pour les États-Unis, prennent un grand nombre de vecteurs d'impacts en compte (1344 flux élémentaires pour CEDA 3.0) car ils ne sont pas soumis au problème de plus grand dénominateur commun entre différents pays. En revanche, l'extrapolation des coefficients d'émissions depuis un pays vers un autre induira des incertitudes technologiques et géographiques. Cette extrapolation peut sembler aller à l'encontre du principe des MREEIO et d'EXIOBASE en particulier qui prennent justement en compte un nombre limité de flux élémentaires puisqu'ils ne veulent inventorier que ceux qui sont recensés dans l'ensemble des inventaires nationaux qu'ils recouvrent. C'est le principe du plus petit dénominateur commun expliqué dans la section 2.2. Cette démarche permet de conserver une homogénéité entre la couverture de toutes les régions prises en compte dans le MREEIO, tout en limitant les incertitudes dues à cette extrapolation. Ceci est cohérent dans des études à grande échelle où seules les principales substances impactantes peuvent être considérées. Notre objectif est de rendre ce

MREEIO commensurable, en termes de nombre d'émissions prises en compte, aux bases de données ACV. Ceci va permettre d'améliorer la pertinence des analyses hybrides ou en tous cas de permettre des analyses plus précises, pour lesquelles un plus grand nombre de substances doit être observé afin de pouvoir analyser correctement les impacts de certains secteurs industriels ou produits spécifiques, ceci pour l'ensemble des catégories d'impact traditionnellement étudiées en ACV. Ceci explique pourquoi nous choisissons cette démarche, quitte à risquer d'augmenter l'incertitude des résultats.

On pourrait également utiliser inventaires de cycle de vie venant d'une base de données comme *ecoinvent*. On pourrait par exemple choisir un ou plusieurs processus pour représenter chacun des secteurs industriels d'EXIOBASE puis extrapoler les émissions connues pour ces processus en émissions par dollar de production de chacun de ces secteurs. Ceci permettrait de prendre en compte un très grand nombre de substances. En revanche, une difficulté sera alors de bien choisir les processus de la base de données ACV pour chaque industrie afin de minimiser les incertitudes liées à ces extrapolations.

Enfin, des bases de données nationales d'émissions pourraient servir de complément à EXIOBASE, soit en prenant des inventaires spécifiques à chacun des pays, soit en les extrapolant à partir d'un ou plusieurs pays donnés. Cette option permettrait d'ajouter un grand nombre de nouveaux flux élémentaires à l'EE d'EXIOBASE mais nécessiterait de grands efforts d'intégration des données (choix des bases de données utilisées pour chaque région pour ajouter les mêmes substances dans chaque région du monde, répartition parmi les secteurs d'EXIOBASE, harmonisation des données...). Dans tous les cas, ces bases de données nationales pourraient au moins servir à vérifier et éventuellement corriger les valeurs des flux élémentaires choisis pour compléter le MREEIO à partir d'une autre source.

4.2.2 Choix des émissions à intégrer au complément

L'objectif de ce projet est de compléter l'EE d'EXIOBASE avec des émissions venant d'une source de données complémentaires. Toutes les émissions déjà présentes dans EXIOBASE sont donc conservées telles quelles mais celle qui sont inventoriées dans l'autre base de données et pas dans EXIOBASE y sont ajoutées. Ceci permet de ne pas augmenter les incertitudes relatives aux émissions déjà prises en compte dans EXIOBASE. Pour cette raison, nous avons besoin de savoir pour chaque émission de la seconde source de données si elle est déjà comprise en compte ou non

dans EXIOBASE afin d'éviter les doubles comptages. Cette étape correspond à l'étape 2 du schéma présenté dans la Figure 4.1.

Nous ne voulons ajouter à EXIOBASE que les émissions (substance et compartiment) de la source de données complémentaires qu'elle ne prend pas déjà en compte. Il est donc nécessaire de relier les émissions de chacune des bases de données à leur équivalent dans l'autre, lorsque cette correspondance existe bien, afin de ne pas les inclure dans le complément. Ceci est trivial pour les substances simples comme le dioxyde de carbone, les PM2.5 ou encore le phosphore. Cependant, EXIOBASE comporte également plusieurs substances agrégées comme les PFC, les PCB ou les HFC. Pour ces dernières, la stratégie qui a été mise en place est expliquée dans la Figure 4.2. Le cas 1 est trivial : les émissions sont déjà prises en compte dans l'EE d'EXIOBASE donc on ne les ajoute pas. De même, dans le cas 2, ces émissions ne sont assurément pas incluses dans l'EE donc on veut les ajouter. Pour le cas 3, on est dans le cas d'une substance appartenant à une famille de substances agrégées présente à la fois dans l'EE d'EXIOBASE et dans la source de données complémentaires. On a donc précédemment exclu cette famille du complément (cas 1). On considère que si cette émission spécifique est inventoriée dans la source de données complémentaires, séparément de sa famille agrégée, c'est qu'elle n'a pas été prise en compte dans l'inventaire de cette famille de substances, ni dans cette base de données, ni dans l'EE d'EXIOBASE. Puisqu'elle n'est pas présente dans l'EE d'EXIOBASE en tant que substance spécifique, on l'ajoute donc au complément. Pour le cas 4, on considère que toutes ces émissions composent la famille agrégée déjà inventoriée par EXIOBASE. Enfin dans le cas 5, on a une émission avec des caractéristiques trop différentes des autres émissions de cette famille pour y être simplement agrégée donc on l'inclut dans le complément car on veut étudier ses effets sur l'environnement, séparément du reste de sa famille. Ceci correspond plutôt à une étude des problèmes d'agrégation de l'EE d'EXIOBASE que de sa troncature à proprement parler. C'est le cas pour l'ensemble des PAH qui ont tous des facteurs de caractérisation très distincts pour les impacts toxiques d'après la méthode de caractérisation Traci 2.1. C'est aussi le cas pour le HFC 134a ou 1,1,1,2-tetrafluoroéthane qui est le seul HFC à avoir un impact sur la santé humaine et sur le smog d'après Traci.

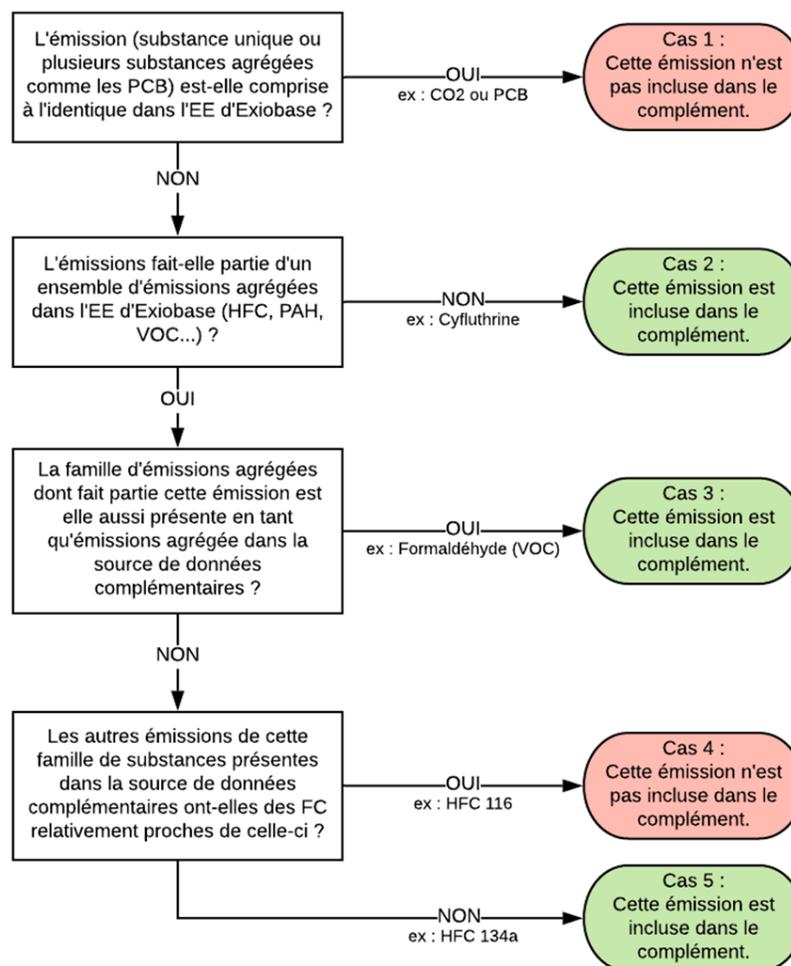


Figure 4.2 : Algorithme de décision pour la prise en compte de chaque émission de la source de données d'émissions complémentaires dans le complément d'EE d'EXIOBASE.

Pour réaliser cet algorithme, nous commençons par dresser des listes de substances composant ces familles, c'est-à-dire leur nom et leur identifiant CAS, à partir de différentes sources disponibles. La deuxième étape consiste à parcourir les émissions contenues dans la source de données complémentaires et à les comparer avec les substances relevées précédemment afin de les classer dans la famille appropriée le cas échéant. Cela est fait avec les CAS lorsqu'ils sont indiqués pour les substances de la base de données, mais également avec des noms de substances dans le cas contraire. Enfin, les compartiments de réceptions sont analysés automatiquement afin d'inclure dans la liste des émissions redondantes uniquement celles concernant des substances émises dans le même compartiment et non celles qui sont émises dans un compartiment différent. Toutes les émissions inventoriées dans la source de données complémentaires et pour lesquelles une émission équivalente a été trouvée dans EXIOBASE ne sont ainsi pas ajoutées au complément.

4.2.3 Gestion du degré divers d'agrégation entre le système de classification des secteurs industriels d'EXIOBASE et celui de la source de données complémentaires

Les inventaires d'émissions des sources de données environnementales peuvent être de formes très variées. C'est pour cette raison que les flux élémentaires provenant d'une source de données complémentaires pour améliorer la couverture de l'EE d'EXIOBASE ne peuvent pas être intégrés directement. Un travail doit tout d'abord être fait afin de lier les deux systèmes de classification de leurs inventaires, notamment à travers des agrégations et désagrégations des secteurs industriels ou des produits recensés dans chacune d'entre elles. C'est l'objectif de l'étape 3 de la Figure 4.1. En raison de la grande spécificité de cette étape en fonction de la base de données choisie afin de fournir les émissions complémentaires, le détail de cette étape ne sera donné que dans l'application de cette méthodologie à un cas d'application de la complétion de l'EE d'EXIOBASE, disponible dans la section 5.2.3.

4.2.4 Intégration des émissions complémentaires au sein de l'EE d'EXIOBASE

Une fois la table de correspondance entre les systèmes de classification d'EXIOBASE et de la source des données d'émission complémentaires créée, elle est utilisée pour répartir les émissions complémentaires vers l'EE d'EXIOBASE. Ceci correspond à l'étape 4 de la Figure 4.1. Comme pour l'étape précédente, cette méthodologie dépend grandement du système de classification utilisé dans la base de données complémentaires. C'est pour cette raison que le détail de cette étape ne sera explicité que pour le cas d'application présenté dans la suite de ce mémoire. Cette étape spécifique est décrite dans la section 5.2.4.

4.2.5 Calcul des facteurs de caractérisation utilisés pour quantifier le nouveau MREEIO complété

Les étapes précédentes nous ont permis d'obtenir un MREEIO complété, basé sur les données d'EXIOBASE auxquelles on a ajouté certaines émissions provenant d'une source de données complémentaires. Afin d'évaluer la pertinence de ce complément, nous avons décidé de comparer les impacts de différents cas d'études, pour différentes catégories d'impacts, calculés avec le MREEIO d'EXIOBASE et avec notre MREEIO complété. Pour ce faire, nous avons besoin des

facteurs de caractérisation des différentes émissions comprises dans le MREEIO complété afin de calculer leur impact. Ce choix des facteurs de caractérisation correspond à l'étape 5 de la Figure 4.1.

Il faut tout d'abord choisir une méthode de caractérisation existante qui va servir de base à tous ces calculs de facteurs de caractérisation. Plusieurs types de substances peuvent être inventoriés dans EXIOBASE et dans la source de données complémentaires. Ils nécessitent plusieurs méthodes de calcul différentes. Tout d'abord, pour toutes les émissions qui se retrouvent telles quelles dans la méthode de caractérisation sélectionnée, la valeur de leur facteur de caractérisation est reproduite à l'identique.

Dans le cas des substances agrégée, c'est-à-dire d'un ensemble de substances inventoriées en tant que famille unique (comme les HFC ou les PCB par exemple), nous avons décidé de prendre pour facteur de caractérisation la moyenne des facteurs de caractérisation des substances de cette famille inventoriés dans la méthode de caractérisation choisie. Si certaines substances ont un facteur de caractérisation plus de 1000 fois supérieur ou inférieur à la moyenne ainsi calculée, il est exclu dans le calcul et on considère cette émission en dehors de la famille agrégée. Elle est donc ajoutée dans le complément, avec son facteur de caractérisation propre afin de pouvoir observer son effet isolé sur le calcul des impacts. Ceci pose le problème d'un double comptage potentiel pour ces émissions car elles peuvent être comptées à la fois dans la famille agrégée d'EXIOBASE et dans le complément, mais c'est la méthode qui a été choisie dans un premier temps afin d'éviter de fausser la valeur du facteur de caractérisation des familles agrégées, sans toutefois supprimer ces émissions spécifiques.

Si aucune valeur n'est disponible pour le facteur de caractérisation d'une certaine émission dans la méthode de caractérisation choisie, alors nous choisissons la valeur 0 afin que cette émission n'intervienne pas dans le calcul d'impacts effectué ultérieurement.

L'application de cette étape de la méthodologie à un cas particulier de complétion d'EXIOBASE est décrite plus précisément dans la section 5.2.5.

4.2.6 Analyse et amélioration du complément

Une fois les extensions environnementales d'EXIOBASE complétées et les facteurs de caractérisation servant à calculer les scores d'impacts à l'aide de ce MREEIO complété obtenus, la

sixième et dernière étape de la méthodologie est d'analyser ce complément afin de l'améliorer. La phase d'analyse est plus détaillée dans la section suivante de la méthodologie car elle correspond également au sous-objectif 4 de cette maîtrise. Cette analyse peut permettre de faire apparaître des problèmes au sein du complément, pouvant donner lieu à une procédure d'amélioration itérative.

Dans le cas d'application étudié dans la section 5.3, le complément précédemment produit va être analysé en suivant une démarche allant du point de vue le plus global vers un point de vue spécifique. La première étape sera de calculer les impacts de l'ensemble de l'économie sur toutes les catégories d'impact prises en compte, puis de regarder les différentes substances responsables de cet impact. On analysera ensuite les impacts de chacun des secteurs de cette économie et le poids du complément dans tous ces calculs d'impact. Enfin, on finira par étudier la cause des impacts d'un secteur spécifique étant apparu au cours de l'analyse précédente comme ayant des impacts sur diverses catégories d'impact provenant essentiellement du complément. Le secteur sélectionné est le secteur « Hôtels et restaurants ». On va s'intéresser en particulier aux émissions qu'il produit et qui sont responsable de son impact, ainsi qu'au différentes étapes de son cycle de vie auxquelles cet impact est principalement attribuable. Toutes ces analyses vont être menées à la fois en perspective producteur et en perspective consommateur.

4.3 Approche mathématique suivie pour analyser le MREEIO complété

Le troisième sous-objectif de cette maîtrise est d'utiliser le MREEIO précédemment complété afin de quantifier le problème de troncature des émissions recensées par les extensions environnementales d'EXIOBASE. Pour cela, nous avons calculé de nombreux scores d'impact avec l'EE d'EXIOBASE avant et après l'ajout des émissions complémentaires. La comparaison des ces scores d'impacts nous a permis d'observer pour quelles catégories d'impact et pour quels secteurs d'EXIOBASE est-ce que ces problèmes de couverture des émissions avaient le plus d'effets. Cette section présente la méthode mise en place afin de calculer ces scores d'impact, tout d'abord en présentant brièvement les différentes matrices utilisées dans le cadre des AIO puis dans un second temps, les différentes équations qui nous ont permis d'effectuer nos calculs de scores d'impact.

4.3.1 Présentation des matrices principales utilisées

Tous les calculs menés afin d'obtenir les résultats permettant d'analyser notre complément l'ont été de manière matricielle, comme c'est généralement le cas pour des analyses Input Output. Il n'existe pas de terminologie ou de notation universellement reconnue pour désigner les différents éléments utilisés dans ces analyses, cette section vise donc à présenter ceux qui ont été utilisés pour ce travail.

Il existe premièrement des matrices et des vecteurs économiques. La matrice \mathbf{Z} est la matrice économique de l'IO. Dans le cas que nous avons étudié, c'est une matrice carrée avec l'ensemble des secteurs industriels de l'IO en lignes et en colonnes. Elle décrit les échanges économiques entre tous les secteurs de l'industrie étudiée avec chaque élément $z_{i,j}$ désignant la production, en euros, du secteur i directement nécessaire à la production totale du secteur j . La matrice \mathbf{A} correspond à la matrice \mathbf{Z} normalisée, c'est-à-dire que chaque colonne correspond à tous les intrants économiques nécessaires à la production d'un euro du secteur correspondant. On appelle aussi chacun de ses composants scalaires des coefficients techniques de production et donc par extension, \mathbf{A} est parfois appelée la matrice des coefficients techniques. Le vecteur \mathbf{y} décrit la demande finale pour tous les secteurs de l'économie étudiée, en euro, c'est-à-dire les produits et services qui ne sont pas utilisés afin d'en produire d'autres mais utilisés directement par les ménages, les organisations à but non lucratif, le gouvernement, exportées ou encore stockées (ou déstockées si comptées négativement). Le vecteur \mathbf{y} est donc de la même taille qu'une colonne des matrices \mathbf{A} ou \mathbf{Z} puisqu'il prend en compte les mêmes secteurs. Enfin, le vecteur \mathbf{x} est le vecteur de production totale, de la même taille que \mathbf{y} . Il présente, en euro et pour chaque secteur industriel, la quantité totale devant être produite par chaque secteur afin de répondre à la demande finale \mathbf{y} , en prenant donc en compte tous les produits intermédiaires nécessaires à la production de la demande finale. Un modèle Input-Output est généralement formé à partir de \mathbf{Z} et de \mathbf{y} , \mathbf{A} et \mathbf{x} étant calculés comme suit :

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z} * \mathbf{e} + \mathbf{y}$$

avec \mathbf{e} le vecteur unitaire de la même dimension que \mathbf{x} permettant de sommer les valeurs de \mathbf{Z} pour chaque secteur industriel.

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z} * \hat{\mathbf{x}}^{-1}$$

On ajoute à ces données la matrice de Leontief inverse, L qui facilite les calculs ultérieurs :

$$L = (I - A)^{-1}$$

avec I la matrice identité de même dimension que A .

Une fois ces premiers éléments obtenus à partir des données sources de l'IO, on peut recalculer, pour la même économie, des vecteurs de production totale à partir d'un vecteur de demande finale spécifique. Pour plus de clarté, on écrira à partir de maintenant M_0 et v_0 respectivement les matrices et les vecteurs provenant des données de base de notre économie, ayant servi à produire l'IO originel et M et v les matrices et les vecteurs calculés ultérieurement à partir d'une donnée spécifique, typiquement un nouveau vecteur de demande finale. On peut donc calculer la production totale nécessaire de chaque industrie de l'économie existante x afin de produire une demande spécifique y de la manière suivante :

$$x = L_0 * y$$

Il existe ensuite deux matrices environnementales F_0 et S_0 . Basée sur le même principe que les matrices Z_0 et A_0 , F_0 est la matrice des émissions totales de chacun des secteurs industriels et S_0 est sa version normalisée. Dans notre étude, nous ne travaillons que sur les émissions mais F_0 et S_0 peuvent aussi comprendre par exemple les ressources en matières premières, en eau, en énergie ou en surface de terre. F_0 est donc typiquement produite à partir d'inventaires nationaux, retravaillés, et a donc pour colonnes l'ensemble des secteurs industriels de l'économie et pour ligne l'ensemble des émissions recensées. Chacun de ses scalaires f_{i,j_0} représente donc, en kilos, la quantité d'émission i produite par l'industrie j pour produire la demande finale y_0 . S_0 est la version normalisée de F_0 , chacun de ses scalaires est donc la quantité d'émission j produites par i en kilo par euro pour l'économie étudiée. On calcule S_0 de la manière suivante :

$$S_0 = F_0 * \widehat{x_0}^{-1}$$

De la même manière, une fois la matrice S_0 connue et représentant en quelque sorte les performances environnementales des différentes technologies utilisées par les industries de notre économie, on peut recalculer les émissions totales F causées par une production totale x ou une demande finale spécifique y de la manière suivante :

$$F = S_0 * x = S_0 * L_0 * y$$

Dans la suite du document, on notera également \mathbf{C} la matrice des facteurs de caractérisation, ayant pour colonnes l'ensemble des émissions de l'EEIO concerné et pour lignes toutes les catégories d'impact étudiées. Chacun de ses scalaires $c_{i,j}$ représente donc le facteur de caractérisation de la substance j dans la catégorie d'impact i , en unité d'impact par kilo. Ces unités d'impact diffèrent pour chaque catégorie d'impact et sont détaillées dans l'annexe I.

Tous ces éléments nous permettent par exemple de calculer une matrice d'impacts \mathbf{H} présentant tous les impacts causés par une production totale \mathbf{x} et donc une demande finale \mathbf{y} dans l'ensemble des catégories d'impact couvertes par \mathbf{C} :

$$\mathbf{H} = \mathbf{C} * \mathbf{S}_0 * \mathbf{x} = \mathbf{C} * \mathbf{S}_0 * \mathbf{L}_0 * \mathbf{y}$$

Dans ce cas, \mathbf{H} a pour colonnes les différents secteurs industriels de l'économie étudiée, pour lignes les différentes catégories d'impact et chacun de ses scalaires $i_{i,j}$ représente l'impact causé par le secteur j dans la catégorie d'impact i en unité d'impact spécifique.

4.3.2 Équations utilisées pour obtenir les différents résultats recherchés pour l'analyse du MREEIO complété

Tous les résultats présentés dans la prochaine partie de ce mémoire ont été obtenus directement à partir de fonctions informatiques regroupées dans un module fourni avec ce travail. Tous les graphiques et les valeurs obtenues sont donc reproductibles très facilement et des analyses complémentaires peuvent très rapidement être menées pour étudier des aspects qui ne l'ont pas été dans le cadre de ce projet. Cette sous-section a pour but de présenter les équations mathématiques sous-jacentes à ces fonctions. Il est important de noter que la plupart de ces calculs étant effectués sur python de manière matricielle et faisant intervenir un très grand nombre d'opérations, en raison de la précision limitée d'un ordinateur pour représenter les nombres, des valeurs extrêmement faibles mais non nulles apparaissent parfois alors qu'elles devraient être égales à zéro d'un point de vue purement mathématique. Pour cette raison, certaines fonctions ont été modifiées afin de rendre nulles certaines valeurs très faibles obtenues à la suite d'un calcul matriciel et considérées comme étant des valeurs non nulles uniquement dues à des approximations effectuées par le programme au cours du calcul.

Une partie des résultats s'intéressent à l'économie au complet ou celle d'une région en particulier, principalement les États-Unis (US). Afin de savoir quelles catégories d'impact ont été les plus

touchées par l'ajout du complément, nous calculons un vecteur \mathbf{v} qui nous donne, pour chaque catégorie c , la part due au complément de l'impact total de l'économie de la région étudiée avec le MREEIO complété. Chaque terme v_c de ce vecteur est obtenu grâce à l'équation (1) :

$$v_c = \frac{i_{compl,tot_c} - i_{exio,tot_c}}{i_{compl,tot_c}} \quad (1)$$

Avec i_{α,tot_c} l'impact de l'ensemble de l'économie de la région étudiée, pour la catégorie d'impact c , ceci avec les données de l'EEIO α . Cet impact total est calculé en sommant, pour chaque catégorie, les impacts totaux de chacun des secteurs composant l'économie étudiée. En notant $\mathbf{i}_{\alpha,tot}$ le vecteur composé des valeurs i_{α,tot_c} pour chaque catégorie c , \mathbf{H}_α la matrice des impacts calculée avec l'EEIO α pour chaque catégorie d'impact et chaque secteur, \mathbf{C}_α la matrice des facteurs de caractérisation pour les émissions de l'EEIO α , \mathbf{F}_α la matrice des émissions directes, par secteur industriel et par émission liées à l'EEIO α , pour une demande finale quelconque \mathbf{y} et \mathbf{e} le vecteur unitaire de la même dimension que $\mathbf{i}_{\alpha,tot}$ permettant de sommer les valeurs de \mathbf{H}_α pour chaque secteur industriel, on a donc :

$$\mathbf{H}_\alpha = \mathbf{C}_\alpha * \mathbf{F}_\alpha = \mathbf{C}_\alpha * \mathbf{S}_{0,\alpha} * \widehat{\mathbf{L}_{0,\alpha}} * \mathbf{y} \quad (2)$$

$$i_{\alpha,tot} = \mathbf{H}_\alpha * \mathbf{e} \quad (3)$$

On peut aussi calculer, pour chaque catégorie d'impact, à quel point chaque secteur a été touché par l'ajout du complément, c'est-à-dire quelle est la part de leur impact, calculé avec le MREEIO complété, due au complément. On obtient ces valeurs, pour chaque secteur s et chaque catégorie d'impact c des deux manières suivantes, soit en augmentation absolue (donc en unité d'impact) :

$$\Delta_{c,s} = i_{compl_{c,s}} - i_{exio_{c,s}} \quad (4)$$

Soit en augmentation relative, c'est-à-dire en fraction de l'impact calculé avec le MREEIO complété dû au complément :

$$\eta_{c,s} = \frac{i_{compl_{c,s}} - i_{exio_{c,s}}}{i_{compl_{c,s}}} = \frac{\Delta_{c,s}}{i_{compl_{c,s}}} \quad (5)$$

On peut également étudier quelles sont les émissions qui ont le plus contribué à l'impact de chaque catégorie. Si on regarde toutes les émissions de l'EEIO α , produites par une demande finale \mathbf{y} , la matrice \mathbf{M}_α présente, avec en lignes les différentes catégories d'impact et en colonnes les émissions recensées dans l'EEIO α , les impacts totaux de l'économie dus à chacune des émissions dans chacune des catégories d'impact. Par exemple, $m_{\alpha,c,e}$ représente, en unités d'impact, l'impact provoqué par les émissions de e , dans la catégorie c , produites par l'ensemble des secteurs de l'économie pour répondre à une demande finale \mathbf{y} avec les données de l'EEIO α .

$$\mathbf{M}_\alpha = \mathbf{C}_\alpha * (\widehat{\mathbf{S}_{0,\alpha}} * \mathbf{x}) = \mathbf{C}_\alpha * (\mathbf{S}_{0,\alpha} * \widehat{\mathbf{L}_{0,\alpha}} * \mathbf{y}) \quad (6)$$

Jusqu'à présent, on s'est uniquement placé dans une perspective producteur c'est-à-dire qu'on a étudié les émissions directes qui étaient produites par chacun des secteurs industriels pour répondre à une demande finale. On pourrait également se placer dans une perspective consommateur c'est-à-dire regarder les émissions sur l'ensemble du cycle de vie de chacun des secteurs industriels sollicités afin de produire une demande finale \mathbf{y} donnée. En sommant les impacts de l'ensemble des secteurs pour chaque catégorie, sur l'économie totale, ces deux approches nous donneront un même impact total. En revanche, la répartition en fonction des secteurs sera différente. L'approche directe ou producteur répartira les impacts en fonction du secteur qui les a provoqués directement, à la fois pour fournir directement la demande finale et pour fournir des demandes intermédiaires utilisées par d'autres industries pour produire la demande finale. L'approche consommateur en revanche ne répartira ces impacts qu'entre les secteurs fournissant directement la demande finale, en leur associant tous les impacts intermédiaires causés par toute leur chaîne de production, donc par les autres secteurs lui ayant fourni des produits ou services intermédiaires dans le but de lui faire produire la demande finale. Afin d'obtenir cette répartition en perspective consommateur, il faut utiliser l'équation (7) :

$$\mathbf{M}_\alpha = \mathbf{C}_\alpha * \mathbf{S}_{0,\alpha} * \mathbf{L}_{0,\alpha} * \widehat{\mathbf{y}} \quad (7)$$

On peut ensuite parfaitement utiliser ces valeurs d'impacts sur le cycle de vie, calculés avec le MREEIO complété d'une part et avec EXIOBASE de l'autre afin de calculer les secteurs pour lesquels l'ajout du complément a le plus modifié l'impact, de la même manière que ce qui a été présenté plus tôt avec une perspective producteur, en utilisant les valeurs contenues dans \mathbf{M}_α à l'intérieur des équations (4) ou (5).

Toutes les analyses précédentes peuvent également être menées en s'intéressant à un secteur spécifique en remplaçant la demande finale \mathbf{y} par un vecteur \mathbf{y}_s , valant 0 partout mais 1 pour le secteur s . Les équations (2) ou (7) ont le même résultat et nous donnent ainsi les impacts par secteur et par catégorie correspondant à une demande finale de 1 euro du secteur s , c'est-à-dire à la répartition des émissions de s sur toutes les étapes de son cycle de vie. L'équation (6) nous donne quant à elle la répartition des impacts de s selon les différentes émissions produites au cours de son cycle de vie.

Le nombre de places gagnées ou perdues dans le classement des secteurs les plus impactants, que ce soit en perspective consommateur ou producteur, peut également fournir des informations intéressantes. Pour obtenir ces résultats, présentés dans la partie suivante, il a suffi d'obtenir les valeurs d'impacts de chaque secteur à l'aide d'une des équations détaillées plus haut, pour EXIOBASE, de classer ces résultats par ordre d'importance et de leur assigner une place dans ce classement puis de faire la même chose avec le MREEIO complété. La différence de places entre chacun des classements est ensuite obtenue à l'aide d'une simple soustraction.

Enfin, une autre information intéressante est de savoir d'où proviennent les émissions participant à un impact étudié. En effet, comme expliqué plus haut, les émissions provenant d'en dehors des US seront beaucoup plus incertaines que celle provenant de l'intérieur des États-Unis. Nous avons donc codé une fonction permettant de répartir les impacts, pour chaque catégorie en fonction de la provenance des émissions y ayant contribué (intro ou extra US). Ceci fonctionne dans le cadre d'études sur la situation globale et non pas par secteur ou par émission donc uniquement pour des résultats obtenus avec l'équation (3). Cette tâche est assez triviale à coder puisque les informations concernant la région de provenance des émissions est contenue dans les noms des différents secteurs. Pour être plus précis, toutes les matrices utilisées sont en réalité des multi-index de la librairie pandas de python. Un des index comprend les informations sur la région du monde et l'autre sur le secteur industriel. Ainsi, pour toutes les autres équations donnant des résultats spécifiques par secteur, cette information est déjà connue grâce au nom du secteur. Cette fonction divise également les impacts entre ceux étant dus à des émissions présentes initialement dans EXIOBASE et ceux ajoutés grâce au complément.

4.4 Démarche suivie pour permettre la transparence de l'étude

Ce projet ne se veut pas une fin en soi mais a vocation à être utilisé, critiqué et amélioré dans le futur. L'objectif est que chacun puisse s'approprier ce travail, le modifier en fonction de ses besoins particuliers ou de nouvelles données disponibles, tester d'autres hypothèses que celles que nous avons choisies ou utiliser d'autres bases de données que celles que nous avons choisies pour notre cas d'application, tout cela avec un minimum d'efforts. C'est le quatrième et dernier sous-objectif de cette maîtrise. La manière dont nous avons tenté d'y répondre est décrite dans la section 5.4 de ce mémoire.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

Après avoir obtenu les premiers résultats de notre analyse qualitative, nous avons analysé les effets de notre complément d'EEIO de manière descendante, en allant d'une analyse très générale à une étude plus spécifique. Tout d'abord, nous étudions ses effets sur chacune des catégories d'impacts pour l'économie globale (mondiale puis américaine). Puis nous dressons un portrait d'ensemble du MREEIO complété en présentant les émissions et les secteurs industriels ayant la plus grande importance dans les calculs d'impacts menés grâce à ce MREEIO complété. Ensuite, nous essayons de relever les secteurs industriels ayant le plus été touchés par cet ajout du complément, c'est-à-dire ceux dont l'impact (en perspective producteur ou consommateur) a le plus augmenté avec l'ajout de ce complément. Enfin, nous étudions plus en détail un de ces secteurs pour savoir d'où viennent ces impacts à la fois au niveau des émissions qu'il produit mais également des différentes étapes de son cycle de vie, en perspective consommateur.

5.1 Résultats de l'analyse qualitative

L'analyse qualitative préliminaire décrite dans la section (4.1) nous a permis d'obtenir une première vision de la couverture de l'EE d'EXIOBASE pour les catégories d'impacts traditionnellement adressées en ACV. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 5.1.

Seules les catégories d'impact prenant en compte des émissions ont été étudiées, la catégorie Utilisation de Combustible Fossile (*Fossil Fuel Use*) a volontairement été mise de côté car les ressources ne sont pas considérées au cours de ce travail de recherche.

La couverture des émissions a été jugée bonne lorsque la plupart des émissions possédant un facteur de caractérisation (FC) correspondant à cette catégorie d'impacts étaient inventoriées dans l'EE d'EXIOBASE, incertaine si quelques-unes étaient manquantes et mauvaise si certaines émissions semblant très impactantes n'étaient pas recensées dans cette EE. Ces critères sont extrêmement dépendants de chacune des catégories d'impact. Ainsi la couverture de la catégorie Eutrophisation a été considérée comme bonne puisque les principales émissions impactant cette catégorie (azote et phosphore dans l'eau et NO_x et NH_3 dans l'air) sont déjà incluses dans l'EE d'EXIOBASE. Il en est de même pour les catégories Pluies acides (SO_x , NO_x et NH_3 comprises dans l'EE d'EXIOBASE) et la catégorie des Effets respiratoires sur la santé humaine (particules, SO_x et NO_x). Le cas des catégories Changement climatique et Formation de smog sont plus incertains. La

première voit bien ses premiers contributeurs inventoriés par EXIOBASE (CO₂, CH₄ et N₂O) mais des familles entières de substances aux forts FC sont également manquantes (CFC et HCFC) ce qui pourrait conduire à une sous-estimation de cet impact pour certains secteurs spécifiques rejetant ces émissions en grande quantité. La seconde connaît une situation équivalente avec les deux principaux contributeurs connus (NO_x et NMVOC) pris en compte mais d'autres émissions au FC élevé manquantes comme par exemple le dichlore. De plus, les émissions liées aux catégories Formation de Smog (*Smog Formation* ou SF) et Changement Climatique Global (*Global Warming* ou GCC), font apparaître un problème d'agrégation, par exemple à travers les HFC ou des NMVOC qui possèdent des facteurs de caractérisation aux valeurs variées dans Traci mais sont tous agrégés sous une seule émission dans EXIOBASE, ce qui pourrait mener à une mauvaise évaluation de l'impact de cette catégorie. On relève donc pour ces catégories un problème d'agrégation. Enfin on prévoit que les catégories restantes présentent d'importants problèmes de couverture. Tout d'abord, aucune des émissions inventoriées par EXIOBASE n'a de facteur de caractérisation dans la catégorie Diminution de la couche d'ozone. De la même manière, très peu d'émissions ayant des impacts sur les aires de protection liées à la toxicité humaine ou à l'écotoxicité sont prises en compte dans l'EE d'EXIOBASE : neuf métaux et le HCB pour les Effets cancérigènes sur la santé humaine (HHNC), auxquels on peut ajouter le benzo(a)pyrène et les PCB pour l'Écotoxicité aquatique (FAE) et les PCDD/F pour les Effets cancérigènes sur la santé humaine (HHC). Ainsi EXIOBASE considère 10 substances pour la catégorie HHNC contre 423 dans Traci 2.1, 12 substances pour la catégorie FAE contre 2519 caractérisées dans Traci et 13 substances pour la catégorie HHC contre 246 dans Traci. En particulier aucun pesticide n'est considéré par EXIOBASE à l'exception du HCB.

On voit donc que même si plusieurs catégories d'impact semblent bien représentées dans la liste des émissions inventoriées dans l'EE d'EXIOBASE, certains manques plus ou moins importants peuvent néanmoins être relevés.

Ceci confirme donc le besoin d'améliorer la couverture de ce MREEIO en lui ajoutant les émissions manquantes à partir d'une autre source de données.

Tableau 5.1 : Analyse qualitative de la complétude de l'EE d'EXIOBASE pour chacune des catégories d'impact prises en compte dans Traci

Eutrophisation (E)	Bonne couverture
Changement Climatique (GCC)	Couverture incertaine et problèmes d'agrégation
Diminution de la couche d'ozone (OD)	Mauvaise couverture
Pluies Acides (AR)	Bonne couverture
Formation de Smog (SF)	Couverture incertaine et problèmes d'agrégation
Effets Respiratoires sur la Santé Humaine (HH-RE)	Bonne couverture
Effets Cancérigènes sur la Santé humaine (HHC)	Mauvaise couverture
Effets Non cancérigènes sur la Santé humaine (HHN)	Mauvaise couverture
Écotoxicité Aquatique dans l'Eau douce (FAE)	Mauvaise couverture

5.2 Cas d'application de la méthodologie générale de complétion d'un MREEIO : complétion de l'EE d'EXIOBASE

Nous avons appliqué le cadre méthodologique de la Figure 4.1 pour compléter les extensions environnementales d'EXIOBASE avec les émissions provenant d'une base de données spécifique afin d'utiliser ce MREEIO complété pour quantifier les troncutures de l'EE d'EXIOBASE. C'est ce qui est présenté dans cette section.

5.2.1 Cas d'application : choix de la source des données complémentaire

La première étape du cadre méthodologique décrit dans la Figure 4.1 consiste à choisir une source de donnée permettant de compléter notre MREEIO. Comme expliqué dans la section 4.2.1, quatre types de bases de données peuvent être utilisées : des MREEIO, des EEIO nationaux, des données d'ACV ou encore des inventaires nationaux. Dans le cadre de ce projet, il a été décidé d'utiliser un EEIO national, USEEIO, pour compléter l'EE d'EXIOBASE.

USEEIO est un EEIO couvrant l'économie des États-Unis. Ses données sont libres d'accès et la méthodologie utilisée pour le produire vise à être expliquée avec le plus de transparence possible à travers différents documents annexes. Il propose également une évaluation de la qualité de ses

données, basée sur une méthode proche de la méthode Pedigree. Il est basé sur des données économiques de 2007 et des données environnementales ramenées à l'année 2013 (date de la plus récente des sources de données utilisées pour leurs données environnementales) extraites de sources diverses. Ceci en fait un des EEIO avec les données les plus récentes actuellement et il a de plus l'ambition d'être régulièrement mis à jour.

USEEIO s'appuie sur les données économiques fournies par le Bureau of Economic Analysis (BEA) et utilise donc la classification américaine des secteurs industriels : NAICS 2002. Il propose donc une couverture très détaillée de l'économie américaine avec 389 secteurs industriels ou commodités et 385 produits et services (contre 163 secteurs industriels pour EXIOBASE) avec notamment une description plus spécifique des secteurs liés à l'industrie manufacturière. Enfin, il prend en compte 1801 émissions contre 170 pour EXIOBASE.

Ses principaux avantages, par rapport à d'autres EEIO, sont donc de proposer une description très détaillée de l'économie américaine, un très grand nombre d'émissions, des données parmi les plus récentes disponibles au sein des EEIO, une méthodologie transparente ainsi qu'une certaine évaluation de la qualité de ses données. En revanche, ses principaux inconvénients sont d'une part qu'il ne donne, logiquement, que des informations sur les émissions américaines et d'autre part que certains types d'industries sont moins détaillés que pour EXIOBASE comme par exemple les secteurs de l'énergie ou du traitement des déchets.

Toutes les étapes méthodologiques détaillées dans la suite de ce document ont été spécifiées pour l'utilisation d'EXIOBASE et de USEEIO mais pourraient aussi être valables avec d'autres EEIO, voire d'autres bases de données complémentaires, si ces dernières ont été préalablement classées par secteur industriel émetteur.

5.2.2 Cas d'application : choix des émissions à intégrer au complément

Cette sous-section décrit la procédure de choix des émissions à intégrer au complément, correspondant à l'étape 2 du schéma présenté dans la Figure 4.1 et explicitée en détails dans la section 4.2.2. Elle est appliquée au cas de la complétion de l'EE d'EXIOBASE par des émissions provenant de USEEIO.

Les données utilisées pour EXIOBASE ont été extraites de (EXIOBASE, 2015b). EXIOBASE prend en compte 170 émissions. Chaque émission consiste en une substance, un compartiment de

réception de la substance et souvent soit un mode d'émission (combustion ou non-combustion) soit un type de culture pour l'azote et le phosphore. 87 de ces émissions ont en fait des inventaires vides partout dans le monde. En supprimant ces émissions non recensées et en regroupant phosphore et azote en uniquement deux émissions, ainsi que les espèces, quel que soit leur mode d'émission, on obtient 32 substances réellement référencées (elles sont toutes émises exclusivement dans l'air sauf le phosphore et l'azote qui le sont uniquement dans l'eau). Pour certaines catégories d'impacts comme le Changement Climatique Global (*Global Climate Change* ou GCC) ou l'Eutrophisation (*Eutrophication*), EXIOBASE prend déjà en compte toutes les substances qui ont le plus d'impact (respectivement CO₂, CH₄ et N₂O pour l'une et P et N pour l'autre). Pour d'autres catégories, en particulier la toxicité humaine et l'écotoxicité, le nombre de substances impactantes est beaucoup plus important et varie énormément en fonction des secteurs étudiés. De plus, l'impact sur la destruction de la couche d'ozone n'est pas du tout pris en compte dans EXIOBASE car aucune des substances recensées n'y contribue. Voilà pourquoi il semble important de compléter cet inventaire avec d'autres substances qui sont susceptibles de modifier grandement les résultats d'une analyse étudiant ces catégories d'impact. C'est la raison pour laquelle nous utilisons USEEIO.

