

LA METHODE INPUT-OUTPUT ET SON UTILISATION EN ACV

RAPPORT FINAL

Décembre 2015

Auteurs :

Guillaume Majeau-Bettez (CIRAIG/NTNU)
Dominique Maxime (CIRAIG)

Superviseurs et collaborateurs :

Valérie Patreau (CIRAIG)
Richard Wood, Diana Ivanova, Anders Arvesen (NTNU)

*CIRAIG,
École Polytechnique de Montréal, Canada*



*Programme d'Écologie Industrielle,
Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU), Norvège*



NTNU Industrial Ecology

L'association **SCORELCA** est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORELCA, La méthode Input-Output et son utilisation en ACV, 2015, 76 p., Étude n°2014-04/A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de **SCORELCA**.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Hélène Bortoli – ADEME, Daniel Dunet – Veolia R&I, Barbara Forrière – Renault, Jade Garcia – SCORE LCA, Denis Le Boulch – EDF, Laurent Meunier – ADEME, Stéphane Morel – Renault, Philippe Osset – SCORE LCA, Prabodh Pourouchottamin – EDF, Anne Prieur – ENGIE, Olivier Réthoré – ADEME, Hélène Stainton – Total, Christèle Wojewodka – Saint Gobain, Frédérique Bouvart – IFPEN, Emmanuel Hache – IFPEN.

RESUME

Ce rapport présente les résultats du projet intitulé « La méthode Input-Output et son utilisation en ACV » financé par SCORELCA et réalisé conjointement par le CIRAIG, Polytechnique de Montréal, et le Programme d'Écologie Industrielle, Université Norvégienne de Science et Technologie.

Ce document consiste d'abord en une revue descriptive et critique de la méthode Input-Output économique (IO), de son extension à l'analyse environnementale (EEIO), du positionnement de cette dernière par rapport à l'ACV traditionnelle, et des méthodes d'hybridation des approches EEIO et ACV. Il présente ensuite les cas d'étude de l'application de la méthode EEIO et de l'hybridation à deux ACV conventionnelles, d'une part l'ACV comparative d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel en Europe et, d'autre part, l'ACV d'un bâtiment d'habitation au Québec. Dans les deux cas, la mise en œuvre diffère : outils et bases de données différents, praticiens différents. L'opérationnalisation est décrite, les résultats sont comparés (ACV/EEIO/hybride), des enseignements et des recommandations en sont tirés. L'hybridation peut être mise en œuvre en suivant une démarche itérative qui est décrite, et qui est automatisable selon les données EEIO utilisées. Un outil d'automatisation a été développé. Enfin, des recommandations pour des développements futurs sont proposées.

MOTS CLES

Analyses entrées-sorties avec extensions environnementales (EEIO), Analyses de cycle de vie (ACV), Tableaux emplois-ressources, ACV-IO hybrides,

SUMMARY

This report presents the outcome of the project "Input-Output method and its use in LCA" sponsored by SCORELCA, jointly performed by the CIRAIG, Polytechnique Montréal, and the Industrial Ecology Programme, Norwegian University of Science and Technology.

First, based on a critical review of the literature and on our own experience, the present document describes the economic Input-Output method (IO), its extension to environmental analysis (EEIO) and its positioning to standard process LCA. Then, a focus on the hybridation of process LCA and EEIO is done. Two case studies are performed to apply EEIO analysis and hybrid LCA. On one hand it is applied to a comparative LCA of an electric and a conventional passenger in Europe, and to a residential building in Quebec (Canada), on the other hand. For both case studies, the operationalization differs: tools and database are different, and practitioners are different. The process is described, results are compared (process LCA vs. EEIO vs. hybrid LCA), and lessons are drawn. Hybridation can be implemented according to an iterative process which is presented and which can be automated (a tool has been developed that can deal with multiregional harmonized EEIO tables only, e.g. Exiobase). Lastly, recommendations for future developments are proposed.

KEY WORDS

Input-Output Analysis with environmental extensions (EEIO), Life-cycle assessment (LCA), Supply and use tables (SUT), Hybrid IO-LCA

TABLE DES MATIERES

1	Glossaire et Abréviations	7
2	Introduction.....	8
3	Synthèse des principes et des applications de la méthode d'analyse économique IO	9
3.1	Perspective historique	9
3.2	Principes de base et exemple	9
3.2.1	Compilation des tableaux IO	9
3.2.2	Les fondements du modèle des quantités en IO.....	12
3.3	Présuppositions et comparaison avec d'autres modèles économiques	13
3.4	Complexifications de la représentation entrées-sorties	15
3.4.1	Désagrégation de la consommation finale et de la valeur ajoutée.....	15
3.4.2	Frontières régionales et nationales : importations et exportations.....	16
3.4.3	Les différentes perspectives de prix	17
3.4.4	Temporalité.....	18
4	Analyses entrées-sorties avec extensions environnementales (EEIO)	20
4.1	Principes de base	20
4.2	Tableaux nationaux avec extensions environnementales.....	21
4.3	Tableaux multirégionaux avec extensions environnementales.....	24
5	Analyses Hybrides ACV et EEIO	27
5.1	Positionnement et complémentarités entre EEIO et ACV traditionnelle	27
5.2	Critères pour une analyse «hybride»	29
5.3	Hybridation avec tableau EEIO comme complément au tableau ACV	29
5.3.1	Méthode d'hybridation	30
5.3.2	Une approche itérative	32
5.3.3	Incertitude plutôt que biais systématique	32
5.3.4	Hybridation directe versus hybridation par paliers	32
5.4	Hybridation par désagrégation des tableaux EEIO	33
5.5	Choix de la méthode et du niveau d'hybridation	35
6	Cas d'étude	37
6.1	Cas d'étude no.1 : véhicule électrique et conventionnel	37
6.1.1	Présentation.....	37
6.1.2	Outils et méthodes.....	38
6.1.3	Résultats et analyse	45
6.2	Cas d'étude no.2 : bâtiment.....	50
6.2.1	Présentation.....	50
6.2.2	Outils et méthodes.....	55
6.2.3	Résultats et analyse	58
7	Enseignements et recommandations.....	63
7.1.1	L'analyse EEIO.....	63
7.1.2	L'hybridation et son fardeau	64
7.1.3	Recommandations.....	65
7.1.4	Recherche et développement et possibles améliorations futures.....	67
8	Conclusion.....	69
9	Bibliographie.....	70
10	Annexes	76

FIGURES

Figure 1: Tableaux simplifiés des ressources et des emplois, comptabilisant l'offre [supply] et l'utilisation [use] des commodités (rangées) par les industries et les ménages (colonnes), ainsi que la valeur ajoutée (salaires, profits, etc.), pour une région et une période donnée. Exemple fortement inspiré de UN (1999).	10
Figure 2: Tableau non normalisé d'entrées-sorties, suivant une classification par produit. La colonne «Électricité» compile les flux des différents produits (\mathbf{Z}) et la valeur ajoutée (\mathbf{va}) dédiés à la production d'électricité dans l'économie ; la rangée «Électricité» dénombre la consommation d'électricité dans la production des différentes commodités (\mathbf{Z}) et par les consommateurs finaux (\mathbf{h}). Les sommes des rangées et des colonnes se doivent d'être égales (\mathbf{x}).	11
Figure 3: Tableau normalisé de coefficient d'entrées sorties. La colonne «Électricité» compile la «recette» moyenne pour la production d'une unité (€) d'électricité, en terme des commodités requises (\mathbf{A}) et de valeur ajoutée normalisée (\mathbf{w}).	11
Figure 4: Calcul de la matrice inverse de Leontief (\mathbf{L} , gauche) à partir de la matrice de coefficients techniques (\mathbf{A})	13
Figure 5: Tableaux ressources-emplois présentant [1] une description plus détaillée de la consommation finale et de la valeur ajoutée, et [2] les importations et exportations avec d'autres régions.	16
Figure 6: Tableau IO multirégional, avec interdépendance entre produits locaux pour chaque région (\mathbf{Z} , gris foncé, sur la diagonale) et valeur ajoutée et consommation finale locales (\mathbf{va} et \mathbf{h} , gris foncé), combinée aux interdépendances entre produits de différentes régions (\mathbf{Z} , gris pâle) et l'importation directe par les ménages de biens étranges (\mathbf{h} , gris pâle)	17
Figure 7: Tableau ressources-emplois en prix de base, prix du producteur et prix d'acquisition	18
Figure 8: Extensions environnementales normalisées (\mathbf{F}) à la matrice de coefficients techniques d'entrées-sorties (\mathbf{A}).	20
Figure 9: Tableau IO multirégional avec extensions environnementales	24
Figure 10: Hybridation d'un processus ACV (partie A, en bleu, à gauche) avec un secteur IO (partie A, en noir, à droite), lequel est multiplié par un prix pour obtenir des intrants par kilogramme de produit (partie B, en noir, à gauche). La double représentation de certains intrants est ensuite évitée en enlevant les intrants de secteurs économiques déjà représentés dans la partie ACV (partie B, boîte rouge) pour compléter l'hybridation (partie C, à gauche).	31
Figure 11: Représentation graphique de la matrice de coefficients techniques (\mathbf{A}) avec extensions environnementales (\mathbf{F}) pour une ACV hybride directe (gauche) et par paliers (droite). Le long de la diagonale de la matrice \mathbf{A} , on retrouve la description de l'avant-plan (\mathbf{A}_{ff}), la base de données ACV d'arrière-plan (p. ex. ecoinvent ; \mathbf{A}_{bb}), et le tableau IO (\mathbf{A}_{IO}). Dans l'hybridation par paliers, les processus de l'avant-plan utilisent des intrants à partir de l'arrière-plan (\mathbf{A}_{bf}) et à partir du tableau IO (\mathbf{A}_{IO-f}). Au contraire, l'hybridation directe n'inclut pas la base de données d'arrière-plan.	33
Figure 12: Hybridation par désagrégation, divisant un secteur agrégé de l'économie en deux secteurs: un processus détaillé (bleu foncé) et un résiduel (bleu pâle). Cette approche conserve tous les équilibres du tableau IO, qui se trouve bonifié et peut être réutilisé dans d'autres études.	35
Figure 13: Processus itératif mis en œuvre pour l'hybridation.	39
Figure 14: Chargement du modèle d'étude et des données d'inventaire (processus et EEIO) et de caractérisation des impacts avec le logiciel pyLCAIO.	39
Figure 15: Structure de l'avant-plan du système « véhicule électrique » (CN : Chine, CA : Canada, EU : Union européenne, BMS : Battery Management System).	41
Figure 16: Regroupement de produits en catégories dans le logiciel pyLCAIO pour gérer le double comptage.	43
Figure 17: Hybridation dans le logiciel pyLCAIO du processus ACV « Battery cell » avec le processus EEIO « Electrical machinery and apparatus, n.e.c. » de la table chinoise de Exiobase, et exclusion des flux des matériaux, des énergies et des transports pour gérer le double comptage.	43

Figure 18: Automatisation de l'hybridation dans le logiciel pyLCAIO de toutes les pièces en acier de la batterie qui sont manufacturées en Chine.	44
Figure 19: Scores d'impact, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV (ACV) et par EEIO (IO).....	46
Figure 20: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV, par EEIO et par analyse hybride. Pour l'analyse hybride, les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.....	47
Figure 21: Scores d'impact, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.....	48
Figure 22: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.....	49
Figure 23: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau au tombeau, d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.....	50
Figure 24: Bâtiment d'habitation collective considéré dans le cas d'étude (gauche), et coupe transversale d'un panneau de bois lamellé-croisé (droite). Crédit photo : Société d'Habitation du Québec.	51
Figure 25: Étapes et opérations d'avant-plan du système évalué.	52
Figure 26: Contributions aux dommages des différentes étapes et sous-étapes/matériaux sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV processus (méthode IMPACT 2002+).	59
Figure 27: Contributions aux impacts des différentes étapes sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV processus (méthode ReCiPe).	59
Figure 28: Comparaison des scores d'impacts pour le bâtiment analysé par l'ACV (ACV) et l'analyse EEIO (IO). Méthode ReCiPe; les scores sont normalisés sur ceux de l'ACV. (CC: Climate change; OD: Ozone depletion; tAC: Terrestrial acidification; FWEu: Freshwater eutrophication; Meu: Marine eutrophication; Htox: Human toxicity; POF: Photochemical oxidant formation; PM: Particulate matter formation; Tetox: Terrestrial ecotoxicity; FWetox: Freshwater ecotoxicity; Metox: Marine ecotoxicity; IR: Ionising radiation; AgLU: Agricultural land occupation; UrbLU: Urban land occupation; NLUC: Natural land transformation; WD: Water depletion; MD: Metal depletion; FD: Fossil depletion).	60
Figure 29: Contributions aux impacts des différentes étapes sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV hybride (méthode ReCiPe). La figure distingue la part initiale des impacts évalués avec l'ACV et la part ajoutée par les processus EEIO modifiés (IO) pour les quatre principales étapes.....	61
Figure 30: Contributions aux impacts de l'ACV hybride amendée des services modélisés par EEIO (méthode ReCiPe).....	62
Figure 31: Estimé du score d'impact sur les changements climatiques pour le véhicule électrique (du berceau à l'usine) en fonction des passes d'hybridation.	64