Les données utilisées pour USEEIO proviennent de (BEA, 2014; USEEIO, 2017). USEEIO compte quant à lui 1801 émissions (une substance spécifique dans un compartiment et un sous-compartiment en particulier) dont seules 2 sont vides dans l'ensemble des secteurs. Ceci représente 865 substances distinctes, quel que soit le compartiment d'émission. Deux substances (intervenant dans trois émissions) ont également été supprimées en première approche : le zinc dans l'eau et l'air à cause d'un problème lié au facteur de caractérisation leur étant associé dans les informations supplémentaires de USEEIO et qui était en fait celui du xylène, ce qui mettait en doute le fait que les valeurs recensées dans l'inventaire soient bien celles du zinc, et le brome dans le sol car aucun facteur de caractérisation n'était connu pour cette émission. Dans le cas du zinc, cette omission n'est pas réellement problématique car, déjà recensé dans EXIOBASE, il n'aurait de toute manière pas été ajouté dans le complément.

La procédure décrite dans la section 4.2.2, et en particulier l'algorithme présenté dans la Figure 4.2 ont été suivies pour ce cas d'application. À cause de certaines erreurs au niveau des CAS de USEEIO, une vérification manuelle a dû être effectuée pour être certain que les substances étaient bien associées aux bonnes familles agrégées.

Nous avons finalement décidé de désagréger tous les HFC et les PFC, contrairement à ce que préconisait l'algorithme, en ajoutant ces émissions individuelles inventoriées dans USEEIO dans le complément et en utilisant ces émissions pour les différents calculs d'impacts au lieu de celles des familles HFC et PFC agrégées de l'EE d'EXIOBASE. Ceci nous permet d'effectuer une analyse rapide des éventuels problèmes d'agrégation des émissions dans EXIOBASE. En ce qui concerne les métaux, le choix a été fait de supprimer à la fois leur forme solide et toutes leurs formes ionisées, en supposant qu'EXIOBASE les prenait toutes en compte. Cela a conduit à la suppression de six émissions supplémentaires du complément. Parmi toutes les émissions de l'EE d'EXIOBASE, seules celles de zinc (parce que ces dernières ont été supprimées précédemment) et de PCDD_F, présentes dans EXIOBASE, n'ont pas trouvé de correspondance dans les émissions de USEEIO.

Nous avons finalement obtenu une liste de 1767 émissions qui ont ensuite été ajoutées à l'EE d'EXIOBASE afin de la compléter. Ceci comprend 7 HFC (7 substances dans l'air), 3 PFC (également dans l'air) et 17 PAH (seulement 5 substances mais dans l'air, l'eau et le sol) qui sont comptées à la fois dans les extensions environnementales d'EXIOBASE mais aussi dans le complément. Pour le calcul des impacts environnementaux expliqué plus loin nous n'avons en revanche pris en compte que les émissions du complément dans ces cas-là, en prenant pour facteur de caractérisation des familles agrégées de l'EE d'EXIOBASE la valeur 0.

Les émissions de USEEIO qui n'ont pas été intégrées au MREEIO complété sont recensées dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Liste des émissions de USEEIO non incluses dans le MREEIO complété.

Ammonia - air - unspecified*	Lead - air - unspecified*
Arsenic - air - unspecified*	Mercury - air - unspecified*
Benzo(a)pyrene - air - unspecified*	Methane - air - unspecified*
Benzo(b)fluoranthene - air - unspecified*	Nickel - air - unspecified*
Benzo(k)fluoranthene - air - unspecified*	Nickel, ion - air - unspecified*
Cadmium - air - unspecified*	Nitrogen - water - unspecified*
Carbon dioxide - air - unspecified*	Nitrogen oxides - air - unspecified*
Carbon monoxide - air - unspecified*	Particulates, < 10 um - air - unspecified*
Chromium - air - unspecified*	Particulates, < 2.5 um - air - unspecified*
Chromium vi - air - unspecified*	Phosphorus - water - unspecified*
Chromium, ion - air - unspecified*	Polychlorinated biphenyls - air - unspecified*
Copper (+ii) - air - low population density*	Selenium - air - unspecified*
Copper - air - unspecified*	Sulfur dioxide - air - unspecified*
Dinitrogen monoxide - air - unspecified*	Sulfur hexafluoride - air - unspecified*
Hexachlorobenzene - air - unspecified*	Voc, volatile organic compounds - air - unspecified*
Indeno(1,2,3-cd)pyrene - air - unspecified*	

5.2.3 Cas d'application : gestion du degré divers d'agrégation entre le système de classification des secteurs industriels d'EXIOBASE et celui de USEEIO

Les (MR)EEIO classent leurs données concernant les inventaires de flux élémentaires suivant une même logique, à savoir en suivant un système de classification par industrie (ou par commodité ou grand ensemble de produits). Cependant, les classifications des secteurs industriels de deux (MR)EEIO sont en général différentes. Ainsi, même si un autre (MR)EEIO est choisi afin de compléter les données de l'EE d'EXIOBASE, leurs deux systèmes de classification doivent être liés afin d'intégrer les données complémentaires. Cette section décrit l'étape 3 de la Figure 4.1 dans le cas appliqué de la complétion de l'EE d'EXIOBASE par des données provenant de USEEIO.

USEEIO est un EEIO, dont la classification des secteurs industriels est basée sur celle du BEA, elle-même s'appuyant sur la classification américaine NAICS 2002. EXIOBASE quant à lui repose sur une classification européenne NACE 1.1, très proche de la classification des activités économiques proposée par l'ONU : ISIC. Il existe des tables de correspondance entre chacune de

ces classifications mais plusieurs problèmes nous empêchent de les utiliser. Tout d'abord, les EEIO n'utilisent pas exclusivement un système de classification mais peuvent par exemple désagréger certains de ses secteurs afin d'améliorer la description de certaines parties de l'économie qu'il étudie. Ainsi, EXIOBASE désagrège entre autres les secteurs agricoles en se basant notamment sur un système de la classification de la FAO qui est plus détaillé que le NACE pour ces activités. Une table de correspondance strictement entre NACE et NAICS ne permettrait donc pas d'intégrer l'ensemble des données de USEEIO à EXIOBASE. Ensuite, même pour les secteurs qui sont effectivement les mêmes que dans les systèmes de classification majoritairement suivis par ces deux EEIO, la correspondance entre NACE et NAICS n'est pas parfaite. C'est-à-dire qu'un secteur de NAICS peut correspondre à une partie de plusieurs secteurs de NACE et inversement. Tous les liens sont précisés dans les tableaux mais sans idée du volume économique effectif de chaque sous-partie du secteur de NAICS qui est censée aller dans un secteur différent de NACE. Par exemple si un premier EEIO propose deux secteurs : « Élevage » et « Culture végétale » et un second EEIO en décrit deux autres : « Production de nourriture via l'agriculture » et « Production de matériaux via l'agriculture (coton, laine...) », alors on sait que les deux secteurs du premier EEIO sont compris dans des deux secteurs du deuxième mais on ne sait pas quelle proportion de la production de chacun d'entre eux ils représentent effectivement. Ainsi on ne sait pas quelle part des émissions du secteur « Élevage » doit être attribuée à chacun des deux secteurs du second EEIO.

Si on veut néanmoins continuer à prendre en compte l'intégralité des secteurs de USEEIO correspondant à un secteur d'EXIOBASE pour répartir les émissions complémentaires, alors certains secteurs ayant une importance marginale dans la composition du secteur d'EXIOBASE risquent de prendre beaucoup trop de poids dans le calcul des émissions de ce secteur complété. En effet, la répartition des émissions depuis USEEIO vers EXIOBASE se fait en prenant uniquement en compte les poids économiques totaux des secteurs de USEEIO (comme expliqué un peu plus loin) et non la répartition exacte des secteurs de USEEIO entre ceux d'EXIOBASE, puisque cette donnée n'est pas disponible. Ceci peut augmenter l'importance relative des secteurs marginaux dans le calcul du facteur d'émissions d'un secteur du complément. Par exemple *Manufacture of textiles* dans NACE 1.1 est relié à *Lighting fixture manufacturing* dans NAICS 2002 en raison des manchons incandescents en tissus utilisés par certains systèmes d'éclairages. Or il paraît évident que ces manchons ne représentent qu'une part infime de l'industrie du textile. Cette situation est représentée dans le cas 1 de la Figure 5.1. Pour simplifier cet exemple, nous

supposons que la quasi-totalité de la production du secteur *Manufacture of textiles* dans NACE 1.1 correspondent à des produits associés au secteur *Textile manufacturing* et de la même façon que la quasi-totalité de la production du secteur *Lighting fixture manufacturing* dans NAICS 2002 correspond à la production du secteur *Manufacturing of lighting* dans NACE. D'après la formule présentée dans la Figure 5.2 de la section suivante, le facteur d'émission de *Manufacture of textiles* sera alors calculé de la manière suivante :

$$s_3 = \frac{s_1 \times P_1 + s_2 \times P_2}{P_1 + P_2}$$

s_1, s_2 et s_3 correspondent respectivement aux facteurs d'émissions des secteurs *Textile manufacturing* et *Lighting fixture manufacturing* de USEEIO et *Manufacture of textiles* d'EXIOBASE. P_1 et P_2 correspondent aux valeurs de production respective des secteurs *Textile manufacturing* et *Lighting fixture manufacturing*.

Si on suppose que ces deux secteurs ont des productions équivalentes, on aura alors :

$$P_1 \approx P_2 \text{ donc } s_3 \approx \frac{s_1 + s_2}{2}$$

Le facteur d'émissions du secteur des textiles d'EXIOBASE complété va être environ égal à la moyenne entre les facteurs d'émissions des secteurs du textile et de production de luminaires de USEEIO alors qu'il aurait dû être beaucoup plus proche de celui du premier secteur qui décrit pratiquement les mêmes technologies puisqu'ils produisent tous les deux en grande majorité les mêmes produits.

C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de diviser les émissions d'un secteur de la base de données complémentaire uniquement entre les principaux secteurs correspondants de la classification de USEEIO, estimés d'après un jugement d'expert, en négligeant les secteurs dont seule une petite partie des activités est concernée. Ceci est décrit dans le cas 2 de la Figure 5.1. Dans ce cas-là, on obtient bien un facteur d'émission pour le secteur d'EXIOBASE complété égal à celui de USEEIO qui en est le plus proche.

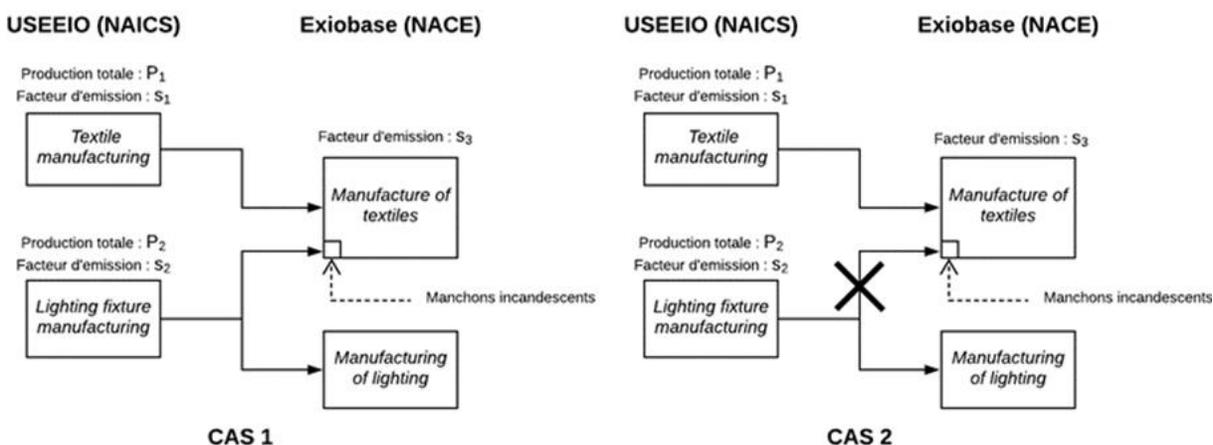


Figure 5.1 : Schémas illustrant les deux manières de répartir les émissions complémentaires des secteurs de USEEIO vers ceux d'EXIOBASE.

Il a donc fallu créer une table de correspondance entre le système de classification de USEEIO et celui d'EXIOBASE, c'est l'étape 2 de la Figure 4.1. Cette dernière a été réalisée manuellement en reliant chacun des secteurs de USEEIO à celui ou ceux d'EXIOBASE qui semblaient lui correspondre le plus en fonction de sa description. Pour les secteurs pour lesquels la connexion était moins évidente, les tables de correspondance disponibles ont été utilisées pour trouver les principaux secteurs à relier. Une légère simplification a ensuite été effectuée afin de supprimer les connexions qui avaient été faites mais paraissaient anecdotiques au regard d'autres connexions beaucoup plus appropriées, tout en vérifiant que chaque secteur des deux EEIO apparaissait toujours au moins une fois dans la table complète.

5.2.4 Cas d'application : intégration des émissions complémentaires au sein de l'EE d'EXIOBASE

La table de correspondance entre les systèmes de classification industrielle d'EXIOBASE et de USEEIO précédemment produite a permis d'intégrer les émissions complémentaires provenant de USEEIO vers l'EE d'EXIOBASE. Ceci correspond à l'étape 4 de la Figure 4.1. USEEIO ne prenant en compte que les États-Unis, c'est uniquement la partie d'EXIOBASE concernant cette région qui a été complétée dans un premier temps. La phase de répartition des valeurs des émissions a été réalisée à travers un calcul matriciel. Quatre situations pouvaient être rencontrées. Ces situations donnaient lieu à des manières de répartir les émissions différentes qui sont résumées dans la Figure 5.2.

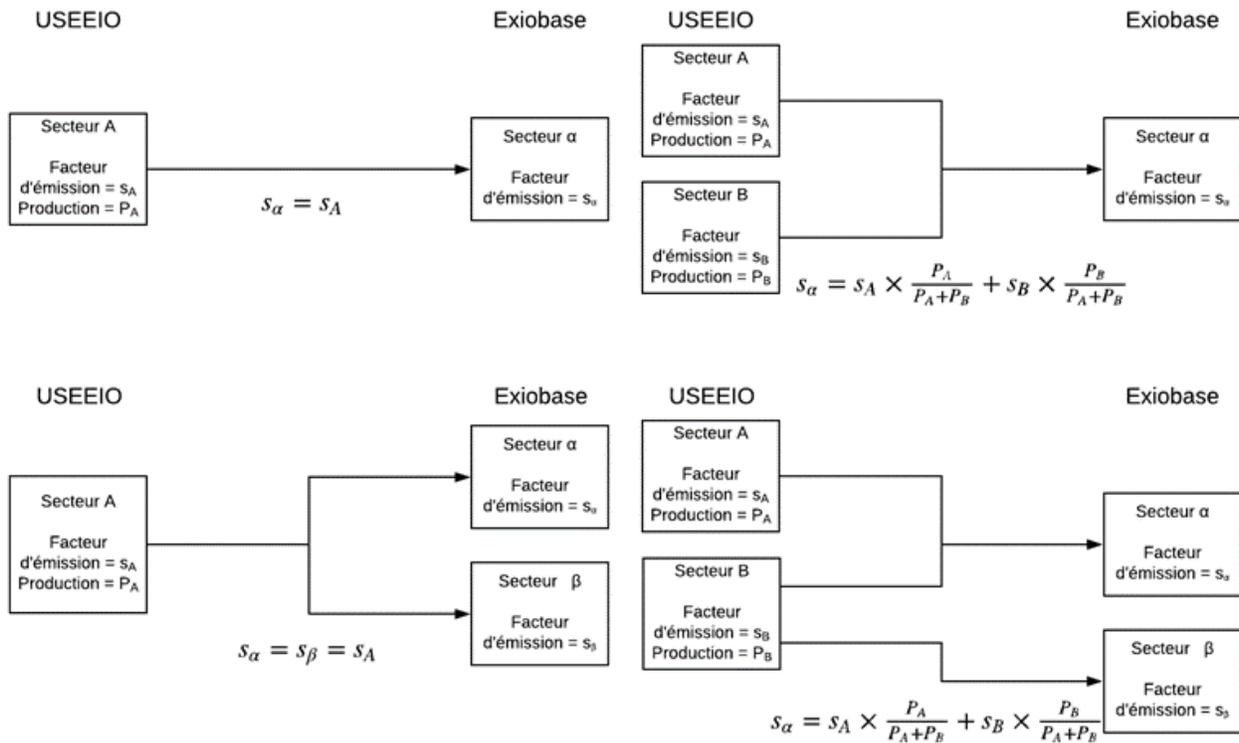


Figure 5.2 : Schéma de la répartition des émissions de USEEIO vers Exiobase

Toutes ces différentes situations sont prises en compte lorsqu'on utilise l'équation suivante pour répartir les émissions :

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 * (\widehat{\mathbf{x}}_0 * {}^t \mathbf{M}_{\text{concordance}}) * (\widehat{\mathbf{M}}_{\text{concordance}} * \mathbf{x}_0)^{-1} \quad (8)$$

Avec \mathbf{S} la matrice normalisée des émissions de USEEIO qu'on veut ajouter à l'EE d'EXIOBASE, redistribuées selon la classification des secteurs industriels d'EXIOBASE, en kilos par euro, avec les secteurs d'EXIOBASE en lignes et les émissions de USEEIO en colonnes. \mathbf{S}_0 est la matrice normalisée des émissions de USEEIO à ajouter à l'EE d'EXIOBASE, en kilos par euro également, distribuées selon les secteurs de USEEIO, avec les secteurs de USEEIO en lignes et les émissions de USEEIO en colonnes. Ses valeurs ont été ramenées de kilo par dollar US en kilo par euro en utilisant le taux de conversion de l'année 2013 (année des valeurs recensées dans USEEIO) : 0,75 euro par dollar US. \mathbf{x}_0 est le vecteur de production totale de USEEIO, en euro. $\mathbf{M}_{\text{concordance}}$ est la matrice de concordance liant les secteurs des deux EEIO avec en lignes les secteurs d'EXIOBASE et en colonnes ceux de USEEIO. Ainsi $m_{(i,j)} = 1$ si les secteurs i et j sont concordants et 0 sinon.

On a choisi de répartir les coefficients d'émission normalisés des secteurs de USEEIO (matrice \mathbf{S}), c'est-à-dire la valeur des émissions directes par euro de production de chacun des secteurs, plutôt que les émissions directes totales (matrice \mathbf{F}). Ces deux choix sont défendables. Le premier revient à considérer que seules les technologies des secteurs sont équivalentes entre USEEIO et EXIOBASE et non les inventaires totaux d'émissions qui dépendent des échanges économiques et des choix méthodologiques utilisés pour la création de chaque (MR)EEIO. De plus, il permet d'appliquer la même méthode de répartition de USEEIO vers les États-Unis et vers le reste des régions du monde dans EXIOBASE (seuls les coefficients sont conservés). Le deuxième permet de conserver un bilan d'émissions totales entre USEEIO et la région US de l'EE d'EXIOBASE mais cette égalité des émissions est elle-même questionnable puisque les économies représentées dans les deux IO sont différentes. Les émissions totales pourraient donc aussi être différentes entre les EEIO, c'est d'ailleurs ce qu'on a pu observer en réalisant la comparaison des inventaires des émissions communes à USEEIO et à EXIOBASE présentée en annexe H. Cette deuxième approche a été appliquée pour information et nous a permis d'obtenir des résultats extrêmement proches de la première.

Une fois la matrice normalisée des émissions de USEEIO, réparties selon les secteurs d'EXIOBASE, obtenue de cette manière, il a suffi de la concaténer avec celle des émissions d'EXIOBASE pour les États-Unis afin d'obtenir une matrice normalisée d'émissions complétée $\mathbf{S}_{compl,US}$, en d'autres termes, notre MREEIO complété pour la région US. Ces résultats ont ensuite été étendus au reste du monde dans EXIOBASE en prenant l'hypothèse très grossière que les technologies dans chaque région du monde sont semblables à celles des US. C'est-à-dire que les émissions par euro des secteurs industriels de chaque région du monde sont les mêmes que pour des secteurs américains. Ainsi, les facteurs d'émission des émissions complémentaires précédemment calculés ont été conservés à l'identique pour l'ensemble des secteurs du monde. Les émissions déjà présentes à l'origine dans EXIOBASE ont été conservées telles qu'elles dans les autres régions puisqu'elles n'ont pas été modifiées dans la région États-Unis, ce qui a permis de ne pas augmenter leur niveau d'incertitudes par rapport à la version originale d'EXIOBASE. Nous avons de cette manière pu construire la matrice normalisée des émissions complétée pour le monde entier \mathbf{S}_{compl} .

Après avoir effectué plusieurs calculs d'impacts, à l'aide de cette matrice complétée, nous nous sommes retrouvés face à des résultats qui montraient une très forte augmentation des impacts des secteurs liés à la production d'électricité, au traitement des déchets et au traitement de l'eau. Cette situation est due au fait que dans EXIOBASE, chacun de ces ensembles de secteurs est très détaillé alors qu'il ne l'est pas du tout au sein de USEEIO (seulement un seul secteur pour l'eau et les déchets et trois pour l'électricité sans distinction du mode de production). Le problème est que pour des secteurs avec un haut degré d'agrégation, le coefficient d'émission du secteur général est une moyenne entre des technologies qui émettent en réalité beaucoup et d'autres qui émettent très peu. Ainsi, un secteur de production d'électricité agrégé regroupe à la fois des technologies très polluantes comme les centrales à charbon et des technologies émettant très peu d'émissions directes comme les éoliennes. Utiliser ce coefficient agrégé pour répartir les émissions de la classification de USEEIO vers celle d'EXIOBASE mène donc à grandement surestimer les émissions de certains secteurs désagrégés et à grandement sous-estimer celles d'autres. Par exemple pour l'électricité, nos premiers résultats montraient une augmentation extrêmement forte des impacts sur le réchauffement climatique des énergies propres (solaire, éolien, géothermique...) puisque des émissions de GES venant des centrales à charbon ou à mazout comprises dans le secteur agrégé de USEEIO leur étaient attribuées dans le complément. Les listes de tous ces secteurs problématiques sont exposées dans les tableaux de l'annexe A (pages 125 à 126).

Afin de remédier à ce problème, nous avons décidé de ne plus intégrer les émissions de USEEIO dans aucun de ces secteurs, mis à part les énergies fossiles dans lesquelles on a décidé d'intégrer l'intégralité des émissions provenant des secteurs de production d'électricité de USEEIO. C'est une hypothèse très grossière qui devrait être réétudiée ultérieurement, cependant, lors de l'ensemble des calculs que nous avons menés avec la base de données EXIOBASE uniquement, les secteurs dans lesquels nous avons décidé de ne plus intégrer les données de USEEIO ne sont jamais apparus comme ayant un impact important. On suppose donc que ce choix méthodologique n'a qu'un impact limité sur nos résultats.

5.2.5 Cas d'application : calcul des facteurs de caractérisation utilisés pour quantifier le nouveau MREEIO complété

Nous disposons maintenant d'une version de l'EE d'EXIOBASE complété par des émissions provenant de USEEIO. Afin d'étudier ce complément, nous avons besoin des facteurs de

caractérisation de toutes les émissions prises en compte. Cette recherche des facteurs de caractérisation correspondants consiste en l'étape 5 de la Figure 4.1.

Ce sont les facteurs de caractérisation de la méthode d'impact Traci 2.1 qui ont été choisis afin de mener notre analyse. Traci propose des facteurs de caractérisation pour 3945 substances (hors ressources) contre moins de 500 pour CML (V3.05), un peu moins de 3000 pour ReCiPe 2016 (V1.03), autour de 3100 pour USETox et autour de 3400 pour IMPACT World + (V1.25) De plus, USEEIO compose la plus grande partie du complément en termes de nombre de substances et ses inventaires d'émissions sont américains. La plupart de nos cas d'études seront donc menés aux États-Unis. Or les facteurs de caractérisation de Traci ont été calculés pour cette région spécifique et cette méthode d'impact est très utilisée pour des analyses américaines. Ces facteurs ont été tirés de (TRACI, 2014; USEEIO, 2017).

USEEIO ayant été produit par une équipe américaine, un fichier comportant les facteurs de caractérisation de Traci pour chacune des émissions de USEEIO est déjà disponible. Il ne reste plus qu'à obtenir des facteurs de caractérisation pour toutes les émissions d'EXIOBASE à partir des données de Traci, pour garder une analyse cohérente.

L'EE d'EXIOBASE comporte plusieurs types d'émissions. Diverses approches, précisées dans la section 4.2.5, ont donc dû être adoptées afin de calculer l'ensemble des facteurs de caractérisation. Les facteurs de caractérisation de toutes les émissions directement caractérisées dans Traci ont été reproduits à l'identique. Simplement, comme cela a été fait pour USEEIO, les émissions dans l'air n'ayant pas de sous-compartiment spécifié, nous avons calculé leur facteur de caractérisation comme étant égaux à la moyenne entre les facteurs de caractérisation de Traci pour l'air urbain et continental (ou rural). De même, pour les émissions dans le sol, seules les valeurs pour le sol naturel (et non agricole) ont été considérées et pour les émissions dans l'eau, ce sont les valeurs pour l'eau douce et non marine qui ont été choisies. Ces différents cas n'apparaissent que pour les catégories d'impact Écotoxicité Aquatique dans l'Eau douce (*Freshwater Aquatic Ecotoxicity* ou FAE), Effets cancérigènes sur la santé humaine (*Human Health Cancer* ou HHC) et Effets non cancérigènes sur la santé humaine (*Human Health Noncancer* ou HHN).

Pour les substances agrégées, la méthode décrite dans la section 4.2.5 a été utilisée en prenant la moyenne de toutes les substances de cette famille, inventoriées dans USEEIO. Plusieurs cas particuliers ont cependant dû être gérés séparément.

Dans le cas des métaux, qui sont inventoriés dans EXIOBASE sous leur dénomination non-ionique (Cu, Pb, Zn...), on a choisi de prendre le facteur de caractérisation de leur ion, ou la moyenne de leurs ions si plusieurs étaient référencés dans Traci, en supposant qu'EXIOBASE englobait tous les ions métalliques dans son inventaire.

Les PCDD_F (polychlorobenzodioxines et polychlorodibenzofuranes) et les NMVOC (composants organiques volatiles en dehors du méthane) sont deux cas particuliers car ils n'apparaissent pas en tant que tels dans la base de données de Traci. Pour les premiers, ce sont les valeurs du 2,3,7,8-tetracdd qui ont été choisies car elles sont référencées en tant que « Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin » dans le fichier des facteurs de caractérisation de USEEIO. Finalement, ceci n'est pas un problème car les émissions de PCDD-F ne sont pas inventoriées dans EXIOBASE en kilo, comme la quasi-totalité des autres substances, mais en kg I-TEQ c'est-à-dire en kilo international d'équivalent toxique. Or pour les dioxines et furanes, c'est en général le 2,3,7,8-tetracdd qui est utilisé comme substance de référence pour cette unité (WHO, 2005). En supposant que c'est bien la référence utilisée par EXIOBASE, ce choix de facteur de caractérisation est donc tout indiqué. Pour les NMVOC, ce sont les valeurs des facteurs de caractérisation des VOC qui ont été choisies car c'étaient les substances qui s'en approchaient les plus référencées dans Traci, même si la présence ou l'absence du méthane altère ces valeurs.

Enfin, HFC et les PFC sont déjà inventoriés en kilo de CO₂ équivalents dans l'EE d'EXIOBASE donc leur facteur de caractérisation est simplement de 1 pour la catégorie GCC et de 0 pour toutes les autres. Cependant, nous avons voulu observer certains effets de l'agrégation de ces substances en deux familles uniques dans l'EE d'EXIOBASE, c'est pourquoi nous avons gardé les HFC et les PFC de USEEIO désagrégés dans le complément. Nous avons alors décidé de fixer les facteurs de caractérisation de ces deux substances agrégées à 0 afin qu'elles n'entrent pas en compte dans nos analyses et d'utiliser les facteurs de caractérisation spécifiques de chacun des HFC et des PFC présents dans USEEIO et donc dans le complément.

Toutes les analyses du MREEIO complété ont été menées à l'aide des facteurs de caractérisation d'une seule méthode d'impact, Traci. Utiliser une autre méthode d'impact aurait pu mener à des résultats différents mais la réalisation d'une telle analyse supplémentaire n'a pas été possible dans le cadre de ce projet pour des raisons de manque de temps.

5.2.6 Cas d'application : analyse et amélioration du complément

L'EE d'EXIOBASE ainsi complété a ensuite été analysé à l'aide des facteurs de caractérisation obtenus au cours de l'étape précédente. Tous les résultats de cette étape sont présentés dans la section suivante. C'est à travers le calcul de différents scores d'impacts à partir des données de notre MREEIO complété que nous avons pu mettre en avant certains résultats étonnants qui nous ont poussés à revenir sur certains points spécifiques de la production du complément. Ce processus itératif nous a conduits à revoir notre manière de traiter les substances agrégées d'EXIOBASE comme expliqué dans la section 5.2.2 ainsi que la méthode de calcul de leurs facteurs de caractérisation (section 5.2.5). C'est également à la suite de l'obtention de premiers résultats que nous avons décidé de ne plus intégrer les émissions de certains secteurs trop agrégés de USEEIO (section 5.2.3).

5.3 Calcul des scores d'impact à partir du MREEIO complété produit au cours du cas d'application

L'EE d'EXIOBASE complété inventorie maintenant 1800 émissions représentant 798 substances, ce qui est bien du même ordre de grandeur que la version 3.5 d'*ecoinvent* qui couvre 4243 flux élémentaires (comprenant les ressources) et 1345 substances (*ecoinvent*, 2018). Il reste maintenant à analyser l'amélioration dans sa couverture des impacts par rapport à la version originale de l'EE d'EXIOBASE. Pour ce faire, nous avons comparé plusieurs scores d'impact calculés avec cette nouvelle version à ceux obtenus à partir de la version originelle afin de quantifier l'importance de la troncature des émissions de l'EE d'EXIOBASE. Ces résultats sont présentés dans cette section.

5.3.1 Analyse des impacts de l'économie dans son ensemble

La première partie de notre analyse consiste à étudier l'effet de l'ajout de notre complément d'une manière globale, en regardant le total des émissions pour l'ensemble des secteurs industriels.

La Figure 5.3 présente, pour chaque catégorie d'impact et pour l'ensemble des émissions directes de l'économie américaine, la provenance des données ayant permis de calculer l'impact total de l'ensemble des secteurs. On a utilisé l'équation (1) pour calculer ces pourcentages. On voit très nettement que pour la catégorie OD, tous les impacts viennent du complément, ce qui est logique car aucune des émissions recensées dans EXIOBASE n'a d'impact sur cette catégorie. On voit

également que la catégorie FAE est très touchée par l'ajout du complément et que la catégorie HHC l'est de façon plus modeste. Les catégories GCC et HHN sont quant à elles très légèrement modifiées par l'ajout du complément. Les autres catégories ne semblent pas ou extrêmement peu affectées.

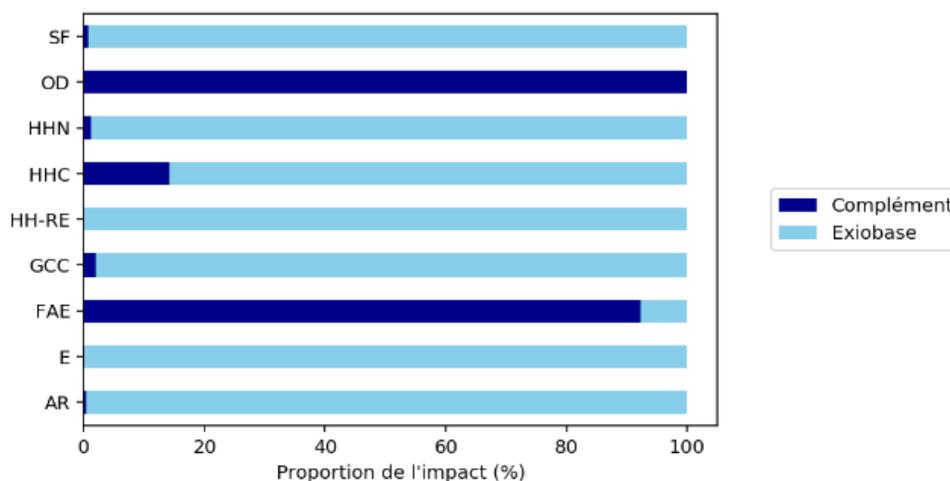


Figure 5.3 : Répartition des impacts de l'ensemble de l'économie des États-Unis selon l'EEIO ayant fourni les données (entre EXIOBASE et le complément), ceci pour chacune des catégories d'impact, en pourcentage.

L'extrapolation des coefficients techniques, ou émissions par euro de production, des secteurs industriels américains aux secteurs du reste du monde permet de produire la Figure 5.4. Elle présente les mêmes résultats mais pour l'économie mondiale. On peut observer que les mêmes catégories d'impacts semblent affectées ou non par l'ajout du complément, à peu près dans les mêmes proportions, mis à part la catégorie HHC qui semble plus de deux fois moins impactée par le complément dans le cas de l'économie mondiale. Elle atteint en effet 14,2 % de l'impact provenant du complément pour la région US contre seulement 5,4 % pour l'économie mondiale. Les catégories FAE et HHN semblent également plus dépendre du complément dans le cas de l'économie américaine (avec respectivement des diminutions de 6,1 et 0,8 points en passant à l'économie mondiale). Ces différences pourraient s'expliquer de deux manières différentes. Premièrement, elle pourrait être due à une structure différente entre les États-Unis et le reste du monde avec les secteurs complémentés ayant une plus grande importance que les autres secteurs dans le cas des US mais pas dans les autres régions du monde. Deuxièmement, cela pourrait être dû à des émissions par dollar déjà recensées dans EXIOBASE plus importantes dans le reste du

monde qu'aux États-Unis, ce qui ferait diminuer relativement l'importance du complément. Une étude détaillée devrait être menée pour analyser les raisons de ces différences.

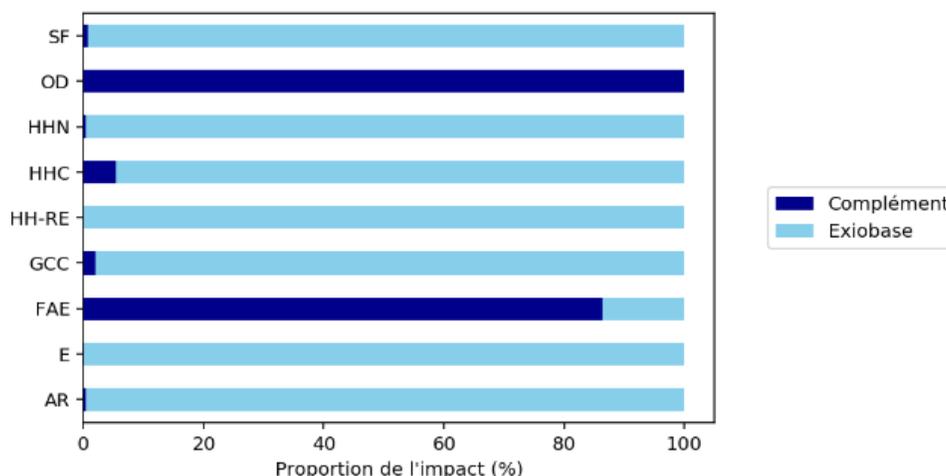


Figure 5.4 : Répartition des impacts de l'ensemble de l'économie mondiale selon l'EEIO ayant fourni les données (entre EXIOBASE et le complément), ceci pour chacune des catégories d'impact, en pourcentage.

Tous les secteurs de l'économie ayant des émissions très variées, les situations générales présentées précédemment ne doivent pas s'appliquer de manière uniforme à l'ensemble des activités de l'industrie. On va donc étudier plus en détail l'hétérogénéité de l'effet du complément sur chacun des secteurs de l'économie. La Figure 5.5 montre, pour chaque catégorie d'impact, la distribution de tous les secteurs de l'économie américaine en fonction de la part de leur impact direct dans cette catégorie qui a été calculée avec des données provenant du complément. Par exemple si 25 % de l'impact calculé pour les émissions totales d'un secteur dans la catégorie GCC est attribuable à des émissions contenues dans le complément de l'EEIO, alors ce secteur sera compté dans ce graphique avec une valeur de 25. Les données pour chacun des secteurs ont été obtenues à l'aide de l'équation (5). Seuls les secteurs impactant ces catégories d'impacts sont considérés, ainsi, un secteur n'ayant aucun impact dans une catégorie donnée, ni dans EXIOBASE ni dans le MREEIO complété, ne sera pas compté à zéro mais simplement écarté de l'analyse afin de ne pas fausser les résultats.

On peut tout d'abord observer que tous les secteurs ayant un impact dans la catégorie OD ont été intégralement affectés par l'ajout du complément puisque toutes les émissions ayant un impact dans cette catégorie proviennent du complément. À l'inverse, dans la catégorie HHRE, toutes les données ayant permis de calculer l'impact proviennent directement d'EXIOBASE donc aucun

secteur n'est affecté par l'ajout du complément. Les catégories HHC et FAE montrent une distribution très étalée avec un quart des secteurs étant impactés à plus de 45 % pour la première et à plus de 15 % pour la seconde, un dixième des secteurs environ impactés à plus de 95 % dans les deux catégories mais au moins un quart absolument pas impacté dans les deux cas. La catégorie HHN voit également une proportion non négligeable de secteurs très affectés par le complément tout en ayant une majorité de secteurs peu ou pas du tout affectés. Enfin, les catégories GCC, AR, SF et E connaissent quelques secteurs assez affectés (environ un dixième au-dessus de 10 %) mais plus des trois quarts des secteurs ont une part de leur impact dépendant des données du complément inférieure à quelques points de pourcentage. Le détail de l'effet du complément pour chacun des secteurs de l'économie américaine sera explicité dans les parties suivantes de ce mémoire (sections 5.3.2.4 et 5.3.2.5).

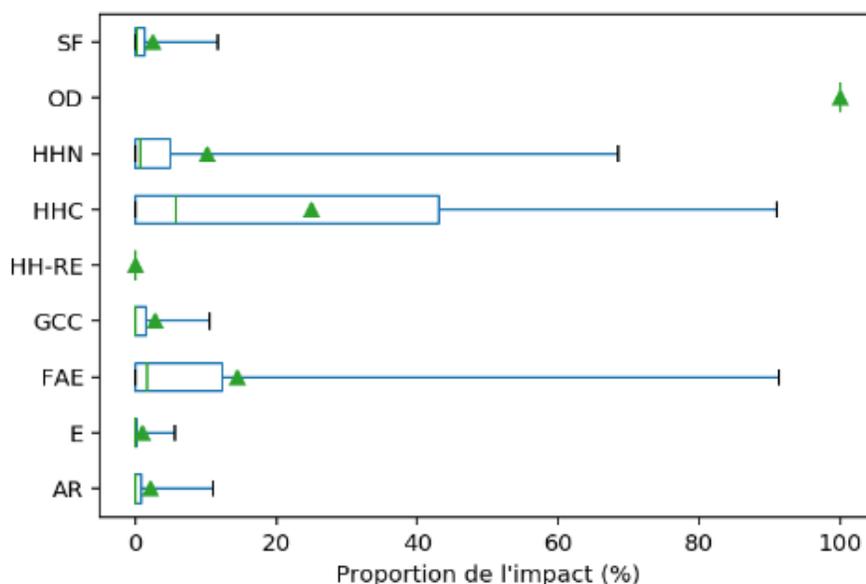


Figure 5.5 : Distribution des secteurs industriels des États-Unis en fonction de la part de leur impact associé due aux données provenant du complément, pour chaque catégorie. Les segments externes présentent le premier et le neuvième décile, la boîte centrale va du premier au troisième quartile, la barre verte représente la médiane et le triangle la moyenne des données.

La Figure 5.6 présente les mêmes résultats mais pour les secteurs du monde entier. On peut réaliser globalement les mêmes observations même si, pour l'ensemble des catégories, un plus grand nombre de secteurs semble affecté par le complément. Ceci est particulièrement visible pour la catégorie GCC pour laquelle le neuvième décile était à environ 15 % au niveau américain alors

qu'il est à environ 45 % pour le monde. L'ensemble des données ayant permis de réaliser ces graphiques est disponible en annexe B.

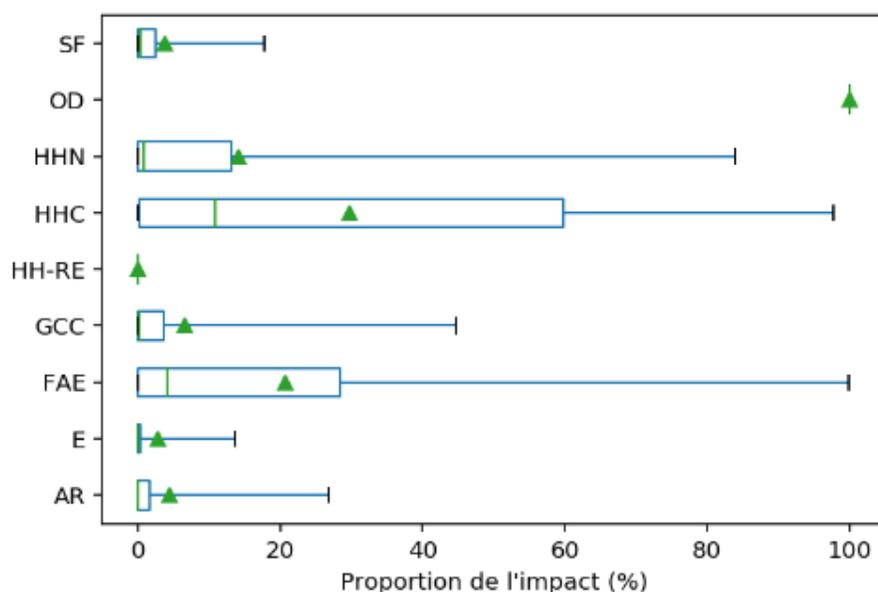


Figure 5.6 : Distribution des secteurs industriels du monde entier en fonction de la part de leur impact associé due aux données provenant du complément, pour chaque catégorie. Les segments externes présentent le premier et le neuvième décile, la boîte centrale va du premier au troisième quartile, la barre verte représente la médiane et le triangle la moyenne des données.¹

On peut voir que les informations de ces graphiques viennent confirmer les tendances générales observées dans les Figure 5.3 et Figure 5.4. En effet, pour les États-Unis, la moyenne arithmétique (sans prendre en compte le poids économique) de l'effet du complément sur les secteurs est bien plus élevée pour les catégories toxiques que pour les autres catégories. Les médianes HHC et FAE sont également relativement élevées, ce qui confirme que le complément va avoir un effet important pour ces catégories, à la fois d'un point de vue global (économie totale) mais aussi détaillé (pour un grand nombre de secteurs spécifiques). On observe cependant que si la catégorie FAE semble beaucoup plus modifiée par l'ajout du complément que la catégorie HHC au niveau global, ces seconds graphiques semblent montrer qu'au niveau détaillé, un plus grand nombre de secteurs sera plus fortement affecté pour HHC que pour FAE (la moyenne et la médiane sont plus élevées pour cette première catégorie que pour la seconde). De même, au niveau global, la catégorie GCC est plus affectée que la catégorie HHN alors que les analyses statistiques montrent qu'un plus

grand nombre de secteurs seront affectés pour la catégorie HHN que pour la catégorie GCC. Ceci s'explique par le fait que les quelques secteurs les plus impactés pour le changement climatique ont un poids économique plus important que pour la toxicité humaine non cancérigène. Des analyses similaires sont valables pour l'économie mondiale.

5.3.2 Portrait détaillé du MREEIO complété et différences avec l'EE d'EXIOBASE

La seconde partie de notre analyse consiste à réaliser une étude plus spécifique de l'effet de notre complément, en recherchant les émissions et les secteurs se démarquant, soit par leur part dans le calcul des impacts du MREEIO complété, soit par l'effet qu'a eu l'ajout du complément sur le calcul de leurs impacts. Dans toute cette section, nous nous intéressons uniquement aux secteurs de l'économie américaine. De plus, dans tout le reste de l'analyse, la catégorie HHRE ne sera plus discutée car l'intégralité de son impact provient systématiquement d'émissions présentes dans EXIOBASE. Notre complément n'a donc jamais aucune influence sur elle.

5.3.2.1 Substances les plus impactantes

Nous nous intéressons tout d'abord aux différentes émissions composant le MREEIO complété. Nous voulons savoir lesquelles participent le plus aux impacts calculés pour chaque catégorie et si elles viennent plutôt d'EXIOBASE ou du complément. Les figures suivantes présentent une division des impacts de chacune des catégories étudiées en fonction des émissions qui les ont causés. Les données utilisées pour tracer ces graphiques ont été obtenues à l'aide de l'équation (6) pour les données du MREEIO complété. Nous ne présentons dans cette section que les catégories d'impacts pour lesquelles l'effet du complément est nettement visible (OD dans la Figure 5.7, HHC dans la Figure 5.8, GCC dans la Figure 5.9 et FAE dans la Figure 5.10). Les graphiques de toutes les autres catégories d'impacts sont regroupés dans l'annexe. Dans toutes les légendes, les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque.

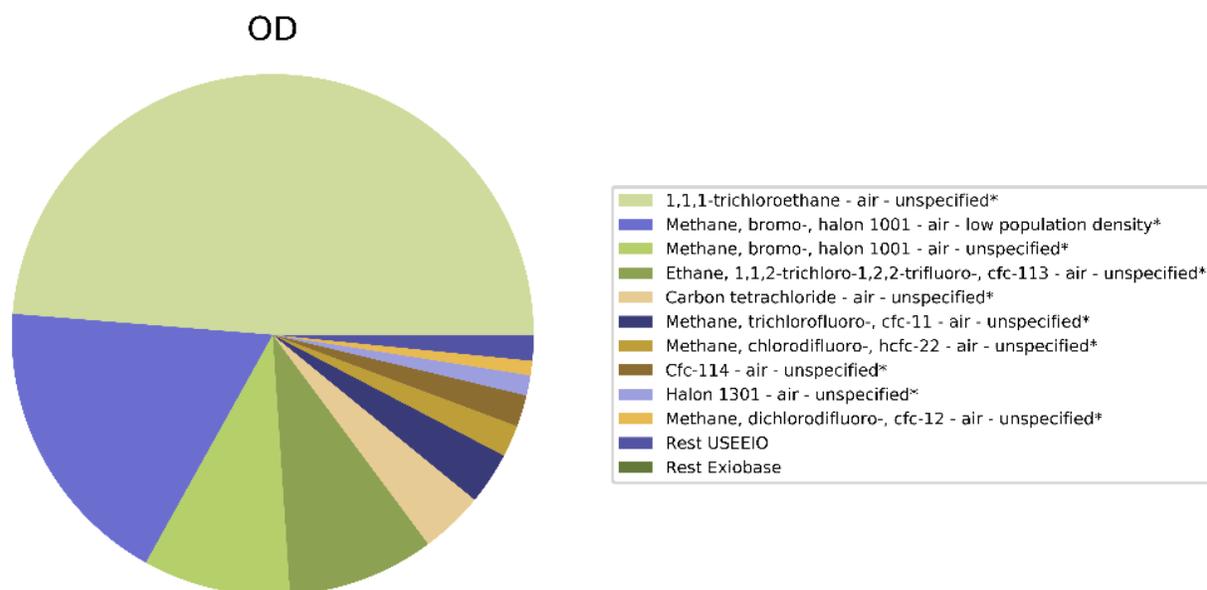


Figure 5.7 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie OD, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

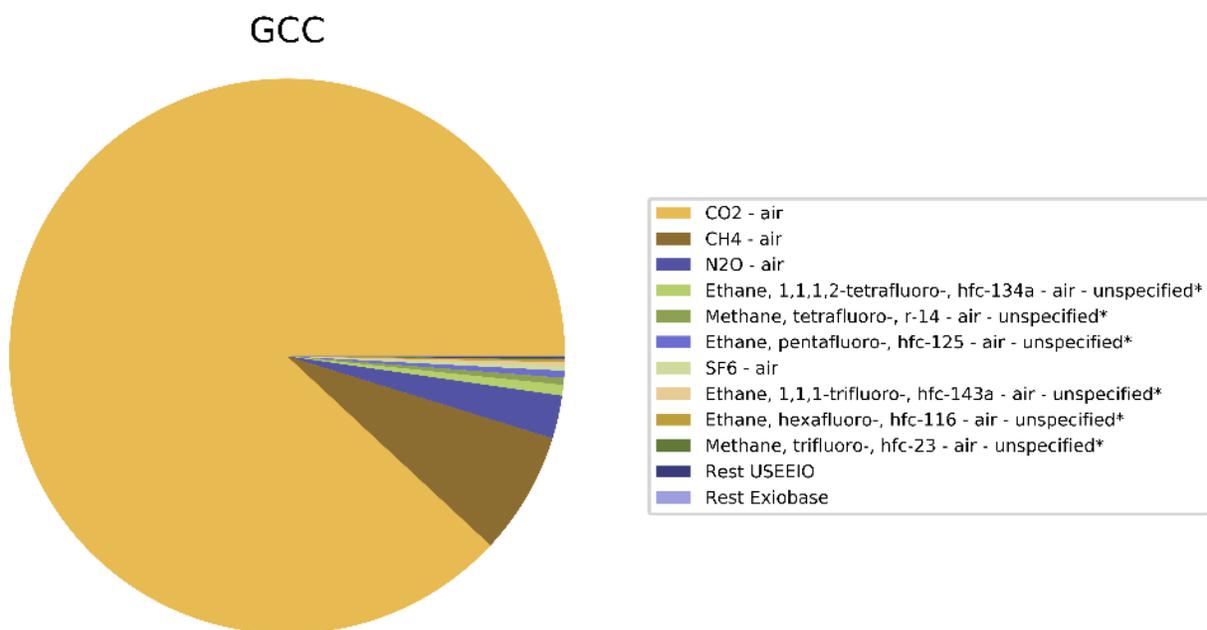


Figure 5.8 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie GCC, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

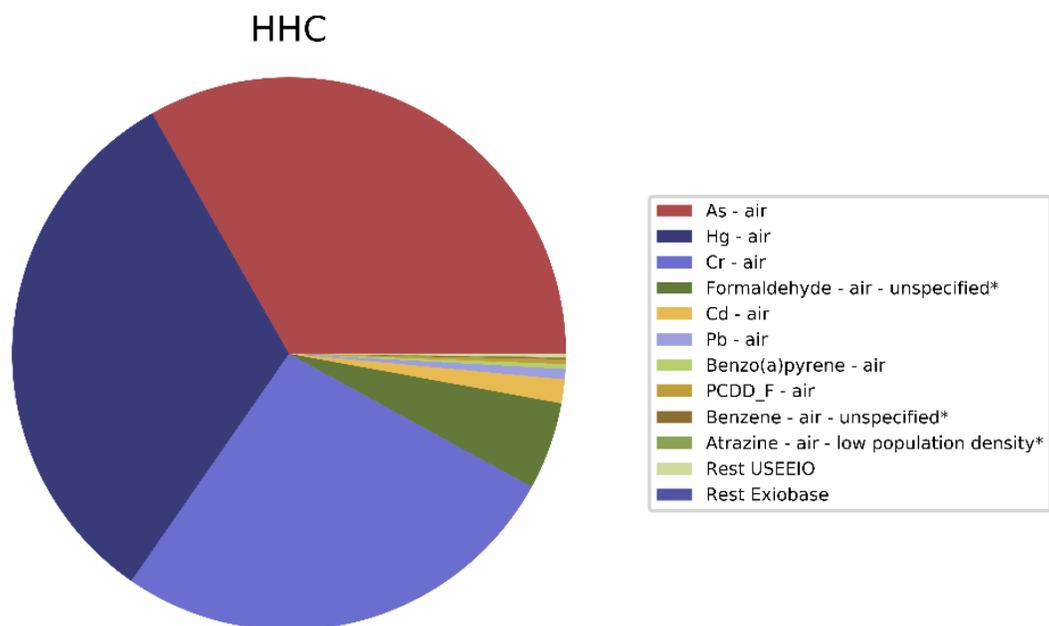


Figure 5.9 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie HHC, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

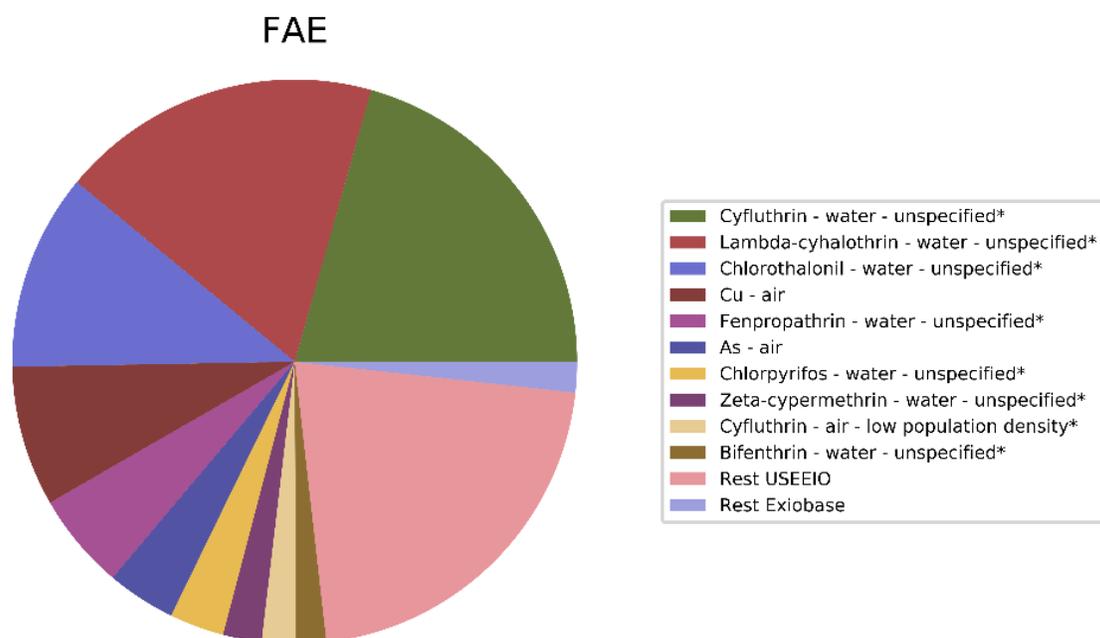


Figure 5.10 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie FAE, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

On observe tout d'abord que, comme on l'a vu précédemment, toutes les émissions de la catégorie OD (Figure 5.7) proviennent du complément.

Les graphiques concernant les catégories d'impact peu affectées par l'ajout du complément sont présents en annexe. En étudiant les unes après les autres, on voit que la catégorie AR (Figure C.1) est totalement dominée par les impacts des SO_x et des NO_x, compris dans EXIOBASE. Même si certaines émissions du complément font partie des dix émissions les plus impactantes, leurs effets sont complètement négligeables devant les deux premières. Le même constat peut être fait en ce qui concerne la catégorie Eutrophisation (Figure C.2), dominée par les émissions d'azote, de phosphore et de NO_x, la catégorie HHN (Figure C.3) dépendant presque exclusivement des métaux d'EXIOBASE et la catégorie SF (Figure C.4) pour laquelle les émissions de NO_x et de NMVOC constituent les contributeurs de la quasi-totalité de l'impact.

La catégorie GCC (Figure 5.8) offre un portrait légèrement différent. Bien que dépendant très largement des émissions de CO₂, de CH₄ et de N₂O dans une moindre mesure, quelques émissions de HFC provenant du complément participent à l'impact même si cela reste très anecdotique. De même, pour la catégorie HHC (Figure 5.9), même si les métaux, provenant d'EXIOBASE, contribuent à presque tout l'impact, la part du formaldéhyde, provenant du complément, n'est pas négligeable.

Enfin, la catégorie FAE (Figure 5.10) est complètement différente avec la plupart des principales émissions contributrices provenant du complément. Seules les émissions de cuivre et d'arsenic ont encore un impact important dans cette catégorie, toutes les autres émissions provenant d'EXIOBASE ne représentant combinées que quelques points de pourcentage de l'impact total de cette catégorie.

Deux tableaux contenant la contribution de chacune des 20 premières émissions, pour chaque catégorie d'impact, sont disponibles en annexe C.

5.3.2.2 Secteurs les plus impactants en émissions directes (approche producteur)

Nous étudions dans cette sous-section les principaux secteurs qui participent à chacune des catégories d'impact dans le MREEIO complété, que nous comparons avec ceux qui y participaient avant qu'EXIOBASE ne soit complété, ceci afin d'observer l'effet de notre complément sur cette répartition. Nous ne nous intéressons ici qu'aux émissions directes de chaque secteur de l'économie

américaine et avons donc obtenu les résultats présentés grâce à l'équation (2). Ceci va nous permettre d'observer si la répartition des impacts causés par l'économie est fortement modifiée par l'ajout du complément. Seules trois catégories d'impact laissent apparaître des différences entre les répartitions avant et après ajout du complément, elles sont donc les seules présentées ici (FAE pour la Figure 5.11 et la Figure 5.12, GCC pour la Figure 5.13 et la Figure 5.14 et enfin HHC pour la Figure 5.15 et la Figure 5.16). Les autres graphiques, qui ne présentent soit aucune différence soit des différences extrêmement faibles (par exemple interversion de deux secteurs dans le classement sans modification visible de leur contribution à l'impact total) sont cependant disponibles en annexe D.

FAE : MREEIO complété

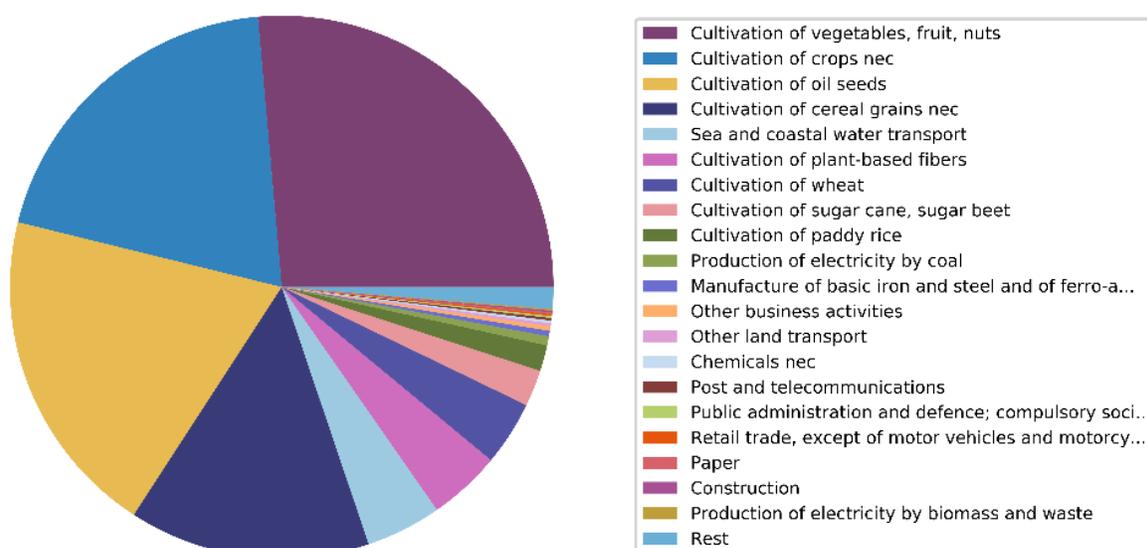


Figure 5.11 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

FAE : Exiobase

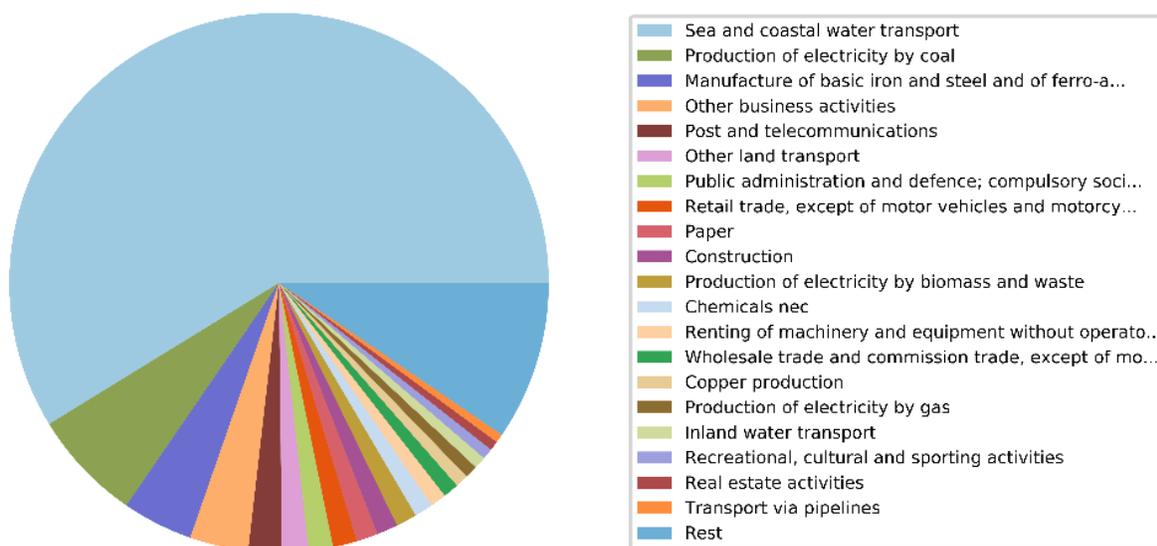


Figure 5.12 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

La catégorie d'impact FAE montre une distribution totalement différente en fonction de l'EEIO avec lequel on calcule son impact. Alors que le secteur *Sea and coastal water transport* était responsable de presque trois cinquièmes des impacts dans EXIOBASE, il est très loin derrière les quatre premiers secteurs dans le MREEIO complété. De la même manière, tous les autres principaux secteurs dans EXIOBASE voient leur part devenir extrêmement faible dans le MREEIO complété, au profit de beaucoup de secteurs dans le domaine de l'agriculture qui y prennent une place prépondérante (8 des 10 premiers secteurs et plus de 90 % de l'impact total).

GCC : MREEIO complété

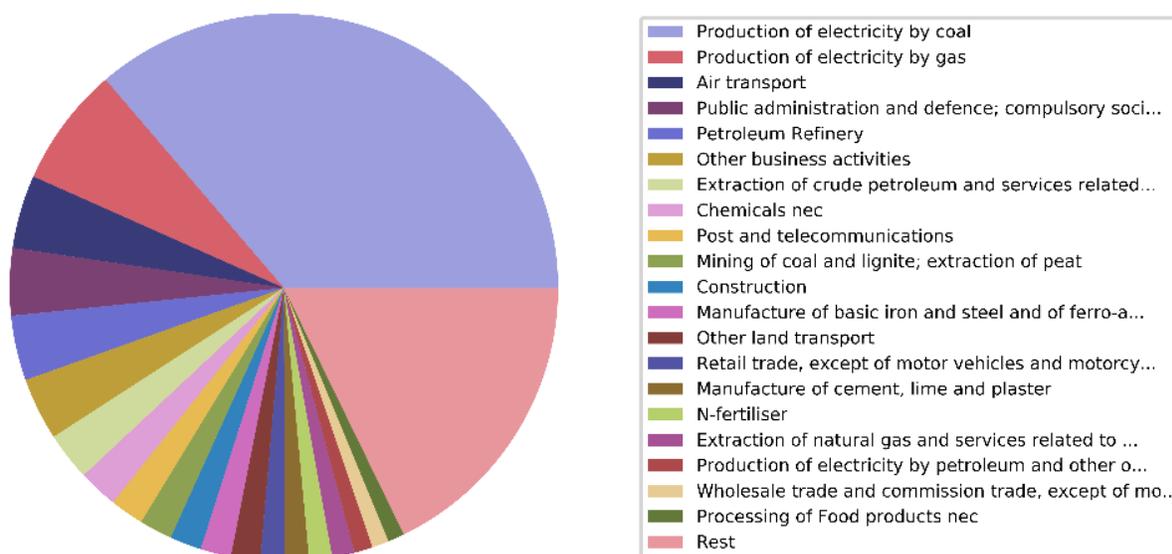


Figure 5.13 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

GCC : Exiobase

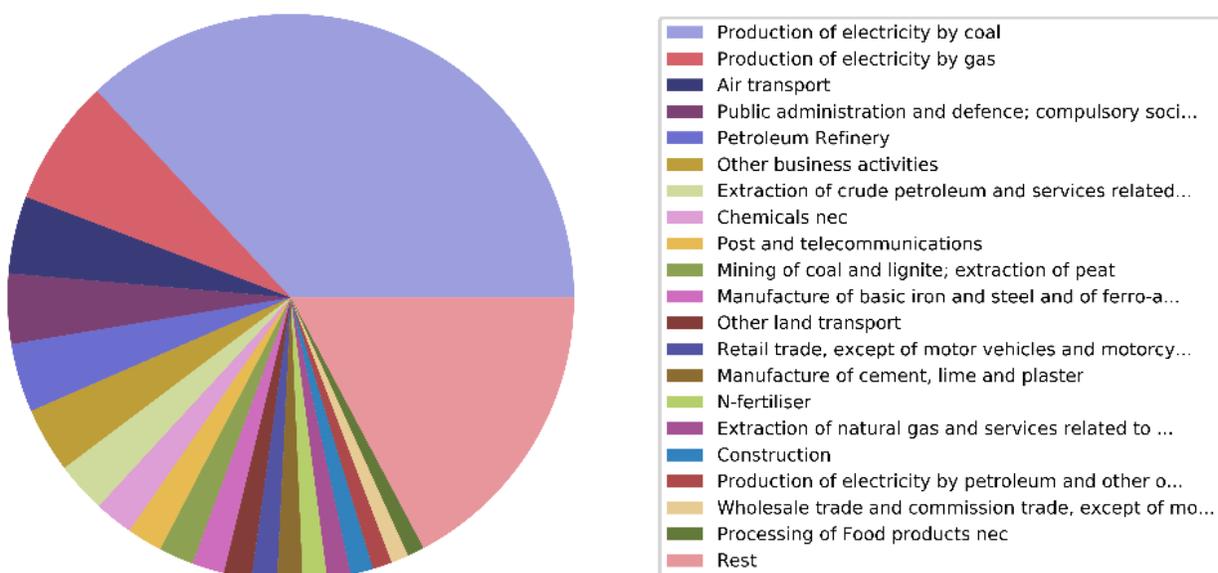


Figure 5.14 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

Pour la catégorie GCC, on n'observe que peu de différence entre les deux MREEIO, à la seule exception du secteur Construction qui progresse de plusieurs places dans le classement mais sans voir de grande modification de sa contribution à l'impact total.

HHC : MREEIO complété

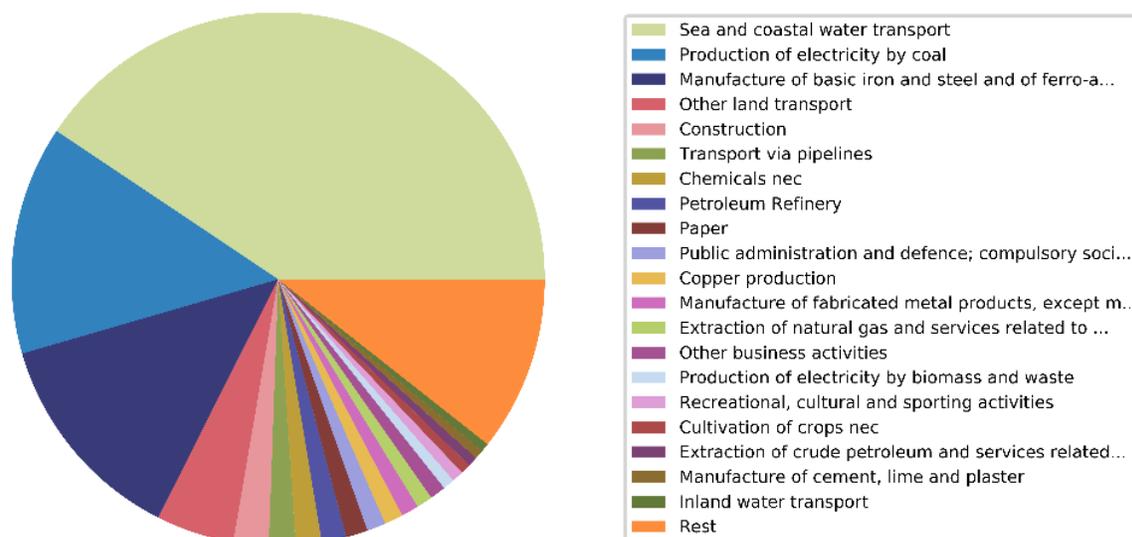


Figure 5.15 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

HHC : Exiobase

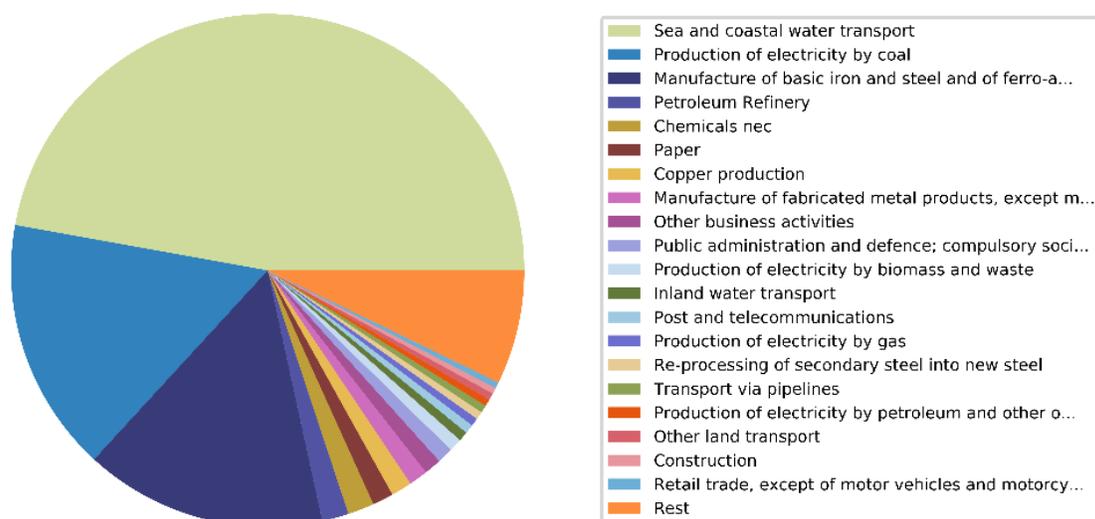


Figure 5.16 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

La catégorie HHC semble modérément affectée par l'ajout du complément. On remarque que la part de l'impact total attribuable au secteur *Sea and coastal water transport* a diminué mais reste largement supérieure à celle de tous les autres secteurs. Le secteur *Other land transport* a lui vu son importance relative largement augmenter puisqu'il est le quatrième secteur le plus impactant dans le MREEIO complété alors qu'il n'était que le 18^e dans EXIOBASE. La place de plusieurs autres secteurs a également été modifiée lors de l'introduction du complément, comme par exemple pour Transportation via pipelines mais sans changer profondément la distribution au sein de cette catégorie.

On peut également retrouver en annexe D le tableau qui montre le gain ou la perte de place des secteurs, dans le classement de leur contribution à l'impact total de chaque catégorie, en émissions directes. Ces classements ont été produits avec les mêmes données que celles ayant permis de tracer les graphiques présentés précédemment. Ce tableau permet d'observer les ensembles de secteurs qui ont pris le plus d'importance dans le classement de chacune des catégories et à l'inverse, ceux qui ont perdu de l'importance relativement aux autres. On y retrouve bien la prise d'importance des secteurs agricoles pour les émissions toxiques ainsi que celle des secteurs d'extraction de minéraux et d'hydrocarbures ainsi que les transports pour la toxicité humaine.

5.3.2.3 Secteurs les plus impactants en approche consommateur

Cette sous-section présente les mêmes résultats que la sous-section précédente, c'est-à-dire la contribution des différents secteurs à l'impact total de chacune des catégories pour l'économie américaine, mais cette fois d'un point de vue consommateur, donc en attribuant toutes les émissions du cycle de vie (du berceau à la porte) aux produits et services consommés lors de la demande finale y_0 . En d'autres termes, on a calculé les impacts sur l'ensemble du cycle de vie (jusqu'à la fin de l'étape de production et avant la phase d'utilisation), dans le monde entier, des produits qui ont été demandés par des consommateurs finaux aux états unis et on a regardé leur contribution par rapport à la somme des productions de toutes ces demandes finales. Quand on réalise ce calcul avec l'équation (6), les impacts de certains secteurs sont négatifs. Cela est dû à des demandes finales négatives pour ces secteurs, en raison par exemple d'une consommation des stocks accumulés au cours des années précédentes. Tous ces impacts négatifs sont compris dans la partie *Rest* des

graphiques ci-dessous et compassés par les impacts positifs également présents dans cette partie *Rest.*

On remarque dans cette étude qu'à l'exception de la catégorie FAE, on ne peut déceler aucune différence entre les graphes avant et après complétion pour aucune des catégories d'impact (Figure 5.17 et Figure 5.18). Dans chaque cas, soit les deux graphiques sont complètement identiques, soit les seules différences sont des inversions de place pour deux secteurs successifs sans modification visible de leur contribution. On ne va donc présenter ici que les graphes concernant la catégorie FAE, tous les autres étant disponibles en annexe E.

Pour la catégorie FAE, on voit à nouveau une grande modification de la répartition des secteurs participant à l'impact total. Ce qui semble apparaître c'est que les secteurs qui progressent grandement sont ceux qui font beaucoup appel à des secteurs agricoles tout au long de leur cycle de vie (secteur agricole directement ou transformation de produits agricoles). Les services semblent assez stables. En revanche, les secteurs manufacturiers et ceux liés à l'énergie ou au transport perdent le plus d'importance dans le calcul de l'impact total.

De la même manière que pour la sous-section précédente, on peut produire un tableau montrant l'évolution dans le classement des secteurs les plus impactants de chaque catégorie d'impact, mais cette fois-ci d'un point de vue consommateur. C'est ce qui est présenté dans le tableau E.1, également disponible en annexe E. On y observe effectivement que peu de secteurs ont connu de grands changements de leurs impacts en se plaçant en approche consommateur. La seule catégorie vraiment concernée est la catégorie FAE qui montre une forte augmentation de presque tous les secteurs liés à l'alimentation.

FAE : MREEIO complété

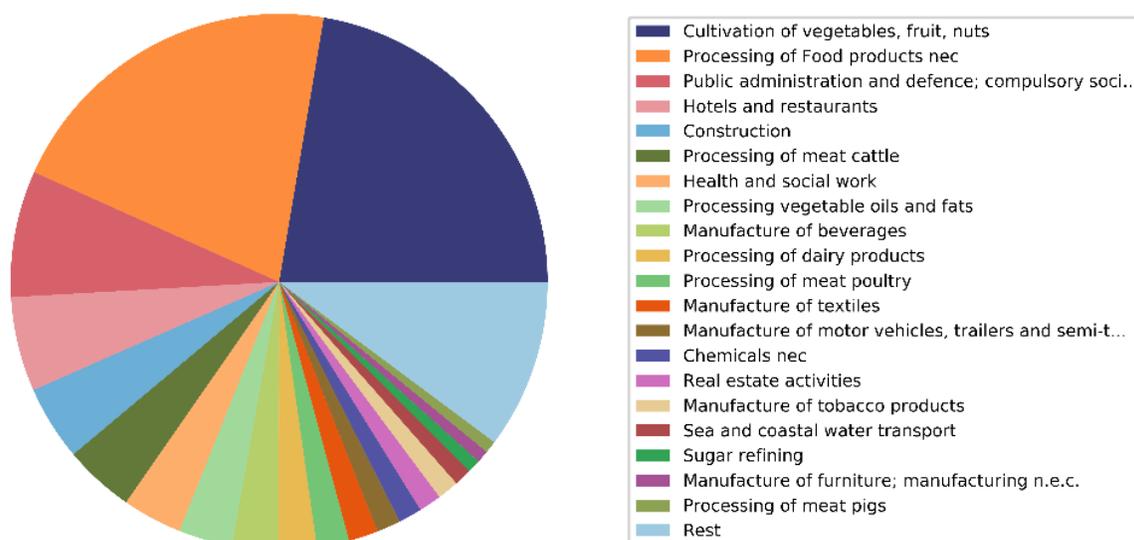


Figure 5.17 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

FAE : Exiobase

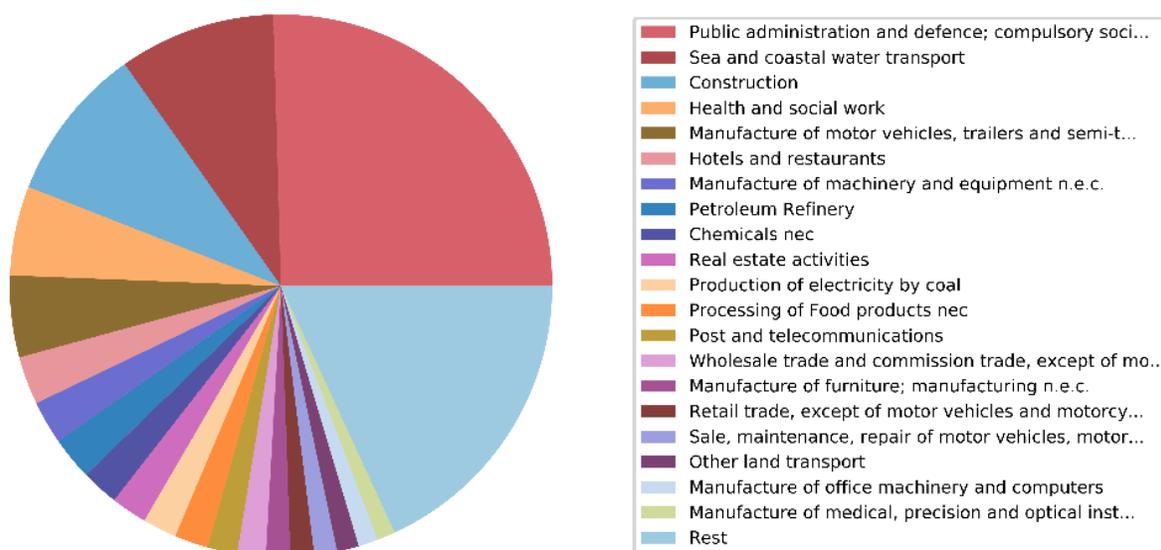


Figure 5.18 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact FAE, en perspective consommateur, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

5.3.2.4 Secteurs les plus modifiés en approche producteur

On recherche maintenant les secteurs pour lesquels l'impact dans une des catégories a le plus augmenté avec l'ajout du complément, en se limitant toujours aux secteurs américains. Ceci va nous permettre de voir pour quels secteurs de l'économie, l'EE d'EXIOBASE a les plus importants problèmes de troncature, afin de préciser les résultats de la Figure 5.5. Pour cela, deux approches sont possibles, on peut étudier les augmentations absolues de l'impact de chaque secteur, obtenues avec l'équation (4) ou alors leur augmentation relative, c'est-à-dire la part de leur impact calculé avec l'équation (5) et les données du MREEIO complété qui a été obtenue avec des émissions comprises dans le complément. De plus, on peut réaliser cette étude en perspective producteur, avec l'équation (2) ou consommateur, avec l'équation (7).

On va commencer par se placer dans une perspective producteur, c'est-à-dire en ne regardant que les émissions directes. Cette partie vient compléter les résultats de la Figure 5.5 en montrant les secteurs les plus touchés par l'ajout du complément, mais cette fois en prenant en compte le poids de leur production dans l'économie totale.

Le Tableau 5.3 montre l'augmentation relative des secteurs dans chaque catégorie. On n'étudie toujours pas la catégorie HHRE dont toutes les valeurs sont nulles ni la catégorie OD car elles oscillent entre 0 % pour les secteurs qui n'ont toujours aucun impact dans cette catégorie et 100 % pour ceux qui en ont désormais grâce aux données du complément.

On peut voir que même dans les catégories qui ont peu d'augmentation absolue au total, certains secteurs ont de grandes augmentations relatives. On peut citer la production de métaux ou l'extraction de matières premières pour la catégorie AR, l'extraction d'aluminium ou la transformation de poissons pour l'Eutrophisation, la production d'aluminium à nouveau ainsi que la construction et certains secteurs manufacturiers pour la catégorie GCC ou encore la production de cuivre pour la catégorie SF. En ce qui concerne les catégories HHC et HHN, on voit de fortes augmentations dans tous les secteurs agricoles, d'extractions de matière première, de manufactures textiles, de certains transports, de la construction ainsi que de plusieurs secteurs manufacturiers (plastique, verre, machineries, produits gaziers...) ou de quelques services pour HHC (hôtellerie, éducation, santé...). Enfin, pour la catégorie FAE, on observe de très fortes augmentations dans les secteurs agricoles, d'extraction de matière première ainsi que dans plusieurs secteurs manufacturiers (plastique, chimie, aluminium, appareils de communication...).