1 Glossaire et Abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie « processus »
ALENA	Accord de libre-échange nord-américain
CEDA	<p><i>Comprehensive Environmental Data Archive</i></p> <p><i>CEDA is a suite of environmentally extended input-output databases that are designed to assist various environmental systems analyses and Life Cycle Assessments, including carbon footprinting, water footprinting and embodied energy analysis. The CEDA quantifies the amount of natural resources use and environmental emissions of products throughout their life-cycles by connecting input-output tables, which represent the entire supply-chain network of an economy, with a comprehensive list of environmental interventions including natural resource types (fossil fuels, water, metals ores and minerals), and various emissions to air, water and soil.</i></p> <p>Dans le cadre de ce projet, il est utilisé la version de CEDA qui se rapporte aux États-Unis pour l'année 2002, telle qu'offerte avec le logiciel ACV SimaPro (v8.05.13), et qui utilise une allocation économique.</p>
CPA	<p><i>Classification of Product by Activity</i></p> <p>Classification et codage des produits (env. 3000 sous-catégories) utilisé par Eurostat. http://ec.europa.eu/eurostat/web/cpa-2008</p>
EEIO	<p><i>Environmentally extended Input-Output</i></p> <p>Tables économiques étendues de flux environnementaux pour servir de modèles à l'analyse environnementale selon une approche cycle de vie fondée sur les échanges économiques des secteurs interconnectés d'une économie nationale ou multirégionale.</p>
EICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
GES	Gaz à effet de serre
ICV	Inventaire du cycle de vie
IO	<p><i>Input-Output</i></p> <p>Tables, modèles et analyse économique Entrées-Sorties</p>
ISIC	<i>International Standard Industrial Classification</i>
SCEE	Système de comptabilité économique et environnementale
SCIAN	<p>Système de classification des industries de l'Amérique du Nord. http://www.census.gov/eos/www/naics/</p>
SPA	<p><i>Structural Path Analysis</i></p> <p>Analyse qui permet d'identifier les principaux canaux de contribution aux impacts du système évalué</p>
Prix de base	Prix corrigé pour l'influence des subventions, taxes, marges commerciales et marges de transport
A	Matrice des coefficients techniques (matrice technologique)
I	Matrice identité
L	Matrice de Leontief (Leontief, 1970)

2 Introduction

Cette étude s'intéresse au potentiel ainsi qu'à la mise en œuvre de la méthode et des données dites « entrées-sorties » (IO)¹ pour réaliser des analyses du cycle de vie environnementales. Une des applications les plus avancées consiste en l'hybridation de données ACV traditionnelles avec des données IO. Un des premiers exemples d'hybridation remonte à Bullard et al. (1976), mais ce n'est que dans les années 1990 (Moriguchi et al. 1993; Treloar 1997) et 2000 que l'ACV hybride fut développée et formellement décrite (Suh et al. 2004, par exemple). En dépit de leurs avantages théoriques, les ACV hybrides demeurent relativement rares, phénomène explicable en partie par des considérations pratiques. Ces analyses nécessitent en effet l'acquisition de données additionnelles (telles le prix des produits), elles sont plus complexes (pour pallier au risque de double comptage), et sont donc perçues comme plus onéreuses en terme de ressources et de temps (Finnveden et al. 2009).

Les objectifs de cette étude sont de :

- Faire un point sur la méthode IO d'analyse économique, sur son extension à l'analyse environnementale (EEIO)², et sur l'état de l'art des approches d'hybridation de l'EEIO avec l'ACV traditionnelle et leur facilité de mise en œuvre ;
- Réaliser deux cas d'étude concrets démontrant l'intérêt, les limitations et la facilité des différentes méthodes (EEIO, ACV, ACV hybride) ;
- En tirer des enseignements pratiques, applicables dans les études d'ACV des membres de **SCORELCA**.

Pour réaliser ce travail, SCORELCA a fait appel à une équipe multidisciplinaire avec une expertise en ACV, en EEIO, et en hybridation d'outils d'analyse en écologie industrielle. Cette équipe unit deux centres de recherche, soit le CIRAIG (Polytechnique Montréal, Canada) et le Programme d'Écologie Industrielle à l'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU, Norvège).

Au-delà d'aspects théoriques, ce rapport met également l'accent sur des considérations pratiques telles que la disponibilité et l'accès aux données, les outils et logiciels disponibles et/ou nécessaires, et le niveau d'expertise requis pour passer des données à l'analyse. Ainsi, ce rapport donne une vue d'ensemble des obstacles pratiques liés à l'utilisation de l'EEIO par tout praticien ACV. La finalité reste bien sûr d'évaluer, entre autres :

- si le fardeau supplémentaire apporte une valeur ajoutée à l'ACV traditionnelle, comme l'identification de sources d'impacts totalement négligées par l'ACV ou une meilleure complétude de l'inventaire de chaque processus/opération (qualité des résultats) ;
- si la combinaison de l'EEIO et l'ACV permet réellement des gains en efficacité en orientant le travail lors de chaque phase d'une ACV³, par exemple lors de l'étape de collecte de données, lors de la modélisation ;

Notes :

1. Par la suite, tout au long de ce rapport, il est entendu par « ACV » la méthode traditionnelle d'analyse du cycle de vie basée sur des processus qui délivrent des produits. *Ecoinvent* est un exemple reconnu de base de données d'inventaire de cycle de vie (ICV) orientée processus.
2. Le lecteur est renvoyé au glossaire figurant au début de ce rapport (section 1) pour la définition de certains termes technico-économiques.
3. Tout au long de ce rapport, les matrices sont désignées en gras par des lettres majuscules; les vecteurs en gras par des lettres minuscules.

1 en anglais « input-output », soit IO. L'abréviation IO est utilisée par la suite tout au long de ce rapport.

2 EEIO: Environmentally Extended Input-Output.

3 La réalisation d'une ACV est un processus itératif selon quatre phases (ISO, 2006) : la définition des objectifs et du champ de l'étude, la compilation de l'inventaire du cycle de vie (ICV), l'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) et la phase d'analyse et d'interprétation.

3 Synthèse des principes et des applications de la méthode d'analyse économique IO

3.1 Perspective historique

Les analyses entrées-sorties représentent l'économie comme un réseau de processus de transformation qui dépendent les uns des autres. Les premiers fondements de ces analyses remontent au «Tableau économique» de Quesnay (1758). Plus tard, Geddes (1884) présente ce qui peut être considéré comme un premier tableau entrées-sorties compilé en unités physiques (Fischer-Kowalski 1998).

C'est toutefois Wassily W. Leontief (1936; 1949) qui jette les bases théoriques et pratiques des analyses entrées-sorties, contribution qui lui vaudra le prix Nobel d'économie en 1973. La compilation de tableaux entrées-sorties fut ensuite grandement simplifiée et améliorée par le développement et l'intégration des tableaux de comptabilité nationale par Richard Stone, contribution pour laquelle il recevra le prix Nobel en 1984 (United Nations 1999).

3.2 Principes de base et exemple

3.2.1 Compilation des tableaux IO

Cette section décrit les principes de base pour la compilation d'inventaires nationaux (en tableaux ressources-emplois) et leur transformation en tableaux entrées-sorties. Ces étapes sont typiquement prises en charge par les agences de statistiques et les groupes de recherche qui compilent les bases de données IO ; le praticien qui utilise un tableau IO précompilé n'a pas à appliquer ces étapes. Cette section vise donc à clarifier les origines et principes qui sous-tendent les tableaux IO précompilés.

Toute analyse IO commence avec l'observation de l'ensemble de l'activité économique d'une région —typiquement un pays, mais pas nécessairement, voir section 3.4.2— au cours d'une période donnée. Depuis 1968, cet inventaire prend la forme d'un *tableau des ressources et des emplois* [supply and use table] (United Nations 1999), comme illustré par la figure 1.

Les différents acteurs économiques sont regroupés en industries (ou secteurs), qui définissent les colonnes des tableaux, tandis que les différents produits et services qu'ils échangent définissent les rangées. La production de commodités par chaque industrie est compilée dans le tableau des ressources (la matrice **V**). L'utilisation de commodités par ces mêmes industries est notée dans le tableau des emplois (la matrice **U**). La consommation «finale» de commodités par les ménages et les gouvernements est représentée à part (vecteur **h**). Tout flux qui ne peut être considéré comme un échange de commodité est représenté dans des extensions; pour une analyse économique, cela se résume typiquement à la valeur ajoutée (**va**), notamment le paiement des salaires et les profits.

La somme de chaque rangée donne la production ou la consommation totale des différentes commodités (**q**; vecteurs verticaux, en gris dans la figure 1). La somme de chaque colonne donne la production ou la consommation totale des différentes industries (**g**; vecteurs horizontaux, en gris dans la figure 1). La somme totale, tous produits ou industries confondus, donne le produit intérieur brut (PIB; en gris foncé dans la figure 1).

Par exemple, l'industrie nucléaire produit 150€ d'électricité et utilise pour cela 15€ de produits manufacturés, 60€ de services et 75€ de valeur ajoutée. L'économie produit un total de 200€ d'électricité, consommée à hauteur de 30€ par l'industrie manufacturière, de 30€ par le secteur des services et de 140€ par les ménages.

[€]		Industrie Manufacturière	Industrie Nucléaire	Industrie Solaire	Secteur des Services	Ménages	Total
Tableaux des ressources [supply]							
Prod. manufacturés		100	0	0	0		100
Électricité	V :	0	150	50	0		q : 200
Services		0	0	0	150		150
total industries	g :	100	150	50	150		PIB = 450
Tableaux des emplois [use]							
Prod. manufacturés		0	15	5	45		
Électricité	U :	30	0	0	30	h :	q : 200
Services		0	60	20	0		150
Valeur ajoutée	va :	70	75	25	75		
total industries	g :	100	150	50	150		PIB= 450

Figure 1: Tableaux simplifiés des ressources et des emplois, comptabilisant l'offre [supply] et l'utilisation [use] des commodités (rangées) par les industries et les ménages (colonnes), ainsi que la valeur ajoutée (salaires, profits, etc.), pour une région et une période donnée. Exemple fortement inspiré de UN (1999).

On remarque à la figure 1 que les vecteurs totaux **q** et **g** sont calculés chacun deux fois. Cette redondance dans la comptabilité assure l'équilibre des marchés. En effet, puisque la totalité de l'activité économique y est représentée, les tableaux des ressources et des emplois se doivent de respecter l'équilibre entre l'offre et la demande. La production totale de chaque commodité (**q** = somme des rangées de **V**) doit évaluer sa consommation totale par les différentes industries et par les consommateurs finaux (**q** = somme des rangées de **U** et **h**).

Les comptes de chaque industrie doivent également être équilibrés: la somme de ses ventes (**g** = somme des colonnes de **V**) doit évaluer la somme de ses achats et de sa valeur ajoutée (**g** = somme des colonnes de **U** et de **va***).

À partir de cet inventaire économique équilibré des industries et des marchés, une représentation symétrique⁴ est construite. On passe d'une description de l'économie en termes d'industries utilisant et fournissant des commodités (figure 1) à un tableau qui décrit quelles commodités servent à la production de quelles commodités (**Z**, figure 2). Autrement dit, on élimine les industries de notre représentation de l'économie, et on se concentre sur l'interdépendance entre les différentes commodités. Différents modèles, collectivement connus sous le nom de constructions [constructs], permettent de passer d'un tableau ressources-emplois à un tel tableau symétrique aux dimensions commodités-par-commodités⁵ (Jansen et ten Raa 1990; European Commission 2008; Suh et al. 2010)

Ces constructions sont plus aisément comprises comme la combinaison de deux étapes (Majeau-Bettez, Wood, et Strømman 2014): d'abord une étape d'allocation (proche des méthodes typiques de partition et de substitution utilisées en ACV) pallie les situations où une industrie coproduit plus d'une commodité, et ensuite une étape d'agrégation calcule une technologie moyenne globale pour la production de chaque commodité.⁶

L'exemple de la figure 1 ne contient aucune coproduction et ne nécessite donc aucune allocation, mais on peut voir que la colonne *Électricité* de la figure 2 résulte de l'agrégation des intrants affectés à

4 Pour ce rapport, le terme *symétrique* signifie que les rangées et les colonnes suivent la même classification et ont le même niveau de résolution.

5 À l'inverse, une autre catégorie de constructions permet d'éliminer les commodités de la description économique et représente l'économie comme une collection d'industries interdépendantes, menant à un tableau entrées-sorties aux dimensions industries-par-industries. De tels tableaux sont trop éloignés des pratiques en ACV et dépassent les objectifs de ce rapport. Le lecteur intéressé se référera à Rueda-Cantucho et ten Raa (2009).