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
Cultivation of paddy rice	0%	0%	100%	0%	90%	53%	1%
Cultivation of wheat	0%	0%	100%	0%	78%	30%	0%
Cultivation of cereal grains nec	0%	0%	100%	0%	69%	21%	0%
Cultivation of vegetables, fruit, nuts	2%	0%	100%	0%	79%	73%	1%
Cultivation of oil seeds	0%	0%	100%	0%	49%	54%	0%
Cultivation of sugar cane, sugar beet	0%	0%	100%	0%	96%	81%	4%
Cultivation of plant-based fibers	0%	0%	100%	0%	89%	70%	1%
Cultivation of crops nec	0%	0%	100%	0%	98%	86%	8%
Cattle farming	0%	0%	23%	0%	86%	32%	1%
Pigs farming	2%	0%	58%	0%	99%	77%	12%
Poultry farming	0%	0%	12%	0%	70%	7%	1%
Meat animals nec	0%	0%	4%	0%	45%	6%	0%
Animal products nec	0%	0%	36%	0%	90%	48%	1%
Raw milk	0%	0%	23%	0%	87%	35%	1%
Wool, silk-worm cocoons	0%	0%	21%	0%	84%	30%	1%
Manure treatment (conventional), storage and land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Manure treatment (biogas), storage and land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Forestry, logging and related service activities	0%	0%	10%	0%	40%	8%	0%
Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mining of coal and lignite; extraction of peat	0%	3%	6%	0%	60%	25%	0%
Extraction of crude petroleum and services related to crude oil extraction, excluding surveying	32%	0%	58%	0%	99%	90%	2%
Extraction of natural gas and services related to natural gas extraction, excluding surveying	5%	0%	21%	0%	90%	42%	4%
Extraction, liquefaction, and regasification of other petroleum and gaseous materials	20%	0%	74%	0%	99%	94%	19%
Mining of uranium and thorium ores	11%	0%	55%	0%	98%	77%	22%
Mining of iron ores	10%	6%	55%	0%	89%	22%	1%
Mining of copper ores and concentrates	0%	0%	5%	0%	3%	0%	0%
Mining of nickel ores and concentrates	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mining of aluminium ores and concentrates	32%	20%	83%	0%	97%	53%	5%
Mining of precious metal ores and concentrates	5%	3%	36%	0%	79%	12%	1%
Mining of lead, zinc and tin ores and concentrates	1%	0%	8%	0%	29%	1%	0%

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
Mining of other non-ferrous metal ores and concentrates	4%	2%	30%	0%	74%	9%	0%
Quarrying of stone	3%	0%	1%	0%	32%	1%	0%
Quarrying of sand and clay	1%	0%	6%	0%	67%	14%	1%
Mining of chemical and fertilizer minerals, production of salt, other mining and quarrying n.e.c.	5%	0%	8%	0%	12%	0%	3%
Processing of meat cattle	0%	6%	1%	0%	2%	3%	0%
Processing of meat pigs	0%	3%	0%	0%	1%	1%	0%
Processing of meat poultry	0%	5%	4%	0%	1%	2%	0%
Production of meat products nec	0%	12%	1%	1%	3%	1%	1%
Processing vegetable oils and fats	1%	0%	3%	0%	3%	1%	3%
Processing of dairy products	0%	1%	1%	3%	2%	1%	0%
Processed rice	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Sugar refining	1%	5%	4%	2%	22%	1%	1%
Processing of Food products nec	1%	3%	4%	3%	10%	1%	0%
Manufacture of beverages	1%	1%	1%	4%	6%	2%	0%
Manufacture of fish products	0%	15%	1%	2%	4%	1%	0%
Manufacture of tobacco products	1%	0%	11%	2%	2%	0%	0%
Manufacture of textiles	1%	0%	5%	4%	30%	1%	4%
Manufacture of wearing apparel; dressing and dyeing of fur	2%	0%	13%	2%	67%	5%	8%
Tanning and dressing of leather; manufacture of luggage, handbags, saddlery, harness and footwear	3%	0%	16%	1%	65%	4%	1%
Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture; manufacture of articles of straw and plaiting materials	1%	0%	13%	7%	53%	23%	4%
Re-processing of secondary wood material into new wood material	0%	0%	0%	0%	7%	1%	0%
Pulp	1%	6%	35%	0%	48%	25%	1%
Re-processing of secondary paper into new pulp	0%	1%	2%	0%	4%	1%	0%
Paper	2%	5%	7%	0%	15%	4%	1%
Publishing, printing and reproduction of recorded media	0%	0%	2%	0%	12%	0%	1%
Manufacture of coke oven products	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Petroleum Refinery	0%	0%	34%	0%	3%	0%	0%
Processing of nuclear fuel	1%	1%	6%	1%	15%	4%	0%
Plastics, basic	1%	3%	41%	2%	24%	3%	4%
Re-processing of secondary plastic into new plastic	1%	5%	45%	3%	26%	3%	5%

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
N-fertiliser	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
P- and other fertiliser	1%	2%	4%	0%	6%	0%	0%
Chemicals nec	1%	1%	49%	7%	10%	1%	4%
Manufacture of rubber and plastic products	1%	1%	6%	7%	18%	9%	3%
Manufacture of glass and glass products	0%	0%	6%	0%	18%	0%	0%
Re-processing of secondary glass into new glass	0%	0%	2%	0%	2%	0%	0%
Manufacture of ceramic goods	8%	0%	4%	0%	5%	0%	0%
Manufacture of bricks, tiles and construction products, in baked clay	2%	0%	1%	0%	1%	0%	0%
Manufacture of cement, lime and plaster	8%	0%	18%	0%	41%	0%	3%
Re-processing of ash into clinker	2%	0%	5%	0%	11%	0%	0%
Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	1%	0%	7%	1%	15%	0%	1%
Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof	0%	1%	0%	0%	0%	0%	1%
Re-processing of secondary steel into new steel	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Precious metals production	0%	0%	0%	7%	0%	0%	0%
Re-processing of secondary precious metals into new precious metals	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%
Aluminium production	13%	0%	53%	43%	6%	1%	0%
Re-processing of secondary aluminium into new aluminium	21%	0%	60%	75%	11%	3%	1%
Lead, zinc and tin production	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Re-processing of secondary lead into new lead	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Copper production	38%	7%	0%	2%	0%	0%	68%
Re-processing of secondary copper into new copper	35%	7%	0%	1%	0%	0%	65%
Other non-ferrous metal production	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Re-processing of secondary other non-ferrous metals into new other non-ferrous metals	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
Casting of metals	0%	0%	4%	0%	2%	0%	1%
Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	2%	1%	2%	4%	4%	1%	12%
Manufacture of machinery and equipment n.e.c.	0%	0%	3%	27%	19%	1%	4%
Manufacture of office machinery and computers	0%	0%	0%	3%	21%	1%	3%
Manufacture of electrical machinery and apparatus n.e.c.	0%	0%	8%	1%	2%	0%	1%
Manufacture of radio, television and communication equipment and apparatus	1%	1%	91%	58%	22%	3%	6%

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	0%	0%	1%	8%	8%	1%	4%
Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers	0%	0%	3%	18%	31%	2%	6%
Manufacture of other transport equipment	1%	0%	1%	4%	31%	2%	5%
Manufacture of furniture; manufacturing n.e.c.	2%	1%	22%	12%	38%	5%	15%
Recycling of waste and scrap	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Recycling of bottles by direct reuse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by coal	0%	0%	6%	0%	1%	0%	0%
Production of electricity by gas	2%	0%	19%	0%	11%	1%	0%
Production of electricity by nuclear	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by hydro	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by wind	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by petroleum and other oil derivatives	0%	0%	4%	0%	1%	0%	0%
Production of electricity by biomass and waste	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by solar photovoltaic	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by solar thermal	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by tide, wave, ocean	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by Geothermal	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity nec	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Transmission of electricity	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Distribution and trade of electricity	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0%	0%	24%	0%	91%	68%	3%
Steam and hot water supply	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Collection, purification and distribution of water	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Construction	0%	0%	8%	32%	84%	17%	2%
Re-processing of secondary construction material into aggregates	31%	24%	66%	0%	81%	22%	35%
Sale, maintenance, repair of motor vehicles, motor vehicles parts, motorcycles, motor cycles parts and accessoires	0%	0%	2%	3%	16%	2%	3%
Retail sale of automotive fuel	0%	0%	0%	2%	18%	1%	2%
Wholesale trade and commission trade, except of motor vehicles and motorcycles	0%	0%	1%	2%	6%	1%	0%
Retail trade, except of motor vehicles and motorcycles; repair of personal and household goods	0%	0%	0%	1%	5%	0%	0%
Hotels and restaurants	0%	0%	10%	9%	69%	1%	1%

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
Transport via railways	0%	0%	6%	3%	82%	16%	0%
Other land transport	0%	0%	30%	11%	92%	52%	4%
Transport via pipelines	0%	0%	15%	2%	74%	58%	0%
Sea and coastal water transport	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Inland water transport	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%
Air transport	0%	0%	0%	0%	13%	1%	0%
Supporting and auxiliary transport activities; activities of travel agencies	0%	0%	5%	0%	67%	33%	0%
Post and telecommunications	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Financial intermediation, except insurance and pension funding	0%	0%	0%	0%	20%	1%	0%
Insurance and pension funding, except compulsory social security	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Activities auxiliary to financial intermediation	0%	0%	0%	2%	3%	0%	0%
Real estate activities	0%	0%	0%	0%	6%	0%	0%
Renting of machinery and equipment without operator and of personal and household goods	0%	0%	0%	1%	2%	0%	0%
Computer and related activities	0%	0%	0%	6%	6%	1%	1%
Research and development	0%	0%	0%	1%	5%	0%	0%
Other business activities	0%	0%	0%	1%	3%	0%	0%
Public administration and defence; compulsory social security	0%	0%	5%	1%	25%	1%	1%
Education	3%	0%	1%	10%	24%	3%	0%
Health and social work	0%	0%	0%	5%	16%	1%	0%
Incineration of waste: Food	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Paper	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Plastic	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Metals and Inert materials	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Textiles	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Wood	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Incineration of waste: Oil/Hazardous waste	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogasification of food waste, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogasification of paper, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogasification of sewage sludge, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Composting of food waste, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Composting of paper and wood, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Waste water treatment, food	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 5.3 : Part de l'impact de chaque secteur de l'économie américaine dans chaque catégorie, venant d'émissions directes tirées du complément. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHN	SF
Waste water treatment, other	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Food	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Paper	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Plastic	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Inert/metal/hazardous	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Textiles	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Landfill of waste: Wood	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Activities of membership organisation n.e.c.	0%	0%	0%	1%	2%	0%	0%
Recreational, cultural and sporting activities	0%	0%	6%	1%	79%	24%	12%
Other service activities	0%	0%	2%	5%	47%	7%	0%
Private households with employed persons	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Extra-territorial organizations and bodies	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

5.3.2.5 Secteurs les plus modifiés en approche consommateur

Pour étudier les effets de l'ajout du complément sur les secteurs en se plaçant en perspective consommateur, on a décidé de s'intéresser uniquement à leur augmentation relative pour chaque catégorie d'impact. Pour chaque secteur, on a donc utilisé l'équation (7) avec un y unitaire comme demande finale, c'est-à-dire un vecteur valant 0 pour tous les secteurs sauf celui étudié. On a obtenu cette valeur avec EXIOBASE et avec le MREEIO complété puis on a utilisé l'équation (5) afin d'obtenir l'augmentation unitaire relative pour chacun des secteurs et chacune des catégories d'impact. Tous ces résultats sont disponibles dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Cultivation of paddy rice	0%	0%	100%	1%	55%	5%	1%
Cultivation of wheat	0%	0%	100%	0%	48%	5%	1%
Cultivation of cereal grains nec	0%	0%	100%	0%	47%	5%	0%
Cultivation of vegetables, fruit, nuts	1%	0%	100%	1%	36%	8%	1%
Cultivation of oil seeds	0%	0%	100%	1%	29%	9%	0%
Cultivation of sugar cane, sugar beet	0%	0%	100%	1%	70%	16%	2%
Cultivation of plant-based fibers	0%	0%	100%	1%	62%	11%	1%
Cultivation of crops nec	0%	0%	100%	1%	59%	9%	2%
Cattle farming	0%	0%	99%	1%	46%	4%	1%
Pigs farming	0%	0%	99%	1%	39%	3%	1%
Poultry farming	0%	0%	99%	1%	25%	2%	1%
Meat animals nec	0%	0%	99%	1%	35%	3%	0%
Animal products nec	0%	0%	98%	1%	23%	2%	1%
Raw milk	0%	0%	99%	1%	39%	3%	1%
Wool, silk-worm cocoons	0%	0%	99%	1%	36%	3%	1%
Manure treatment (conventional), storage and land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Manure treatment (biogas), storage and land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Forestry, logging and related service activities	0%	0%	99%	0%	35%	4%	1%
Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing	0%	0%	31%	1%	3%	0%	0%
Mining of coal and lignite; extraction of peat	0%	0%	78%	0%	11%	2%	0%
Extraction of crude petroleum and services related to crude oil extraction, excluding surveying	4%	0%	74%	0%	48%	11%	1%
Extraction of natural gas and services related to natural gas extraction, excluding surveying	2%	0%	64%	0%	54%	12%	2%
Extraction, liquefaction, and regasification of other petroleum and gaseous materials	1%	0%	54%	0%	40%	7%	2%
Mining of uranium and thorium ores	1%	0%	64%	0%	14%	1%	0%
Mining of iron ores	1%	0%	80%	1%	10%	1%	0%
Mining of copper ores and concentrates	0%	0%	48%	0%	6%	1%	0%
Mining of nickel ores and concentrates	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mining of aluminium ores and concentrates	1%	0%	77%	0%	19%	1%	0%
Mining of precious metal ores and concentrates	1%	0%	78%	0%	16%	1%	0%

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Mining of lead, zinc and tin ores and concentrates	0%	0%	57%	0%	10%	1%	0%
Mining of other non-ferrous metal ores and concentrates	1%	0%	80%	1%	14%	1%	0%
Quarrying of stone	1%	0%	67%	0%	8%	1%	0%
Quarrying of sand and clay	0%	0%	71%	0%	13%	1%	1%
Mining of chemical and fertilizer minerals, production of salt, other mining and quarrying n.e.c.	1%	0%	68%	0%	7%	1%	0%
Processing of meat cattle	0%	0%	99%	1%	38%	3%	1%
Processing of meat pigs	0%	0%	98%	1%	18%	2%	1%
Processing of meat poultry	0%	0%	98%	1%	15%	1%	1%
Production of meat products nec	0%	0%	92%	1%	10%	1%	0%
Processing vegetable oils and fats	0%	0%	100%	1%	20%	4%	1%
Processing of dairy products	0%	0%	98%	1%	20%	2%	1%
Processed rice	0%	0%	95%	0%	11%	1%	0%
Sugar refining	1%	0%	100%	1%	42%	5%	1%
Processing of Food products nec	1%	0%	99%	1%	17%	2%	1%
Manufacture of beverages	1%	0%	96%	7%	9%	1%	1%
Manufacture of fish products	0%	0%	68%	1%	3%	0%	0%
Manufacture of tobacco products	1%	0%	98%	2%	15%	1%	1%
Manufacture of textiles	0%	0%	96%	2%	12%	1%	1%
Manufacture of wearing apparel; dressing and dyeing of fur	0%	0%	91%	1%	12%	1%	1%
Tanning and dressing of leather; manufacture of luggage, handbags, saddlery, harness and footwear	1%	0%	89%	1%	12%	1%	1%
Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture; manufacture of articles of straw and plaiting materials	1%	0%	95%	2%	24%	4%	1%
Re-processing of secondary wood material into new wood material	0%	0%	45%	0%	8%	2%	0%
Pulp	1%	2%	94%	1%	34%	10%	1%
Re-processing of secondary paper into new pulp	0%	1%	30%	0%	5%	1%	0%
Paper	1%	1%	81%	1%	14%	3%	1%
Publishing, printing and reproduction of recorded media	1%	0%	70%	1%	9%	1%	1%
Manufacture of coke oven products	0%	0%	11%	0%	0%	0%	0%
Petroleum Refinery	1%	0%	52%	0%	20%	2%	1%
Processing of nuclear fuel	1%	0%	41%	1%	19%	3%	0%
Plastics, basic	1%	0%	76%	1%	9%	1%	1%

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Re-processing of secondary plastic into new plastic	1%	0%	77%	2%	8%	1%	1%
N-fertiliser	0%	0%	3%	0%	0%	0%	0%
P- and other fertiliser	1%	1%	43%	0%	9%	1%	0%
Chemicals nec	0%	0%	82%	3%	7%	1%	2%
Manufacture of rubber and plastic products	0%	0%	77%	2%	8%	2%	1%
Manufacture of glass and glass products	0%	0%	50%	0%	11%	0%	0%
Re-processing of secondary glass into new glass	0%	0%	34%	0%	3%	0%	0%
Manufacture of ceramic goods	4%	0%	60%	1%	6%	1%	0%
Manufacture of bricks, tiles and construction products, in baked clay	1%	0%	57%	0%	4%	0%	0%
Manufacture of cement, lime and plaster	4%	0%	53%	0%	19%	0%	1%
Re-processing of ash into clinker	2%	0%	35%	0%	10%	0%	0%
Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	1%	0%	62%	1%	9%	0%	0%
Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof	0%	0%	19%	0%	1%	0%	0%
Re-processing of secondary steel into new steel	0%	0%	12%	0%	0%	0%	0%
Precious metals production	1%	0%	49%	2%	3%	0%	1%
Re-processing of secondary precious metals into new precious metals	0%	0%	47%	2%	3%	0%	1%
Aluminium production	3%	0%	46%	26%	4%	0%	0%
Re-processing of secondary aluminium into new aluminium	6%	0%	47%	41%	4%	0%	1%
Lead, zinc and tin production	1%	0%	16%	1%	1%	0%	0%
Re-processing of secondary lead into new lead	0%	0%	12%	1%	0%	0%	0%
Copper production	2%	0%	17%	1%	1%	0%	5%
Re-processing of secondary copper into new copper	1%	0%	17%	1%	1%	0%	5%
Other non-ferrous metal production	0%	0%	44%	1%	2%	0%	0%
Re-processing of secondary other non-ferrous metals into new other non-ferrous metals	0%	0%	45%	2%	2%	0%	1%
Casting of metals	1%	0%	41%	4%	3%	0%	0%
Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	1%	0%	41%	4%	2%	0%	1%
Manufacture of machinery and equipment n.e.c.	1%	0%	52%	6%	3%	0%	1%
Manufacture of office machinery and computers	0%	0%	51%	3%	3%	0%	1%
Manufacture of electrical machinery and apparatus n.e.c.	1%	0%	47%	3%	3%	0%	1%

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Manufacture of radio, television and communication equipment and apparatus	0%	0%	58%	7%	4%	0%	1%
Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	0%	0%	59%	3%	4%	0%	1%
Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers	1%	0%	62%	4%	3%	0%	1%
Manufacture of other transport equipment	1%	0%	57%	4%	4%	0%	1%
Manufacture of furniture; manufacturing n.e.c.	1%	0%	78%	4%	7%	1%	3%
Recycling of waste and scrap	0%	0%	14%	0%	1%	0%	0%
Recycling of bottles by direct reuse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by coal	0%	0%	17%	0%	1%	0%	0%
Production of electricity by gas	2%	0%	36%	0%	25%	3%	0%
Production of electricity by nuclear	1%	0%	65%	2%	13%	1%	1%
Production of electricity by hydro	1%	0%	66%	2%	15%	1%	1%
Production of electricity by wind	1%	0%	65%	2%	15%	1%	1%
Production of electricity by petroleum and other oil derivatives	0%	0%	14%	0%	4%	0%	0%
Production of electricity by biomass and waste	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by solar photovoltaic	1%	0%	75%	2%	15%	1%	1%
Production of electricity by solar thermal	1%	0%	76%	2%	14%	1%	1%
Production of electricity by tide, wave, ocean	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Production of electricity by Geothermal	1%	0%	75%	2%	14%	1%	1%
Production of electricity nec	1%	0%	69%	1%	28%	4%	1%
Transmission of electricity	1%	0%	66%	1%	15%	1%	1%
Distribution and trade of electricity	1%	0%	69%	2%	14%	1%	1%
Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	2%	0%	55%	1%	39%	7%	2%
Steam and hot water supply	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Collection, purification and distribution of water	0%	0%	61%	3%	10%	1%	0%
Construction	1%	0%	77%	6%	17%	1%	1%
Re-processing of secondary construction material into aggregates	1%	0%	65%	0%	11%	1%	0%
Sale, maintenance, repair of motor vehicles, motor vehicles parts, motorcycles, motor cycles parts and accessoires	0%	0%	64%	2%	6%	1%	1%
Retail sale of automotive fuel	1%	0%	78%	1%	11%	1%	1%
Wholesale trade and commission trade, except of motor vehicles and motorcycles	0%	0%	67%	1%	9%	1%	0%

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Retail trade, except of motor vehicles and motorcycles; repair of personal and household goods	0%	0%	77%	1%	10%	1%	0%
Hotels and restaurants	0%	0%	94%	2%	13%	1%	1%
Transport via railways	0%	0%	56%	3%	45%	5%	0%
Other land transport	0%	0%	49%	6%	69%	15%	3%
Transport via pipelines	0%	0%	39%	2%	62%	26%	0%
Sea and coastal water transport	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Inland water transport	0%	0%	8%	0%	4%	0%	0%
Air transport	0%	0%	65%	0%	18%	2%	0%
Supporting and auxiliary transport activities; activities of travel agencies	0%	0%	53%	1%	30%	6%	0%
Post and telecommunications	0%	0%	49%	1%	7%	1%	0%
Financial intermediation, except insurance and pension funding	0%	0%	70%	1%	10%	1%	1%
Insurance and pension funding, except compulsory social security	0%	0%	66%	1%	9%	1%	1%
Activities auxiliary to financial intermediation	0%	0%	77%	2%	11%	1%	1%
Real estate activities	0%	0%	82%	1%	10%	1%	0%
Renting of machinery and equipment without operator and of personal and household goods	0%	0%	52%	1%	7%	1%	0%
Computer and related activities	0%	0%	69%	2%	8%	1%	1%
Research and development	0%	0%	30%	1%	1%	0%	0%
Other business activities	0%	0%	65%	1%	8%	1%	0%
Public administration and defence; compulsory social security	0%	0%	63%	1%	6%	0%	1%
Education	0%	0%	86%	1%	8%	1%	0%
Health and social work	0%	0%	83%	2%	8%	1%	1%
Incineration of waste: Food	0%	0%	71%	1%	7%	1%	1%
Incineration of waste: Paper	0%	0%	71%	1%	7%	1%	1%
Incineration of waste: Plastic	0%	0%	70%	1%	7%	1%	1%
Incineration of waste: Metals and Inert materials	0%	0%	62%	1%	6%	1%	0%
Incineration of waste: Textiles	0%	0%	69%	1%	7%	1%	0%
Incineration of waste: Wood	0%	0%	69%	1%	7%	1%	0%
Incineration of waste: Oil/Hazardous waste	0%	0%	66%	1%	7%	1%	0%
Biogasification of food waste, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogasification of paper, incl. land application	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tableau 5.4 : Part due à des émissions provenant du complément, de l'impact calculé dans chaque catégorie en approche consommateur. (extraits de USEEIO et EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	SF
Biogasification of sewage sludge, incl. land application	0%	0%	76%	2%	6%	1%	1%
Composting of food waste, incl. land application	0%	0%	67%	1%	7%	1%	0%
Composting of paper and wood, incl. land application	0%	0%	71%	1%	7%	1%	1%
Waste water treatment, food	0%	0%	44%	0%	9%	1%	0%
Waste water treatment, other	0%	0%	22%	0%	5%	1%	0%
Landfill of waste: Food	0%	0%	73%	2%	8%	1%	1%
Landfill of waste: Paper	0%	0%	73%	2%	8%	1%	1%
Landfill of waste: Plastic	0%	0%	73%	2%	7%	1%	1%
Landfill of waste: Inert/metal/hazardous	0%	0%	73%	2%	8%	1%	1%
Landfill of waste: Textiles	0%	0%	73%	2%	7%	1%	1%
Landfill of waste: Wood	0%	0%	73%	2%	7%	1%	1%
Activities of membership organisation n.e.c.	0%	0%	77%	1%	9%	1%	0%
Recreational, cultural and sporting activities	0%	0%	80%	1%	34%	3%	5%
Other service activities	0%	0%	68%	2%	12%	1%	0%
Private households with employed persons	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Extra-territorial organizations and bodies	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

On observe qu'en perspective consommateur, la plupart des catégories ne connaissent pas de secteur industriel avec une forte augmentation relative. Pour la catégorie GCC, seule la production d'aluminium voit son impact grandement augmenter. Pour la catégorie HHN, seul les secteurs « Autres transports terrestres » (*Other land transport*), « Transport via pipelines », et « Pulpe », l'extraction de gaz et de pétrole et quelques cultures ont une part d'impact venant du complément de plus de 10 % de l'impact total. Pour la catégorie HHC, plus de secteurs sont cependant impactés, en particulier l'agriculture et la transformation de produits agricoles, certains transports ou secteurs du domaine de l'énergie, les extractions de matière première, l'industrie textile et le secteur des services de loisirs. Enfin, la catégorie FAE voit des augmentations très fortes dans la quasi-totalité des secteurs et tout particulièrement dans les secteurs liés à l'agriculture.

5.3.3 Étude d'un secteur spécifique à l'aide du MREEIO complété : « Hôtels et restaurants »

Dans cette section, on va pousser l'analyse un peu plus loin que jusqu'à maintenant en étudiant un secteur industriel en particulier ayant connu une forte augmentation d'impact avec l'ajout du complément dans au moins une catégorie. On va s'intéresser à un secteur de services, « Hôtels et restaurants » (*Hotels and restaurants*) puisqu'on a vu que ses impacts augmentaient beaucoup entre les calculs effectués avec EXIOBASE et ceux avec le MREEIO complété, particulièrement dans la catégorie HHC en approche producteur et FAE en approche consommateur. On va commencer par présenter un profil général des impacts causés par ce secteur puis on étudiera les principales substances émises tout au long du cycle de vie de ce secteur expliquant ses impacts en perspective consommateur. On terminera l'étude en regardant quelles étapes de son cycle de vie contribuent le plus à ces mêmes impacts. Cette même analyse spécifique peut facilement être menée pour d'autres secteurs grâce au code fourni avec ce travail.

5.3.3.1 Analyse générale du secteur

La Figure 5.19 montre que les émissions directes du secteur *Hotels and restaurants* n'ont aucun impact direct dans la catégorie OD. Pour les catégories SF, HHN, HHRE, E et AR, la totalité ou presque des impacts vient d'émissions présentes dans EXIOBASE. En revanche, le complément a eu un effet modéré sur les catégories GCC et FAE et très important sur la catégorie HHC. La Figure 5.20 nous apprend qu'à l'image de l'économie globale, la substance responsable de cette forte augmentation des impacts des émissions directes de ce secteur pour la catégorie HHC est le formaldéhyde (65 %), suivi de très loin par le benzène (2 %) et le styrène (1 %). Pour la catégorie GCC, les principales substances responsables sont les HFC 134a (4 %), HFC 125 (3 %) et HFC 143a (1 %). Pour la catégorie FAE seuls le pyrène (5 %) et le formaldéhyde (3 %) causent une importante augmentation des impacts les émissions directes lors de l'ajout du complément.

La Figure 5.21 montre qu'en se plaçant dans une approche consommateur, deux catégories semblent avoir été impactées par le complément pour ce secteur, en dehors de la catégorie OD, alors que toutes les autres n'ont pratiquement pas été affectées. Tout d'abord la catégorie HHC, dont une grande partie de cet impact attribuable au complément doit venir des émissions directes, au vu de la figure précédente. Ensuite la catégorie FAE dont l'impact vient presque intégralement

d'émissions apportées par le complément. Cette figure nous montre également que pour les deux catégories qui nous intéressent, la grande majorité de l'impact attribuable au complément vient d'émissions produites par des secteurs américains, ce qui nous assure une plus grande fiabilité des données disponibles.

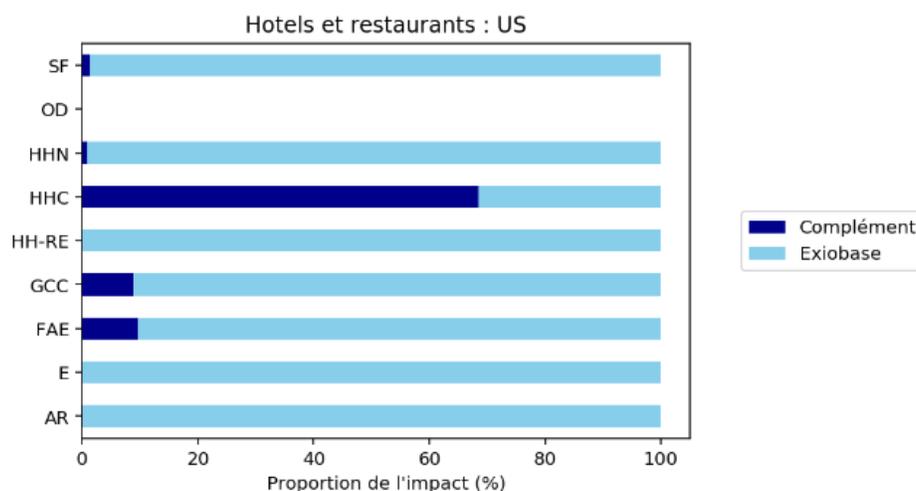


Figure 5.19 : Répartition des impacts des émissions directes du secteur *Hotels and restaurants* aux États-Unis, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

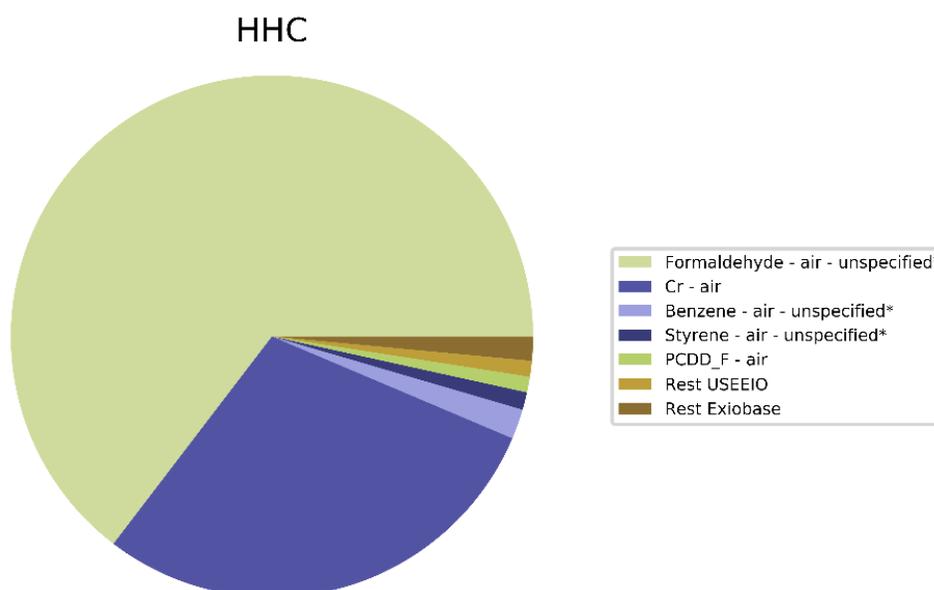


Figure 5.20 : Répartition des émissions selon leur contribution aux impacts des émissions directes du secteur *Hotels and restaurants* pour la catégorie d'impact HHC. (données extraites de *USEEIO* et d'*EXIOBASE*)

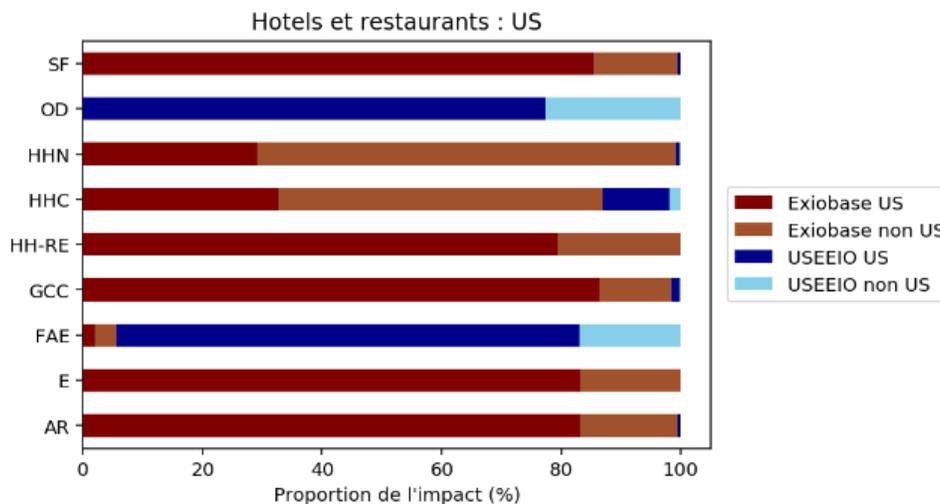


Figure 5.21 : Répartition des impacts du secteur *Hotels and restaurants*, en perspective consommateur, aux États-Unis, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

5.3.3.2 Substances les plus impactantes

On présente maintenant les substances émises sur l'ensemble du cycle de vie de ce secteur, dans les deux catégories les plus affectées par le complément et la part de l'impact total attribuable à chacune de ces substances. Pour ces deux catégories d'impacts, on va comparer cette distribution dans le MREEIO complété avec celle présente à l'origine dans EXIOBASE.

La Figure 5.22 confirme que l'impact de secteur pour la catégorie d'impact FAE est principalement dû à des émissions venant du complément. En effet, de toutes les émissions venant d'EXIOBASE, seule celle de cuivre a encore une contribution notable dans l'impact total calculé avec les données du MREEIO complété. Toutes les autres ne comptent, additionnées que pour quelques points de pourcentage de l'impact total.

La Figure 5.23 montre bien que pour la catégorie HHC, l'effet du complément est beaucoup moins important puisque seul le formaldéhyde, provenant du complément, a une part importante dans l'impact total. La somme de l'impact de toutes les autres émissions contenues dans le complément ne compte que pour moins d'un point de pourcentage de l'impact total pour cette catégorie.

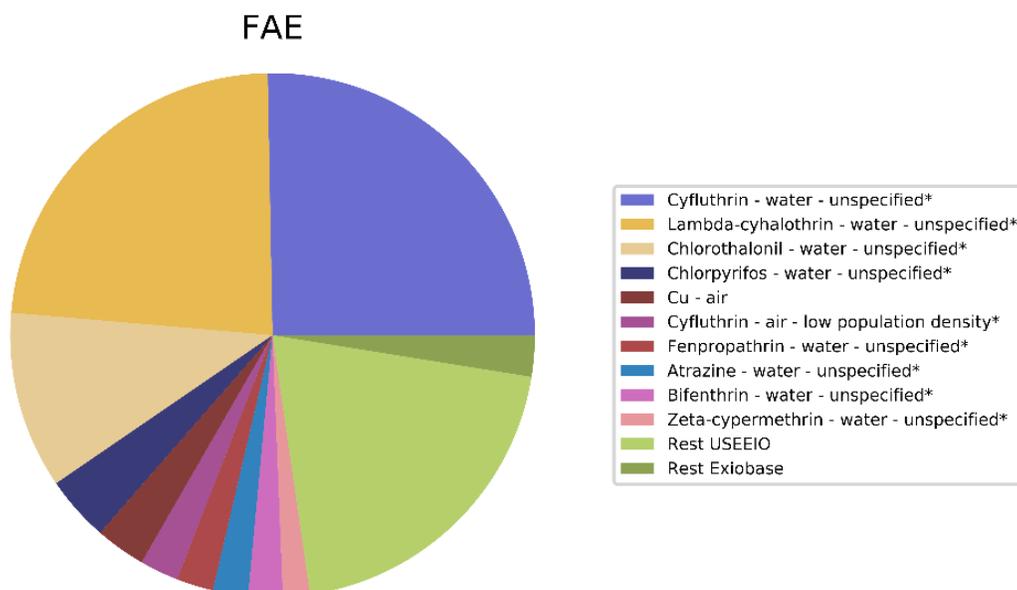


Figure 5.22 : Principales émissions contribuant à la catégorie d'impact FAE pour le secteur *Hotels and restaurants*, en approche consommateur, dans le MREEIO complété.

Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)

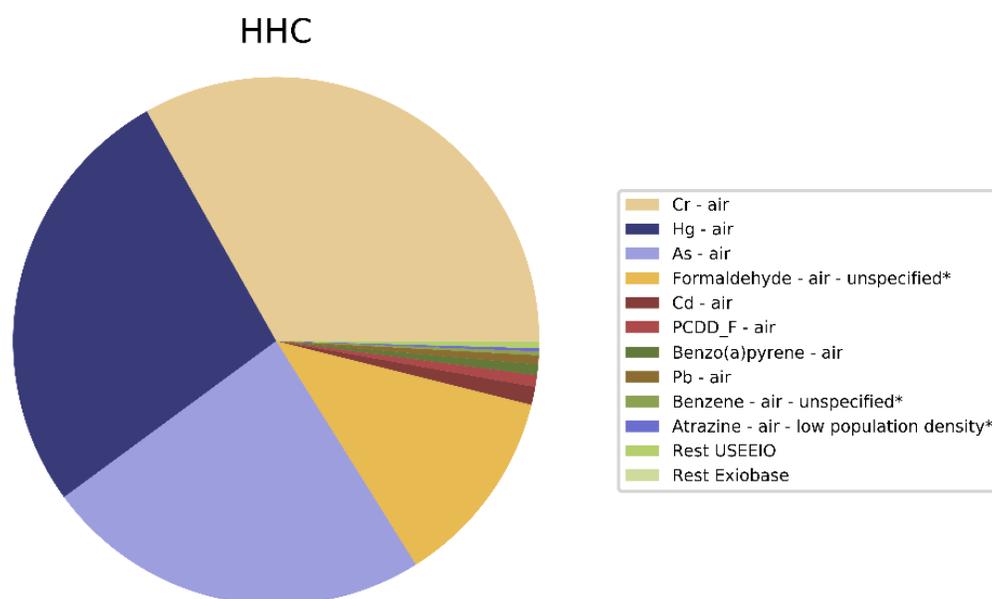


Figure 5.23 : Principales émissions contribuant à la catégorie d'impact HHC pour le secteur *Hotels and restaurants*, en approche consommateur, dans le MREEIO complété.

Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)

5.3.3.3 Étapes du cycle de vie les plus impactantes en approche consommateur

Finalement, on va étudier quelles sont les étapes du cycle de vie de ce secteur qui contribuent le plus à son impact total dans les deux catégories étudiées. Les figures suivantes montrent les 20 secteurs mondiaux contribuant le plus à l'impact total du secteur Hotels and restaurants, sur l'ensemble de son cycle de vie (du berceau à la porte). On compare également l'impact de chacun de ces principaux secteurs avec celui qu'ils ont lorsqu'on utilise uniquement des données d'EXIOBASE. Dans la légende accompagnant chaque graphique, le pays d'où provient l'émission de chacune des étapes est indiqué avant le nom du secteur correspondant dans ce pays. Il convient aussi de préciser que ces graphiques ne présentent que les 20 étapes les plus importantes mais que la somme de ces contributions ne représente pas le total de l'impact. En effet, un très grand nombre d'autres secteurs participent également à cet impact à travers le monde, chacun ayant un petit impact, mais leur somme peut représenter plus que chacune des étapes présentées.

On observe sur la Figure 5.24 que l'impact total en perspective consommateur du secteur Hotels and restaurants est principalement dû à des étapes de son cycle de vie qui concernent la culture de végétaux. Or toutes ces étapes avaient un impact nul dans EXIOBASE. En dehors de celles-ci, seules les étapes de transport maritime au Royaume-Uni et de production d'électricité au charbon aux États-Unis 19 étapes les plus impactantes. De plus, la majorité des émissions ont lieu aux États-Unis (puis au Canada, en Amérique latine et au Mexique).

La Figure 5.25 montre que la plupart des étapes du cycle de vie de ce secteur qui ont le plus d'importance dans l'impact total de la catégorie HHC, dans le MREEIO complété, en avaient presque autant dans EXIOBASE. Seules les émissions directes et les « Autres transports terrestres » (*Other land transport*) aux États-Unis ont vu leur impact augmenter avec l'ajout du complément. On observe également que parmi les 19 premiers secteurs, 10 sont des « Transports maritimes et côtiers » (*Sea and coastal water transport*), localisés dans différentes parties du monde. La majorité des impacts vient donc d'émissions en dehors des États-Unis pour cette catégorie en perspective consommateur.