6 Les constructions les plus utilisées en analyses entrées-sorties sont la construction par technologie de commodité [commodity-technology construct (CTC)], la construction par technologie d'industrie [industry-technology construct (ITC)], et la construction par technologie de sous-produit [byproduct-technology construct (BTC)] (European Commission 2008; Jansen et ten Raa 1990). Voir également Suh et al. (2010).

la production d'électricité dans l'industrie nucléaire et ceux affectés à la production d'électricité dans l'industrie solaire. On obtient donc une description globale de la production d'électricité, toutes industries confondues. De façon similaire, la valeur ajoutée n'est plus exprimée par rapport à la production par chaque industrie (va_*), mais bien par rapport à la production de chaque commodité (va).

[€]		Produits manufacturés	Électricité	Services	Ménages	total
Prod. manufacturés		0	20	45	35	100
Électricité	Z :	30	0	30	140	200
Services		0	80	0	70	150
Valeur ajoutée	va :	70	100	75		
total	x' :	100	200	150		

Figure 2: Tableau non normalisé d'entrées-sorties, suivant une classification par produit. La colonne «Électricité» compile les flux des différents produits (**Z**) et la valeur ajoutée (**va**) dédiés à la production d'électricité dans l'économie ; la rangée «Électricité» dénombre la consommation d'électricité dans la production des différentes commodités (**Z**) et par les consommateurs finaux (**h**). Les sommes des rangées et des colonnes se doivent d'être égales (**x**).

Cette nouvelle représentation est également assujettie à un équilibre financier : les coûts associés à la production de chaque commodité (sommes des colonnes, vecteur horizontal x' , en gris) doivent égaler le montant de ses ventes (somme des rangées, vecteur vertical x , en gris) (Jansen et ten Raa 1990; Majeau-Bettez et al. 2015; Majeau-Bettez, Wood, et Strømman 2015).

Cette représentation est ensuite *normalisée* par rapport à la production totale de chaque commodité, ce qui transforme la matrice de flux (**Z**) en une matrice de coefficients techniques (**A**), accompagnée par des valeurs ajoutées normalisées (**w**; Figure 3). Chaque colonne constitue donc une sorte de « recette de cuisine » pour produire une commodité (Leontief 1970). Ainsi, pour cet exemple, produire 1 € d'électricité requiert, en moyenne, 0.10 € de produits manufacturés, 0.40 € de services, et 0.50 € de paiement de valeur ajoutée (salaires, etc.).

[€/€]		Produits manufacturés	Électricité	Services
Prod. manufacturés		0	0.10	0.30
Électricité	A :	0.30	0	0.20
Services		0	0.40	0
Valeur ajoutée	w :	0.70	0.50	0.50
total		1.0	1.0	1.0

Figure 3: Tableau normalisé de coefficient d'entrées sorties. La colonne «Électricité» compile la «recette» moyenne pour la production d'une unité (€) d'électricité, en terme des commodités requises (**A**) et de valeur ajoutée normalisée (**w**).

La somme de chaque colonne normalisée doit égaler 1, ce qui permet de vérifier l'équilibre financier (Miller et Blair 2009).

3.2.2 Les fondements du modèle des quantités en IO

Cette section présente les principes de base de l'un des deux⁷ modèles fondamentaux de l'IO : le modèle des quantités, où l'on calcule la production totale requise dans l'économie pour satisfaire une demande finale du consommateur. Cette étape fait partie du calcul du cycle de vie, tant en EEIO qu'en ACV classique.

Dans cette section, la matrice des coefficients techniques (**A**) est utilisée dans une analyse IO pour répondre à une question : Quelle serait la production totale de chaque commodité (**x**) pour une consommation finale donnée (**y**) ? Ou, en d'autres termes, quelle production peut être associée au cycle de vie (du berceau au consommateur) d'une consommation finale donnée ?

Par exemple, toutes choses étant égales par ailleurs, quelle serait la production totale d'électricité nécessaire pour subvenir à une demande finale par les ménages de 45 € de produits manufacturés, 160 € d'électricité, et 70 € de services (**y'** = [45, 160, 70]) ?

La production totale d'électricité (x_{el} , valeur inconnue) dépend de la consommation finale par les ménages ($y_{el} = 160$ €) et la consommation intermédiaire d'électricité dans chaque production. La consommation intermédiaire d'électricité pour la production de services dépend des besoins en électricité selon leur recette technologique ($a_{el-serv} = 0.2$) ainsi que de leur volume de production (x_{serv} , inconnu), c'est-à-dire la multiplication $a_{el-serv}x_{serv}$. De même, la consommation d'électricité pour la production de biens manufacturés dépend de leur recette technologique ($a_{el-man} = 0.3$) et de leur volume de production (x_{man} , inconnu), c'est-à-dire $a_{el-man}x_{man}$. Ainsi, en se basant sur l'équilibre des marchés, l'équation 1 représente la production totale d'électricité en fonction de la consommation finale et de la consommation intermédiaire, exprimée en termes de trois volumes de production inconnus (x_{man} , x_{el} , x_{ser}).

$$x_{el} = a_{el-man} x_{man} + a_{el-el} x_{el} + a_{el-ser} x_{ser} + y_{el} \quad (1)$$

De façon similaire, les équations 2 et 3 décrivent l'équilibre entre l'offre et la demande pour les biens manufacturés et pour les services, respectivement.

$$x_{man} = a_{man-man} x_{man} + a_{man-el} x_{el} + a_{man-ser} x_{ser} + y_{man} \quad (2)$$

$$x_{ser} = a_{ser-man} x_{man} + a_{ser-el} x_{el} + a_{ser-ser} x_{ser} + y_{ser} \quad (3)$$

On se retrouve ainsi avec un système de trois équations avec trois inconnues, et le système peut donc être résolu par simple algèbre linéaire. L'ensemble de ces trois équations est plus aisément représenté en notation matricielle

$$x = Ax + y \quad (4)$$

Cette équation est résolue en isolant le vecteur **x**, en réorganisant l'équation comme suit,

$$x - Ax = y \quad (5)$$

$$(I - A)x = y \quad (6)$$

$$x = (I - A)^{-1} y \quad (7)$$

où la variable **I** désigne une matrice identité⁸ aux dimensions appropriées.

Ainsi donc, pour connaître la production totale requise dans l'économie pour satisfaire une demande finale **y**, il suffit de multiplier ce vecteur de demande finale par la matrice $(I - A)^{-1}$. Cette matrice n'est nulle autre que la célèbre « matrice inverse de Leontief » [Leontief Inverse] (**L**), telle que décrite dans l'équation 8.

$$L = (I - A)^{-1} \quad (8)$$

7 L'autre modèle fondamental des analyses entrées-sorties, le modèle des prix, n'est pas inclus dans ce rapport car il est trop éloigné de la pratique ACV et de l'analyse environnementale. Le lecteur intéressé se référera à Duchin (2009).

8 Une matrice carrée, avec les entrées sur la diagonale égales à 1 et les autres valeurs égales à 0.

Dans cette matrice, les colonnes représentent la production totale dans l'économie pour fournir une unité de chaque produit au consommateur final. Ainsi, fournir 1 € d'électricité au consommateur final requiert une certaine activité dans chaque secteur économique: la production de 0.26 € de produits manufacturés, de 1.17 € d'électricité et de 0.47 € de services.

	Prod. Man.	Élect.	Serv.
Prod. man.	1.08	0.26	0.37
Électricité	0.35	1.17	0.34
Services	0.14	0.47	1.14

$$= \mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.1 & -0.3 \\ -0.3 & 1.0 & -0.2 \\ 0.0 & -0.4 & 1.0 \end{bmatrix}^{-1}$$

Figure 4: Calcul de la matrice inverse de Leontief (\mathbf{L} , gauche) à partir de la matrice de coefficients techniques (\mathbf{A})

La matrice \mathbf{L} permet donc, par simple multiplication, de calculer la production totale (\mathbf{x}) du «berceau au consommateur» [cradle-to-gate] pour une consommation finale fictive (\mathbf{y}), tel qu'indiqué par l'équation 9 (Miller et Blair 2009).

$$\mathbf{x} = \mathbf{L} \mathbf{y} \tag{9}$$

$$\begin{matrix} \text{Prod. man.} \\ \text{Électricité} \\ \text{Services} \end{matrix} \mathbf{x} : \begin{bmatrix} 116 \\ 227 \\ 161 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.08 & 0.26 & 0.37 \\ 0.35 & 1.17 & 0.34 \\ 0.14 & 0.47 & 1.14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 45 \\ 160 \\ 70 \end{bmatrix} \tag{10}$$

On peut enfin répondre à notre question initiale : la consommation finale de 45 € de produits manufacturés, 160 € d'électricité, et 70 € de services ($\mathbf{y}' = [45, 160, 70]$) requiert une production totale de 116 € de produits manufacturés, 227 € d'électricité, et 161 € de services ($\mathbf{x}' = [116, 227, 161]$).

Ce calcul du modèle des quantités —qui est parfois exprimé avec une notation différente mais équivalente (Heijungs et Suh 2002; Peters 2006)— se retrouve au cœur de toute analyse IO ou ACV. Les échanges entre les processus dans la base de données *ecoinvent* (2013), par exemple, peuvent être organisés en une matrice \mathbf{A} de coefficients techniques.⁹ *L'IO et l'ACV partagent donc les mêmes fondements mathématiques et bon nombre de présuppositions.*

3.3 Présuppositions et comparaison avec d'autres modèles économiques

Les tableaux entrées-sorties sont des modèles fort simplifiés de l'économie. Cette section présente les principales présuppositions du modèle des quantités en IO. Ces présuppositions sont comparées avec celles d'autres modèles apparentés à l'analyse IO, notamment les modèles de programmation linéaire¹⁰ et d'équilibre général. Ceci permet d'identifier, sur le plan théorique, quelles questions sont trop complexes pour être résolues par une analyse IO.

Fonctions de production de Leontief : Les secteurs en IO et les processus en ACV sont tous deux formulés en termes de «recettes technologiques» fixes, aussi connues sous le nom de *fonctions de productions de Leontief*. Dans ces descriptions technologiques, les intrants ne peuvent se substituer entre eux (Voir ci-dessous le Tableau 1, ligne A).

Par exemple, on présume en IO que produire une voiture requiert de l'acier et de l'électricité dans un ratio donné, et qu'on ne peut pas augmenter la consommation d'électricité afin d'économiser de l'acier, ou vice-versa.

Cette présupposition des fonctions de Leontief est diamétralement opposée à celle des fonctions de Cobb-Douglas, qui présume que les intrants d'une production sont parfaitement substituables entre

⁹ Notamment à l'aide de logiciels libres comme *ecospond2matrix*, voir Pauliuk et al. (2015).
¹⁰ Voir Vogstad (2009) concernant l'influence mutuelle entre l'analyse IO et les modèles de programmation linéaire

eux. Dépenser 1 € de plus en carburant devrait permettre une économie de 1 € en salaires pour la même production. Une voiture devrait pouvoir être construite avec un coût total de x € en acier et en électricité, peu importe le ratio entre les deux.

Tant les fonctions de Leontief en IO et en ACV (0% de substitutivité entre intrants) que les fonctions de Cobb-Douglas (100% de substitutivité entre intrants) constituent des simplifications extrêmes de mécanismes de production réels. En pratique, un niveau partiel de substitution est typiquement possible entre les intrants, et des études empiriques sont requises pour déterminer ces *élasticités* (Koesler et Schymura 2015). Celles-ci peuvent ensuite être prises en compte dans des *modèles d'équilibre partiel ou général* (Burfisher 2011).

Modèle non contraint : Le modèle des quantités de Leontief, tout comme les analyses ACV classiques, calcule une production totale qui satisfait une demande finale donnée, et ce, *peu importe la taille de cette demande finale*. Il n'y a pas de limite maximale ou minimale à la taille de l'économie ; on présuppose que l'économie ne se bute jamais à des limites de capacité de production ou de disponibilité des ressources. Les analyses IO et ACV sont donc des analyses non contraintes.

Puisque les quantités ne sont pas contraintes, le modèle des quantités en IO présuppose donc implicitement que les prix ne sont pas affectés par la taille de la demande finale. En somme, *les quantités sont présumées non contraintes, et les prix sont fixes* (Miller et Blair 2009) (Tableau 1-B).¹¹ Pour une modélisation plus réaliste des contraintes et de leur influence sur les prix, on se tourne vers des modèles d'équilibre général ou partiel, ou encore vers des modèles de recherche opérationnelle (notamment les modèles de programmation linéaire).

Correspondance 1:1 entre produit et technologie : Comme illustré par la figure 3, un tableau entrées-sorties se doit d'être symétrique, et donc carré, avec exactement une technologie (moyenne) par produit (Tableau 1-C). Cette représentation n'est donc pas appropriée pour modéliser une compétition entre différents modes de production pour fournir un même produit. De telles analyses sont plutôt le lot des modèles de programmation linéaire, lesquels se basent sur une matrice technologique (**A**) non symétrique.

Homogénéité : Tant l'ACV que l'analyse IO présupposent qu'un groupe de produits doit avoir les mêmes caractéristiques intrinsèques, peu importe l'industrie qui le produit ou l'utilise (Tableau 1-D). Si, d'une part, l'industrie automobile utilise un certain alliage d'acier et, d'autre part, l'industrie aéronautique utilise plutôt un autre alliage de composition et propriétés différentes, ces deux alliages ne devraient pas (en théorie) être regroupés au sein du même groupe de produits (aciers inoxydables). Cet « acier inoxydable » désigne, sous un même nom, deux produits consommés dans des ratios différents dans deux industries, ce qui risque d'introduire un *biais par agrégation* [aggregation bias] dans l'analyse (p. ex., surestimation dans le cycle de vie des automobiles et sous-estimation dans le cycle de vie des avions) (Morimoto 1970; Olsen 1993; Olsen 2000; Lahr et Stevens 2002; Steen-Olsen et al. 2014). En pratique, cette *présupposition d'homogénéité* est une simplification théorique, car un certain niveau d'hétérogénéité dans la classification des produits est pratiquement inévitable.

Dans une analyse IO économique, la valeur des produits est la caractéristique dont l'homogénéité importe le plus. *Les prix sont donc présumés homogènes* : un produit a un prix moyen, peu importe le client (Tableau 1-E) (Weisz et Duchin 2006). Par exemple, si une industrie achète son électricité à un prix différent de la moyenne, cette électricité doit être considérée comme un produit différent (p. ex., « approvisionnement continu d'électricité pour client résidentiel », « électricité pour client industriel, avec possibilité d'interruption en période de pointe », etc.) Utiliser un tableau IO compilé avec des *prix de base* —c'est-à-dire un tableau où l'on corrige l'influence des subventions, taxes, marges commerciales et marges de transport, voir section 3.4.3— réduit de façon significative les disparités de prix entre les secteurs. Travailler avec des tableaux à plus haute résolution permet également de réduire les problèmes d'hétérogénéité. Alternativement, travailler avec des tableaux IO compilés en unités physiques permet d'éliminer complètement toute considération liée aux prix des produits. Il est d'ailleurs à noter que Leontief compilait ses premiers tableaux IO en unités physiques (Leontief 1936).

11 C'est l'inverse pour le modèle des prix en IO : les quantités sont fixes et les prix sont non contraints.

Tableau 1: Présuppositions inhérentes à l'analyse entrées-sorties

Caractéristiques et simplifications de l'IO	Partagées par l'ACV classique ?	Alternatives et Solutions
A. Fonctions de Leontief : technologies fixes, aucune substitution entre les intrants	oui	Autres fonctions de production, avec élasticités ; modèles d'équilibre général calculable (MEGC)
B. Prix fixes, quantités non contraintes	oui	Modèles de programmation linéaire, recherche opérationnelle, ou MECG
C. Relation 1:1 entre technologie et produit*	oui*	Programmation linéaire
D. Produits homogènes	oui	Désagrégation
E. Prix homogènes	--	Désagrégation, ou travailler en unités physiques

* contrainte partiellement résolue par la création de multiples produits « identiques » mais retracés à leurs industries d'origine, p.ex. « électricité éolienne », « électricité à partir du charbon », etc.

De par les simplifications et présuppositions qui lui sont inhérentes, l'analyse IO classique n'est donc pas particulièrement appropriée pour :

- Analyser les conséquences d'un choc important qui mènerait à une compétition accrue pour une ressource contrainte et à des perturbations des prix (Tableau 1B) (p. ex. politique Européenne des biocarburants (Dandres et al. 2012)) ;
- Analyser la compétition entre différents modes de production d'un même produit (Tableau 1C) ou entre différents produits pour une même fonction (Tableau 1A) ;
- Analyser l'impact de la production d'un produit spécifique qui diffère physiquement ou financièrement de la catégorie (agrégée) de produits à laquelle il appartient (Tableau 1D & E) (p. ex., une voiture électrique Tesla, appartenant à la catégorie « véhicule automobile ».)

Pour les deux premiers points, on se tournera vers des modèles d'équilibre partiel ou général, ou encore vers des modèles de programmation linéaire (p. ex., Duchin (2005); Strømman, Hertwich, et Duchin (2009)). Pour le dernier point, on se devra d'ajouter de la résolution et du détail aux tableaux IO, notamment par l'hybridation avec l'ACV.

3.4 Complexifications de la représentation entrées-sorties

Les principes de base et les limites théoriques des modèles entrées-sorties étant clarifiés, cette section se tourne vers un certain nombre de considérations pratiques. Une bonne compréhension de ces aspects pratiques est essentielle au choix éclairé d'un tableau IO et à son utilisation appropriée.

3.4.1 Désagrégation de la consommation finale et de la valeur ajoutée

Les tableaux ressources-emplois dans la section 3.2.1 représentent la demande finale comme un simple vecteur. Dans les faits, les agences de statistiques offrent typiquement une description plus détaillée, distinguant la consommation par les ménages, les achats par les gouvernements, la formation de capital fixe, etc. (figure 5). Ceci permet une représentation plus fine du consommateur. Une résolution encore plus grande peut être requise pour certaines études sur la consommation. Par exemple, on peut détailler la consommation selon les classes sociales (ménages à faible revenu, à revenu moyen, et à revenu élevé).

De même, la valeur ajoutée est typiquement subdivisée entre les compensations pour les employés, le loyer payé pour les terres et le capital, et les profits. Encore une fois, une plus haute résolution est offerte par certains tableaux IO. Par exemple, les salaires versés peuvent être divisés entre les salaires pour la main-d'œuvre hautement, moyennement, et peu qualifiée. L'équilibre financier et la représentation des travailleurs rend donc l'analyse entrées-sorties particulièrement attrayante pour les études de type ACV sociale (p. ex., Simas et al. 2014).

De façon plus générale, on peut voir la valeur ajoutée comme le paiement pour tout *facteur de production*, c'est-à-dire tout ce qui n'est pas une commodité mais est nécessaire à la production (main-d'œuvre, terre, ressource naturelle, etc.) (Duchin 2009). Si, par l'entremise d'un prix sur le carbone, une industrie se doit de payer pour le droit d'utiliser l'atmosphère comme réceptacle pour ses émissions de CO₂, ce coût devrait être inclus dans la valeur ajoutée.

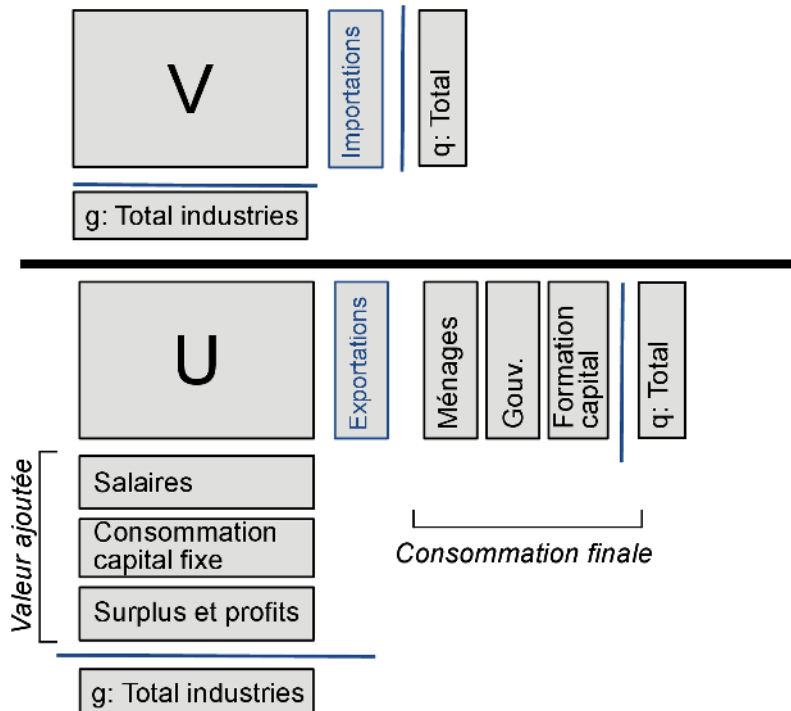


Figure 5: Tableaux ressources-emplois présentant [1] une description plus détaillée de la consommation finale et de la valeur ajoutée, et [2] les importations et exportations avec d'autres régions.

3.4.2 Frontières régionales et nationales : importations et exportations

Les tableaux ressources-emplois compilent l'inventaire de l'activité économique dans une région donnée, que ce soit une ville, une province (Lahr 1992; Lahr et Stevens 2002; Lahr 2001; Lahr 1993) ou, plus typiquement, un pays (United Nations 1999).

Dans la section 3.2.1, les tableaux ressources-emplois ne présentent aucun échange avec l'extérieur ; ils peuvent donc être interprétés comme des tableaux mondiaux (sans échanges avec d'autres planètes). Pour toute autre situation, un vecteur des importations doit être ajouté au tableau des ressources, et un vecteur des exportations doit être inclus dans le tableau des emplois (figure 5).

Les importations et exportations compliquent la construction de tableaux entrées-sorties symétrique. Par exemple, les intrants pour la production locale de viande sont connus, mais la technologie de production pour la viande importée ne l'est pas nécessairement. Deux stratégies peuvent résoudre ce problème.

Hypothèse de la technologie domestique : Cette approche, aussi connue comme l'hypothèse de l'économie miroir, est l'approche la plus courante pour les études qui se basent sur le tableau IO d'une seule région (p. ex., étude basée sur le tableau IO des États-Unis).

En l'absence d'information sur la technologie de production d'un bien importé, il devient nécessaire de présupposer que sa technologie est semblable à la technologie locale pour la production d'un bien identique ou similaire (European Commission 2008). Ainsi, on présupposera que les besoins en maïs et en médicaments pour la production de viande à l'étranger sont les mêmes que ceux pour la production de viande dans l'économie locale. De plus, on présuppose que ce maïs et ces médicaments sont eux aussi produits avec des technologies identiques aux productions locales, et ainsi de suite. On *présuppose donc que toutes les importations proviennent d'une économie identique à l'économie locale*, ce qui revient à dire qu'on les modélise comme s'ils étaient produits localement.

Cette simplification a l'avantage d'être claire et rapide, mais elle peut sérieusement biaiser une analyse, notamment pour une région avec beaucoup d'importations ou pour un produit avec des chaînes de production internationales.

Tableaux entrées-sorties multirégionaux : En combinant les tableaux ressources-emplois de tous les pays, et en réconciliant leurs déclarations d'importations et d'exportations, on obtient un tableau ressources-emplois du monde entier. Chaque pays est représenté explicitement, et chaque industrie utilise des intrants locaux (p. ex. secteur agricole du Canada utilisant du pétrole canadien) et des intrants provenant d'autres pays (p. ex. secteur agricole du Canada utilisant du pétrole états-unien).

Une fois que ce tableau ressources-emplois mondial est compilé et équilibré (p.ex. on s'assure de la correspondance des totaux financiers), un tableau entrées-sorties multirégional est construit selon la procédure normale, telle que présentée en section 3.2.1. On obtient ainsi un tableau aux dimensions produit-par-produit dans lequel chaque produit est explicitement lié à son pays d'origine (Wiedmann et al. 2011; Wood et al. 2014; Miller et Blair 2009).

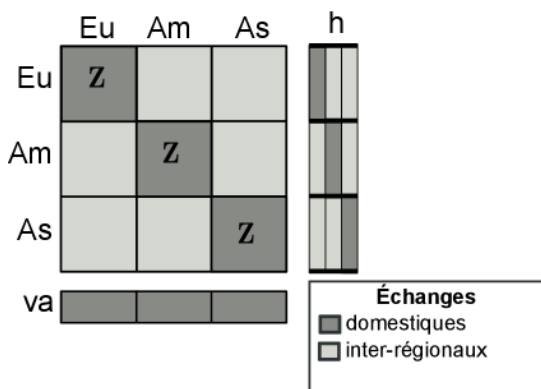


Figure 6: Tableau IO multirégional, avec interdépendance entre produits locaux pour chaque région (**Z**, gris foncé, sur la diagonale) et valeur ajoutée et consommation finale locales (**va** et **h**, gris foncé), combinée aux interdépendances entre produits de différentes régions (**Z**, gris pâle) et l'importation directe par les ménages de biens étrangers (**h**, gris pâle)

La compilation de tableaux multirégionaux est une tâche passablement ardue, mais leur utilisation n'est pas plus compliquée que celle d'un tableau IO national. Cependant, de par leur taille, ils peuvent représenter un défi pour certains logiciels ACV ou pour les ordinateurs avec peu de mémoire. Il est à noter que les pays les plus pauvres sont malheureusement regroupés et représentés par une seule région comme le « reste-du-monde » (Stadler, Steen-Olsen, et Wood 2014).

3.4.3 Les différentes perspectives de prix

Les tableaux entrées-sorties représentent l'économie comme une collection de processus de production ou de transformation qui s'échangent des produits entre eux. Or, plusieurs intermédiaires peuvent exister entre deux processus de production. Comme ces intermédiaires ne transforment pas toujours les produits de façon significative, et comme ils embrouilleraient la description du système, ils ne sont pas représentés explicitement pour chaque transaction. Par exemple, un tableau ressources-emplois multirégional notera que le secteur agricole du Brésil fournit d'importantes quantités de cuir à l'industrie du vêtement en Chine, sans noter que ce cuir a été racheté et revendu à plusieurs reprises par des grossistes, exportateurs, importateurs, et spéculateurs en bourse.