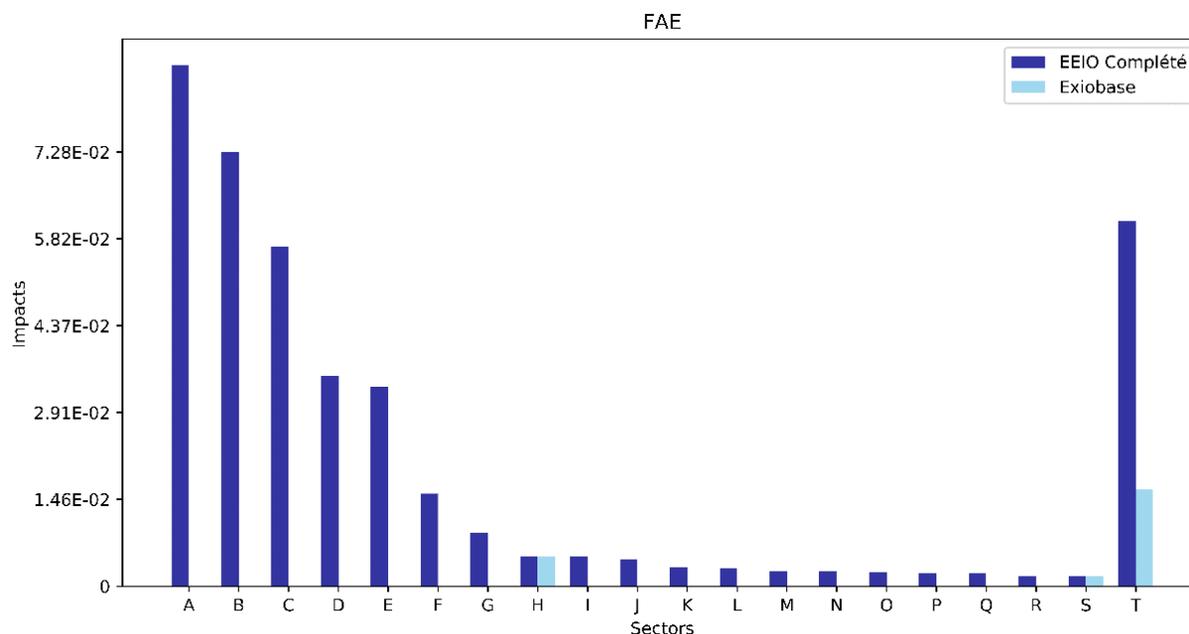


Figure 5.24 : Étapes du cycle de vie les plus impactantes du secteur *Hotels and restaurants*, avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)

A = (États-Unis, « Cultivation of oil seeds »)
 B = (États-Unis, « Cultivation of crops nec »)
 C = (États-Unis, « Cultivation of cereal grains nec »)
 D = (États-Unis, « Cultivation of vegetables, fruit, nuts »)
 E = (États-Unis, « Cultivation of paddy rice »)
 F = (États-Unis, « Cultivation of wheat »)
 G = (États-Unis, « Cultivation of sugar cane, sugar beet »)
 H = (Grèce, « Sea and coastal water transport »)
 I = (États-Unis, « Cultivation of plant-based fibers »)
 J = (Canada, « Cultivation of oil seeds »)
 K = (Canada, « Cultivation of wheat »)
 L = (Reste de l'Amérique latine, « Cultivation of vegetables, fruit, nuts »)

M = (Reste de l'Amérique latine, « Cultivation of cereal grains nec »)
 N = (Canada, « Cultivation of cereal grains nec »)
 O = (Mexique, « Cultivation of vegetables, fruit, nuts »)
 P = (Reste de l'Amérique latine, « Cultivation of oil seeds »)
 Q = (Reste de l'Amérique latine, « Cultivation of crops nec »)
 R = (Reste de l'Asie et du Pacifique, « Cultivation of vegetables, fruit, nuts »)
 S = (États-Unis, « Production of electricity by coal »)
 T = Rest

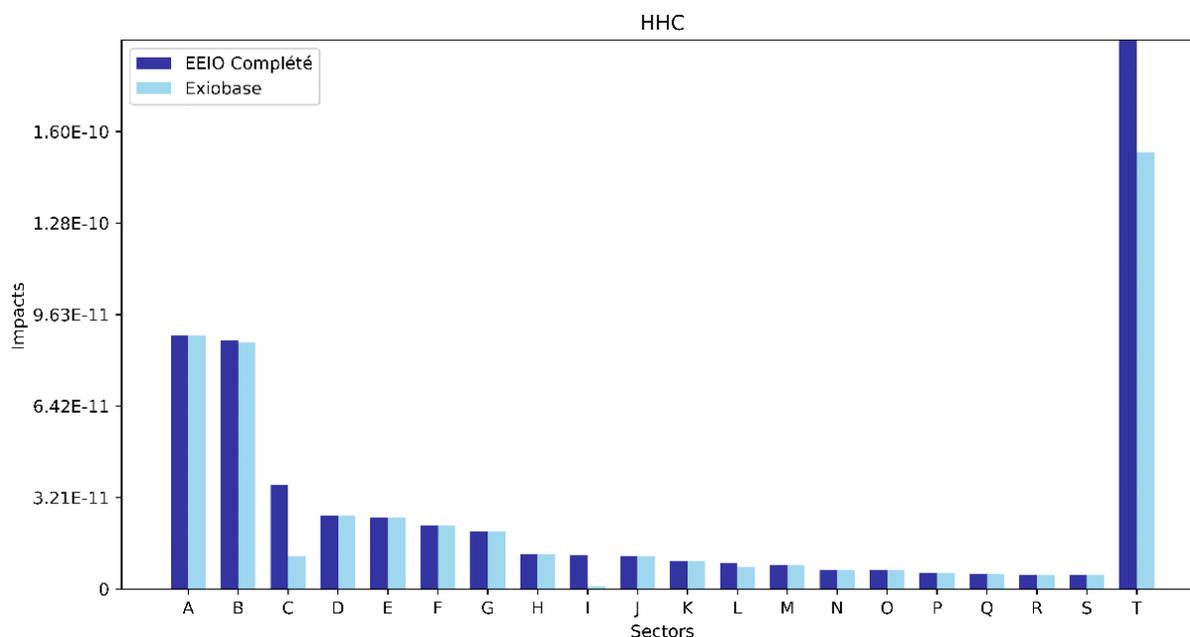


Figure 5.25 : Étapes du cycle de vie les plus impactantes du secteur *Hotels and restaurants*, avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (*données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE*)

A = (Grèce, « Sea and coastal water transport »)

B = (États-Unis, « Production of electricity by coal »)

C = (États-Unis, « Hotels and restaurants »)

D = (États-Unis, « Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof »)

E = (Allemagne, « Sea and coastal water transport »)

F = (Chine, « Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof »)

G = (Norvège, « Sea and coastal water transport »)

H = (Reste de l'Asie et du Pacifique, « Sea and coastal water transport »)

I = (États-Unis, « Other land transport »)

J = (Japon, « Sea and coastal water transport »)

K = (Canada, « Sea and coastal water transport »)

L = (États-Unis, « Paper »)

M = (Canada, « Sea and coastal water transport »)

N = (États-Unis, « Sea and coastal water transport »)

O = (Reste de l'Amérique latine, « Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing »)

P = (Danemark, « Sea and coastal water transport »)

Q = (États-Unis, « Other business activities »)

R = (Taïwan, « Sea and coastal water transport »)

S = (Canada, « Re-processing of secondary steel into new steel »)

T = Rest

Les deux figures F.1 et F.2, présentes en annexe F, montrent les étapes les plus impactantes ayant lieu quel que soit le pays dans lequel elles ont lieu. Ils permettent d'avoir une idée des secteurs qui auraient le plus d'impact dans une analyse ACV classique par exemple. Avec cette approche, on

observe à peu près la même répartition des principales étapes pour la catégorie FAE : surtout les cultures de végétaux puis la production d'électricité au charbon, le transport maritime et les émissions directes. Pour la catégorie HHC, on observe une répartition des principales étapes beaucoup plus variée mais dont les impacts viennent toujours principalement directement d'EXIOBASE. Les étapes les plus impactantes venant globalement, en dehors des émissions directes, des secteurs de l'énergie, du transport, de production de métaux ou de produits métalliques et de l'alimentation, en plus de quelques secteurs manufacturiers.

Enfin, les deux graphiques F.3 et F.4, également disponibles en annexe F, suivants montrent cette fois les principaux pays dont viennent les impacts, cette fois en sommant les secteurs émetteurs à l'intérieur de chaque pays. On observe que pour la catégorie FAE, les émissions provenant les États-Unis sont de très loin les plus impactantes avec le reste des pays du continent américain arrivant en deuxième (reste de l'Amérique latine) et troisième position (Canada) mais très loin derrière. Pour la catégorie HHC, les États-Unis sont toujours largement en tête mais la Grèce et la Chine arrivent deuxième et troisième avec des impacts non négligeables. Pour la Grèce, cela provient très certainement des transports maritimes qui représentent la principale étape impactante, pour la Chine, en plus du transport maritime, on a vu précédemment que la transformation de produits métalliques y avait un fort impact.

5.4 Transparence de la démarche suivie et production d'un code informatique pour compléter un MREEIO et analyser un MREEIO complété

Rendre notre démarche transparente, reproductible et appropriable a été une grande préoccupation tout au long de cette maîtrise. C'est pourquoi toute la démarche suivie l'a été comme un algorithme avec une série de règles précises, décrites dans ce mémoire (section 4.2 pour la méthode générale et section 5.2 pour le cas d'application). Pour la même raison, les données sur lesquelles se base notre travail sont toutes libres d'accès, ce qui le rend entièrement reproductible.

Mais surtout, toutes les étapes de création et d'analyse du MREEIO complété ont été réalisées sous la forme d'un code informatique avec très peu d'étapes manuelles, mis à part la création des tables de correspondances des secteurs industriels entre EXIOBASE et USEEIO. Tout le code a été rédigé dans le langage Python, sous la forme de notebooks, grâce à l'application Jupyter. Chaque étape,

variable ou fonction de ces scripts est documentée et l'ensemble de ce code, ainsi que les documents intermédiaires ayant permis un prétraitement des données ont vocation à être accessibles à tous. Ce code permet à la fois de suivre clairement l'ensemble des démarches ayant permis d'obtenir les résultats présentés dans ce mémoire mais il permet surtout à ceux qui le désirent d'effectuer leurs propres analyses, en s'appropriant ce code et en le modifiant pour l'adapter à ses besoins (hypothèses différentes, nouvelles bases de données, nouveaux résultats recherchés...).

Par exemple, l'étape de répartition des coefficients d'émissions de USSEIO vers la région US du MREEIO complété est présentée dans la Figure 5.26. Un utilisateur voulant utiliser une équation différente pour intégrer les émissions de USEEIO au sein de l'EE d'EXIOBASE, n'aurait qu'à modifier ces cellules pour observer les implications de ce choix sur tout le reste de l'analyse.

```
In [12]: # This is the vector by which we will divide the following sub-results.
# The value for each index is equal to the sum of all the total outputs
# of the USEEIO industries that are matched to the index Exiobase industry.
denominator=conc_table_sectors_matrix.dot(x0_useeio)

In [13]: # This matrix contains all the coefficients by which we have to multiply the emissions from
# each USEEIO matrix to get the amount attributed to the corresponding Exiobase industries
M=pandas_diag(x0_useeio).dot(conc_table_sectors_matrix.transpose())/denominator.transpose()
M=M.fillna(0.0)

In [14]: # This matrix contains all the emissions from the USEEIO matrix that will be added
# to the exiobase emissions, attributed to the corresponding Exiobase industries in kg/€
S_useeio_without_exio=S0_useeio_without_exio.dot(M)

In [15]: S_comp=pandas.concat([S_exio_US,S_useeio_without_exio])
```

Figure 5.26 : Impression d'écran du code permettant de répartir les coefficients d'émissions des secteurs de USEEIO vers ceux du MREEIO complété, pour la région US.

Chaque cas particulier qui causait des problèmes dans le fonctionnement normal du code a été traité de façon transparente à l'intérieur même des scripts permettant la production du MREEIO complété. Par exemple, la Figure 5.27 présente la création de la matrice de concordance des secteurs industriels utilisée dans le code de la Figure 5.26 et prend en compte les secteurs exclus de l'analyse dans un second temps (gestion de l'eau et des déchets et électricité propre).

```

# To limit industry aggregation errors, we decided not to hybride water and waste industries
# as long as clean electricity ones.
# This matrix has the BEA industries as columns, the Exiobase ones as index and m(i,j)=1 if the
# industries i and j are matched
conc_table_sectors_matrix=pandas.DataFrame(
    index=x0_exio_US.index.tolist(),columns=conc_table_sectors['BEA'].drop_duplicates(), data=0)
for i in conc_table_sectors.index.tolist():
    exio=conc_table_sectors.loc[i,'Exiobase']
    useeio=conc_table_sectors.loc[i,'BEA']
    if useeio!='Drinking water and wastewater treatment' and \
    useeio!='Waste management and remediation' and \
    'hydro' not in exio and 'wind' not in exio and 'solar' not in exio and \
    'tide' not in exio and 'Geothermal' not in exio and \
    'electricity nec' not in exio and 'Transmission of electricity' not in exio and \
    'trade of electricity' not in exio and 'by nuclear' not in exio and 'biomass and waste' not in exio:
        conc_table_sectors_matrix.loc[conc_table_sectors.loc[i,'Exiobase'],conc_table_sectors.loc[i,'BEA']]=1

```

Figure 5.27 : Impression d'écran de la partie du code permettant de produire la matrice de concordance entre la classification industrielle de USEEIO et celle d'EXIOBASE, tout en excluant les industries que nous avons décidé de ne plus agréger dans un second temps.

Les résultats sont obtenus grâce à des fonctions spécifiques à chaque type d'information recherchée et qui correspondent aux équations décrites dans la section 0 de la méthodologie. Tous les graphiques et tableaux présentés dans la section 5.3 de ce mémoire sont également directement obtenus grâce à des équations.

Par exemple, la fonction présentée dans la Figure 5.28 permet de créer un vecteur de production totale utilisé ensuite dans la fonction de la Figure 5.29 afin de calculer les principales étapes du cycle de vie de la production d'un secteur d'une région donnée qui contribuent le plus aux impacts sur une aire de protection spécifiée. Plusieurs paramètres de la fonction permettent de choisir la catégorie d'impact, le secteur et la région étudiés ainsi que la valeur limite d'impact des étapes les plus impactantes du cycle de vie à présenter. Tous les impacts en dessous de cette limite seront additionnés et présentés comme un reste (*Rest*). Plusieurs autres paramètres permettent de personnaliser cette étude en spécifiant qu'on veut la mener sur les données originales de l'EE d'EXIOBASE ou sur l'EE complété, qu'on veut présenter les résultats en pourcentage de l'impact total ou en valeur absolue ou encore qu'on ne veut prendre en compte que les étapes du cycle de vie ayant lieu dans la même région que le secteur étudié.

```

# This function accepts as input a final demand vector and a coefficient matrix and returns the total output vector.
def specific_x_calculation(y_spec,A=A):
    x_spec=numpy.linalg.solve((numpy.eye(len(y_spec))-A).values),y_spec.values)
    x_spec=pandas.Series(index=A.index,data=x_spec)
    return(x_spec)

```

Figure 5.28 : Impressions d'écran de la fonction permettant de produire un vecteur de production totale à partir d'un vecteur de demande finale et en suivant l'équation de Leontief.

```

# This function returns the serie of the first stages of the life cycle that contributes to one given impact category,
# up to a certain given limit value, for a specific sector (and region).
# The user can also chose to work with emissions from the completed version of Exiobase (default choice),
# the original version of Exiobase or the original version of USEEIO (in that last case,
# the sectors are going to be those of the BEA/USEEIO classification)
# The user can choose to work with the percentage of the impact of each stage on the impact of
# the whole category instead of absolute values
# Finally, the user can chose to only study the first stages in the region of the final demand
# but the sectors of the whole world are considered by default.
def first_stages(category,limit,region,sector,EE='Exiobase_compl',percentage=False,in_region=False):
    y_spec=specific_y_creation(dict_indus_value={(region,sector):1.0})
    if EE=='Exiobase_only':
        sr = (C_exio.dot(S_exio).dot(pandas_diag((L).dot(y_spec)))) .loc[category,:]
    if EE=='Exiobase_compl':
        sr = (C_compl.dot(S_compl).dot(pandas_diag((L).dot(y_spec)))) .loc[category,:]
    if in_region:
        sr = sr[region]
    if percentage :
        sr=sr/sr.sum()*100
    sr=sr.sort_values(ascending=False)
    sr_rest=sr[sr<=limit]
    r=sr_rest.sum()
    sr=sr[sr>limit]
    if r!=0:
        sr=sr.append(pandas.Series({'Rest':r}))
    sr.name=category
    return sr

```

Figure 5.29 : Impression d'écran de la fonction permettant d'étudier les principales étapes du cycle de vie de la production d'un secteur spécifique contribuant aux impacts d'une catégorie d'impact donnée.

Pour prendre un dernier exemple, la fonction informatique présentée dans la Figure 5.30 permet d'appliquer l'équation (5) à tous les secteurs d'EXIOBASE et toutes les catégories d'impacts. Elle prend garde à supprimer les faux zéros causés lors du calcul par les problèmes de précision des systèmes informatiques pour décrire des nombres. C'est un exemple de toutes les fonctions présentes dans le code produit pour ce mémoire et qui permettent d'obtenir l'ensemble des résultats présentés plus loin en appliquant toutes les équations présentées dans cette partie.

```
# This function calculates the percentage of increase between a matrix and another (with the same index and columns).
# The reference (denominator) is the completed matrix which is supposed to have higher values than the completed one.
# The negatives values observed before are taken as zeros to not obtain negative increases.
def compare_impacts_ref_is_completed(completed,noncompleted):
    if type(completed)==pandas.core.frame.DataFrame:
        df=pandas.DataFrame(index=completed.index.tolist(),columns=completed.columns.tolist(),data=np.nan)
        for i in df.index:
            for j in df.columns:
                if completed.loc[i,j]!=0.0:
                    if (completed.loc[i,j]-noncompleted.loc[i,j])==0.0 or \
                       (completed.loc[i,j]-noncompleted.loc[i,j])<0.0 and \
                       (completed.loc[i,j]-noncompleted.loc[i,j])/completed.loc[i,j]>-10**(-13):
                        df.loc[i,j]=0.0
                    else:
                        df.loc[i,j]=((completed.loc[i,j]-noncompleted.loc[i,j])/completed.loc[i,j])*100
            return df
    elif type(completed)==pandas.core.frame.Series:
        s=pandas.Series(index=completed.index.tolist(),data=np.nan)
        for i in s.index:
            if completed.loc[i]!=0.0:
                if (completed.loc[i]-noncompleted.loc[i])==0.0 or \
                   (completed.loc[i]-noncompleted.loc[i])<0.0 and \
                   (completed.loc[i]-noncompleted.loc[i])/completed.loc[i]>-10**(-13):
                    s.loc[i]=0.0
                else:
                    s.loc[i]=((completed.loc[i]-noncompleted.loc[i])/completed.loc[i])*100
        return s
```

Figure 5.30 : Impression d'écran de la fonction permettant de calculer l'effet du complément en calculant la part des impacts directs de chaque secteur du MREEIO complété qui est due au complément.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

6.1 Analyse des scores d'impact calculés et quantification de la troncature d'EXIOBASE

6.1.1 Écotoxicité aquatique dans l'eau douce

Les résultats présentés dans la partie précédente montrent que toutes les catégories d'impact ne sont pas touchées de la même manière par le manque de complétude de l'inventaire des émissions de l'EE d'EXIOBASE et donc affectées différemment par le complément. Toutes les catégories d'impact en lien avec la toxicité sont concernées par des problèmes de manque de complétude mais à des degrés divers. La catégorie FAE est particulièrement affectée par le complément. On observe en effet que l'impact des émissions directes de l'ensemble de l'économie, américaine ou mondiale, est très sous-estimé par l'EE d'EXIOBASE contrairement au MREEIO complété. On voit surtout que cette situation se retrouve pour les émissions directes d'un grand nombre de secteurs (principalement agricoles mais aussi pour certaines extractions de matière première et quelques plus rares secteurs de transformation de matières premières ou manufacturiers). Cette forte modification des secteurs à la base des cycles de vie de la plupart des autres secteurs explique également que la quasi-totalité des secteurs de l'économie est impactée, voire très impactée par l'ajout du complément lorsqu'on les étudie en perspective consommateur, c'est-à-dire sur l'ensemble du cycle de vie (du berceau à la porte) des biens et services qu'ils produisent. L'augmentation des impacts directs pour cette catégorie est principalement due à des pesticides pour les secteurs agricoles (lambda-cyhalothrine, cyfluthrine, atrazine, propanil...), à des aldéhydes (formaldéhyde, acroléine...) ou des PAH désagrégés (pyrène, phénanthrène, fluoranthène...) pour des secteurs divers comme l'élevage, l'extraction d'hydrocarbures, le transport ou la construction, du cyanure, de l'acide sulfurique ou du sulfate de diméthyle pour les secteurs miniers ou encore d'autres substances comme le phtalate de dibutyle (plastifiant ou utilisé dans les colles et les encres), le crésol (antiseptique), le phénol, la cyanhydrine d'acétone (utilisée dans la production de verre ou de plastique transparent) ou le benzo(g,h,i)perylène pour divers secteurs manufacturiers (textile, production de pulpe de bois, d'aluminium...).

6.1.2 Effets cancérigènes sur la santé humaine

La catégorie HHC est plus modérément touchée par ce problème de manque de complétude. Seulement 14 % de l'impact de l'ensemble de l'économie américaine calculé avec le MREEIO complété est attribuable à des émissions manquantes dans l'EE d'EXIOBASE, ce qui n'est pas négligeable mais beaucoup plus faible que pour FAE. En revanche, quand on étudie plus précisément certains secteurs, on observe très clairement que beaucoup sont extrêmement affectés par l'absence de prise en compte de certaines émissions affectant cette catégorie. Les impacts directs de tous les secteurs agricoles, de presque tous les secteurs liés à l'extraction de matières premières, des secteurs de la construction et de certains secteurs manufacturiers (textile, pulpe de bois, plastique...), de transports ou de services (hôtelier, loisir, éducation...) semblent en effet extrêmement sous-estimés par une étude utilisant uniquement les données de l'EE d'EXIOBASE, souvent même davantage que pour la catégorie FAE. Cependant, puisque les émissions impactant cette catégorie sont déjà bien prises en compte dans les autres secteurs de l'économie, cet effet du complément se trouve dilué et semble donc moins important que pour la catégorie FAE lorsqu'on se place en perspective consommateur avec moins de secteurs semblant connaître un grand manque de complétude. Les secteurs de l'agriculture ou de la transformation de produits agricoles, de l'extraction de matières premières, du textile, de l'énergie, de la construction, du transport, des loisirs et quelques autres secteurs industriels sont cependant touchés de manière non négligeable. Les substances ajoutées responsables de ces augmentations pour la catégorie HHC sont globalement les pesticides, principalement pour l'agriculture, les aldéhydes, les PAH désagrégés auxquels on peut ajouter des VOC désagrégés (benzène, xylène naphthalène, styrène, butadiène...) et des substances chimiques utilisées dans différents types d'industries, comme des réfrigérants (tétrachlorométhane...) ou des solvants (dichlorométhane, méthylpropan-2-ol, chloroforme...). Il est à noter que dans la plupart des cas, c'est le formaldéhyde, souvent suivi dans une plus faible mesure du benzène, qui est responsable de la quasi-totalité de l'augmentation de l'impact. La seule exception vient des secteurs agricoles où les pesticides ont également une part importante dans l'augmentation de l'impact. La Figure 5.9 valide bien cette observation en montrant que le formaldéhyde est de loin la substance venant du complément ayant le plus d'impact dans la catégorie HHC sur l'ensemble de l'économie américaine, suivie un peu plus loin du benzène.

6.1.3 Effets non cancérigènes sur la santé humaine

Une situation équivalente, bien qu'à un degré bien inférieur, se retrouve pour la dernière catégorie liée à la toxicité, HHNC : un manque de couverture qui semble très limité lorsqu'on étudie l'économie totale, certains secteurs (globalement les mêmes que pour HHC à l'exception des services) très touchés en perspective producteur mais beaucoup moins en perspective consommateur. Pour cette catégorie, les principales substances venant du complément causant l'augmentation des impacts des secteurs touchés sont les pesticides (dichloropropène, bromométhane, acéphate...), les aldéhydes (formaldéhyde, acétaldéhyde, acroléine...), les VOC (butadiène, benzène, xylène...) ou encore des solvants (tétrachlorométhane). Pour cette catégorie, c'est l'acroléine qui représente, pour presque tous les secteurs, pratiquement l'intégralité des impacts ajoutés par le complément. On pouvait s'attendre à cette situation étant donné la Figure C.3 qui montrait que l'acroléine était la principale substance impactante venant du complément pour l'ensemble de l'économie américaine, pour la catégorie HHNC.

Ces observations confirment l'analyse qualitative préliminaire (4.1) qui prévoyait de grands problèmes de couverture pour les trois catégories d'impact liées à la toxicité en raison de l'infime partie des émissions toxiques effectivement inventoriées par l'EE d'EXIOBASE (uniquement les métaux et quelques-unes plus anecdotiques comme le benzo(a)pyrène ou les dioxines et furanes) sur les plus de 2500 substances écotoxiques, plus de 600 substances cancérigènes et presque 450 substances toxiques non cancérigènes recensées par Traci 2.1.

6.1.4 Changement climatique global et formation de smog

L'étude préliminaire avait indiqué que les catégories GCC et SF semblaient présenter à la fois des légers problèmes de complétude dans l'EE d'EXIOBASE mais également de potentiels problèmes d'agrégation. En effet, pour les changements climatiques, plusieurs émissions ne sont pas inventoriées comme celles de CFC, HCFC ou de HFE et les émissions de PFC et HFC sont agrégées chacune en une catégorie unique. Pour la formation de smog, une grande partie des 1173 substances impactantes recensées dans Traci 2.1 ne sont pas prises en compte par EXIOBASE mais les NOx étant classiquement la principale source de cet impact, le problème de complétude n'a pas été jugé préoccupant. Une source de potentiels problèmes d'agrégation a été en revanche décelée à cause des émissions agrégées de NMVOC. Finalement, nos résultats montrent que ces problèmes de

complétude sont effectivement très limités pour ces deux catégories à l'échelle de l'économie américaine totale. Les seules substances apparaissant dans notre analyse comme complétant les impacts de la catégorie GCC sont des HFC et des PFC qui sont considérées dans EXIOBASE mais uniquement en tant que famille agrégée, ce qui nous ramène pour cette catégorie à un problème d'agrégation plutôt que de complétude. En termes de secteurs, seuls la production d'aluminium, la construction et quelques secteurs manufacturiers voient leurs émissions directes véritablement modifiées par l'ajout du complément et la production d'aluminium est le seul secteur restant affecté par cet ajout en se plaçant en perspective consommateur. Pour la catégorie SF, toutes les substances ajoutées par le complément et même leur somme ont un effet extrêmement négligeable devant les NOx et les NMVOC. Seuls quelques secteurs connaissent une modification de l'impact de leurs émissions directes après l'incorporation des émissions venant du complément (aldéhydes, VOC désagrégés, chlore, éthylène glycol...). Ceci concerne principalement la production de cuivre puis la production d'agrégats à partir de matériaux de construction et plus anecdotiquement l'élevage porcin, l'extraction d'uranium et de thorium, l'extraction et le traitement d'hydrocarbures autres que le pétrole et le gaz naturel, la production d'objets métalliques hors machinerie et équipements, la manufacture de meubles divers et enfin les activités de loisir. En approche consommateur en revanche, aucun secteur ne semble affecté.

6.1.5 Pluies acides et eutrophisation

En ce qui concerne les deux autres catégories, AR et Eutrophisation, elles ne semblaient pas souffrir de problèmes de complétude significatifs d'après l'analyse préliminaire. Ceci est confirmé par l'analyse globale de l'ensemble de l'économie américaine. Cependant, les impacts directs de certains secteurs sont quand même affectés de manière non négligeable par l'ajout du complément. Ainsi, en ce qui concerne la catégorie AR, on remarque des augmentations pour l'extraction de plusieurs ressources fossiles et minérales (pétrole, aluminium, uranium...), la transformation de certaines de ces ressources (aluminium et cuivre) ou encore la production d'agrégats à partir de matériaux de construction. Pour la catégorie Eutrophisation, quelques secteurs ont aussi une augmentation de leurs impacts directs (extraction de minerai d'aluminium, production de viandes diverses, de nourriture à base de poisson et production d'agrégats à partir de matériaux de construction). Cependant, en approche consommateur, aucun secteur ne connaît plus d'augmentation significative.

6.1.6 Diminution de la couche d'ozone et effets respiratoires sur la santé humaine

Enfin, nous observons deux cas extrêmes, les catégories HH-RE et OD. La catégorie HH-RE n'a aucun problème de manque de complétude détectable par notre analyse puisque toutes les émissions inventoriées dans USEEIO et l'impactant sont déjà prises en compte dans l'EE d'EXIOBASE. La catégorie OD n'est absolument pas représentée dans EXIOBASE et donc dépend intégralement du complément. On voit que les émissions responsables de cet impact sont en nombre assez limité avec le 1,1,1-trichloroéthane représentant la moitié de l'impact total des émissions directes aux États-Unis, le bromométhane représentant un autre quart de ces impacts et le dernier quart étant principalement dû à quelques CFC.

6.1.7 Bilan général sur les émissions manquantes

Pour résumer, on peut voir que l'ajout d'un nombre limité d'émissions recensées par l'EE d'EXIOBASE pourrait permettre une grande amélioration de sa couverture pour plusieurs catégories d'impacts. Ainsi, intégrer à l'inventaire certaines émissions comme le 1,1,1-trichloroéthane, le bromométhane et quelques CFC permettrait une raisonnablement bonne couverture de la catégorie OD, les pesticides (en premier lieu la cyfluthrine, la lambda-cyhalothrine, et le chlorothalonil, qui représentent à eux seuls la moitié des impacts de l'économie américaine pour l'écotoxicité calculés avec notre MREEIO complété) permettrait de régler le problème de couverture de l'agriculture pour la catégorie FAE, les aldéhydes et en premier lieu desquels le formaldéhyde et l'acroléine résoudrait presque intégralement les manques des catégories HHC et HHNC et enfin le cyanure et l'acide sulfurique recouvriraient la majorité de l'impact manquant des autres secteurs de la catégorie FAE. En dehors de ces quelques substances, seules certaines substances spécifiques affectent les impacts de quelques secteurs particuliers, surtout dans la catégorie FAE et la catégorie SF (chlorine). Enfin, mieux inventorier, caractériser ou désagréger les émissions de VOC, PAH, HFC et PFC permettrait de connaître avec plus de certitude les impacts des différentes catégories et leur source.

La plupart de ces substances font partie des inventaires d'autres bases de données, en particulier des données ACV comme *ecoinvent*, parfois sous forme agrégée (principalement les pesticides). Mais ces inventaires étant réalisés suivant des méthodes et des exigences variées, tous ne disposent

pas de la même couverture et on peut également se retrouver face à des problèmes de complétude dans ces bases de données pourtant globalement plus exhaustives.

Le Tableau 6.1 offre un résumé de l'analyse des troncatures de chacune des catégories d'impacts, observées suite à la production d'un complément à l'EE d'EXIOBASE à partir de USEEIO.

Tableau 6.1 : Récapitulatif des troncatures de chacun des catégories d'impact. Les substances en gras sont celles qui contribuent principalement à chacune des catégories d'impact considérées.

Catégorie d'impact	Niveau de troncature	Secteurs principalement touchés (perspective producteur)	Substances manquantes
OD	Total	Tous	1,1,1-trichloroéthane, bromométhane, CFC...
FAE	Très élevé	Agriculture, extraction et transformation de fossiles et minéraux, quelques secteurs manufacturiers	Pesticides (lambda-cyhalothrine, cyfluthrine...), aldéhydes (formaldéhyde, acroléine...), PAH (pyrène, phénanthrène...), cyanure, acide sulfurique...
HHC	Élevé	Agriculture, extraction de matières premières, construction, transport, manufacture (textile, plastique...), services (hôtelier, loisir, éducation...)	Pesticides, aldéhydes (formaldéhyde...), PAH, VOC (benzène, xylène, naphthalène...), réfrigérants (tétrachlorométhane...), solvants (dichlorométhane, chloroforme...)
HHNC	Modéré	Agriculture, extraction de matières premières, construction, transport, manufacture (textile, plastique...)	Pesticides (dichloropropène, bromométhane, acéphate...), aldéhydes (formaldéhyde, acroléine...), VOC (butadiène, benzène...), réfrigérants
GCC	Faible	Quelques secteurs spécifiques	Quelques HFC et PFC
SF	Faible	Quelques secteurs spécifiques	Aldéhydes, VOC, chlorine , éthylène glycol...
AR	Faible	Quelques secteurs spécifiques	Chlorure d'hydrogène, acide sulfurique
E	Faible	Quelques secteurs spécifiques	Acide nitrique...
HH-RE	Nul	-	-

Notre version complétée de l'EE d'EXIOBASE prend en compte 1800 émissions, loin devant la version originale qui n'en comportait que 32 effectivement inventoriées (EXIOBASE, 2015a), ou

encore que les autres MREEIO les plus courants comme WIOD 2013 (8 émissions) (Dietzenbacher et al., 2013) ou GTAP (uniquement CO₂, CH₄, N₂O et les gaz fluorés) (Irfanoglu & van der Mensbrugge, 2015). Nous avons donc réussi à travers ce travail de recherche à produire un MREEIO, couvrant le monde de manière uniforme, et prenant en compte un nombre d'émissions plus de 50 fois plus important que le meilleur MREEIO actuellement disponible.

6.2 Sources d'incertitudes de l'étude

Bien sûr, l'analyse proposée précédemment et les résultats obtenus au cours de notre étude sont assortis de plusieurs incertitudes. En raison de la variété des incertitudes pouvant apparaître, aucune analyse quantitative n'a pu être menée au cours de cette maîtrise mais nous allons nous charger dans cette partie de les recenser et de les expliquer. Elles peuvent être réparties en trois grands types : les incertitudes internes aux données que nous avons utilisées (EXIOBASE, USEEIO et Traci), celles liées à notre processus d'intégration des émissions complémentaires au sein de l'EE d'EXIOBASE et enfin celles liées à l'expansion de ce MREEIO complété des États-Unis vers le reste du monde.

6.2.1 Incertitudes liées aux données utilisées

Les données que nous utilisons pour conduire notre étude, que ce soient les (MR)EEIO ou les méthodes de caractérisation, contiennent intrinsèquement des incertitudes. Celles-ci peuvent concerner les données économiques, les inventaires des émissions ou les valeurs des facteurs de caractérisation.

La revue de littérature présente les différents types d'incertitudes liées aux tables (MR)EEIO (section 2.6). De plus, ces bases de données étant produites à partir de sources et de méthodes variées, leurs inventaires d'émissions seront différents et le choix de la base de données servant à bâtir notre complément de l'EE d'EXIOBASE aura une influence sur nos résultats. Afin de mettre en évidence une partie de ces différences de comptabilisation entre les EEIO, on peut retrouver en annexe H les comparaisons entre les inventaires des émissions comptabilisées à la fois dans USEEIO et EXIOBASE. On voit que même si les inventaires de certaines substances sont très proches (proches de 100 % sur la figure), d'autres sont extrêmement différents. Un des facteurs pouvant expliquer cette différence est que les données environnementales présentes dans l'EE d'EXIOBASE datent de 2007 alors que celles de USEEIO datent principalement de 2013.

L'évolution des technologies entre des deux années a eu une influence sur les coefficients d'émissions des différents secteurs industriels. La conversion des données de USEEIO de kilo de substances émises par dollar de production en kilo de substance émise par euro de production peut ajouter de l'incertitude à l'utilisation de USEEIO. Ces problèmes sont adressés en partie, d'une part en utilisant uniquement les données économiques de l'EEIO à compléter (EXIOBASE) puisque seules les émissions brutes de l'EEIO complétant sont utilisées ; d'autre part en supprimant le risque de double comptage de la même substance entre l'EEIO de base et le complément puisque seules les substances absentes de l'EEIO de base sont ajoutées via le complément (en dehors des substances faisant partie de la catégorie agrégée VOC).

Enfin, les méthodes de caractérisation utilisent également des méthodes différentes afin de calculer les facteurs d'impact et ne caractérisent même pas nécessairement les mêmes émissions. Nous avons utilisé la méthode Traci 2.1 afin de correspondre au mieux à la situation américaine mais d'autres méthodes très utilisées comme ReCiPe ou USEtox nous auraient apporté d'autres résultats. Par exemple, le Tableau 6.2 montre que pour trois émissions, dans une même catégorie d'impact et un même compartiment d'émission (air urbain pour Traci et USEtox et air à forte densité de population pour ReCiPe), les valeurs des facteurs de caractérisation peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur. La conversion entre kg 1.4-DB équivalent et CTUe pour ReCiPe a été réalisée en multipliant la première valeur par le facteur de caractérisation, en CTUe, du 1.4-dichlorobenzène dans l'eau douce pour la catégorie d'impact FAE dans Traci 2.1, la valeur de ce facteur de caractérisation étant de 1,0 dans ReCiPe. Utiliser une autre méthode de caractérisation aurait donc conduit à des résultats différents. De plus, les émissions d'EXIOBASE et de USEEIO sont inventoriées comme ayant été émises dans un air indéterminé alors que Traci (tout comme ReCiPe et USEtox) précise si le compartiment est de l'air urbain ou rural (ou avec une population élevée ou faible pour ReCiPe). Le choix de faire une moyenne des FC de Traci pour approximer l'air indéterminé ajoute donc encore de l'incertitude à nos résultats.

Tableau 6.2 : Facteurs de caractérisation pour des émissions dans l'air urbain, pour la catégorie d'impacts écotoxiques pour trois substances et trois méthodes d'impact. Les unités sont indiquées pour chaque colonne.

	Traci 2.1 (CTUe)	ReCiPe 2014 (kg 1.4-DB équivalent)	ReCiPe 2014 (CTUe)	USEtox (CTUe)
Formaldéhyde	2,76E +01	1,6E -02	1,6E +01	1,59E +01
Acroléine	1,05E +02	4,9E -01	4,8E +02	9,99E +01
Cuivre	2,31E +04	4,3E +00	4,3E +03	3,63E +06

Les EEIO et les méthodes d'impacts disposent de manières variées de quantifier ou au moins de communiquer sur ces incertitudes potentielles : explication détaillée de tous leurs algorithmes, communication des références des sources qu'ils utilisent, analyse des points pouvant poser problème au sein de leurs données finales, création d'indicateurs pseudo-quantitatifs (type matrice pedigree) afin d'informer sur les différents types d'incertitude comprise dans leurs données (temporelle, géographique, technologique...).

Nous ne pouvons donc pas avoir d'effet sur tous ces problèmes de fiabilité internes aux données utilisées pour notre étude. Tout ce que nous pouvons faire est d'écarter de notre analyse les données pour lesquelles une erreur semble manifeste. C'est ce qui a été fait pour le zinc dans USEEIO. Mais une analyse détaillée pour chacune des substances (inventaire et facteur de caractérisation) nécessiterait beaucoup trop de ressources pour le cadre de ce projet de recherche. Leur quantification semble particulièrement ardue en raison de la variété et du nombre de paramètres à prendre en compte. De plus, l'objectif de cette maîtrise est d'analyser les problèmes de couvertures d'un EEIO, ici EXIOBASE, pas de l'utiliser afin d'étudier une économie ou un secteur en particulier. L'étude de la fiabilité des données de ce matériel de base est donc en dehors du cadre de ce travail.

6.2.2 Incertitudes liées à l'intégration des données complémentaires

Les différentes hypothèses et les choix méthodologiques pris afin de former notre complément pour les États-Unis peuvent causer de nombreuses incertitudes pour nos résultats finaux. Cette sous-section vise à expliciter certains risques d'incertitudes prenant place au niveau de la création de ce complément régional.

Une première source d'incertitudes vient du choix des émissions à intégrer ou ne pas intégrer à EXIOBASE. Plusieurs hypothèses ont été faites en ce qui concerne ce qui était réellement pris en compte ou non dans l'EEIO de base (métaux et toutes leurs formes ioniques, substances agrégées au complet ou seulement les substances aux caractéristiques proches, compartiments d'émissions prenant déjà en compte une partie du devenir de l'émission ou non...). De plus, même si la manière de traiter les émissions de USEEIO faisant partie d'EXIOBASE a finalement été modifiée, si nous avons décidé de conserver la première méthode (ne pas prendre en compte toutes les émissions de USEEIO qui entraînent dans une des familles agrégées d'EXIOBASE), la façon de relever toutes les émissions faisant partie de chaque famille aurait été une autre cause possible d'erreurs car certaines auraient pu être oubliées ou prises en compte à tort, étant donné qu'il n'existe pas de liste exhaustive de toutes les substances faisant partie de chacune de ces familles, que le nom d'une substance dans ces listes pourrait différer du nom de la même substance dans USEEIO, que des erreurs ont déjà été relevées dans les numéros CAS des substances indiqués dans les bases de données, etc. Toutes ces hypothèses ont évidemment un impact sur les résultats et les conclusions de notre étude.

La façon dont nous avons lié les classifications industrielles des deux EEIO cause également de l'incertitude. Tout d'abord à travers le choix de mettre à zéro les liens qui nous paraissaient négligeables entre un secteur de USEEIO et un autre d'EXIOBASE. Mais plus globalement, le choix d'intégrer certains secteurs de USEEIO à certains d'EXIOBASE a été fait de manière subjective en fonction de leur dénomination, mais des erreurs ont pu être faites à ce niveau-là, attribuables à une mauvaise compréhension de ce que prenait effectivement en compte chacun des secteurs. Le choix de ne pas intégrer les émissions venant des secteurs concernant le traitement des déchets, de l'eau ou l'électricité propre entraîne évidemment plus d'écart par rapport à la réalité. Enfin, la répartition des émissions de USEEIO vers EXIOBASE à travers l'équation (8) est aussi source d'erreurs puisqu'elle ne prend pas en compte la proportion exacte des productions des secteurs de USEEIO dans ceux d'EXIOBASE auxquels ils sont reliés.

Afin d'avoir une meilleure idée du niveau de fiabilité de nos résultats, nous pourrions procéder à une analyse de sensibilité en effectuant les mêmes calculs tout en modifiant chacun des paramètres cités dans cette sous-section (liens non triviaux entre certains secteurs, choix de conserver ou non les substances agrégées dans le complément, autre méthode de répartition des émissions du complément vers EXIOBASE...). De plus, une autre méthode de caractérisation, voire une autre

source de données pour des émissions complémentaires, pourrait être utilisée afin de vérifier si les mêmes émissions manquantes affectant le plus les impacts calculés étaient toujours mises en avant.

6.2.3 Incertitudes liées à l'extension du complément depuis la région US vers le reste du monde

Pour finir, la décision d'utiliser des données américaines pour approximer les émissions de tous les secteurs de toutes les régions d'EXIOBASE, en appliquant les facteurs d'émission US au reste du monde, pour les substances venant du complément, cause des incertitudes géographiques mais surtout technologiques. En effet, cela suppose qu'un même secteur dans chacun des pays émette les mêmes substances par euro de production que le secteur américain, donc que les technologies de ces deux secteurs sont globalement équivalentes. Même si cette hypothèse semble plutôt acceptable pour des pays technologiquement proches des États-Unis comme le Canada ou les pays d'Europe de l'Ouest, il n'en va pas de même pour d'autres régions comme les pays d'Afrique, d'Amérique latine ou d'Asie. Et même pour les pays pour lesquels les technologies sont plus ou moins équivalentes, cette hypothèse néglige d'autres différences, notamment législatives, comme par exemple des substances interdites dans certains pays et pas aux États-Unis ou inversement. Une autre source d'incertitudes géographiques est liée à l'utilisation de Traci qui correspond parfaitement à une situation étasunienne mais n'a pas été développée pour le reste du monde.