Même si ces intermédiaires ne transforment pas le produit de façon tangible, ils affectent son prix. Ainsi, pour le même échange IO, le prix reçu par le *producteur* agricole diffère du prix payé par l'*acheteur* manufacturier. Cette différence risque de causer une grande confusion dans la représentation IO et n'est pas acceptable pour l'équilibre financier. Afin d'avoir une perspective cohérente sur la valeur des produits, les tableaux ressources-emplois et entrées-sorties sont donc divisés en *couches de prix [valuation layer]*, chacune représentant l'ensemble de l'économie avec soit le *prix acquisition*, le *prix du producteur*, ou le *prix de base* (European Commission 2008).

Pour passer du prix d'acquisition au prix du producteur, on doit soustraire la taxe sur la valeur ajoutée, la marge commerciale des intermédiaires, et la marge de transport. Pour passer du prix du producteur au prix de base, on intègre les aides et taxes gouvernementales sur la production : on soustrait les taxes (autres que celles sur la valeur ajoutée) ainsi que les diverses subventions offertes producteur.

Cependant, les agences de statistiques ne produisent pas des tableaux IO de l'économie tous les ans, et le rythme de ces publications varie d'un pays à l'autre (USA : tous les 5 ans). De plus, ces tableaux sont publiés avec plusieurs années de retard (USA : tableau pour l'année 2007, publié en 2013).¹³

Cela dit, les agences de statistiques publient également des inventaires partiels de l'économie, et ce, de façon beaucoup plus fréquente (p. ex., annuellement). Ces informations partielles permettent de mettre à jour, par extrapolation, la représentation IO la plus récente. C'est ainsi que les bases de données WIOD et Eora produisent des tableaux IO multirégionaux mis à jour annuellement.

Pour les tableaux IO en unités monétaires, il est important de **travailler en devise constante**, corrigeant l'inflation ou la déflation (Miller et Blair 2009).¹⁴ Les indices de prix au consommateur permettent une correction pour les fluctuations de prix des différents produits dans le temps. Néanmoins, il est préférable d'utiliser un tableau aussi récent que possible afin de minimiser l'incertitude associée à ces corrections.

13 En règle générale, les tableaux ressources-emplois sont publiés beaucoup plus souvent et rapidement que les tableaux entrées-sorties.

14 De même, pour une analyse qui combine plusieurs devises différentes, il importe d'utiliser les taux de changes entre devises qui reflètent l'année de référence du tableau multirégional.

4 Analyses entrées-sorties avec extensions environnementales (EEIO)

4.1 Principes de base

Cette section présente les principes de base des extensions environnementales. L'exemple de la section 3.2.2 précédente est complété pour obtenir finalement des émissions pour le cycle de vie complet d'une consommation finale donnée.

L'analyse IO présentée à la section 3.2.2 calcule la *production* totale (du berceau au consommateur) pour une consommation finale donnée. Une des principales applications de l'analyse EEIO est plutôt de calculer les *émissions* totales pour une consommation donnée. Pour ce faire, on ajoute des *extensions environnementales* à l'inventaire de l'économie.

Mathématiquement, on compile et on traite les extensions environnementales de la même manière que la valeur ajoutée, tel que présenté à la section 3.2.1. On compile d'abord les émissions et l'extraction des ressources pour chaque *industrie* comme extension aux tableaux ressources-emplois. Ensuite, par l'application d'une construction, on associe les émissions à la production de chaque *produit*. Enfin, on normalise par rapport aux volumes de production pour obtenir une extension normalisée (**F**) à la matrice technologique (**A**) (figure 8).

		Produits manufacturés	Électricité	Services
Prod. man. [€/€]	A :	0	0.10	0.30
Électricité [€/€]		0.30	0	0.20
Services [€/€]		0	0.40	0
Valeur ajoutée [€/€]	w :	0.70	0.50	0.50
CO ₂ [kg/€]	F :	0.5	5.0	1.0
SO ₂ [kg/€]		2.0	4.0	0.5

Figure 8: Extensions environnementales normalisées (**F**) à la matrice de coefficients techniques d'entrées-sorties (**A**).

Comme on a déjà calculé la production totale ($\mathbf{x}' = [116, 227, 161]$) liée à une consommation finale (\mathbf{y}) à l'équation 9, il ne reste plus qu'à multiplier cette production totale par les facteurs d'émissions normalisés (**F**) pour obtenir les émissions du cycle de vie, du berceau-au-consommateur.

$$\mathbf{e} = \mathbf{F} \mathbf{x} \quad (11)$$

$$\begin{matrix} \text{CO}_2 \text{ [kg]} \\ \text{SO}_2 \text{ [kg]} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1353 \\ 1220 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 5.0 & 1.0 \\ 2.0 & 4.0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 116 \\ 227 \\ 161 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{Prod. man. [€]} \\ \text{Électricité [€]} \\ \text{Services [€]} \end{matrix}$$

Les tableaux EEIO représentent typiquement les intrants et les émissions non seulement des processus de production, mais également des activités de services et des processus (services) de traitement des déchets. Pour obtenir un cycle de vie complet, il ne manque donc en principe que les émissions directes lors de la phase d'utilisation des produits. Pour certains tableaux EEIO, dont EXIOBASE, ces extensions sont fournies avec la base de données (\mathbf{F}_y), sous forme d'émissions directes des ménages par € d'achat d'un produit (p. ex., émissions de CO₂ par € d'achat d'essence automobile). On complète l'équation 11 pour obtenir l'équation 12 pour les émissions du cycle de vie complet.

$$\mathbf{e} = \mathbf{F} \mathbf{x} + \mathbf{F}_y \mathbf{y} \quad (12)$$

4.2 Tableaux nationaux avec extensions environnementales

Cette section présente la démarche et les enjeux de la collecte de données environnementales pour étendre les tableaux IO, ainsi que les caractéristiques de certains tableaux EEIO disponibles.

Des données environnementales, en unités physiques, peuvent être ajoutées aux tables économiques par les agences statistiques elles-mêmes ou, selon un canal de diffusion plus restreint, par des développeurs de bases de données.

Dans le premier cas, les agences statistiques nationales rendent les données publiques en complément des tables économiques via leur système de comptes environnementaux (comptes satellites des comptes économiques)¹⁵. Les comptes environnementaux assurent un format des données environnementales conforme aux données économiques en termes de classifications (p.ex. produits et industries), ainsi que la cohérence temporelle et la cohérence des frontières considérées dans la comptabilité. Toutefois la couverture est généralement limitée à un nombre restreint de flux environnementaux, comme les GES, les prélèvements d'eau, l'énergie primaire. Tous les pays n'offrent pas la même information, puisque les agences nationales n'élaborent des tables que si elles ont pu au préalable collecter des données et compiler des statistiques, et que si elles peuvent garantir un haut niveau de confiance des données (Smith et St. Lawrence 2012). Enfin, certains pays sont plus proactifs que d'autres pour la comptabilité environnementale, et l'engagement envers un système comptable intégré comme le SCEE. Le *Tableau 2* présente un aperçu des pays compilant des comptes environnementaux, selon une enquête des Nations unies de 2007. Les comptes liés à l'eau (surtout dans les pays en développement) et les comptes liés à l'énergie et aux émissions sont parmi les plus couramment compilés et ceux pour lesquelles l'expansion est jugée prioritaire dans les régions en développement (United Nations 2007). Globalement, seul un pays sur deux compile des comptes autres que liés à l'énergie et aux émissions.

Tableau 2: Modules de comptes environnementaux compilés par les pays selon la région économique (United Nations 2007)

All world			Developed Regions			Developing regions		
Module	Number of countries	Percentage of countries	Module	Number of countries	Percentage of countries	Module	Number of countries	Percentage of countries
Total countries - World	44	100	Total countries - Developed regions ..	29	100	Total countries -Developing regions ..	15	100
Energy and emission accounts	33	75	Energy and emission accounts	22	76	Water Accounts	13	87
EPEA	24	55	EPEA	18	62	Energy and emission accounts	11	73
Water Accounts	22	50	MFA/Waste accounts	16	55	Mineral Asset Accounts	9	60
Forest Account	22	50	Forest Account	13	45	Forest Account	9	60
MFA/Waste accounts	22	50	Water Accounts	9	31	Land and Ecosystem Accounts	6	40
Mineral Asset Accounts	14	32	Mineral Asset Accounts	5	17	MFA/Waste accounts	6	40
Land and Ecosystem Accounts	10	23	Fisheries Accounts	4	14	EPEA	6	40
Fisheries Accounts	9	20	Land and Ecosystem Accounts	4	14	Fisheries Accounts	5	33
PSUT	5	11	PSUT	3	10	PSUT	2	13
Other	9	20	Other	6	21	Other	3	20

Note: EPEA is Environmental Protection Expenditure Accounts; MFA is Material Flow Accounts; PSUT is Physical Supply and Use Tables.

Les développeurs de tableaux EEIO cherchent à étendre les extensions environnementales fournies par les agences statistiques pour considérer d'autres flux environnementaux. Ils se basent donc généralement sur la résolution des tableaux EEIO fournis par ces dernières et recherchent parmi des sources de données tierces des flux environnementaux répertoriés selon la même classification des industries, comme la classification internationale ISIC des Nations Unies ou encore la classification NAICS propres aux pays de l'ALENA (États-Unis, Canada, Mexique). Les sources de données sont trop spécifiques à chaque pays pour être listées ici, mais le lecteur intéressé pourra trouver des

15 Mieux, certaines adoptent un système élargi de Comptabilité économique et environnementale (SCEE [SEEA]) dont le Cadre central est devenu en 2012 le « standard statistique international initial pour la comptabilité environnementale et économique ».

exemples dans les documents de référence des modèles présentés au *Tableau 3*. Les principaux enjeux auxquels un développeur de tableaux EEIO est confronté sont :

- d'identifier les secteurs pour lesquels les statistiques sont inévitablement biaisées. C'est typiquement le cas pour les registres nationaux d'inventaire d'émissions auxquels ne sont soumises que les entreprises d'une certaine taille (ou niveau de production). Suh (2005) propose une méthode pour estimer les émissions manquantes des entreprises non soumises à partir de facteurs d'activité ;
- de s'assurer de la cohérence de certaines données fortement corrélées dans certaines industries, telles que la consommation d'énergies fossiles et l'émission de CO₂ dans le secteur des transports ;
- de s'assurer de la cohérence des grands totaux compilés au travers de l'économie avec des publications telles que les inventaires nationaux des GES ou certaines statistiques internationales (p.ex. Agence européenne de l'environnement, Agence internationale de l'énergie, Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation, etc.) ;
- d'assurer la cohérence temporelle des données environnementales entre-elles afin que certains bilans élémentaires soient assurés (p.ex. prélèvements et rejets d'eau) ;
- de faire un choix lorsque plusieurs sources existent pour un même type de données. Ce peut être le cas pour les énergies primaires puisqu'on peut trouver des statistiques nationales comme internationales (p.ex. Agence internationale de l'énergie), mais également des statistiques sectorielles (p.ex. bases de données indépendantes sur la consommation d'énergie des secteurs manufacturiers, des transports, etc.). Dans le cas de données sur l'émission de polluants de toxicité potentielle avérée, s'il n'est pas possible d'identifier la valeur la plus probable, l'approche conservatrice est d'éliminer les valeurs d'émission les plus faibles pour éviter toute sous-estimation future des impacts (Suh 2010) ;
- de juger de la pertinence d'interpoler certaines données. Par exemple, à moins que des tables annuelles soient délibérément développées, on peut faire le choix de compiler des statistiques d'utilisation (ou ventes) de pesticides en agriculture sur plusieurs années afin d'établir un profil type annuel moyen. On pallie ainsi le risque de statistiques incomplètes ou de qualité variable d'une année sur l'autre, ou l'on s'affranchit ainsi d'une variabilité naturelle. Cette approche n'est toutefois pas recommandée lorsque des corrélations fortes existent entre plusieurs flux environnementaux (p.ex. utilisation d'énergie fossile et émission de CO₂).

Plusieurs tableaux EEIO (ou modèles EEIO) sont utilisables à des fins d'analyses au travers d'outils en ligne, comme par exemple EIO-LCA du Green Design Institute de l'université Carnegie Mellon aux États-Unis qui offre plusieurs modèles ou le modèle canadien Open-IO Canada. La plupart des modèles sont généralement téléchargeables au format Excel ou Matlab. Certains ont été rendus disponibles au sein du logiciel ACV professionnel SimaPro¹⁶. Le *Tableau 3* présente les références et quelques informations sur certains de ces modèles. Le *Tableau 4* contient également une description du niveau de désagrégation disponible par grand secteur économique des modèles.

Les modèles disponibles au sein de SimaPro offrent une valeur ajoutée indéniable au praticien ACV qui dispose d'un outil utilisable rapidement et simplement. Il n'a pas à –au mieux– apprendre à utiliser un outil en ligne ni –au pire– à devoir procéder par lui-même à des calculs matriciels à partir de tableaux dans Excel, Matlab ou tout autre environnement de programmation. L'environnement du logiciel ACV offre également le choix des méthodes d'évaluation des impacts. Il permet surtout de pouvoir se servir de modèles EEIO dans le contexte d'une ACV classique.

Les modèles CEDA 4 des États-Unis pour l'année 2002 sont disponibles dans SimaPro. À notre connaissance, CEDA 4 offre les tableaux EEIO les plus complets en termes de couverture environnementale (voir *Tableau 3*) mais aussi de granulométrie de l'industrie (plus de 400 secteurs). Il est donc probablement le mieux adapté dans un objectif d'analyse rapide (p.ex. une analyse *screening* en parallèle d'une ACV ou une analyse *cradle-to-gate* d'un matériau). CEDA 4 n'inclut pas les imports, contrairement au modèle suisse de 2005, également disponible dans SimaPro (l'amont des imports est modélisé sur le modèle de la production domestique suisse, selon l'approche de l'économie miroir –voir section 3.4.2). La considération des imports n'est toutefois pas d'une haute pertinence lorsque la base de données EEIO est utilisée pour estimer les impacts d'un matériau ou

16 À ce jour, le logiciel OpenLCA ne permet pas d'utiliser des modèles EEIO. Il n'est pas exclu qu'il en offre à l'avenir, puisque la *Social Hotspot Database* (construite sur un modèle IO multirégional) y est déjà disponible.

d'un produit manufacturé. Elle le devient lorsque l'objectif est l'évaluation d'une économie dans son ensemble, et que la considération de la demande finale (et de ses impact directs) devient alors une autre nécessité de la base de données EEIO (ce qui est le cas pour les bases de données de la Suisse 2005, ou de l'Europe des 27).

Tableau 3: Exemples de modèles nationaux EEIO

	CEDA 4	open IO-Canada	EIO-LCA.net	EU27
Région	États-Unis	Canada	États-Unis (national et états de Pennsylvanie et Virginie de l'Ouest), Canada, Allemagne	Europe des 27 comme une économie fermée (à partir des données de 20 des 27 pays)
Année couverte	2002	2009	1997,2002 (É-U), 2002 (Canada), 1995 (Allemagne)	2003
Gratuité / Disponibilité	Non. Version académique gratuite disponible sur demande (fichiers Excel) Disponible dans le logiciel ACV SimaPro	Oui. Licence publique <i>Creative Commons</i> http://www.ciraig.org/en/open_io_canada/index.html Outil d'analyse en ligne ; fichiers Excel téléchargeables.	Oui. http://www.eiolca.net/index.html Outil d'analyse en ligne ; Modèles MATLAB disponibles pour les É-U.	Oui Projet FORWAST du programme-cadre FP6 de l'union européenne http://forwast.brgm.fr Disponible dans le logiciel ACV SimaPro
Nombre de commodités ou industries	424 industries	112 industries x 246 commodités, et 143 catégories de demande finale	- Allemagne: 58 industries, - Canada: 105 industries - É-U: 491(1997) / 428(2002)	142 commodités : 60 produits, 31 services, 41 services de traitement de déchets , et 10 catégories de demande finale des foyers (modélisées sur la base du Danemark pour l'EU27)
Type de flux environnementaux	Énergies fossiles, ressources forestières, eau prélevée, utilisation des sols, minéraux et minéraux, substances toxiques couvertes par les deux inventaires nationaux de rejet de polluants des É-U, GES, pesticides, nutriments eutrophiants (N et P agricoles, NOx de combustion), 2 types de déchets (dangereux et non)	GES et substances toxiques couvertes par l'Inventaire national du rejet de polluants du Canada (INRP)	- Allemagne: polluants atmosphérique conventionnels et GES - Canada: énergie, polluants atmosphérique conventionnels et GES - É-U: énergie, GES, rejets toxiques, déchets dangereux	Principaux minerais et minéraux (9), énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz)
Émissions dans l'air	778	170	ND	NH ₃ , CO ₂ (fossile et biogénique), CO, N ₂ O, CH ₄ , NO ₂ , NMVOC, SO ₂
Émissions dans l'eau	575	89	ND	non incluses
Émissions au sol	270	56	ND	non incluses

	CEDA 4	open IO-Canada	EIO-LCA.net	EU27
Versions / Notes	Existe en 2 modèles selon l'approche de résolution des co-produits : - allocation économique selon l'approche industrie-technologie ; - approche hybride d'extension des frontières et d'allocation économique (Suh et al. 2010)	Version actuellement disponible : modèle <i>industrie x industrie</i> avec allocation économique selon l'approche industrie-technologie Un des objectifs recherché avec la licence <i>Creative Commons</i> est de favoriser l'utilisation et l'amélioration de l'outil et des modèles (de nombreux axes d'améliorations sont proposés)	Différentes versions pour les É-U selon prix producteurs/prix acquéreurs ; modèle <i>commodité x industrie</i> (2002) et <i>industrie x industrie</i> (1997)	Le modèle est particulier dans la mesure où il hybride des données IO équilibrées économiques et physiques [Physical Supply-Use Tables] ; la multifonctionnalité est gérée par extension des frontières (Suh et al. 2010)

4.3 Tableaux multirégionaux avec extensions environnementales

Un tableau IO multirégional est étendu de vecteurs de données environnementales selon le même principe (Figure 9).

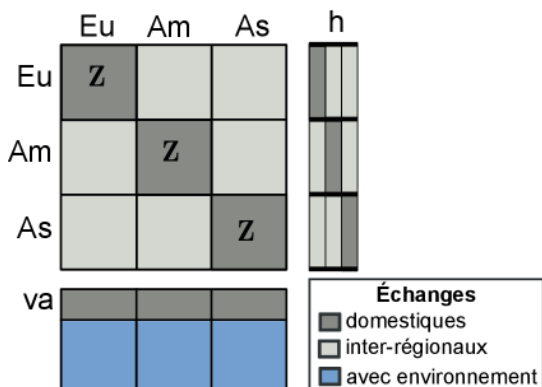


Figure 9: Tableau IO multirégional avec extensions environnementales

Le *Tableau 4* compare les tableaux multirégionaux des bases de données Eora, EXIOBASE, GTAP 8 et de la World IO database (WIOD). On remarque que ces tableaux sont très orientés ressources (énergie, minerais et métaux) et émissions dans l'air, au détriment des émissions dans l'eau et au sol, à l'instar des tableaux régionaux.

Les approches sont différentes et résultent en des compromis selon les choix de valeurs propres à chaque approche, entre :

- La disponibilité sur une base annuelle (choix de Eora et WIOD) ;
- La granulométrie des régions (choix de Eora et GTAP) ;
- La résolution des secteurs/commodités : EXIOBASE a pris parti pour une résolution fixe pour chaque région alors qu'elle est variable pour Eora. EXIOBASE procède donc à une désagrégation des tableaux nationaux rendus disponibles par les agences statistiques à une résolution inférieure, et agrège des tableaux de plus haute résolution. Eora conserve la résolution originelle des tableaux nationaux, et gère donc des résolutions variables. La majorité des tableaux des économies européennes sont de l'ordre de **60 commodités** (France, Allemagne, etc.).

- En termes de flux environnementaux, EXIOBASE se dégage nettement avec 150 ressources différentes, 57 émissions gazeuses et –c’est un minimum– 2 émissions dans l’eau (azote et phosphore pour, entre autres, l’évaluation de l’eutrophisation aquatique).

Le *Tableau 5* présente la désagrégation réalisée sur certains secteurs spécifiques de ces tableaux multirégionaux et les met en comparaison avec certains tableaux nationaux évoqués précédemment. On peut voir que les tableaux multirégionaux « rivalisent » en termes de désagrégation avec la plupart des tableaux EEIO nationaux, à l’exception du tableau américain dont la granularité est beaucoup plus fine. GTAP et EXIOBASE mettent l’emphase sur les secteurs de l’agriculture et de la foresterie. De surcroît, EXIOBASE couvre significativement mieux les secteurs de l’extraction des ressources, de la production des énergies primaires et secondaires (pétrole, électricité, gaz), de l’eau ainsi que des services.

Tableau 4: Comparaison de tableaux multirégionaux (adapté de Steen-Olsen et al. 2014)

	Eora	EXIOBASE 2	GTAP 8	WIOD
Site Internet	worldmrio.com	www.exiobase.eu	https://www.gtap.agecon.purdue.edu/	www.wiod.org
Gratuit ?	Non (oui pour académique)	Oui (sous licence)	Non (oui pour versions anciennes et/ou résumées)	Oui (égide du 7 ^{ème} FP de l’UE)
Année(s) de référence	annuel :1990-2012	2000, 2007	2004, 2007	annuel 1995-2011
Régions	187	44	129	41
<i>dont non-paramétrées</i>	74	43	109	40
Commodités par pays	26-511 (France: 60)	200 produits 163 industries	57	35
Dimension	>10 000	5 676	7 353	1 435
Unité	US\$	€	US\$	US\$
Émissions dans l’air	33	57	7	7
Émissions dans l’eau	0	2 (N, P)	0	0
Utilisation de matériaux et ressources	23	150 48 matières premières 15 types d’utilisation des terres 172 types d’utilisation de l’eau	18	25

Note : la version 9 de GTPA a été publiée en mai 2015, mais les tableaux satellites ne sont pas encore disponibles. Les prix varient de 1 000 US\$ (académique) à 6 000 US\$.

Tableau 5: Nombre de sous-secteurs disponibles dans les tableaux nationaux et multirégionaux (adapté de Steen-Olsen et al. 2014 pour les tableaux multirégionaux)

Secteur	Tableaux multirégionaux			Tableaux nationaux			
	EXIOBASE	GTAP8	WIOD	É-U 2002	Canada 2009	Suisse 2005	EU27 2003
Agriculture, foresterie	17	14	1	19	4	1	13
Mines et carrières	15	4	1	14	5	1	9
Produits alimentaires, breuvages, tabac	12	8	1	34	11	1	4
Textiles et vêtements	3	3	2	20	3	4	3
Bois et papier	3	2	2	20	3	2	8
Pétrole, produits de raffinerie et produits chimiques	15	3	4	75	10	3	8
Métaux	8	3	1	18	2	2	14
Équipement électrique et machinerie	5	2	2	88	12	4	7
Équipement de transport	2	2	1	19	7	2	2
Manufacture et recyclage	3	1	1	27	2	3	8
Électricité, gaz, et eau	11	3	1	3	2	1	3
Construction	1	1	1	7	9	1	3
Commerce	5	1	4	3	2	1	1
Transports	7	3	4	10	7	2	3
Poste et télécommunications	1	1	1	14	3	2	1
Finances et administration	8	4	3	14	9	6	4
Éducation, santé, récréation, autres services	13	2	5	67	25	8	55 (41 traitement déchets)

Les chiffres en gras des tableaux multirégionaux identifient les efforts (relatifs) de désagrégation de chaque base de données. Les valeurs sont approximatives pour les tableaux nationaux en raison de la réaffectation selon les secteurs.

5 Analyses Hybrides ACV et EEIO

5.1 Positionnement et complémentarités entre EEIO et ACV traditionnelle

Malgré des analogies, les approches EEIO et ACV diffèrent fondamentalement au point de ne pas pouvoir répondre l'une et l'autre à un même objectif d'étude. Elles ne sont donc pas substituables. Leurs complémentarités (meilleure couverture des enjeux environnementaux pour l'ACV, absence de troncature pour l'EEIO) peuvent être valorisées par l'hybridation. Un modèle EEIO, s'il est jugé comme suffisamment détaillé et complet, peut également être utilisé conjointement à une ACV pour guider la collecte de données et la modélisation.

Puisque l'analyse IO économique a l'avantage de se baser sur des modèles qui couvrent la totalité des échanges économiques de l'activité humaine (section 3.2.2), qu'elle permet une analyse selon une perspective cycle de vie grâce à la matrice inverse de Leontief (section 3.2.2), et que l'EEIO y ajoute des flux environnementaux pour calculer un inventaire environnemental du cycle de vie (section 4), le positionnement par rapport à l'ACV est légitime. De surcroît, tel que mentionné en section 3.2.2, les fortes analogies de concept et d'approche mathématique entre une ACV et une analyse IO/EEIO suggèrent également la possibilité de substituer ou de combiner les approches. Ces analogies ne sont pas discutées ici et le lecteur intéressé se référera à Heijungs et Suh (2002).