Toutes ces erreurs ne concernent pas les résultats obtenus pour des émissions directes aux États-Unis mais entrent en jeu dès qu'un cycle de vie fait intervenir des secteurs d'autres régions du monde. C'est la raison pour laquelle nos résultats en perspective consommateur montrent la part de l'impact calculé due à des émissions provenant des États-Unis et celle provenant d'autres régions du monde. Plus la part étasunienne est importante, moins ces incertitudes seront élevées. Ceci correspond à une première analyse qualitative de ces incertitudes. On pourrait améliorer cette analyse en regroupant tous les pays considérés par EXIOBASE en différents groupes en fonction de la proximité de leur technologie et de leurs législations avec celles des États-Unis puis en présentant la part de l'impact due à chacun des groupes dans les calculs effectués. Une étude pseudo-quantitative de ces analyses pourrait alors être menée en attribuant un score de fiabilité à chacun de ces groupements de pays afin de calculer un niveau de fiabilité général pour le résultat concerné.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Contributions et avancées permises par l'étude

Ce travail a permis de compléter l'EE d'EXIOBASE et ainsi de démontrer, d'une manière qualitative puis quantitative, qu'il ne couvrait pas correctement certaines aires de protection en raison d'un manque de couverture de certaines catégories de substances, en particulier en ce qui concerne toutes les émissions toxiques.

La catégorie concernant la disparition de la couche d'ozone est la plus touchée parce qu'aucune substance l'impactant n'est prise en compte dans EXIOBASE. L'écotoxicité aquatique est la deuxième catégorie la plus affectée (plus de 90 % de l'impact est manquant pour les émissions américaines) principalement parce qu'aucun pesticide n'est considéré dans EXIOBASE. Et même pour les catégories dont les impacts semblent plutôt bien couverts au niveau de l'économie globale, on observe que les impacts directs de certains secteurs sont extrêmement sous-estimés. Cette situation se retrouve pour les secteurs agricoles (toxicité humaine), les extractions de minéraux ou d'hydrocarbures (toxicité humaine et pour certains d'entre eux smog et pluies acides), l'industrie textile (toxicité humaine), la production d'aluminium (réchauffement climatique et pluies acides) ou de cuivre (pluies acides et smog), le transport (toxicité humaine) ainsi que diverses autres industries de production ou de service. Des problèmes liés à l'agrégation de certaines émissions inventoriées par EXIOBASE (NMVOC principalement...) ont également été mis en avant. Ce manque de couverture est préjudiciable aux analyses Input-Output menées à l'aide de cette base de données mais également aux analyses ACV hybrides qui utiliseraient EXIOBASE afin de combler leurs propres troncatures, en particulier lorsque ces analyses portent sur certains de ces secteurs particulièrement touchés. Cette affirmation concerne principalement les catégories d'impacts toxiques et pour un nombre très limité de secteurs le réchauffement climatique. En effet, on a aussi pu remarquer qu'en se plaçant en approche consommateur c'est-à-dire en attribuant à un produit tous les impacts de son cycle de vie au moment de son achat par le consommateur final, soit la même approche que celle utilisée en ACV, les effets du manque de couverture d'EXIOBASE deviennent négligeables pour toutes les autres aires de protection ainsi que pour de nombreux secteurs dont les impacts directs étaient grandement sous-estimés pour le réchauffement climatique.

Mais ce travail a également mis en avant le fait que même si ces problèmes de couverture sont importants, l'ajout aux extensions environnementales d'un nombre limité de substances pourrait les résoudre en grande partie (pesticides, formaldéhyde et acroléine en tête ainsi que quelques émissions comme le 1,1,1-trichloroéthane, le bromométhane ou les CFC pour la disparition de la couche d'ozone). Même si les résultats sont extrêmement dépendants de la méthode de caractérisation des impacts utilisée (ici Traci), on pourrait allonger cette liste avec des émissions ressortant d'analyses menées avec d'autres méthodes de caractérisation. Ceci permettrait d'obtenir une liste restreinte de substance à ajouter à EXIOBASE dans le but de lui permettre de grandement améliorer sa couverture de l'ensemble des impacts environnementaux. Cette amélioration serait alors indépendante de la méthode de caractérisation utilisée par la suite par chaque analyse se basant sur les données d'EXIOBASE.

Cette maîtrise a aussi permis de proposer une méthode générale permettant de compléter un MREEIO avec une autre base de données de flux environnementaux et de montrer l'application de ce cadre général de méthodologie à la complétion d'EXIOBASE par un EEIO national, USEEIO. Ce cas d'application a permis de rendre le nombre d'émissions inventoriées par l'EE d'EXIOBASE commensurable à celui de la base de données ACV *ecoinvent* (ecoinvent, 2018). Un MREEIO ainsi complété permettrait de réduire considérablement les problèmes de troncatures et de mauvaise couverture de certaines catégories d'impacts au cours d'AIO ou d'analyses hybrides relevés par plusieurs études (Beylot et al., 2019; Suh & Huppes, 2002) et donc peut-être de permettre une plus large application de ces outils de calculs d'impacts. C'est le MREEIO ainsi complété qui a permis l'analyse quantitative des problèmes de couverture d'EXIOBASE. Tout cet algorithme de complétion a été appliqué grâce à un programme informatique également fourni avec cette maîtrise et qui a été codé de manière à le rendre compréhensible, utilisable et modifiable par le plus grand nombre. Ceci a pour but de permettre à la fois à tout un chacun de vérifier les données présentées dans ce mémoire mais également de tester de nouvelles hypothèses ou des variations de la méthodologie proposée mais aussi de produire et de tester une multitude d'autres compléments d'EEIO répondant aux besoins spécifiques d'une autre étude (analyse EEIO ou ACV hybride par exemple).

7.2 Pistes d'amélioration

Cette étude comprend plusieurs pistes d'améliorations. La mise en correspondance des secteurs de USEEIO et d'EXIOBASE pourrait être améliorée. D'une part, il faudrait adopter une méthode plus systématique et moins subjective afin de faire correspondre deux secteurs, par exemple en se basant sur les tableaux de correspondance entre les systèmes de classifications internationaux, afin de réduire le nombre de correspondances négligées entre des secteurs n'étant relié que par un nombre limité de produits. Ces tables de correspondance ne pourraient cependant pas être utilisées telles quelles car elles n'indiquent pas la part de la production de chacun des secteurs qui est effectivement reliée au secteur correspondant dans l'autre classification. D'autre part, il est nécessaire de trouver une manière d'intégrer les secteurs des énergies propres, du traitement de l'eau et des déchets à l'étude, en trouvant une méthode spécifique de répartition de leurs émissions des secteurs de USEEIO vers ceux d'EXIOBASE ou d'utiliser une autre source de donnée plus désagrégée que USEEIO pour ces secteurs. Des résultats pourraient être calculés avec des configurations différentes afin de réaliser une première analyse de sensibilité liée aux choix de correspondance effectués. La méthode de répartition des émissions des secteurs de USEEIO vers ceux d'EXIOBASE pourrait aussi être améliorée afin de mieux prendre en compte le poids réel de chacun des secteurs du premier dans chacun de ceux du second. Enfin, l'extrapolation du complément US vers le complément mondial devrait être améliorée afin d'adapter les émissions aux pays très différents technologiquement des États-Unis. Pour cela, on pourrait par exemple se baser sur des relevés d'émissions de certains pays et adapter nos facteurs d'émissions pour atteindre des bilans spécifiques pour chaque pays.

Le traitement des substances pourrait être amélioré par exemple en testant plusieurs méthodes afin de leur attribuer un facteur de caractérisation (minimum ou maximum de l'ensemble des substances comprises à l'intérieur afin de connaître les limites hautes et basses des impacts potentiels, moyennes pondérées par la distribution des substances à l'intérieur de l'agrégat, etc.). Pour l'ensemble des émissions, une meilleure méthode que celle de réaliser une moyenne arithmétique pourrait être étudiée afin d'associer des facteurs de caractérisation à des compartiments plus généraux que ceux pris en compte dans les méthodes d'impact. Enfin, différentes méthodes d'impact pourraient être utilisées pour comparer les conclusions qu'elles permettraient de tirer quant à la complétude d'EXIOBASE, en plus de Traci.

Enfin, plusieurs pistes sont possibles afin de prolonger cette maîtrise. Il faudrait tout d'abord procéder à une meilleure analyse d'incertitude et de sensibilité des résultats obtenus. Ce travail sur les incertitudes, même s'il reste rare dans le domaine des AIO est jugé indispensable par de nombreux chercheurs (Lenzen et al., 2010; Vaccara, 1970; Yamakawa & Peters, 2009). On pourrait aussi s'intéresser à d'autres catégories d'impacts (déplétion des ressources minérales et fossiles, des réserves en eau, occupation des sols...). On devrait également mettre à jour ce travail avec la version 3 d'EXIOBASE. On pourrait réaliser une étude de cas comparative entre une analyse menée d'une manière classique, à travers une ACV, une autre avec une ACV hybride incorporant EXIOBASE et enfin une troisième analyse hybride avec EXIOBASE et notre complément. Ceci permettrait d'observer sur un cas concret, l'effet réel que pourrait avoir notre EEIO sur les résultats obtenus avec une analyse hybride. On pourrait également réaliser une étude comparative entre une analyse IO menée avec EXIOBASE et une autre avec notre MREEIO complété.

Une autre manière de continuer ce projet serait d'utiliser d'autres bases de données (émissions nationales, MRIO ou multiples EEIO nationaux, bases de données d'ACV comme *ecoinvent...*) pour réaliser d'autres compléments ou pour améliorer celui-ci. On pourrait ainsi continuer à utiliser USEEIO comme source de complément pour les régions dont les technologies sont proches de celles des États-Unis, comme le Canada et les pays européens, et d'autres EEIO nationaux pour d'autres ensembles de pays comme par exemple CEEIO (un EEIO chinois) pour les pays asiatiques. Le choix entre plusieurs EEIO pour modéliser les émissions des secteurs industriels d'un pays pourrait se faire en fonction des normes environnementales en place dans ce pays. Cette utilisation de plusieurs EEIO différents à la fois pour compléter EXIOBASE demanderait d'accorder une attention particulière aux émissions que chacun d'entre eux recense effectivement. On pourrait par exemple mettre en place un ordre de priorité pour l'utilisation des données de chaque EEIO : si une émission manquante est recensée dans plusieurs EEIO, on prend celui dont les technologies se rapprochent le plus du pays dont on cherche à compléter l'inventaire mais si cette émission n'est pas recensée dans l'EEIO préférentiel, alors on prend la prochaine Extension Environnementale qui la contient. On pourrait aussi imaginer que l'utilisateur du complément puisse choisir les bases de données à partir desquelles ce dernier est produit en fonction de différents paramètres. Par exemple préfère-t-il réduire au maximum les troncatures en ajoutant le plus d'émissions possibles, quel que soit l'EEIO dont elles proviennent ou minimiser les incertitudes en n'ajoutant que les émissions provenant des EEIO de régions aux technologies les plus semblables ? Pour les secteurs

qui sont plus désagrégés dans EXIOBASE que dans les autres EEIO (comme l'électricité), on pourrait utiliser les données d'*ecoinvent* pour modéliser leurs coefficients d'émission (si *ecoinvent* indique les émissions par unité monétaire de ces processus) ou pour répartir les émissions du secteur agrégé de l'EEIO servant à la formation du complément vers les secteurs désagrégés d'EXIOBASE. Par exemple, si le processus d'*ecoinvent* décrivant la production d'électricité via l'énergie éolienne émet deux fois plus d'une émission que celui concernant l'énergie solaire, alors deux fois plus des émissions de cette substance par le secteur agrégé devraient être attribuées au secteur désagrégé éolien qu'à celui du solaire. Un algorithme d'optimisation pourrait ainsi permettre de répartir les émissions du secteur agrégé vers les différents secteurs désagrégés d'EXIOBASE. La production d'un complément à EXIOBASE à partir de USEEIO n'est donc bien qu'une première étape dans une démarche de réduction systématique de la troncature des émissions des MREEIO.

7.3 Recommandations

Cette maîtrise a mis en évidence le fait que les bases de données traditionnellement utilisées afin de réaliser des études environnementales souffrent de troncature, que ce soit au niveau des impacts étudiés, des substances caractérisées ou encore des processus dont les flux environnementaux sont inclus dans les données du cycle de vie. Ceci peut conduire ces études à des conclusions erronées, par exemple en sous-estimant les impacts de certains choix d'une analyse comparative. Il paraît dès lors indispensable d'étudier des manières de compléter ces bases de données ou au moins d'analyser les éléments de ces études qui pourraient être faussés par un manque de complétude des bases de données. Pour ce faire, l'utilisation de sources de données environnementales annexes semble être une bonne solution. Cette réflexion commence à être appliquée dans le cadre d'ACV avec le développement des analyses hybrides ACV-IO (Bullard, Penner, & Pilati, 1978; Joshi, 1999; Lenzen & Crawford, 2009; Nakamura & Kondo, 2002a; Suh & Huppes, 2005). Cependant, elle devrait être développée davantage, notamment par la complétion des différents EEIO qui pourront ensuite à leur tour être intégrés dans ces analyses hybrides. Il serait intéressant pour les communautés ACV ou IO de commencer à penser ces données environnementales (inventaires d'émissions de cycles de vie, extensions environnementales de tables Input-Output, etc.) non plus uniquement comme des résultats en soi mais comme des données annexes permettant d'améliorer d'autres études ou bases de données ou tout au moins de développer des pistes d'amélioration pour

ces dernières en les utilisant comme sources de premières approximations. Pour permettre ceci, il serait en particulier utile d'améliorer les tables de correspondance entre les différents systèmes de classifications des secteurs industriels ou des produits utilisés par les (MR)IO afin qu'elles prennent en compte les volumes de production et puissent ainsi permettre une meilleure répartition des émissions des uns vers les autres.

Toutes les aires de protection liées à des études de toxicité en particulier nécessitent une réflexion supplémentaire de la part de l'ensemble de la communauté. On a pu mettre en avant dans ce travail que les études concernant ces catégories souffrent d'un grand nombre d'incertitudes, expliquant que ces problématiques sont rarement au cœur des études ACV et surtout IO, et ceci pour plusieurs raisons. En ce qui concerne la caractérisation, c'est-à-dire la recherche des impacts potentiels causés dans ces aires de protection par chacune des émissions des polluants, les différentes études disponibles fournissent des résultats très différents mais une réflexion est déjà lancée au sein de ce champ de recherche visant à une plus grande homogénéité et une certaine convergence de ces résultats (Margni et al., 2008; Rosenbaum et al., 2008). C'est maintenant au tour de la partie de la communauté liée à la production des inventaires des flux environnementaux de se lancer dans un processus d'amélioration et de convergence de méthodes liées aux problématiques de la toxicité, notamment en prenant mieux en compte les émissions ayant des impacts sur ces aires de protection et en faisant cela d'une manière commune afin de réduire les disparités de prise en compte de ces problématiques environnementales entre les différentes sources de données proposées. Toute cette réflexion permettra d'améliorer l'ensemble des analyses environnementales en développant leur capacité à étudier les problèmes liés à la toxicité humaine et à l'écotoxicité.

BIBLIOGRAPHIE

- Bare, J. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>
- BEA. (2014). Input-Output Accounts Data. Retrieved July 1, 2017, from Make Tables/Before Redefinitions/2007 website: https://apps.bea.gov/industry/io_annual.htm
- Benoît, C., Mazijn, B., United Nations Environment Programme., CIRAIG., Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, P. and S., & Canadian Electronic Library. (2013). *Guidelines for social life cycle assessment of products*. Retrieved from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=FShilCSUVWQC&oi=fnd&pg=PA79&dq=economic+lca&ots=UcoHDKeD9g&sig=V1-UTrWbclBvW3jAsXd_u1Yfil8#v=onepage&q=economic+lca&f=false
- Beylot, A., Secchi, M., Cerutti, A., Merciai, S., Schmidt, J., & Sala, S. (2019). Assessing the environmental impacts of EU consumption at macro-scale. *Journal of Cleaner Production*, 216, 382–393. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.134>
- Bullard, C. W., Penner, P. S., & Pilati, D. A. (1978). Net energy analysis: Handbook for combining process and input-output analysis. *Resources and Energy*, 1(3), 267–313. [https://doi.org/10.1016/0165-0572\(78\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0165-0572(78)90008-7)
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., ... Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- CIRAIG. (2012). Open IO Canada. Retrieved March 25, 2019, from http://www.ciraig.org/en/open_io_canada/
- Ciroth, A., Muller, S., Weidema, B., & Lesage, P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1338–1348. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>
- CML - Department of Industrial Ecology. (2001). CML-IA Characterisation Factors - Leiden University. Retrieved March 25, 2019, from <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Crawford, R. H., Bontinck, P.-A., Stephan, A., Wiedmann, T., & Yu, M. (2018). Hybrid life cycle inventory methods – A review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.176>
- de Koning, A., Bruckner, M., Lutter, S., Wood, R., Stadler, K., & Tukker, A. (2015). Effect of aggregation and disaggregation on embodied material use of products in input–output analysis. *Ecological Economics*, 116, 289–299. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.05.008>
- Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., Timmer, M., & de Vries, G. (2013). THE CONSTRUCTION OF WORLD INPUT-OUTPUT TABLES IN THE WIOD PROJECT.

- Economic Systems Research*. <https://doi.org/10.1080/09535314.2012.761180>
- ecoinvent. (2018). Ecoinvent database (version 3.5). [Cut-off system model]. Retrieved from the ecospold files. Retrieved December 18, 2018, from <https://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- Europa - RAMON. (2002). NACE Rev. 1.1. Retrieved March 25, 2019, from https://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_CLS_DLD&StrNom=NACE_1_1
- EXIOBASE. (2015a). Exiobase - EXIOBASE2 (year 2007). Retrieved March 25, 2019, from <https://www.exiobase.eu/index.php/data-download/exiobase2-year-2007-full-data-set>
- EXIOBASE. (2015b). Exiobase - EXIOBASE2 Data Download. Retrieved February 3, 2017, from MrIOT IxI fpa coefficient version2 2 2 website: <https://www.exiobase.eu/index.php/data-download/exiobase2-year-2007-full-data-set/78-mriot-ixi-fpa-coefficient-version2-2-2>
- Fantke, P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., ... Van Zelm, R. (2017). *USEtox® 2.0 Documentation (Version 1)*. Retrieved from <http://usetox.org>
- Ferrão, P., & Nhambiu, J. (2009). *A Comparison Between Conventional LCA and Hybrid EIO-LCA: Analyzing Crystal Giftware Contribution to Global Warming Potential*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5737-3_11
- Frischknecht, R. (1998). *Life cycle inventory analysis for decision-making*. Zurich: ETH.
- Genty, A., Arto, I., & Neu. (2012). Final Database of Environmental Satellite Accounts : Technical Report on Thei Communication. *WIOD Deliverable, 4.6*, 1–69. Retrieved from http://www.wiod.org/publications/source_docs/Environmental_Sources.pdf
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & R, V. Z. (2013). *ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009*. 133. <https://doi.org/http://www.lcia-recipe.net>
- Huijbregts, M. A. J. (1998). Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(5), 273–280. <https://doi.org/10.1007/BF02979835>
- Huijbregts, M. A. J., Norris, G., Bretz, R., Citroth, A., Maurice, B., von Bahr, B., ... de Beaufort, A. S. H. (2001). Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(3), 127–132. <https://doi.org/10.1007/BF02978728>
- Igos, E., Benetto, E., Meyer, R., Baustert, P., & Othoniel, B. (2019). How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(4), 794–807. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1477-1>
- Ingwersen, W., & Yang, Y. (2017). USEEIO v1.1 - Matrices - USEEIOv1.1_Matrices.xlsx - Data.gov. Retrieved August 25, 2018, from <https://catalog.data.gov/dataset/useeio-v1-1-matrices/resource/2a0f07af-59e9-4b5e-b5eb-402f4b03269d>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO14040:2006 Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*.

- International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- Irfanoglu, Z. B., & van der Mensbrugge, D. (2015). *Development of the Version 9 non-CO2 GHG emissions database*. 2. Retrieved from <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/7813.pdf>
- Joshi, S. (1999). Product Environmental life cycle Assessment Using Input-Output Techniques. *Journal of Industrial Ecology*, 3(2–3), 95–120. <https://doi.org/10.1162/108819899569449>
- Junnila, S. I. (2006). Empirical comparison of process and economic input-output life cycle assessment in service industries. *Environmental Science & Technology*, 40(22), 7070–7076. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17154018>
- Lenzen, M. (2000). Errors in Conventional and Input-Output—based life cycle Inventories. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 127–148. <https://doi.org/10.1162/10881980052541981>
- Lenzen, M. (2002). Differential Convergence of life cycle Inventories toward Upstream Production Layers. *Journal of Industrial Ecology*, 6(3–4), 137–160. <https://doi.org/10.1162/108819802766269575>
- Lenzen, M., & Crawford, R. (2009). The Path Exchange Method for Hybrid LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8251–8256. <https://doi.org/10.1021/es902090z>
- Lenzen, M., & Dey, C. (2000). Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products. *Energy*, 25(6), 577–585. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00088-2)
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., & Geschke ISA, A. (2013). *Building EORA: a global multi-region Input-Output database at high country and sector resolution*.
- Lenzen, M., Pade, L.-L., & Munksgaard, J. (2004). CO2 Multipliers in Multi-region Input-Output Models. *Economic Systems Research*, 16(4), 391–412. <https://doi.org/10.1080/0953531042000304272>
- Lenzen, M., Wood, R., & Wiedmann, T. (2010). Uncertainty analysis for multi-region input-output models - A case study of the UK's carbon footprint. *Economic Systems Research*, 22(1), 43–63. <https://doi.org/10.1080/09535311003661226>
- Leontief, W. (1970). Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262. <https://doi.org/10.2307/1926294>
- Leontief, W. W. (1936). Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 18(3), 105. <https://doi.org/10.2307/1927837>
- Liang, S., Feng, T., Qu, S., Chiu, A. S. F., Jia, X., & Xu, M. (2017). Developing the Chinese Environmentally Extended Input-Output (CEEIO) Database. *Journal of Industrial Ecology*, 21(4), 953–965. <https://doi.org/10.1111/jiec.12477>
- Lloyd, S. M., & Ries, R. (2008). Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in life cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 161–179. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>
- Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H., & Hertwich, E. G. (2011). Evaluation of Process- and Input–

- Output-based Life Cycle Inventory Data with Regard to Truncation and Aggregation Issues. *Environmental Science & Technology*, 45(23), 10170–10177. <https://doi.org/10.1021/es201308x>
- Margareta Lundin, *, Magnus Bengtsson, and, & Molander, S. (1999). *Life Cycle Assessment of Wastewater Systems: Influence of System Boundaries and Scale on Calculated Environmental Loads*. <https://doi.org/10.1021/ES990003F>
- Margni, M., Gloria, T., & Bare, J. (2008). Guidance on how to move from current practice to recommended practice in Life Cycle Impact Assessment. In *Environmental Protection*. Retrieved from http://www.scpclearinghouse.org/upload/publication_and_tool/file/250.pdf
- Matheys, J., Van Autenboer, W., Timmermans, J.-M., Van Mierlo, J., Van den Bossche, P., & Maggetto, G. (2007). Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 191–196. <https://doi.org/10.1065/lca2007.04.322>
- Muller, S., Lesage, P., Ciroth, A., Mutel, C., Weidema, B. P., & Samson, R. (2016). The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1327–1337. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0759-5>
- Nakamura, S., & Kondo, Y. (2002a). Input-Output Analysis of Waste Management. *Journal of Industrial Ecology*, 6(1), 39–63. <https://doi.org/10.1162/108819802320971632>
- Nakamura, S., & Kondo, Y. (2002b). Recycling, landfill consumption, and CO2 emission: analysis by waste input–output model. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 4(1), 2–11. <https://doi.org/10.1007/s10163-001-0052-0>
- Norris, G. A. (2002). Life cycle emission distributions within the economy: implications for life cycle impact assessment. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 22(5), 919–930. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12442989>
- Peters, G. P., Andrew, R., & Lennox, J. (2011). Constructing an environmentally-extended multi-regional Input-Output table using the GTAP database. *Economic Systems Research*, 23(2), 131–152. <https://doi.org/10.1080/09535314.2011.563234>
- Pomponi, F., & Lenzen, M. (2018). Hybrid life cycle assessment (LCA) will likely yield more accurate results than process-based LCA. *Journal of Cleaner Production*, 176, 210–215. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.119>
- Potting, J., & Hauschild, M. (2006). Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment: A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(S1), 11–13. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.005>
- Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., ... Hauschild, M. Z. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7), 532–546. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- Rowley, H. V., Lundie, S., & Peters, G. M. (2009). A hybrid life cycle assessment model for

- comparison with conventional methodologies in Australia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(6), 508–516. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0093-5>
- Schmidt, J., Merciai, S., Delahaye, R., Vulk, J., Heijungs, R., de Koning, A., & Sahoo, A. (2012). *Recommendation of terminology, classification, framework of waste accounts and MFA, and data collection guideline*. Retrieved from <https://www.exiobase.eu/index.php/publications/documentation>
- Sonnemann, G., Vigon, B., Rack, M., & Valdivia, S. (2013). Global guidance principles for life cycle assessment databases: development of training material and other implementation activities on the publication. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 1169–1172. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0563-7>
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., ... Tukker, A. (2018). EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>
- Statistics Canada, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), & Economic Classification Policy Committee (ECPC). (2017). *North American Industry Classification System (NAICS) Canada 2017 Version 1.0*. Retrieved from <https://www.statcan.gc.ca/eng/subjects/standard/naics/2017/index>
- Steinmann, Z. J. N., Hauck, M., Karuppiah, R., Laurenzi, I. J., & Huijbregts, M. A. J. (2014). A methodology for separating uncertainty and variability in the life cycle greenhouse gas emissions of coal-fueled power generation in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(5), 1146–1155. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0717-2>
- Stephan, A., Crawford, R. H., & Bontinck, P.-A. (2019). A model for streamlining and automating path exchange hybrid life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 237–252. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1521-1>
- Strømman, A. H., Peters, G. P., & Hertwich, E. G. (2009). Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production*, 17(2), 248–254. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2008.05.003>
- Strømman, A. H., & Solli, C. (2008). Applying Leontief's Price Model to Estimate Missing Elements in Hybrid Life Cycle Inventories. *Journal of Industrial Ecology*, 12(1), 26–33. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00011.x>
- Suh, S. (2009). *Developing the Sectoral Environmental Database for Input-Output Analysis: Comprehensive Environmental Data Archive of the U.S.* https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5737-3_32
- Suh, S., & Huppes, G. (2002). Missing inventory estimation tool using extended input-output analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 7(3), 134–140. <https://doi.org/10.1007/BF02994047>
- Suh, S., & Huppes, G. (2005). Methods for Life Cycle Inventory of a product. *Journal of Cleaner Production*, 13(7), 687–697. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2003.04.001>
- Suh, S., Lenzen, M., Treloar, G. J., Hondo, H., Horvath, A., Huppes, G., ... Norris, G. (2004). System Boundary Selection in life cycle Inventories Using Hybrid Approaches.

Environmental Science and Technology. <https://doi.org/10.1021/es0263745>

- Suh, S., & Lippiatt, B. C. (2012). Framework for hybrid life cycle inventory databases: a case study on the Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(5), 604–612. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0393-z>
- Svanes, E., Vold, M., & Hanssen, O. J. (2011). Effect of different allocation methods on LCA results of products from wild-caught fish and on the use of such results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(6), 512–521. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0288-4>
- Swarr, T. E., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Ciroth, A., Brent, A. C., & Pagan, R. (2011). Environmental life cycle costing: a code of practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), 389–391. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0287-5>
- Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., & de Vries, G. J. (2015). An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: the Case of Global Automotive Production. *Review of International Economics*, 23(3), 575–605. <https://doi.org/10.1111/roie.12178>
- TRACI. (2014). Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts (TRACI). Retrieved May 20, 2017, from TRACI 2.1 website: <https://www.epa.gov/chemical-research/tool-reduction-and-assessment-chemicals-and-other-environmental-impacts-traci>
- Tukker, A., Bulavskaya, T., Giljum, S., de Koning, A., Lutter, S., Simas, M., ... Wood, R. (2014). The Global Resource Footprint of Nations: Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption. In *Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1002/cne.20193>
- Tukker, A., Bulavskaya, T., Giljum, S., de Koning, A., Lutter, S., Simas, M., ... Wood, R. (2014). *The Global Resource Footprint of Nations. Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/264080789_The_Global_Resource_Footprint_of_Nations_Carbon_water_land_and_materials_embodied_in_trade_and_final_consumption_calculated_with_EXIOBASE_21
- United Nations. (2008). International Standard Industrial Classification of All Economic Activities. In *United Nations Publication*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- USEEIO. (2017). USEEIO v1.1 - Matrices. Retrieved May 15, 2017, from USEEIOv1.1_Matrices.xlsx website: <https://catalog.data.gov/dataset/useeio-v1-1-matrices/resource/2a0f07af-59e9-4b5e-b5eb-402f4b03269d>
- Vaccara, B. N. (1970). Changes over time in input-output coefficients for the United States. In *Applications of Input-Output Analysis*, 2 (pp. 238–260).
- Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2007). *Embodied Environmental Emissions in U.S. International Trade, 1997–2004*. <https://doi.org/10.1021/ES0629110>
- Weidema, B. P. (2011). Stepping Stones From Life Cycle Assessment to Adjacent Assessment Techniques. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 658–661. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00391.x>

- Weidema, B. P., & Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4(3–4), 167–174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016a). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016b). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- WHO. (2005). *The International Programme of Safety*. Retrieved from https://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf
- Wood, R., Bulavskaya, T., Ivanova, O., Stadler, K., Simas, M., Tukker, A., ... Heijungs, R. (2013). *Report D7.2 Update EXIOBASE with WP3-6 input*. Retrieved from <https://www.exiobase.eu/index.php/publications/documentation>
- Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., de Koning, A., ... Tukker, A. (2014). Global Sustainability Accounting—Developing EXIOBASE for Multi-Regional Footprint Analysis. *Sustainability*, 7(1), 138–163. <https://doi.org/10.3390/su7010138>
- Yamakawa, A., & Peters, G. P. (2009). Using time-series to measure uncertainty in environmental input-output analysis. *Economic Systems Research*, 21(4), 337–362. <https://doi.org/10.1080/09535310903444766>
- Yang, Y., & Heijungs, R. (2019). Moving from completing system boundaries to more realistic modeling of the economy in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 211–218. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1532-y>
- Yang, Y., Heijungs, R., & Brandão, M. (2017). Hybrid life cycle assessment (LCA) does not necessarily yield more accurate results than process-based LCA. *Journal of Cleaner Production*, 150, 237–242. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.006>
- Yang, Y., Ingwersen, W. W., Hawkins, T. R., Srocka, M., & Meyer, D. E. (2017). USEEIO: A new and transparent United States environmentally-extended input-output model. *Journal of Cleaner Production*, 158, 308–318. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.150>
- Zamagni, A., Guinée, J., Heijungs, R., Masoni, P., & Raggi, A. (2012). Lights and shadows in consequential LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(7), 904–918. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0423-x>

ANNEXE A – SECTEURS EXCLUS DU COUPLAGE ENTRE USEEIO ET EXIOBASE

Tableau A.1 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine du traitement de l'eau et secteur correspondant dans USEEIO.

Exiobase	USEEIO	CodeBEA	BEA
Steam and hot water supply	Water, sewage and other systems	221300	Drinking water and wastewater treatment
Collection, purification and distribution of water	Water, sewage and other systems	221300	Drinking water and wastewater treatment
Waste water treatment, food	Water, sewage and other systems	221300	Drinking water and wastewater treatment
Waste water treatment, other	Water, sewage and other systems	221300	Drinking water and wastewater treatment

Tableau A.2 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine de la production d'électricité et secteur correspondant dans USEEIO.

Exiobase	USEEIO	CodeBEA	BEA
Production of electricity by coal	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by gas	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by nuclear	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by hydro	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by wind	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by petroleum and other oil derivatives	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by biomass and waste	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by solar photovoltaic	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by solar thermal	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by tide, wave, ocean	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity by Geothermal	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Production of electricity nec	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Transmission of electricity	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
Distribution and trade of electricity	Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities

Tableau A.3 : Liste des secteurs de USEEIO dans le domaine de la production d'électricité.

USEEIO	CodeBEA	BEA
Electric power generation, transmission, and distribution	221100	Electricity
Federal electric utilities	S00101	Federal electric utilities
State and local government electric utilities	S00202	State and local government electric utilities

Tableau A.4 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine du traitement des déchets et secteur correspondant dans USEEIO.

Exiobase	USEEIO	CodeBEA	BEA
Recycling of waste and scrap	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Recycling of bottles by direct reuse	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Food	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Paper	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Plastic	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Metals and Inert materials	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Textiles	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Wood	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Incineration of waste: Oil/Hazardous waste	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Biogasification of food waste, incl. land application	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Biogasification of paper, incl. land application	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Biogasification of sewage sludge, incl. land application	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Composting of food waste, incl. land application	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation

Tableau A.4 : Liste des secteurs d'EXIOBASE dans le domaine du traitement des déchets et secteur correspondant dans USEEIO. (suite)

Exiobase	USEEIO	CodeBEA	BEA
Composting of paper and wood, incl. land application	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Food	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Paper	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Plastic	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Inert/metal/hazardous	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Textiles	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation
Landfill of waste: Wood	Waste management and remediation services	562000	Waste management and remediation

ANNEXE B – DONNÉES STATISTIQUES COMPLÉMENTAIRES DE L’EFFET DU COMPLÉMENT SUR LES DIFFÉRENTS SECTEURS INDUSTRIELS

Tableau B.1 : Données statistiques concernant la part de chacun des secteurs de l’économie mondiale due aux données du complément, pour chaque catégorie d’impact.

	Acid Rain	Eutrophication	Freshwater Aquatic Ecotoxicity	Global Climate Change	Human Health - Respiratory Effects	Human Health Cancer	Human Health Noncancer	Ozone Depletion	Smog Formation
count	6543.000000	6541.000000	6544.000000	6544.000000	6.528000e+03	6544.000000	6544.000000	5111.0	6555.000000
mean	4.432472	2.842796	20.761609	6.649679	2.930884e-15	29.797715	14.123552	100.0	3.751419
std	13.646841	11.836604	31.109209	16.152085	6.446974e-15	35.480582	26.092351	0.0	10.376470
min	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000e+00	0.000000	0.000000	100.0	0.000000
25%	0.000022	0.000000	0.062369	0.000024	0.000000e+00	0,269 717	0,011 368	100,0	0,018 605
50 %	0,072 505	0,005 294	4,195 600	0,142 897	0.000000e+00	10,799 196	0,860 731	100,0	0,412 723
75 %	1,665 291	0,345 223	28,499 220	3,691 624	0.000000e+00	59,823 965	13,142 494	100,0	2,539 982
max	100,000 000	100,000 000	100,000 000	100,000 000	3.518358e-14	100,000 000	100,000 000	100,0	99,998 199

Tableau B.2 : Données statistiques concernant la part de chacun des secteurs de l’économie américaine due aux données du complément, pour chaque catégorie d’impact.

	Acid Rain	Eutrophication	Freshwater Aquatic Ecotoxicity	Global Climate Change	Human Health - Respiratory Effects	Human Health Cancer	Human Health Noncancer	Ozone Depletion	Smog Formation
count	1.550000e+02	155.000000	155.000000	155.000000	1.550000e+02	155.000000	155.000000	118.0	155.000000
mean	2.121762e+00	0.996518	14.480303	2.744148	2.872965e-15	25.033611	10.200892	100.0	2.551342
std	6.494141e+00	3.205873	26.776749	9.167206	6.340537e-15	33.266585	21.391562	0.0	8.417415
min	0.000000e+00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000e+00	0.000000	0.000000	100.0	0.000000
25%	6.774347e-09	0,000 000	0,024 730	0,000 003	0.000000e+00	0,038 327	0,002 699	100,0	0,007 901
50 %	4.729336e-02	0,004 936	1,700 540	0,020 414	0.000000e+00	5,788 774	0,684 208	100,0	0,254 148
75 %	7.919468e-01	0,233 083	12,413 978	1,468 366	0.000000e+00	43,113 006	4,885 463	100,0	1,269 971
max	3.808581e+01	24,388 786	99,986 449	75,855 364	2.660834e-14	98,911 271	93,568 812	100,0	67,771 874

ANNEXE C – ÉMISSIONS LES PLUS IMPACTANTES POUR L'ÉCONOMIE DANS SON ENSEMBLE

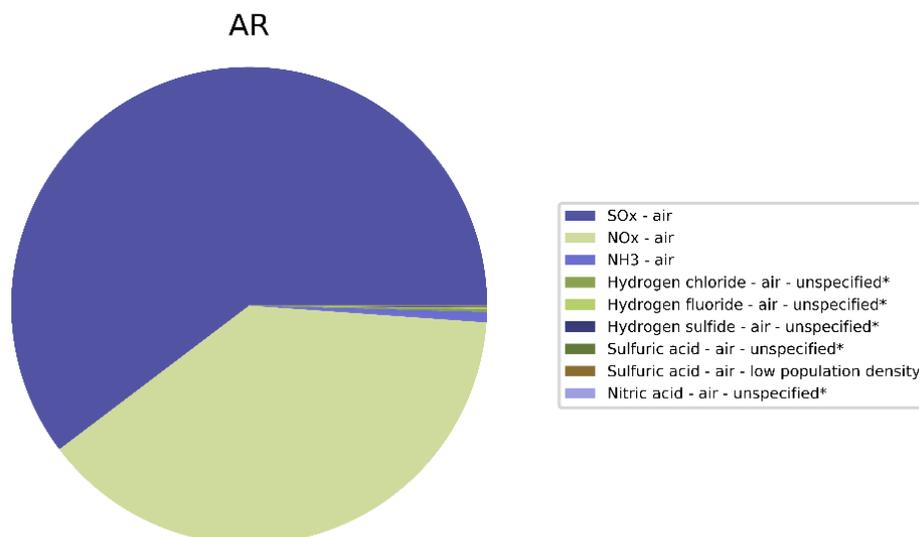


Figure C.1 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie AR, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

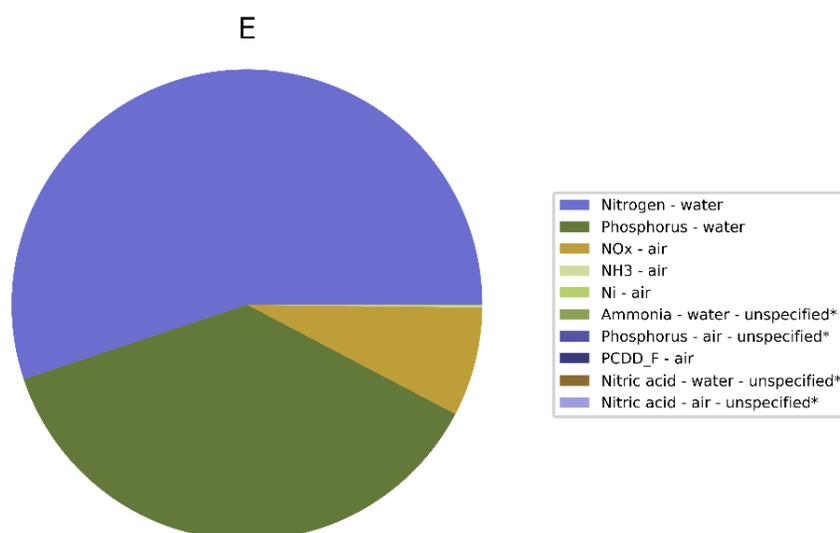


Figure C.2 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie Eutrophisation, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

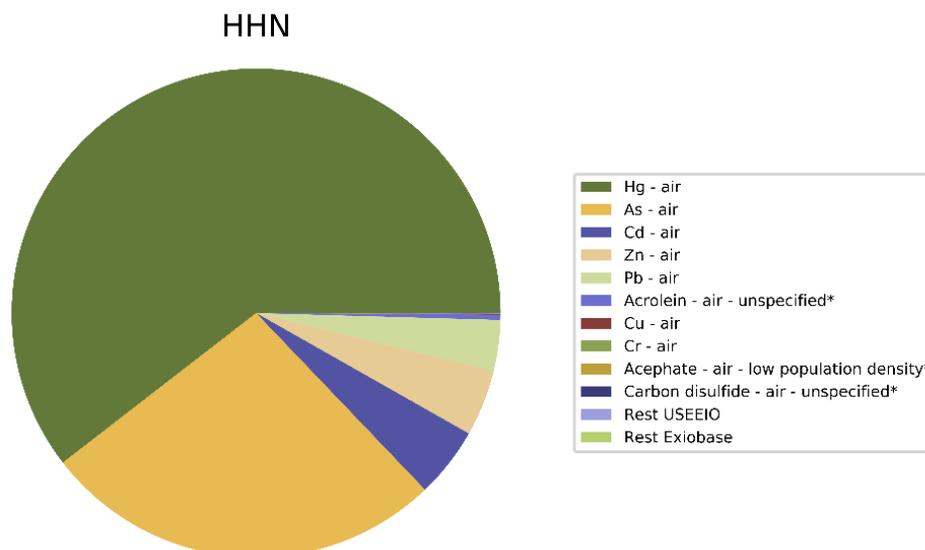


Figure C.3 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie HHN, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

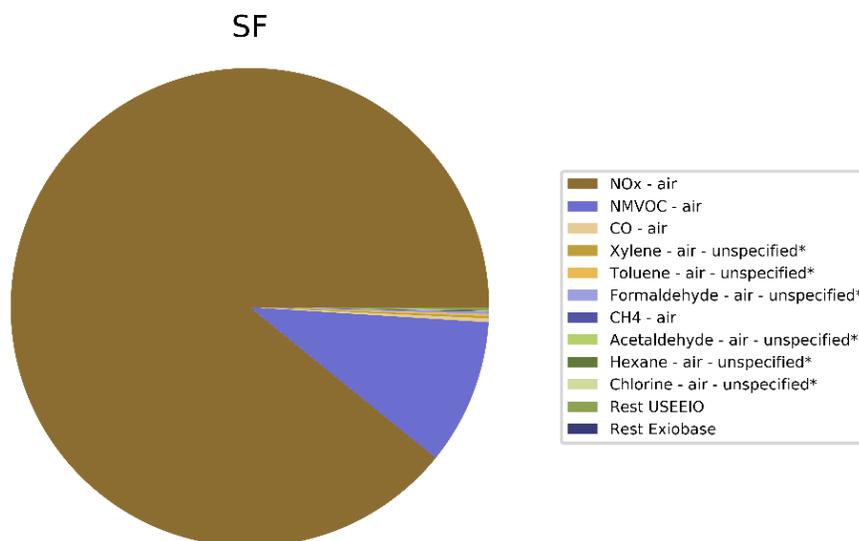


Figure C.4 : Principales émissions participant aux impacts de la catégorie SF, dans le MREEIO complété de l'économie américaine. Les émissions provenant du complément sont marquées d'un astérisque. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

Tableau C.1 : Principales émissions participant à chacune des catégories d'impact, classées en fonction du pourcentage de l'impact de chaque catégorie leur étant attribuable (1). Les émissions provenant du complément sont sur fond bleu. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

AR		E		FAE		GCC		HHRE	
SOx - air	60,3 %	Nitrogen - water	55,1%	Cyfluthrin - water	21%	CO2 - air	87,7 %	PM2.5 - air	37,6 %
Nox - air	38,6%	Phosphorus - water	37,2%	Lambda-cyhalothrin - water	18,4 %	CH4 - air	7,1%	SOx - air	28,8 %
NH3 - air	0,7%	NOx - air	7,5%	Chlorothalonil - water	11,3 %	N2O - air	2,5%	PM10 - air	15,7 %
Hydrogen chloride - air	0,2%	NH3 - air	0,1%	Cu - air	8,0 %	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, hfc-134a - air	0,6%	TSP - air	14,6 %
Hydrogen fluoride - air	<0,1 %	Ni - air	<0,1 %	Fenpropathrin - water	5,5 %	Methane, tetrafluoro-, r-14 - air	0,4%	NOx - air	3,1 %
Hydrogen sulfide - air	<0,1 %	Ammonia - water	<0,1 %	As - air	3,9 %	Ethane, pentafluoro-, hfc-125 - air	0,4%	NH3 - air	0,2 %
Sulfuric acid - air	<0,1 %	Phosphorus - air	<0,01 %	Chlorpyrifos - water	3,1 %	CO - air	0,4%		
Nitric acid - air	<0,001 %	PCDD_F - air	<0,01 %	Zeta-cypermethrin - water	2,2 %	SF6 - air	0,3%		
		Nitric acid - water	<0,001 %	Cyfluthrin - air	2,0 %	Ethane, 1,1,1-trifluoro-, hfc-143a - air	0,2%		
		Nitric acid - air	<0,001 %	Bifenthrin - water	1,7 %	Ethane, hexafluoro-, hfc-116 - air	0,2%		
				Atrazine - water	1,6 %	Methane, trifluoro-, hfc-23 - air	<0,1 %		
				Chlorothalonil - air	1,4 %	Methane, difluoro-, hfc-32 - air	<0,1 %		
				Diflubenzuron - water	1,2 %	Methane, chlorodifluoro-, hfc-22 - air	<0,1 %		
				Propanil - air	1,0 %	Nitrogen fluoride - air	<0,1 %		
				Cypermethrin - water	1,0 %	1,1,1-trichloroethane - air	<0,1 %		
				Zn - air	1,0 %	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, cfc-113 - air	<0,1 %		
				Metam-sodium - water	1,0 %	Propane, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-, hfc-236fa - air	<0,1 %		
				Chlorothalonil - soil	0,9 %	Cfc-114 - air	<0,01 %		
				Propanil - soil	0,9 %	Methane, trichlorofluoro-, cfc-11 - air	<0,01 %		
				Acetochlor - water	0,8 %	Butane, perfluorocyclo-, pfc-318 - air	<0,01 %		

Tableau C.2 : Principales émissions participant à chacune des catégories d'impact, classées en fonction du pourcentage de l'impact de chaque catégorie leur étant attribuable (2). Les émissions provenant du complément sont sur fond bleu. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

HHC		HHNC		OD		SF	
As - air	33,2 %	Hg - air	60,5 %	1,1,1-trichloroethane - air	48,7 %	NOx - air	89,4 %
Hg - air	32,1 %	As - air	26,7 %	Methane, bromo-, halon 1001 - air	27,3 %	NM VOC - air	9,9%
Cr - air	26,6 %	Cd - air	4,7%	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, cfc-113 - air	9,1%	Xylene - air	0,1%
Formaldehyde - air	5,1%	Zn - air	4,4%	Carbon tetrachloride - air	3,9%	Toluene - air	0,1%
Cd - air	1,4%	Pb - air	3,4%	Methane, trichlorofluoro-, cfc-11 - air	3,2%	Formaldehyde - air	0,1%
Pb - air	0,6%	Acrolein - air	0,3%	Methane, chlorodifluoro-, hcfc-22 - air	2,0%	CH4 - air	<0,1 %
Benzo(a)pyrene - air	0,3%	Cu - air	<0,1 %	Cfc-114 - air	2,0%	Acetaldehyde - air	<0,1 %
PCDD_F - air	0,3%	Cr - air	<0,1 %	Halon 1301 - air	1,3%	Hexane - air	<0,1 %
Benzene - air	<0,1 %	Acephate - air	<0,1 %	Methane, dichlorodifluoro-, cfc-12 - air	0,9%	Chlorine - air	<0,1 %
Atrazine - air	<0,1 %	Carbon disulfide - air	<0,1 %	Methane, monochloro-, r-40 - air	0,8%	Methyl isobutyl ketone - air	<0,1 %
Benzene, ethyl- - air	<0,1 %	Dichloropropene - air	<0,0 1%	Cfc-115 - air	0,2%	M-xylene - air	<0,1 %
Styrene - air	<0,1 %	Methane, bromo-, halon 1001 - air	<0,0 1%	Halon 1211 - air	0,2%	Butadiene - air	<0,1 %
Carbon tetrachloride - air	<0,1 %	Hexane - air	<0,0 1%	Hcfc-142b - air	0,2%	Benzene, ethyl- - air	<0,1 %
Acetaldehyde - air	<0,1 %	Aldicarb - air	<0,0 1%	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, hcfc-124 - air	<0,1 %	Ethene - air	<0,1 %
Naphthalene - air	<0,1 %	Acetaldehyde - air	<0,0 1%	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, hcfc-123 - air	<0,1 %	Methanol - air	<0,1 %
Butadiene - air	<0,1 %	Chlorpyrifos - water	<0,0 1%	Methane, tetrachloro-, r-10 - air	<0,1 %	Acrolein - air	<0,0 1%
Ethene, tetrachloro- - air	<0,0 1%	Atrazine - air	<0,0 1%	Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro-, hcfc-141b - air	<0,1 %	Ethylene glycol - air	<0,0 1%
Ethene, chloro- - air	<0,0 1%	Carbon tetrachloride - air	<0,0 1%	2-chloro-1,1,1-trifluoroethane - air	<0,1 %	Benzene - air	<0,0 1%
PCBs - air	<0,0 1%	Formaldehyde - air	<0,0 1%	Hcfc-132b - air	<0,1 %	Propene - air	<0,0 1%
Dichloropropene - air	<0,0 1%	Acephate - water	<0,0 1%	Cfc-13 - air	<0,0 1 %	2,2,4-trimethylpentane - air	<0,0 1 %

ANNEXE D – SECTEURS LES PLUS IMPACTANTS EN APPROCHE PRODUCTEUR

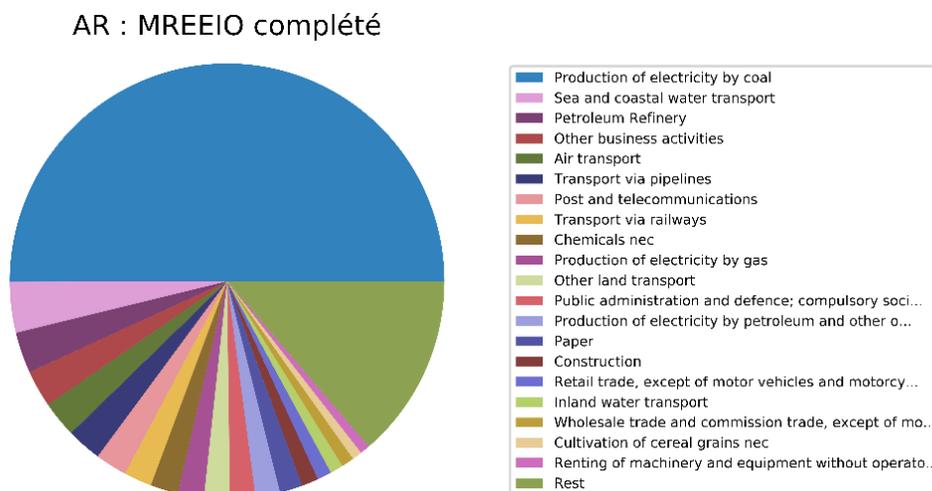


Figure D.1 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

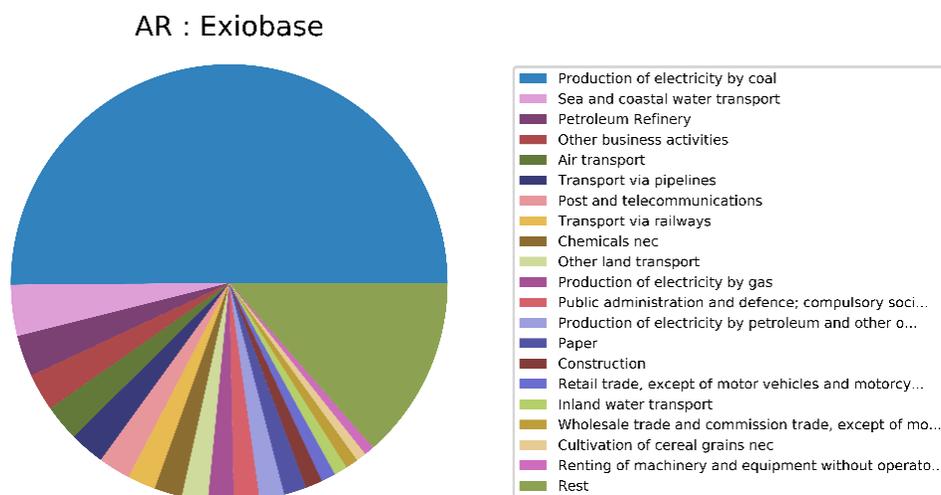


Figure D.2 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

E : MREEIO complété

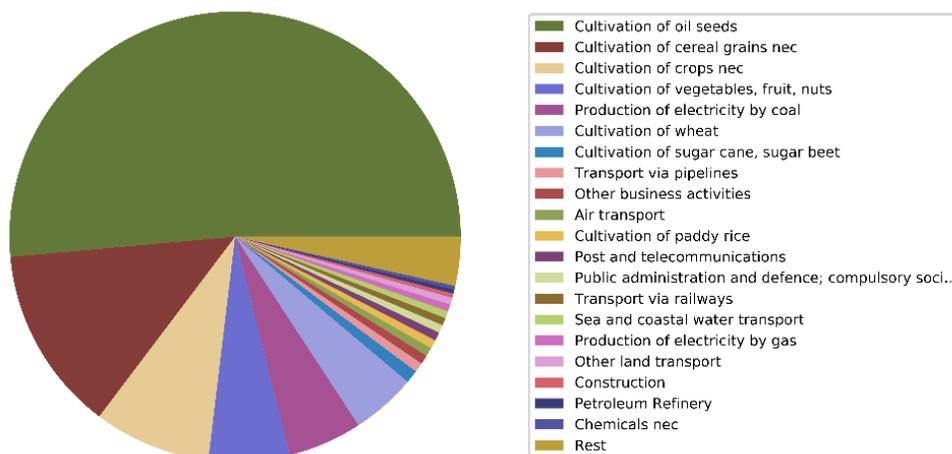


Figure D.3 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

E : Exiobase

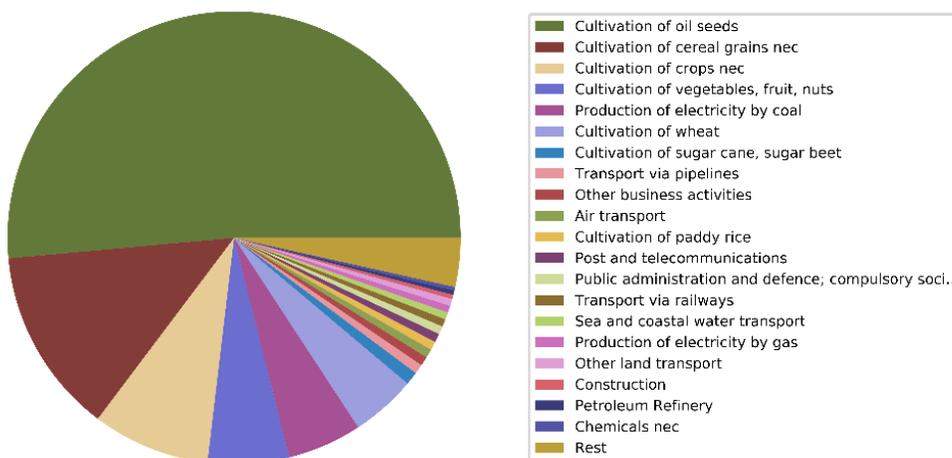


Figure D.4 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

OD : MREEIO complété

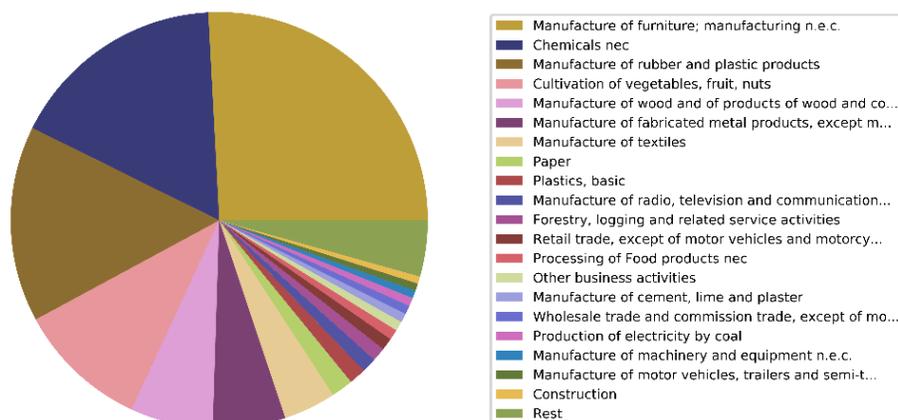


Figure D.5 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact OD avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

HH-RE : MREEIO complété

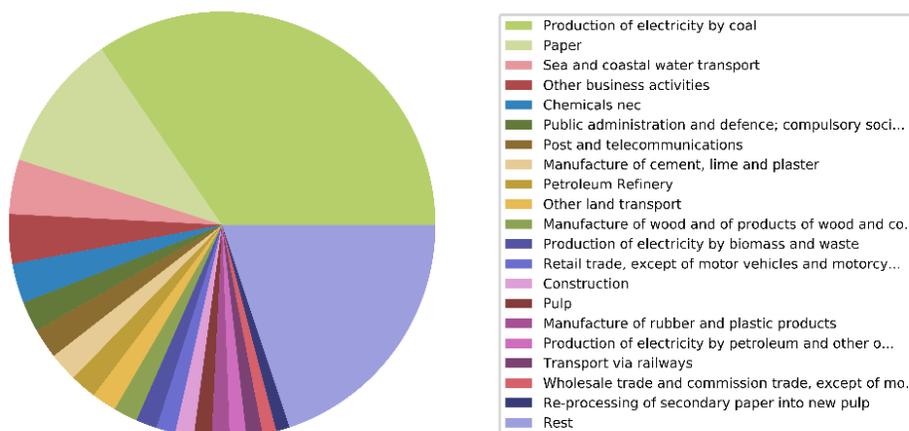


Figure D.6 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHRE avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

HHN : MREEIO complété

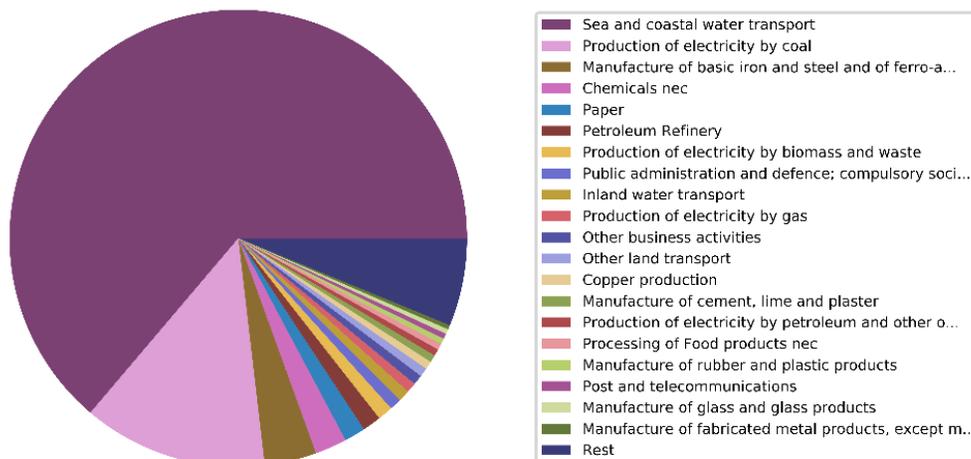


Figure D.7 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

HHN : Exiobase

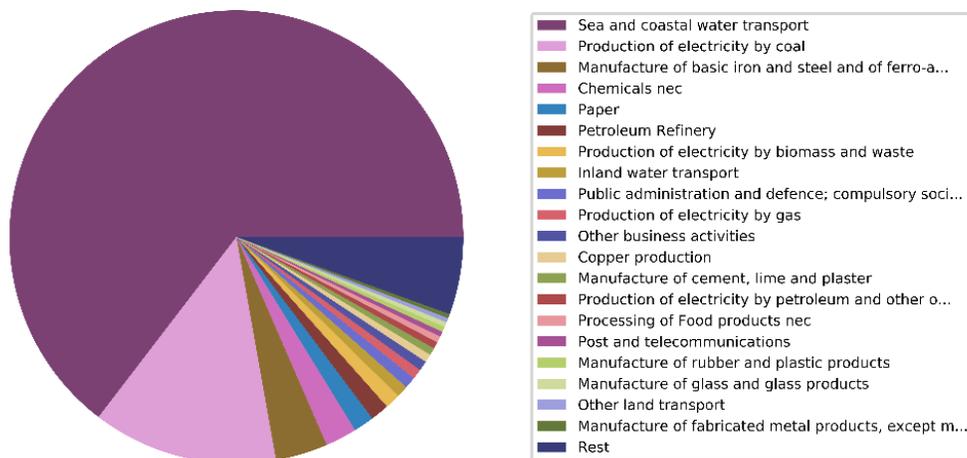


Figure D.8 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

SF : MREEIO complété

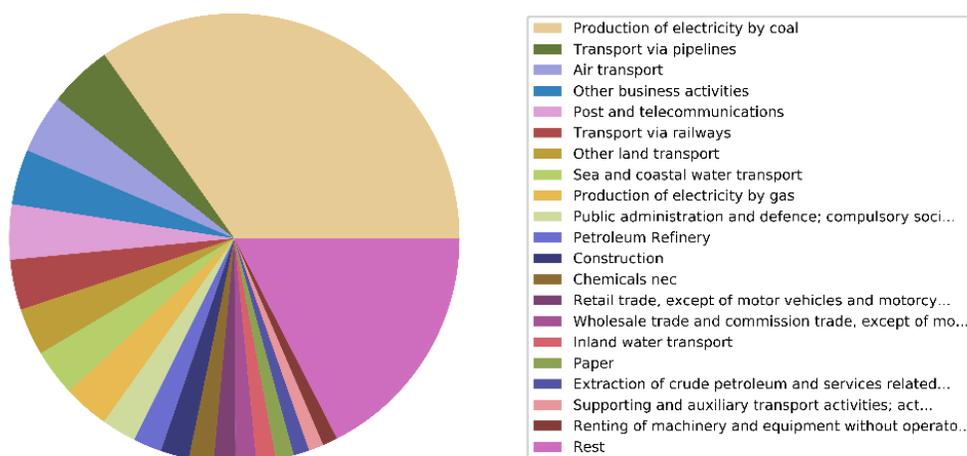


Figure D.9 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF avec leurs émissions directes, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

SF : Exiobase

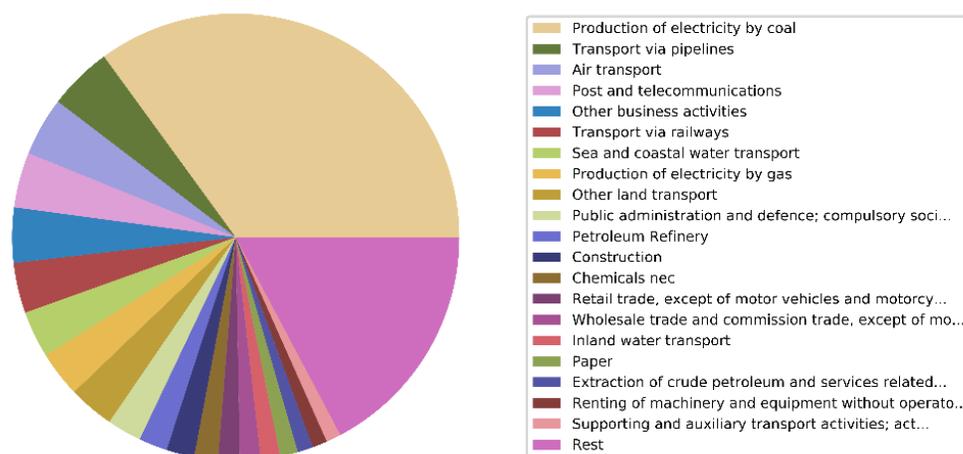


Figure D.10 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF avec leurs émissions directes, dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

De la même manière, les seuls changements visibles dans la catégorie SF concernent l'intervention de certains secteurs mais sans modification notable de leur contribution à l'impact total.

Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	OD	SF
Cultivation of paddy rice	0	0	107	0	29	5	73	0
Cultivation of wheat	0	0	77	-2	22	0	79	0
Cultivation of cereal grains nec	0	0	40	-2	10	2	93	0
Cultivation of vegetables, fruit, nuts	0	0	66	-1	27	23	151	0
Cultivation of oil seeds	0	0	70	-2	2	11	0	0
Cultivation of sugar cane, sugar beet	0	0	107	0	42	16	71	-1
Cultivation of plant-based fibers	0	0	91	-1	39	16	77	0
Cultivation of crops nec	0	0	72	-1	73	41	95	0
Cattle farming	-1	0	2	-2	35	2	0	-1
Pigs farming	0	0	6	0	45	15	47	2
Poultry farming	-1	0	-2	-1	13	-3	44	0
Meat animals nec	0	0	-2	0	3	-1	42	-1
Animal products nec	0	0	3	0	15	8	45	0
Raw milk	0	0	-2	0	32	4	0	0
Wool, silk-worm cocoons	0	0	0	0	1	0	38	0
Manure treatment (conventional), storage and land application	0	0	0	0	0	0	0	0
=Manure treatment (biogas), storage and land application	0	0	0	0	0	0	0	0
Forestry, logging and related service activities	0	0	-8	0	2	-3	144	-2
Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing	0	0	-9	0	-12	-3	85	-1
Mining of coal and lignite; extraction of peat	-1	1	-3	0	9	4	55	0
Extraction of crude petroleum and services related to crude oil extraction, excluding surveying	11	0	15	0	82	48	119	0
Extraction of natural gas and services related to natural gas extraction, excluding surveying	0	0	-7	-1	30	7	122	1
Extraction, liquefaction, and regasification of other petroleum and gaseous materials	0	0	14	0	38	27	52	1
Mining of uranium and thorium ores	0	0	2	0	21	5	53	1
Mining of iron ores	0	0	7	0	18	0	98	0
Mining of copper ores and concentrates	-1	0	-5	-2	-8	-1	0	-1
Mining of nickel ores and concentrates	0	0	0	0	0	0	0	0
Mining of aluminium ores and concentrates	0	0	2	0	6	1	62	0

Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'Exiobase) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	OD	SF
Mining of precious metal ores and concentrates	0	1	3	0	7	-2	91	0
Mining of lead, zinc and tin ores and concentrates	-1	0	-1	0	-1	-2	65	-1
Mining of other non-ferrous metal ores and concentrates	-1	0	1	0	2	-1	58	-1
Quarrying of stone	0	0	-4	-2	-3	-3	64	0
Quarrying of sand and clay	-1	0	-4	-1	6	1	67	0
Mining of chemical and fertilizer minerals, production of salt, other mining and quarrying n.e.c.	-1	-1	0	-1	-10	-4	57	-1
Processing of meat cattle	-1	0	-4	-2	-11	-7	89	0
Processing of meat pigs	0	0	-6	-3	-12	-4	87	0
Processing of meat poultry	0	1	-4	-1	-10	-3	92	0
Production of meat products nec	0	2	-5	0	-12	-6	82	-1
Processing vegetable oils and fats	0	0	-4	-1	-12	-3	80	1
Processing of dairy products	0	0	-7	0	-13	-3	75	0
Processed rice	1	-1	-2	-1	-7	-3	97	-1
Sugar refining	-1	0	-4	0	-7	-5	74	-1
Processing of Food products nec	1	1	-9	1	-9	-1	142	0
Manufacture of beverages	0	0	-11	-3	-12	-3	110	0
Manufacture of fish products	0	2	-5	0	-8	-6	88	-1
Manufacture of tobacco products	-1	0	-6	0	-11	-4	41	-2
Manufacture of textiles	0	0	-9	-1	-2	-1	148	1
Manufacture of wearing apparel; dressing and dyeing of fur	0	0	-2	-1	12	-2	116	1
Tanning and dressing of leather; manufacture of luggage, handbags, saddlery, harness and footwear	0	-1	1	0	1	-4	103	1
Manufacture of wood and of products of wood and cork, except furniture; manufacture of articles of straw and plaiting materials	1	0	-9	2	4	1	150	1
Re-processing of secondary wood material into new wood material	-1	-1	-9	-1	-11	-5	83	0
Pulp	0	0	4	-1	0	0	127	-1
Re-processing of secondary paper into new pulp	-1	0	-11	-1	-11	-1	111	-1
Paper	0	1	-9	-4	-3	0	147	0
Publishing, printing and reproduction of recorded media	0	0	-10	0	-8	-3	128	0

Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'Exiobase) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	OD	SF
Manufacture of coke oven products	0	0	-7	-1	-11	0	54	0
Petroleum Refinery	0	0	-5	0	-4	0	106	0
Processing of nuclear fuel	0	0	0	0	-2	-2	101	0
Plastics, basic	-1	1	6	-1	-2	0	146	0
Re-processing of secondary plastic into new plastic	0	0	4	1	-6	-5	125	0
N-fertiliser	0	0	-10	-1	-12	-5	46	0
P- and other fertiliser	0	0	-10	-2	-10	-2	60	-1
Chemicals nec	0	0	-2	0	-2	0	153	0
Manufacture of rubber and plastic products	0	0	-10	0	-6	0	152	0
Manufacture of glass and glass products	0	0	-8	-4	-7	-1	121	0
Re-processing of secondary glass into new glass	0	0	-10	-1	-11	-5	96	0
Manufacture of ceramic goods	0	0	-4	-1	-11	-4	86	0
Manufacture of bricks, tiles and construction products, in baked clay	2	0	-11	0	-10	-3	84	-1
Manufacture of cement, lime and plaster	0	0	-6	-1	2	-1	140	0
Re-processing of ash into clinker	1	0	-5	0	-10	-4	105	0
Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	0	-1	-9	0	-5	-1	107	-1
Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof	0	0	-8	-1	0	0	118	-1
Re-processing of secondary steel into new steel	0	-1	-9	-1	-9	-3	68	0
Precious metals production	-1	0	-7	1	-11	-1	70	-1
Re-processing of secondary precious metals into new precious metals	-1	0	-1	1	-4	-3	50	-1
Aluminium production	2	0	10	12	-10	-4	81	0
Re-processing of secondary aluminium into new aluminium	2	-1	10	26	-8	-1	72	0
Lead, zinc and tin production	-1	0	-8	0	-11	-3	56	-1
Re-processing of secondary lead into new lead	0	0	0	0	-10	-5	49	0
Copper production	3	1	-9	0	-4	-1	90	9
Re-processing of secondary copper into new copper	6	1	-9	0	-13	-5	66	6
Other non-ferrous metal production	0	0	-3	0	-5	-1	59	0
Re-processing of secondary other non-ferrous metals into new other non-ferrous metals	0	0	0	0	-6	-1	61	0

Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'Exiobase) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	OD	SF
Casting of metals	0	0	-9	-1	-11	-3	100	0
Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	0	0	-9	0	-4	0	149	1
Manufacture of machinery and equipment n.e.c.	0	0	-8	5	-6	-1	137	-1
Manufacture of office machinery and computers	-1	0	-7	1	-6	-1	124	1
Manufacture of electrical machinery and apparatus n.e.c.	-1	0	-7	1	-10	-2	133	-1
Manufacture of radio, television and communication equipment and apparatus	-2	0	36	17	-8	-6	145	2
Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	0	0	-11	-1	-7	-4	129	0
Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers	0	0	-9	0	0	-1	136	0
Manufacture of other transport equipment	0	0	-11	-1	-7	-6	131	1
Manufacture of furniture; manufacturing n.e.c.	0	0	-6	2	-3	-1	154	4
Recycling of waste and scrap	0	0	-1	0	-3	-4	0	-1
Recycling of bottles by direct reuse	0	0	0	0	0	0	0	0
Production of electricity by coal	0	0	-8	0	0	0	138	0
Production of electricity by gas	1	0	-7	0	-9	0	130	-1
Production of electricity by nuclear	0	-1	-2	0	-4	-1	0	-1
Production of electricity by hydro	0	0	-1	0	-3	-4	0	-1
Production of electricity by wind	-1	-1	-1	0	-4	-1	0	-1
Production of electricity by petroleum and other oil derivatives	0	0	-10	0	-9	-1	108	0
Production of electricity by biomass and waste	0	0	-9	0	-4	0	0	0
Production of electricity by solar photovoltaic	0	0	0	0	0	0	0	0
Production of electricity by solar thermal	0	0	-1	0	0	-1	0	-1
Production of electricity by tide, wave, ocean	0	0	0	0	0	0	0	0
Production of electricity by Geothermal	0	0	-1	0	-4	-1	0	0
Production of electricity nec	0	0	-1	0	-2	-1	0	0
Transmission of electricity	0	0	-5	0	-8	-1	0	0
Distribution and trade of electricity	0	0	-12	-2	-13	-6	0	0
Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	-1	0	-1	-1	42	22	102	1

Tableau D.1 : Gain ou perte de place de chaque secteur du MREEIO complété, restreint à l'économie américaine, dans le classement des secteurs dont les émissions directes contribuent le plus à l'impact de chacune des catégories. (données extraites de USEEIO et d'Exiobase) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HH-C	HH-NC	OD	SF
Steam and hot water supply	0	-1	-9	0	-12	-3	0	0
Collection, purification and distribution of water	0	-1	-2	0	-4	-1	0	-1
Construction	0	0	-9	6	14	1	135	0
Re-processing of secondary construction material into aggregates	0	0	1	0	1	1	43	1
Sale, maintenance, repair of motor vehicles, motor vehicles parts, motorcycles, motor cycles parts and accessoires	-2	0	-9	0	-10	-4	132	1
Retail sale of automotive fuel	0	0	-4	0	-6	-2	94	0
Wholesale trade and commission trade, except of motor vehicles and motorcycles	0	0	-8	0	-10	-2	139	0
Retail trade, except of motor vehicles and motorcycles; repair of personal and household goods	0	0	-9	-1	-9	-1	143	0
Hotels and restaurants	0	0	-8	0	11	-1	0	0
Transport via railways	0	0	-9	0	27	4	104	0
Other land transport	-1	0	-7	-1	14	7	123	2
Transport via pipelines	0	0	-9	0	10	16	126	0
Sea and coastal water transport	0	0	-4	-2	0	0	99	-1
Inland water transport	0	0	-8	-1	-8	-1	78	0
Air transport	0	0	-9	0	-9	-5	114	0
Supporting and auxiliary transport activities; activities of travel agencies	-1	0	-10	-3	9	4	117	0
Post and telecommunications	0	0	-10	0	-9	-2	115	0
Financial intermediation, except insurance and pension funding	0	0	-9	-1	-6	-5	69	0
Insurance and pension funding, except compulsory social security	0	0	-11	-2	-12	-5	39	0
Activities auxiliary to financial intermediation	-1	0	-12	-2	-9	-6	48	0
Real estate activities	0	0	-11	-1	-12	-1	51	0
Renting of machinery and equipment without operator and of personal and household goods	0	-1	-8	-1	-8	-2	0	0
Computer and related activities	0	0	-9	1	-12	-5	112	0
Research and development	-1	0	-10	-1	-11	-5	63	0
Other business activities	0	0	-8	0	-5	0	141	0

ANNEXE E – SECTEURS LES PLUS IMPACTANTS EN APPROCHE CONSUMMATEUR

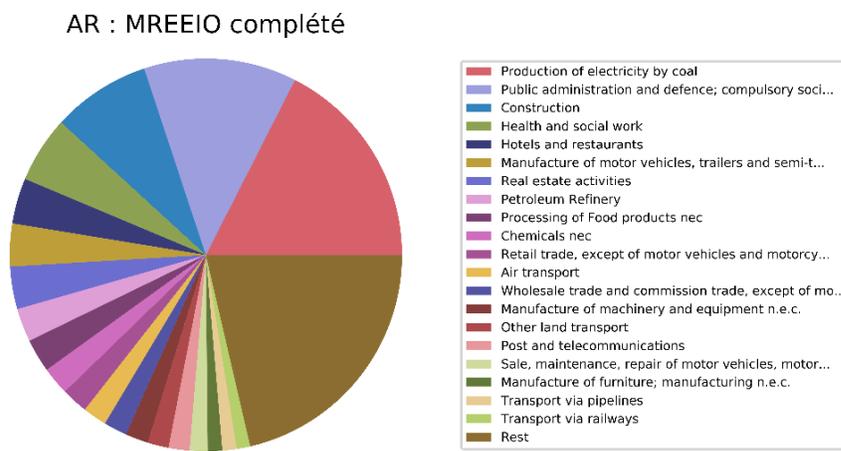


Figure E.1 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact AR, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

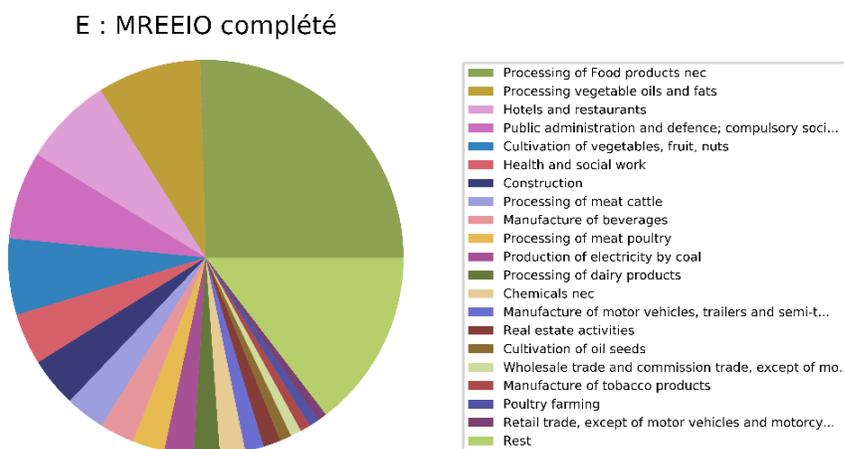


Figure E.2 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact Eutrophisation, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

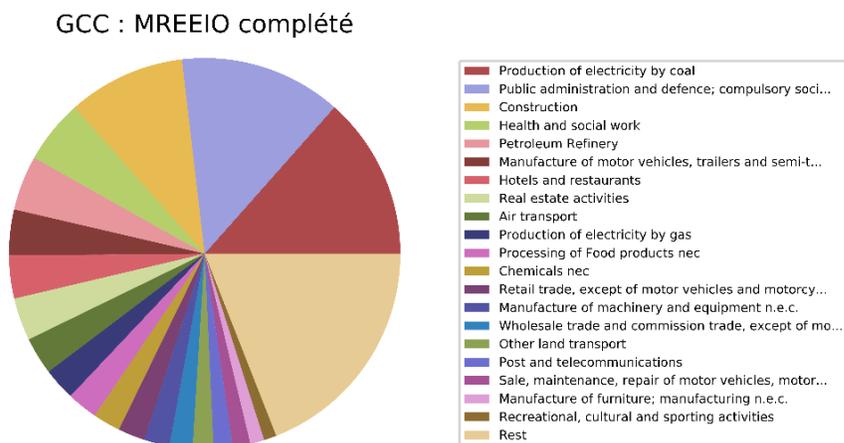


Figure E.3 Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact GCC, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

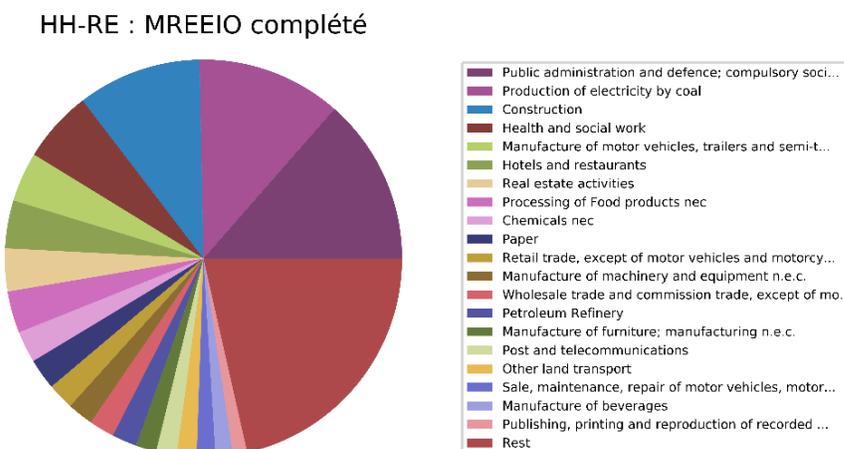


Figure E.4 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHRE, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

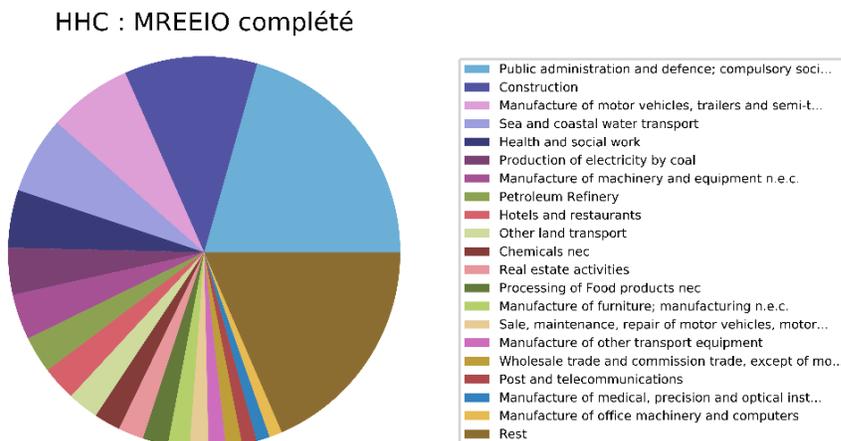


Figure E.5 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHC, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

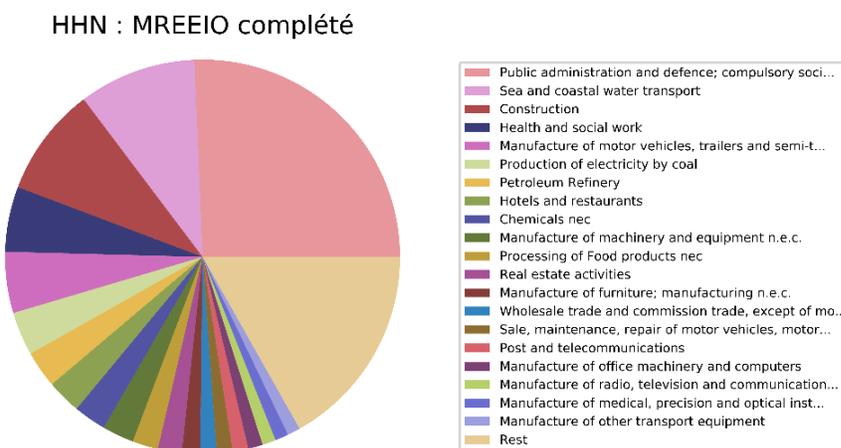


Figure E.6 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact HHN, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

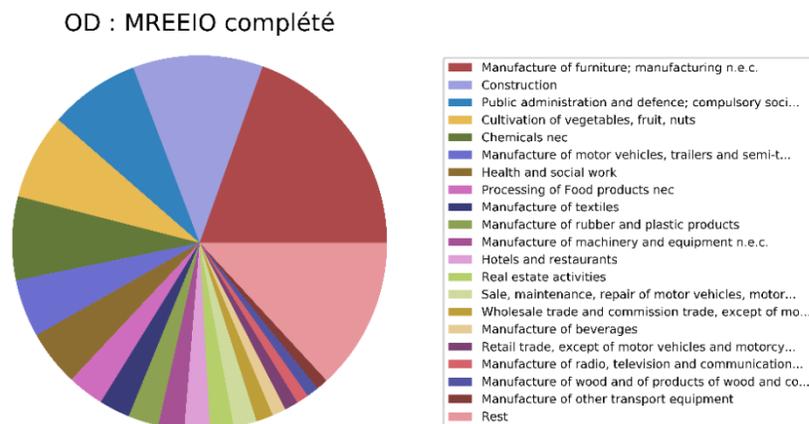


Figure E.7 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact OD, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

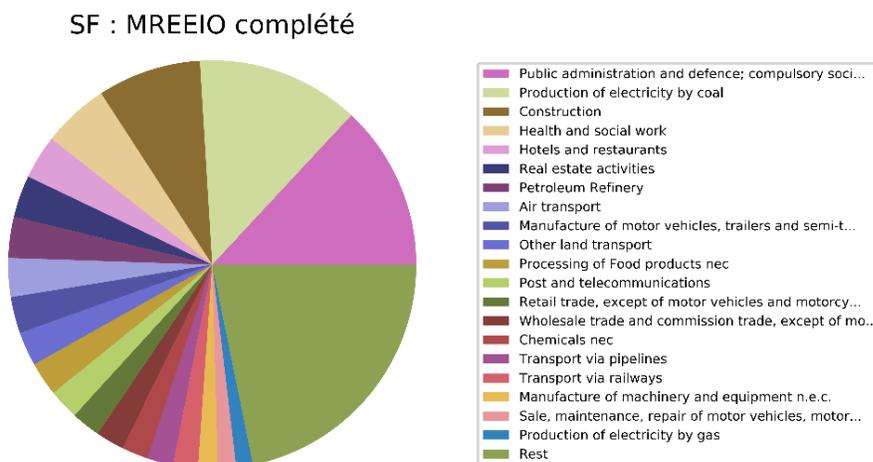


Figure E.8 : Principaux secteurs contribuant à la catégorie d'impact SF, en perspective consommateur, dans le MREEIO complété. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

Pour la catégorie HHC, il y a en réalité une seule modification visible entre Exiobase et le MREEIO complété, c'est encore une fois le secteur « Autres transports terrestres » qui a pris une importance non négligeable. Tous les autres secteurs n'ont subi aucune modification visible.