Les forces et les faiblesses de l'analyse IO ont été évoquées au cours du chapitre 3. Le chapitre 4 précédent a mis en évidence le fait que l'élaboration de l'inventaire des flux élémentaires que l'on associe aux tables économiques est une tâche ardue : on constate en effet qu'il n'existe pas de modèle EEIO, national et encore moins multirégional, qui rivalise en terme de couverture des flux environnementaux avec ce que peuvent offrir les jeux de données d'une base de données ACV telle que *ecoinvent*. Il est donc très important de noter que, **bien qu'une analyse EEIO assure la prise en compte exhaustive des activités économiques impliquées, la couverture des enjeux environnementaux n'est que partielle si l'inventaire est incomplet**. On pourra être relativement confiant sur l'évaluation des GES (avec des réserves toutefois vis-à-vis de la comptabilité du carbone des sols car certains tableaux estiment les émissions de CO₂ par modélisation à partir des énergies consommées) et des ressources (surtout les énergies primaires) avec une analyse EEIO, ou encore sur l'estimation des impacts d'acidification, de toxicité humaine (par voie aérienne), ou d'effets respiratoires (particules fines). Mais il conviendra d'être prudent sur la sous-estimation d'impacts liés à l'occupation des terres (biodiversité), de la toxicité humaine et de l'écotoxicité liées aux métaux et aux pesticides (activités agricoles), à l'eutrophisation et plus généralement aux impacts dont la voie est aquatique ou par le sol, ainsi qu'à l'impossibilité d'estimer une empreinte eau conforme à la norme en vigueur. Au titre de la couverture des enjeux environnementaux, CEDA 4 se démarque significativement des autres modèles EEIO disponibles. À titre d'exemple, le modèle EU27 (*Tableau 3*) ne contribue pas à 9 des 16 catégories d'impact de la méthode ILCD 2011 (v1.06) ; CEDA 4 ne contribue pas aux deux catégories des radiations ionisantes.

Les bases de données d'inventaire utilisées en ACV ont été développées en focalisant sur les échanges économiques de matières et d'énergies. Leur champ n'est pas de considérer les échanges économiques faiblement matérialisés qui ne sont pas directement liés au sortant principal de chaque jeu de données d'inventaire mais pourtant également nécessaires à toute activité, même industrielle. Ce sont, typiquement, les activités administratives et le travail de bureau, les biens en capitaux, les déplacements humains (voyages d'affaire, transport des employés), et les activités de développement pré-industriel (R&D) et les services (architectes, consultants, etc.). Moins systématiquement, mais afin de réduire le fardeau de la collecte de données lors du développement des bases de données, les flux de matières en faible quantité sont souvent exclus de l'inventaire réalisé. Ces deux sources d'omission et de troncature sont donc présentes dans les bases de données d'inventaire ACV et causent les différences lorsqu'elles sont comparées aux tables EEIO de façon systématique (Mongelli et al. 2005 ; Majeau-Bettez et al. 2011 ; Lenzen 2000 ; Norris 2002). Les différences ne sont toutefois pas systématiquement observées avec la même amplitude selon les produits ou services évalués (Rowley et al. 2009 ; Junnila 2006 ; Williams 2004 ; Ferrao et Nhambiu 2009 ; Crawford 2008 ; Zhai et Williams 2010 ; Acquaye et al. 2011), mais peuvent par exemple atteindre jusqu'à 50% de sous-estimation des besoins en énergie (Lenzen 2000) et, surtout, mener à des conclusions différentes lorsque des alternatives sont évaluées (Lenzen 2002).

Aux deux importantes différences entre EEIO et ACV présentées ci-dessus s'ajoutent d'autres caractéristiques qui positionnent les deux approches (*Tableau 6*). On comprend que, d'un point de

vue pratique, il est d'un intérêt limité de les mettre en opposition puisqu'elles ne peuvent servir les mêmes objectifs et ne sont pas substituables. L'intérêt réside bien dans la mise en synergie de l'ACV et de l'EEIO à travers l'hybridation, comme présenté dans les sections qui suivent.

On notera toutefois que dans une double perspective 1) d'identification rapide des principaux contributeurs à l'impact d'un produit ou d'un service, et 2) de révéler d'éventuelle omissions significatives par troncature d'un processus ACV (ou d'un système ACV en cours de modélisation), un modèle EEIO tel que CEDA 4 peut s'avérer un complément très utile au praticien ACV dans son effort de collecte de données et de raffinement de son modèle.

Tableau 6: Positionnement de l'EEIO avec l'ACV

	EEIO	ACV
Objectif des études	<p>Évaluation macroscopique des impacts d'une économie nationale/régionale (y inclus les imports, si possible), de la consommation.</p> <p>Identification grossière des secteurs de l'économie contributeurs à l'impact.</p>	<p>Évaluation détaillé d'un produit / service.</p> <p>Identification détaillée des processus et flux élémentaires contributeurs et des pistes d'amélioration.</p>
Atouts principaux	<p>La couverture de toute l'économie d'une région, y compris des activités faiblement matérialisées (services administratifs, bancaires, gouvernementaux, de soins, etc...).</p> <p>La possibilité de couvrir « toutes » les régions (donc l'économie globale) avec les tableaux multirégionaux.</p> <p>Le potentiel d'analyse au-delà des enjeux environnementaux avec des extensions à caractère social.</p>	<p>Le détail de l'industrie (des produits/services) est élevé : plus de 4000 processus dans <i>ecoinvent 2.2</i> ; plus de 6000 (incl. régionalisation) et 3000 marchés dans <i>ecoinvent 3</i> (<i>ecoinvent Centre 2014</i>).</p> <p>L'inventaire des flux environnementaux est détaillé et spécifique à la technologie et à la région représentée.</p> <p>Un praticien ACV quelque peu expérimenté peut adapter des processus unitaires existants de base de données.</p>
Défauts majeurs	<p>Extensions environnementales limitées, et risque de négligence et sous-estimation des impacts.</p> <p>Les flux de déchets sont limités ou très grossiers et les traitements sont peu détaillés, sauf emphase particulière (p.ex. FORWAST, tableaux spéciaux [Waste-IO]).</p> <p>Le détail de l'industrie (des produits/services) est grossier : couramment de l'ordre d'une centaine ; au mieux 450.</p> <p>La conversion prix-quantité pour le praticien est un fardeau et une source d'incertitude à l'usage.</p> <p>La modification de tableaux par le praticien ACV pour un besoin spécifique est (quasi-) impossible/dangereux.</p>	<p>Troncature [cut-off] des inventaires systématique pour des activités non matérialisées ; fréquente pour des flux économiques en quantité marginale.</p> <p>Les quantités échangées au sein des processus unitaires sont constantes mais l'apparition de processus paramétrés offre la possibilité de modifier l'équilibre.</p> <p>Une base de données ACV n'est pas représentative de l'économie.</p>
Représentativité temporelle	<p>Cohérence temporelle des flux économiques.</p> <p>Les flux environnementaux ne le sont pas nécessairement lorsqu'ils sont déterminés à partir de facteurs d'émission qui ne correspondent pas au contexte.</p>	<p>Disparité temporelle des processus au sein d'une base de données ICV.</p> <p>Comme pour l'EEIO, les flux environnementaux ne sont pas toujours précisément représentatifs du contexte temporel annoncé d'un processus lorsqu'ils sont déterminés à partir de facteurs d'émission qui ne correspondent pas au contexte, mais l'incertitude évaluée le prend en compte.</p>

	EEIO	ACV
Représentativité géographique	Cohérence géographique des flux économiques au sein d'une table et des tables régionales associées. Toutefois, les flux environnementaux ne le sont pas nécessairement lorsqu'ils sont déterminés à partir de facteurs d'émission qui ne correspondent pas au contexte. Dans les tables nationales qui considèrent les importations, il est souvent fait la simplification de l'économie miroir.	Signifiée. Mais pour ses besoins, le praticien est amené souvent à mélanger différentes géographies (l'incertitude est adaptable toutefois). La disponibilité de multiples régions est apparue avec <i>ecoinvent</i> 3 mais elle est encore limitée. Un praticien ACV quelque peu expérimenté peut régionaliser efficacement des processus unitaires existants de base de données. Mélanger différentes bases de données ICV n'est pas recommandé si les approches méthodologiques diffèrent significativement.
Détail technologique / produit	Très faible: limité aux secteurs disponibles dans les tables originelles, ou dépendant ensuite d'un travail d'expert (développeur de tableaux) pour désagréger et gérer l'allocation.	Disponibilité de nombreuses technologies dans les bases de données ICV (p.ex. modes de production de chaleur, d'électricité, régies agricoles, gestion des déchets).
Évaluation des incertitudes	Pas ou peu (seulement dans Eora).	Oui dans la plupart des bases de données ICV (approche semi-qualitative). Non pour les méthodes d'évaluation des impacts (mais en développement, p.ex. Impact World+ pour intégration dans le logiciel ACV OpenLCA).

5.2 Critères pour une analyse «hybride»

Le terme «hybride» est plutôt vague et peut porter à confusion. En effet, s'il est possible de combiner de différentes façons des données physiques et économiques, un tel arrimage ne présentera pas nécessairement les avantages théoriques associés aux analyses ACV-EEIO hybrides.

À partir de la littérature sur le développement méthodologique de l'analyse ACV-EEIO hybride (Suh et al. 2004; Strømman, Peters, et Hertwich 2009; Strømman et Solli 2008; Lenzen 2009; Suh et Huppes 2002; Heijungs et Suh 2002; Suh et Huppes 2005), trois critères fondamentaux se dégagent. Une méthode d'analyse n'est considérée *hybride* que si elle :

1. Combine *des descriptions détaillées* de processus spécifiques à *une description agrégée mais complète* de l'économie
2. Permet d'éviter (ou de réduire fortement) les problèmes de troncature des processus détaillés
3. Corrige les problèmes de double comptage introduits par la combinaison de descriptions ACV et EEIO

Ces critères sont explicités à travers l'exemple de la section suivante.

5.3 Hybridation avec tableau EEIO comme complément au tableau ACV

Cette section présente l'usage d'un tableau IO normalisé comme complément à un ou plusieurs processus ACV détaillés. Cette approche requiert un minimum de données et d'efforts.

5.3.1 Méthode d'hybridation

Cette approche requiert :

- Un tableau EEIO normalisé
- Un processus ACV détaillé
- Un seul prix, soit
 - le prix du produit de ce processus, OU
 - le prix moyen du secteur auquel il appartient
- Optionnel : le prix des intrants physiques de ce processus

Cette hybridation commence avec un processus détaillé, de type ACV, pour la production d'un kilogramme d'une batterie Li-ion (Figure 10-A, en bleu). L'inventaire est considéré comme relativement complet et inclut les principaux intrants métalliques et les principaux besoins en énergie. Cependant, cet inventaire manque de données quant aux autres intrants associés à cette production, et cette description ACV souffre donc de troncature.

La catégorie de produits à laquelle la batterie Li-ion appartient est identifiée (machinerie électrique, Figure 10-A, en noir). Cet inventaire est plus complet —couvrant tous les intrants de tous les secteurs économiques, de l'informatique à la restauration— mais plus agrégé. Par exemple, les intrants de manganèse ou d'un alliage nickel-cobalt sont rassemblés et intégrés dans les intrants « autres métaux non ferreux ».

La description IO pour produire 1 € de machinerie électrique est ensuite copiée et multipliée par le prix moyen d'un kg de machinerie électrique, de façon à obtenir des intrants pour 1 kg de machinerie électrique (Figure 10-B). Par exemple, on obtient un estimé des intrants informatiques par kg de batterie (€/kg).

Ceci résulte en une double description pour la production du même kilogramme de batterie : une description issue de l'ACV et une autre issue de l'EEIO. Si la méthode en restait là, bon nombre d'intrants et d'impacts environnementaux seraient comptés en double. La prochaine étape vise donc à corriger le double comptage.

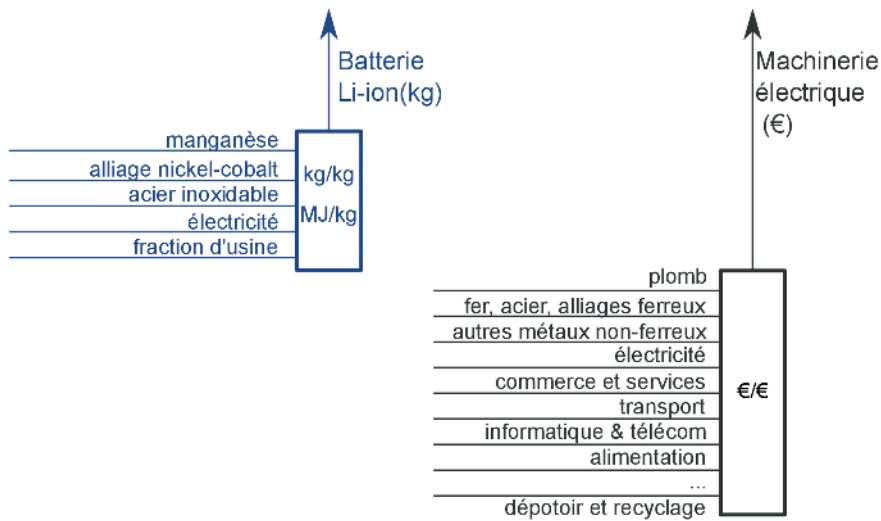
Plusieurs algorithmes existent pour opérer cette correction de la façon la plus fine possible (Strømman, Peters, et Hertwich 2009b; Lenzen 2009; Strømman 2009; Lenzen et Crawford 2009), mais ceux-ci requièrent beaucoup de données et des outils d'analyse. Dans ce rapport, nous présumons que le praticien n'a pas accès aux prix de tous les intrants du processus ACV (prix du manganèse, acier inoxydable, etc.) et n'a pas accès à des logiciels d'analyse de structure de réseaux [structural path analysis].