Tableau E.1 : Évolution de la place de chaque secteur du MREEIO complété, pour l'économie américaine, dans le classement des secteurs contribuant le plus à l'impact de chaque catégorie, dans une perspective consommateur. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHNC	OD	SF
Petroleum Refinery	1	0	-14	0	1	0	124	0
Processing of nuclear fuel	0	0	-10	0	1	0	74	0
Plastics, basic	0	0	-2	0	-1	-1	112	0
Re-processing of secondary plastic into new plastic	0	0	-4	0	1	0	89	0
N-fertiliser	0	0	-7	-2	-3	0	4	0
P- and other fertiliser	0	2	-11	0	1	0	55	0
Chemicals nec	0	0	-5	1	-1	0	144	1
Manufacture of rubber and plastic products	0	0	-6	0	-4	0	139	1
Manufacture of glass and glass products	0	0	-13	0	-2	0	92	0
Re-processing of secondary glass into new glass	-1	0	-16	0	-1	0	61	0
Manufacture of ceramic goods	1	-1	-6	0	-1	0	72	0
Manufacture of bricks, tiles and construction products, in baked clay	0	0	0	0	-1	0	14	0
Manufacture of cement, lime and plaster	0	0	-14	0	0	0	65	0
Re-processing of ash into clinker	0	0	-3	0	-1	-1	25	0
Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	0	0	-8	0	-1	0	80	0
Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof	0	0	-17	0	-4	0	63	0
Re-processing of secondary steel into new steel	0	0	-16	0	-4	0	26	0
Precious metals production	0	0	-7	0	-3	-1	36	0
Re-processing of secondary precious metals into new precious metals	0	0	0	0	0	0	10	0
Aluminium production	0	0	-7	7	-4	0	39	0
Re-processing of secondary aluminium into new aluminium	0	0	0	2	0	0	11	0
Lead, zinc and tin production	0	0	-7	0	-3	0	16	0
Re-processing of secondary lead into new lead	0	0	-3	0	-1	0	5	0
Copper production	0	0	-13	0	-2	-1	27	1
Re-processing of secondary copper into new copper	0	1	-3	0	-3	0	7	0
Other non-ferrous metal production	0	0	-1	-1	0	0	12	0
Re-processing of secondary other non-ferrous metals into new other non-ferrous metals	0	0	-1	-1	0	0	13	0
Casting of metals	0	0	-16	0	-2	0	52	0
Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment	0	0	-23	2	-3	0	126	0

Tableau E.1 : Évolution de la place de chaque secteur du MREEIO complété, pour l'économie américaine, dans le classement des secteurs contribuant le plus à l'impact de chaque catégorie, dans une perspective consommateur. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHNC	OD	SF
Manufacture of machinery and equipment n.e.c.	0	0	-16	0	0	0	138	0
Manufacture of office machinery and computers	0	0	-21	0	-1	0	123	0
Manufacture of electrical machinery and apparatus n.e.c.	0	1	-20	0	-3	0	114	0
Manufacture of radio, television and communication equipment and apparatus	0	0	-16	1	0	0	131	0
Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	0	0	-15	1	-1	0	127	0
Manufacture of motor vehicles, trailers and semi-trailers	0	0	-8	0	0	0	143	0
Manufacture of other transport equipment	0	0	-16	0	-1	0	129	0
Manufacture of furniture; manufacturing n.e.c.	0	0	-4	0	-1	0	148	0
Recycling of waste and scrap	0	0	-9	0	-1	0	15	0
Recycling of bottles by direct reuse	0	0	0	0	0	0	0	0
Production of electricity by coal	0	0	-28	0	0	0	111	0
Production of electricity by gas	0	0	-16	0	1	-1	102	0
Production of electricity by nuclear	0	0	-8	0	0	0	68	0
Production of electricity by hydro	0	0	-5	0	-1	0	59	0
Production of electricity by wind	0	0	-4	0	1	0	33	0
Production of electricity by petroleum and other oil derivatives	0	0	-19	-1	-4	0	75	0
Production of electricity by biomass and waste	0	0	-25	0	-3	-1	45	0
Production of electricity by solar photovoltaic	0	0	1	0	0	0	9	0
Production of electricity by solar thermal	0	-1	0	0	0	0	6	0
Production of electricity by tide, wave, ocean	0	0	0	0	0	0	0	0
Production of electricity by Geothermal	0	0	-1	0	-1	0	29	-1
Production of electricity nec	0	0	0	0	2	-1	20	0
Transmission of electricity	0	0	-7	0	1	0	71	0
Distribution and trade of electricity	0	0	-9	0	-1	0	90	0
Manufacture of gas; distribution of gaseous fuels through mains	0	0	-14	0	6	0	105	0
Steam and hot water supply	0	0	-15	0	-3	-2	3	0
Collection, purification and distribution of water	0	0	-6	0	0	0	67	0
Construction	0	0	-2	0	0	0	147	0
Re-processing of secondary construction material into aggregates	0	0	-2	0	-1	0	23	0

Tableau E.1 : Évolution de la place de chaque secteur du MREEIO complété, pour l'économie américaine, dans le classement des secteurs contribuant le plus à l'impact de chaque catégorie, dans une perspective consommateur. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE) (suite)

Sector	AR	E	FAE	GCC	HHC	HHNC	OD	SF
Sale, maintenance, repair of motor vehicles, motor vehicles parts, motorcycles, motor cycles parts and accessoires	0	0	-11	0	-1	0	135	0
Retail sale of automotive fuel	0	0	-3	0	-1	0	81	0
Wholesale trade and commission trade, except of motor vehicles and motorcycles	0	0	-11	0	-1	0	134	0
Retail trade, except of motor vehicles and motorcycles; repair of personal and household goods	0	0	-5	-1	0	0	132	0
Hotels and restaurants	0	0	2	0	-1	0	137	0
Transport via railways	0	0	-9	0	5	1	99	0
Other land transport	0	0	-18	0	14	0	120	1
Transport via pipelines	0	0	-14	-1	20	3	101	-1
Sea and coastal water transport	0	0	-15	0	0	0	83	0
Inland water transport	0	0	-28	0	-4	0	79	0
Air transport	0	0	-14	0	-3	0	107	0
Supporting and auxiliary transport activities; activities of travel agencies	0	0	-15	0	2	0	95	0
Post and telecommunications	0	0	-17	0	-1	0	121	0
Financial intermediation, except insurance and pension funding	0	0	-9	0	-3	0	108	0
Insurance and pension funding, except compulsory social security	0	0	-10	0	-2	-1	104	-1
Activities auxiliary to financial intermediation	0	0	0	0	-1	0	100	0
Real estate activities	0	0	-5	0	-1	0	136	0
Renting of machinery and equipment without operator and of personal and household goods	0	0	-9	1	-3	-1	98	0
Computer and related activities	0	0	-15	0	-3	0	117	0
Research and development	0	0	-26	0	-2	0	88	0
Other business activities	0	0	-15	-1	-2	0	110	0
Public administration and defence; compulsory social security	0	0	-2	0	0	0	146	0
Education	0	0	1	-1	0	0	118	0
Health and social work	0	0	-3	0	0	0	142	0
Incineration of waste: Food	0	0	2	0	0	0	42	0
Incineration of waste: Paper	0	0	-2	0	0	-1	49	0
Incineration of waste: Plastic	0	0	-3	-1	-1	-1	57	0

ANNEXE F – ÉTAPES LES PLUS IMPACTANTES DU CYCLE DE VIE DU SECTEUR « HÔTELS ET RESTAURANTS »

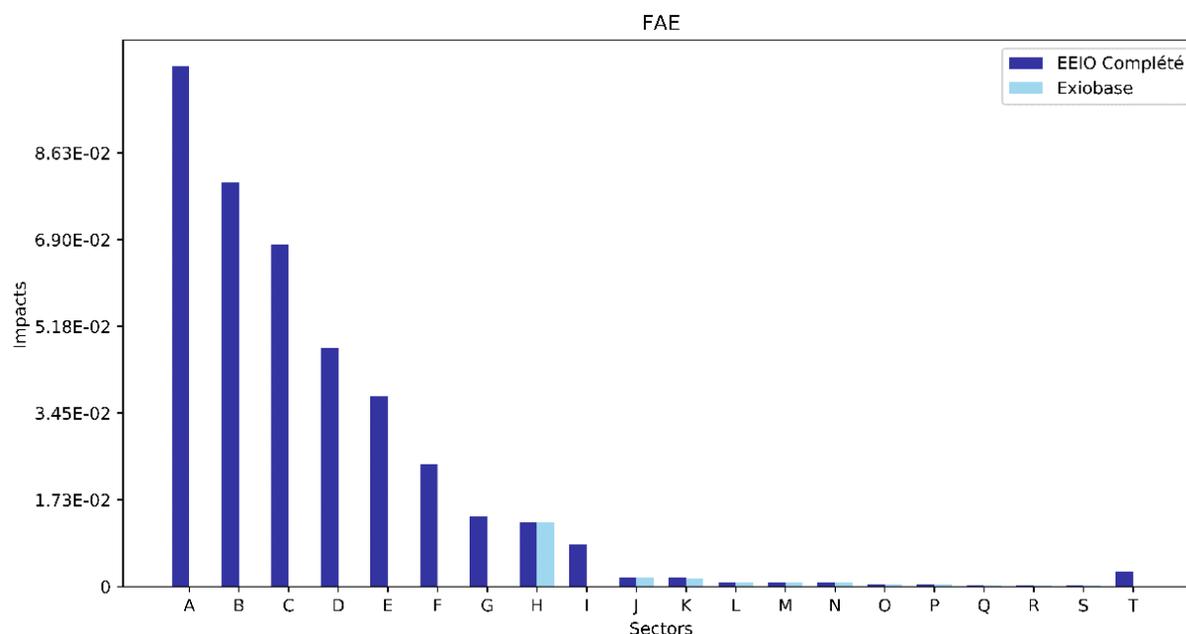


Figure F.1 : Étapes du cycle de vie, sommées sur l'ensemble des pays, les plus impactantes du secteur *Hotels and restaurants*, avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

A = Cultivation of oil seeds

B = Cultivation of crops nec

C = Cultivation of cereal grains nec

D = Cultivation of vegetables, fruit, nuts

E = Cultivation of paddy rice

F = Cultivation of wheat

G = Cultivation of sugar cane, sugar beet

H = Sea and coastal water transport

I = Cultivation of plant-based fibers

J = Production of electricity by coal

K = Hotels and restaurants

L = Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof

M = Other business activities

N = Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing

O = Inland water transport

P = Paper

Q = Production of electricity by biomass and waste

R = Post and telecommunications

S = Other land transport

T = Rest

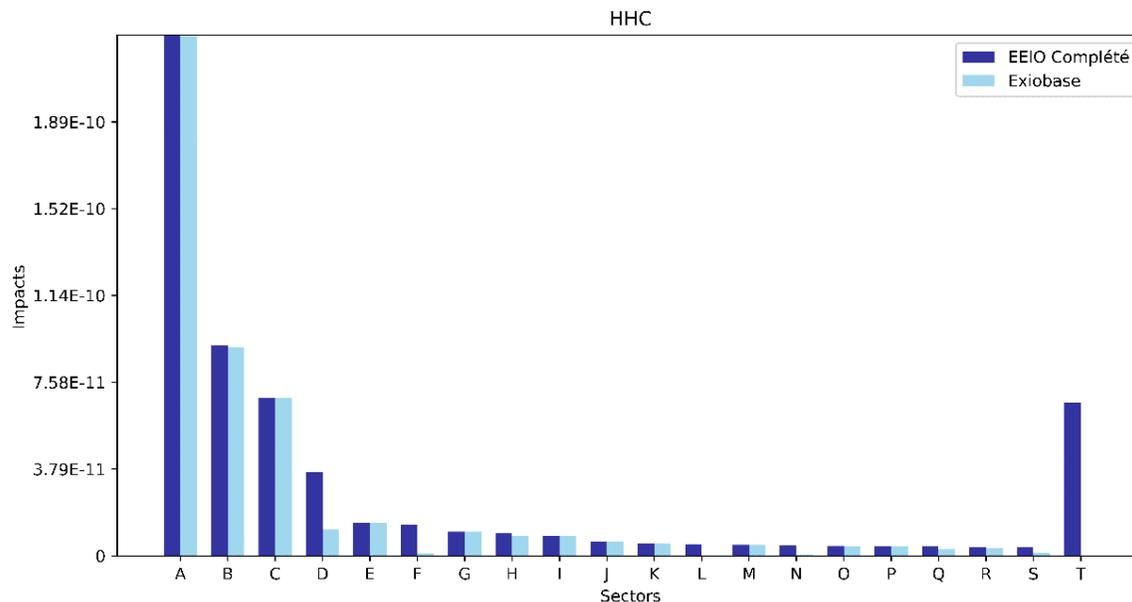


Figure F.2 : Étapes du cycle de vie, sommées sur l'ensemble des pays, les plus impactantes du secteur Hotels and restaurants, avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces mêmes secteurs dans EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

A = Sea and coastal water transport

B = Production of electricity by coal

C = Manufacture of basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof

D = Hotels and restaurants

E = Fishing, operating of fish hatcheries and fish farms; service activities incidental to fishing

F = Other land transport

G = Re-processing of secondary steel into new steel

H = Paper

I = Inland water transport

J = Copper production

K = Other business activities

L = Cultivation of crops nec

M = Production of electricity by biomass and waste

N = Extraction of natural gas and services related to natural gas extraction, excluding surveying

O = Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment

P = Chemicals nec

Q = Manufacture of cement, lime and plaster

R = Processing of Food products nec

S = Cultivation of cereal grains nec

T = Rest

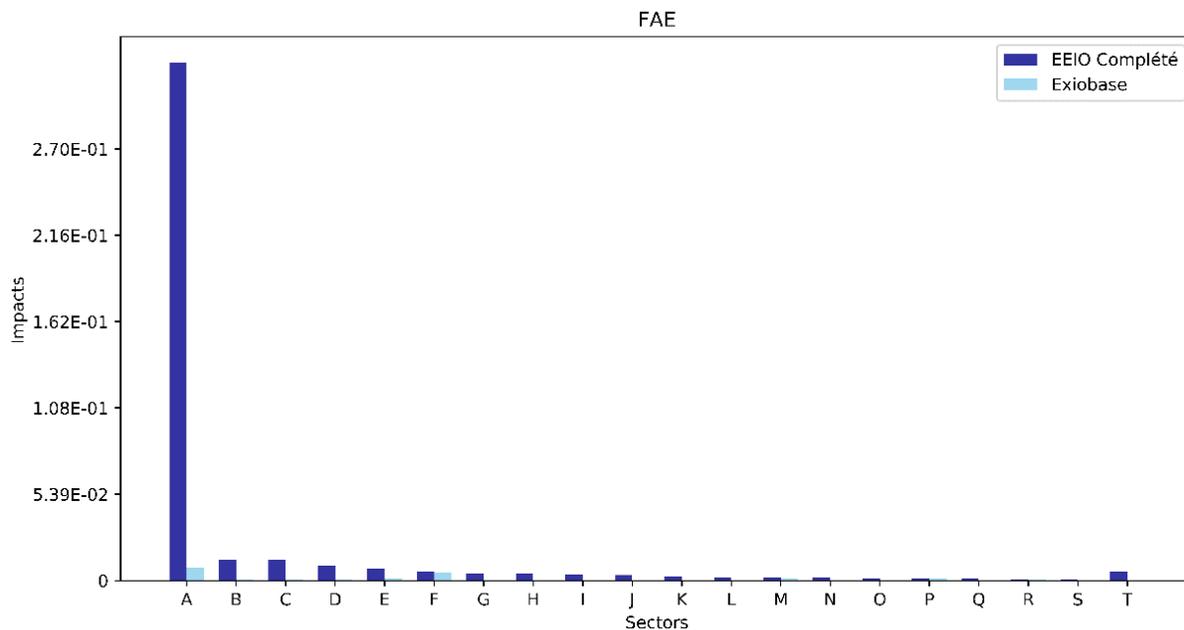


Figure F.3 : Régions du monde d'où proviennent le plus d'impacts liés au cycle de vie du secteur Hotels and restaurants, avec le MREEIO complété, dans la catégorie FAE, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces pays calculés avec l'EE d'EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

A = États-Unis

B = Reste de l'Amérique latine

C = Canada

D = Reste de l'Asie et du Pacifique

E = Canada

F = Grèce

G = Mexique

H = Inde

I = Brésil

J = Reste de l'Afrique

K = Reste du Moyen-Orient

L = Turquie

M = Allemagne

N = Italie

O = Indonésie

P = Norvège

Q = Espagne

R = Japon

S = France

T = Reste

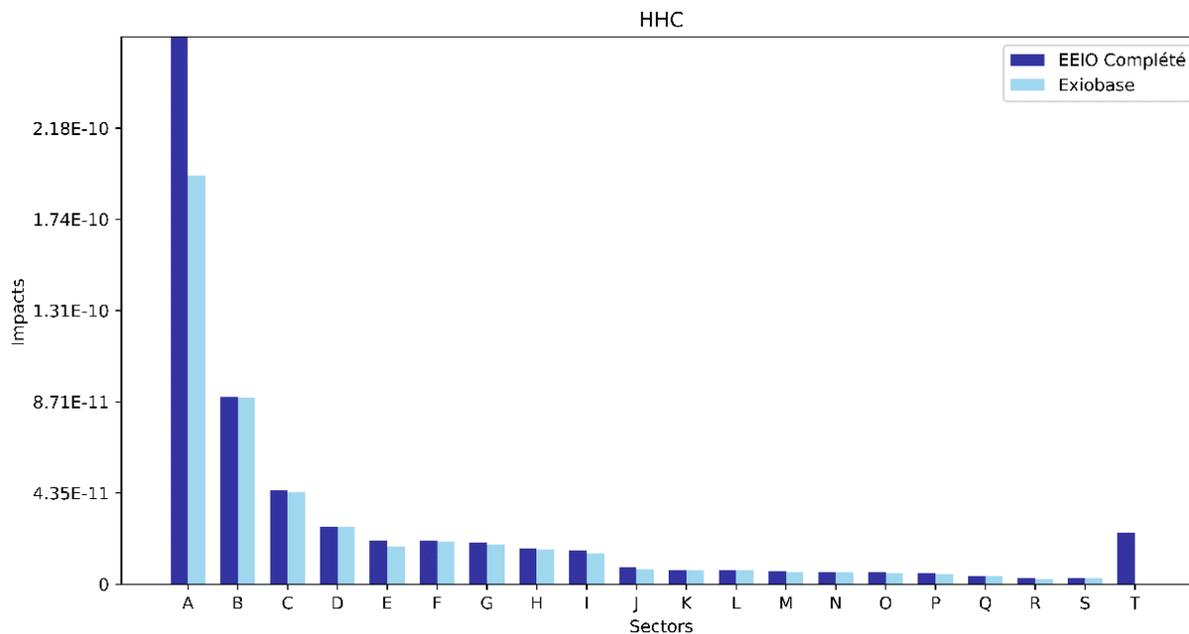


Figure F.4 : Régions du monde d'où proviennent le plus d'impacts liés au cycle de vie du secteur Hotels and restaurants, avec le MREEIO complété, dans la catégorie HHC, en unité d'impact par dollar d'euro de demande finale et comparaison avec les impacts de ces pays calculés avec l'EE d'EXIOBASE. (données extraites de USEEIO et d'EXIOBASE)

A = États-Unis

B = Grèce

C = Canada

D = Allemagne

E = Canada

F = Norvège

G = Reste de l'Asie et du Pacifique

H = Japon

I = Reste de l'Amérique latine

J = Reste du Moyen-Orient

K = Russie

L = Taïwan

M = Corée du Sud

N = Danemark

O = Brésil

P = Royaume-Uni

Q = Reste de l'Europe

R = Mexique

S = Suède

T = Reste du monde

ANNEXE G – ANALYSES COMPLÉMENTAIRES EN DEHORS DES ÉTATS-UNIS

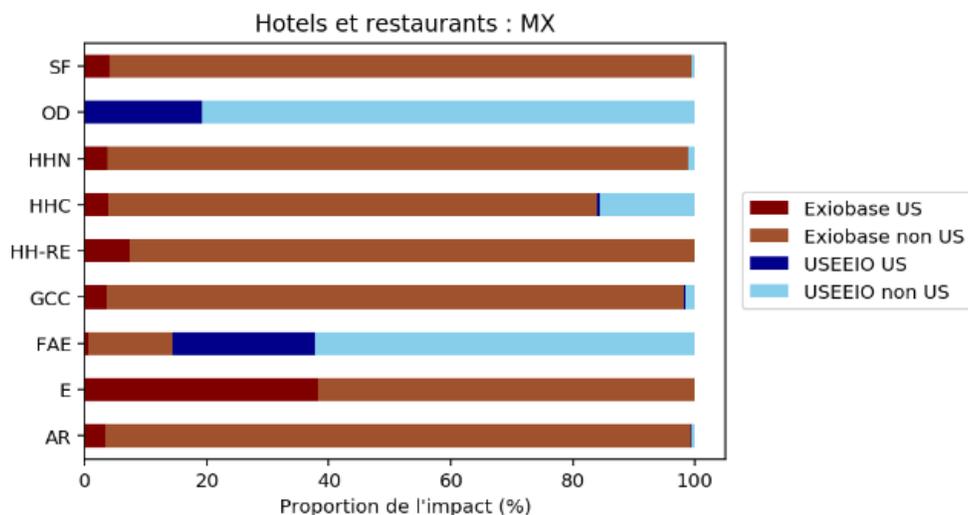


Figure G.1 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Mexique, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

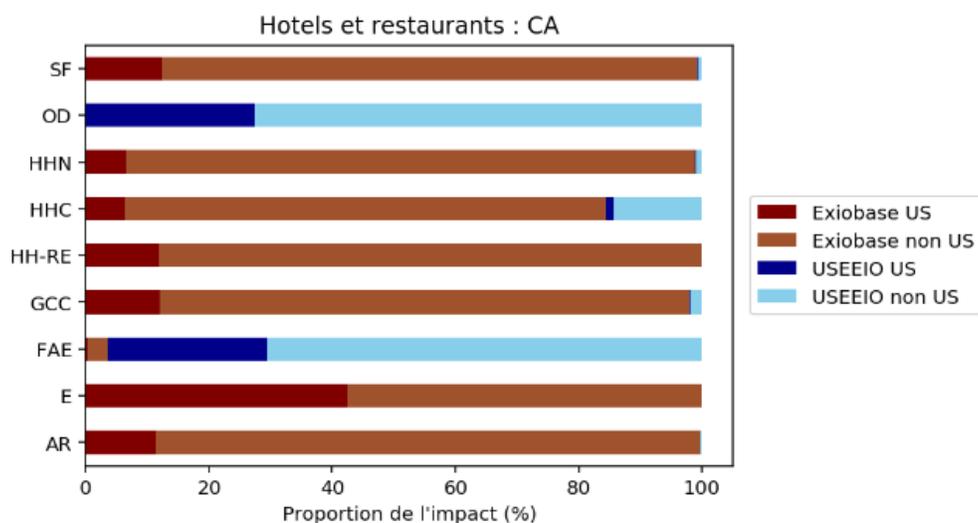


Figure G.2 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Canada, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

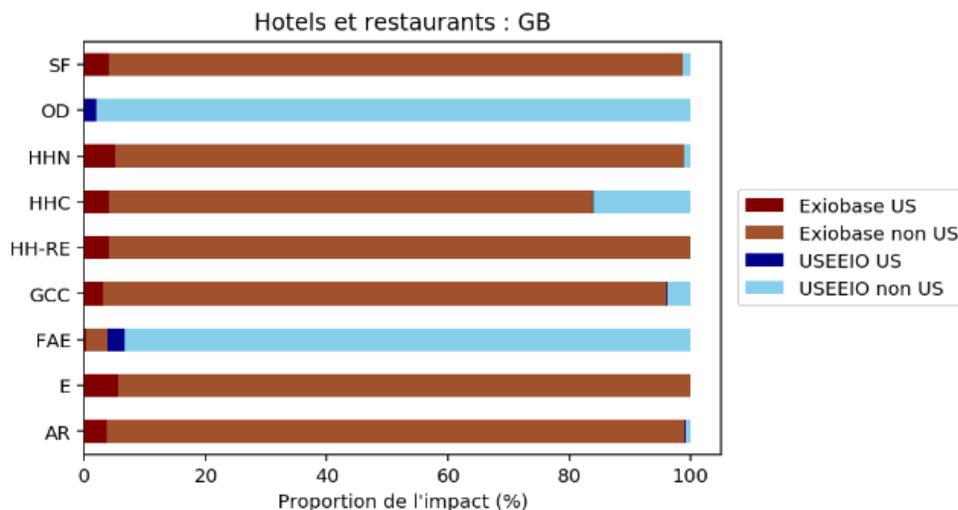


Figure G.3 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, au Royaume-Uni, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

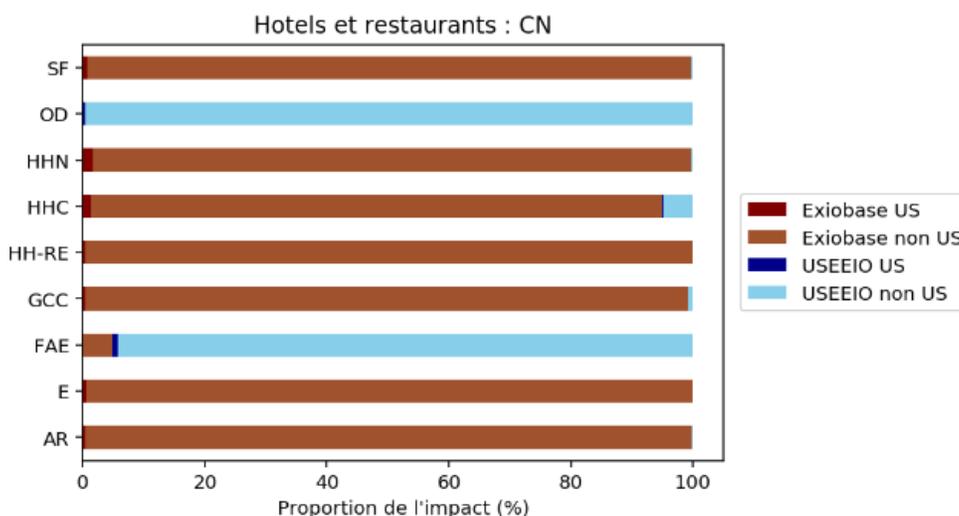


Figure G.4 : Répartition des impacts du secteur Hotels and restaurants, en perspective consommateur, en Chine, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

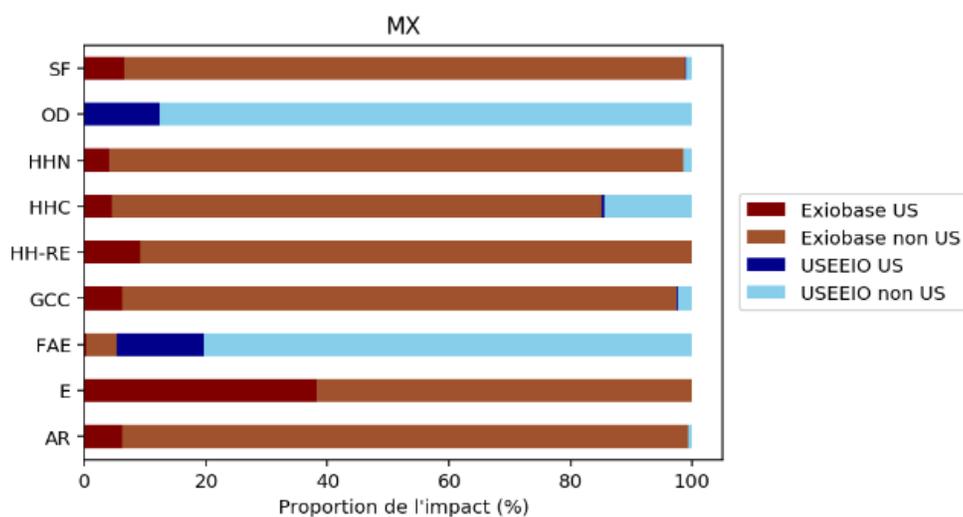


Figure G.5 : Répartition des impacts de l'économie totale du Mexique, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

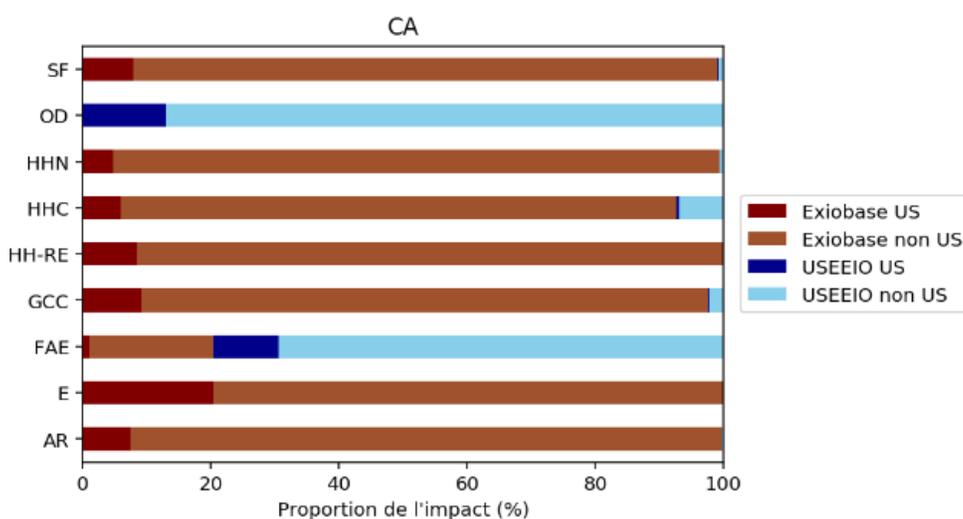


Figure G.6 : Répartition des impacts de l'économie totale du Canada, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

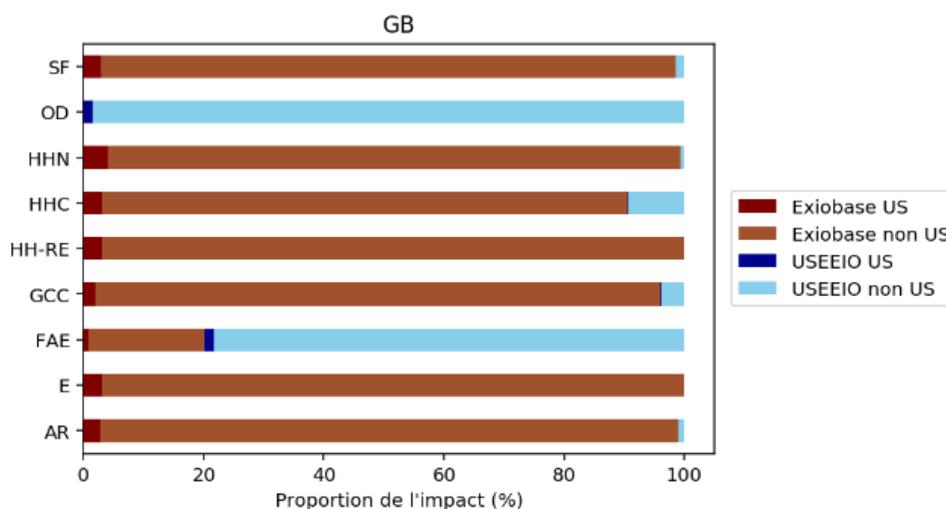


Figure G.7 : Répartition des impacts de l'économie totale du Royaume-Uni, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

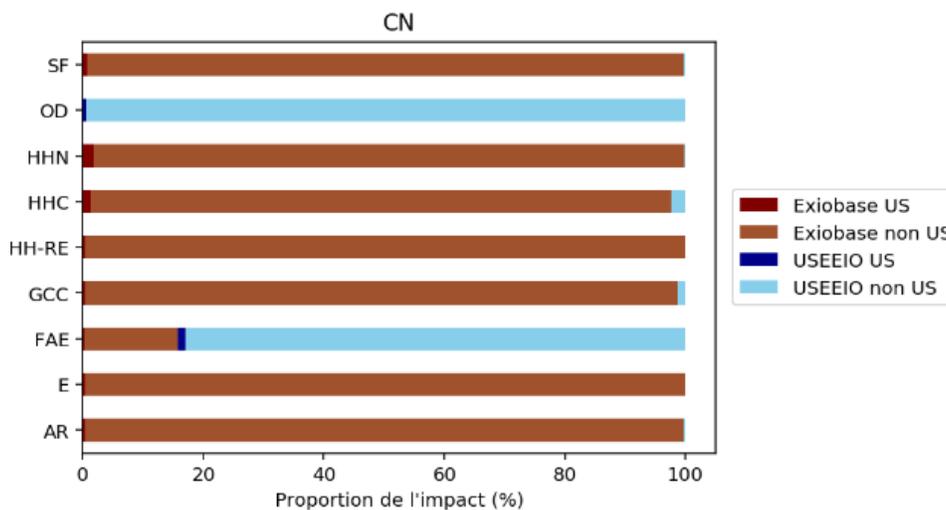


Figure G.8 : Répartition des impacts de l'économie totale de la Chine, en perspective consommateur, en fonction de la provenance des émissions ayant permis de les calculer, pour toutes les catégories d'impact.

ANNEXE H – COMPARAISON DES INVENTAIRES DES ÉMISSIONS COMMUNES DE USEEIO ET D'EXIOBASE

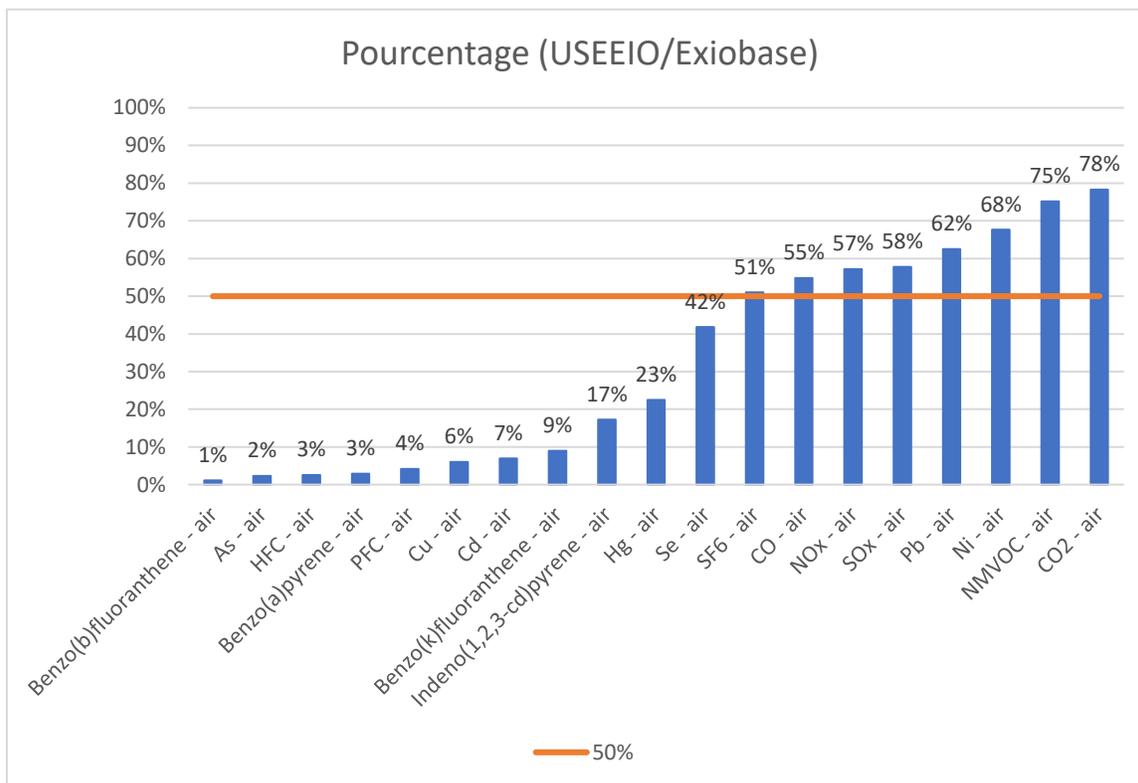


Figure H.1 : Comparaison des inventaires des émissions en commun entre USEEIO et EXIOBASE, sur la totalité de l'économie américaine, pour les émissions produites en quantité supérieure dans EXIOBASE que dans USEEIO. Plus la valeur se rapproche de 100 % plus les deux inventaires sont proches.

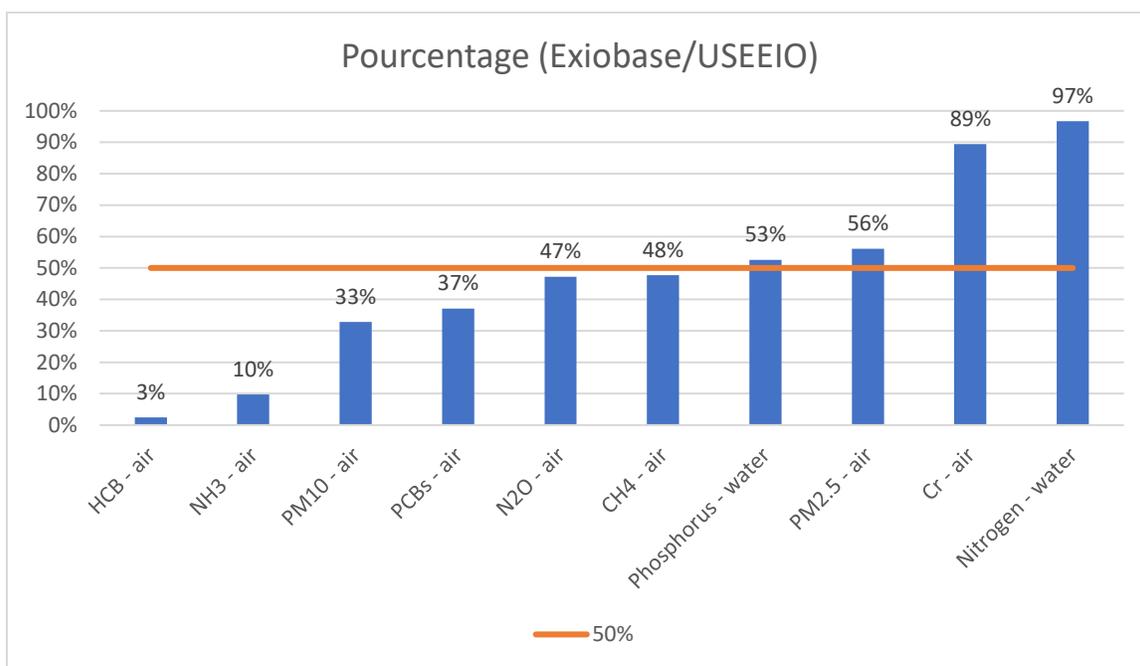


Figure H.2 : Comparaison des inventaires des émissions en commun entre USEEIO et EXIOBASE, sur la totalité de l'économie américaine, pour les émissions produites en quantité supérieure dans USEEIO que dans EXIOBASE. Plus la valeur se rapproche de 100 % plus les deux inventaires sont proches.

ANNEXE I – UNITÉS D'IMPACT POUR CHAQUE CATÉGORIE

Tableau I.1 : Unités utilisées pour chaque catégorie d'impact.

Catégorie d'impact	Unité d'impact
AR	kg SO ₂ eq
E	kg N eq
FAE	CTUe (Comparative Toxicity Unit = PAF.m ³ .jour)
GCC	kg CO ₂ eq
HH-RE	kg PM 2.5 eq
HHC	CTUcancer (Comparative Toxicity Unit = nombre de cas)
HHN	CTUoncancer (Comparative Toxicity Unit = nombre de cas)
OD	kg CFC-11 eq
SF	kg O ₃ eq