La façon la plus simple de corriger le double comptage consiste à enlever tous les intrants provenant de secteurs économiques que l'on juge suffisamment bien couverts dans la description ACV. Dans cet exemple, on retirerait de la description tous les intrants métalliques et énergétiques en provenance du tableau EEIO (figure 10-B, en rouge). Ainsi, les intrants de plomb sont effacés, car les auteurs savent que cette batterie (contrairement à la machinerie électrique moyenne) ne contient pas de plomb. Les intrants de « autres métaux non ferreux » sont également retirés, car les auteurs sont confiants d'avoir couvert ces intrants plus en détail avec leurs intrants de manganèse et de nickel-cobalt. La même logique est appliquée aux alliages ferreux et aux besoins en électricité.

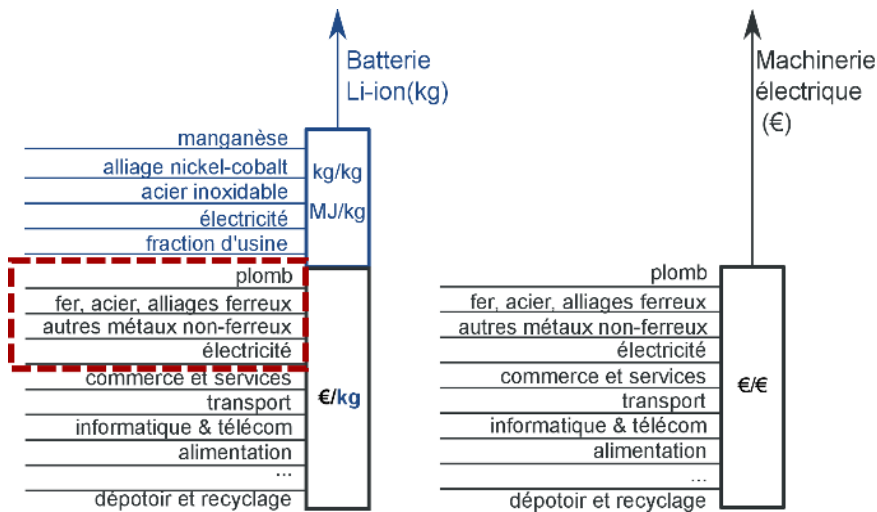
Cette approche simplifiée pour la correction du double comptage a notamment été utilisée par Arvesen et al. (2013).

Cette méthode résulte donc en une description détaillée des intrants métalliques et énergétiques, spécifiques à la production de batteries Li-ion, combinés aux autres intrants typiques du secteur de la machinerie électrique pour compléter les données manquantes (Figure 10-C).

A)



B)



C)

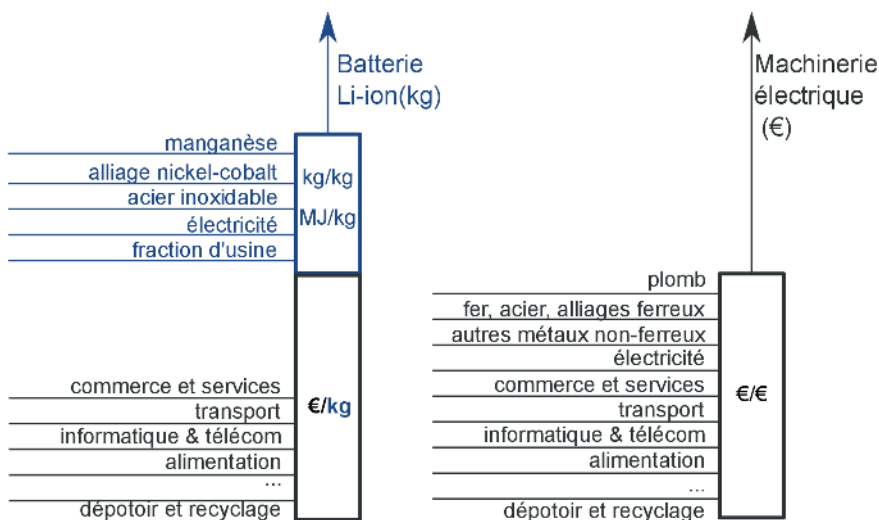


Figure 10: Hybridation d'un processus ACV (partie A, en bleu, à gauche) avec un secteur IO (partie B, en noir, à droite), lequel est multiplié par un prix pour obtenir des intrants par kilogramme de produit (partie B, en noir, à gauche). La double représentation de certains intrants est ensuite évitée en enlevant les intrants de secteurs économiques déjà représentés dans la partie ACV (partie B, boîte rouge) pour compléter l'hybridation (partie C, à gauche).

5.3.2 Une approche itérative

Avec ce type d'hybridation, les données IO servent de complément générique à une analyse spécifique. Il va sans dire que plus l'analyse est spécifique, plus les résultats devront être précis et utiles. Il est donc souhaitable que la majorité des impacts proviennent des processus détaillés de l'ACV, et que le complément générique soit le plus petit possible. Une fois l'hybridation complétée, si la part des impacts provenant de la partie IO est jugée trop importante, une deuxième ronde de collecte de données devrait être entamée pour étendre la partie ACV et réduire la partie IO dans l'analyse hybride (Williams, Weber, et Hawkins 2009).

L'identification des secteurs les plus contributeurs aux impacts de la part IO dans l'hybridation peuvent servir de guide à ces efforts itératifs de collecte de données. Dans la figure 10-C, par exemple, si la majorité des impacts provenant du complément IO sont causés par les intrants de produits informatiques et télécommunication, il peut s'avérer judicieux de concentrer les efforts de recherche dans cette direction : *En quoi la production de batteries Li-ion diffère-t-elle de la production moyenne de machinerie électrique en termes d'intrants informatiques et télécommunication ?* Ainsi, le praticien concentre ses efforts de recherche dans une direction apte à augmenter la spécificité de son analyse (Suh et Huppés 2002).

5.3.3 Incertitude plutôt que biais systématique

Un certain niveau d'incertitude accompagne chaque étape de l'hybridation. La taille appropriée du complément IO, proportionnelle au prix, est incertaine. Le niveau de correction approprié pour double comptage est également incertain. Les coefficients techniques IO, de par leur niveau d'agrégation, sont eux-mêmes fort incertains. En fait, de par l'hybridation, il est fort probable que l'on ait augmenté l'incertitude totale associée aux résultats. Cela dit, cette augmentation de l'incertitude a permis d'éliminer un biais systématique (Suh et al. 2004; Williams, Weber, et Hawkins 2009).

Avec une ACV classique, une partie du système n'est pas représentée, et ce problème de troncature rend plus probable la possibilité que l'analyse ait sous-estimé plutôt que surestimé les impacts. Grâce à l'hybridation, on corrige ce biais. Il est maintenant tout aussi probable que les impacts aient été surestimés que sous-estimés.

*En somme, l'argument théorique en faveur de l'ACV hybride affirme qu'il vaut mieux être exact avec incertitude qu'être biaisé avec précision.*¹⁷

5.3.4 Hybridation directe versus hybridation par paliers

La plupart des analyses ACV classiques présentent une description spécifique d'un système (description d'avant-plan [foreground]) complétée par une base de données générique, typiquement ecoinvent, en arrière-plan [background].

Avec la méthode décrite dans la section 5.3.1, le tableau IO sert également de complément générique. Il peut donc soit *remplacer* la base de données d'arrière-plan, ou plutôt servir de complément additionnel.

Si, par exemple, un tableau EEIO est utilisé au lieu d'ecoinvent comme description d'arrière-plan, servant de seul complément à une description d'avant-plan, il s'agit d'une *hybridation directe* [IO-based hybrid]. Si, au contraire, la description d'avant-plan requiert certains intrants à partir d'ecoinvent et d'autres à partir d'un tableau EEIO, cette hybridation est désignée comme une *hybridation par paliers* [tiered hybrid] (Suh et Huppés 2005)

Au-delà de la nomenclature, il n'y a pas vraiment de différence fondamentale entre les deux types d'hybridation. La méthode de la section 5.3.1 s'applique de la même façon.

D'un point de vue pratique, l'hybridation par paliers offre cependant certains avantages. La présence simultanée d'une base de données ACV et d'un tableau IO offre un maximum de flexibilité, puisque deux compléments sont disponibles pour le même avant-plan. De plus, une base de données comme *ecoinvent* offre une résolution complémentaire à celle des tableaux IO ; certains secteurs économiques y sont représentés avec beaucoup plus de résolution, et vice versa pour d'autres (Majeau-Bettez, Strømman, et Hertwich 2011).

¹⁷ Variation sur Read 1898, cité dans Brandão et al. (2014)

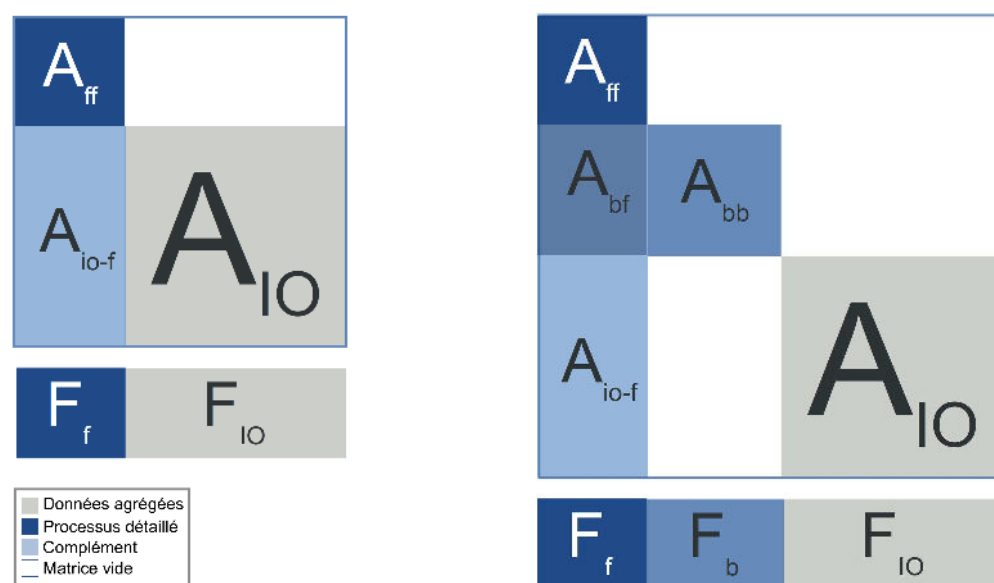


Figure 11: Représentation graphique de la matrice de coefficients techniques (**A**) avec extensions environnementales (**F**) pour une ACV hybride directe (gauche) et par paliers (droite). Le long de la diagonale de la matrice **A**, on retrouve la description de l'avant-plan (A_{ff}), la base de données ACV d'arrière-plan (p. ex. ecoinvent ; A_{bb}), et le tableau IO (A_{IO}). Dans l'hybridation par paliers, les processus de l'avant-plan utilisent des intrants à partir de l'arrière-plan (A_{bf}) et à partir du tableau IO (A_{IO-f}). Au contraire, l'hybridation directe n'inclut pas la base de données d'arrière-plan.

5.4 Hybridation par désagrégation des tableaux EEIO

Cette section présente un second type d'hybridation qui s'adresse aux praticiens désireux de modéliser l'ensemble de l'économie, en mettant l'accent sur le rôle de certaines technologies ou de certains produits dans les divers secteurs de cette économie. Cette approche requiert plus d'efforts et de données, mais bonifie le tableau IO tout en lui conservant son caractère équilibré.

Plutôt que de voir l'EEIO comme un complément générique à la description de système de l'ACV, on peut prendre la perspective inverse : les données détaillées d'un processus ACV peuvent être intégrées dans une description de système IO pour ajouter de la résolution à la description économique.

Cette approche requiert :

- Un tableau EEIO équilibré *non normalisé* (tableau des flux **Z**) pour une année donnée ;
- Au moins un processus (ACV) détaillé ;
- Plusieurs prix :
 - Le prix de la commodité fournie par le processus ACV ;
 - Le prix de chaque intrant physique du processus ACV.
- Le volume de production de ce processus pour une année donnée ;
- *Optionnel* : des données sur l'utilisation du produit par les différents secteurs de l'économie.

Cette approche commence sensiblement de la même manière que l'hybridation présentée en section 5.3.1. Un processus ACV (p. ex., production de batterie Li-ion) est spécifique mais souffre de troncature. Le secteur économique auquel ce processus appartient est identifié (p. ex., machinerie électrique), et la description IO de ce secteur est utilisée pour compléter l'inventaire de ses intrants.

Cette approche va cependant beaucoup plus loin pour intégrer ce processus hybridé dans une représentation cohérente de l'économie.

D'abord, comme les prix des intrants du processus ACV sont connus, il est possible de vérifier que l'hybridation respecte l'équilibre financier, ce qui réduit considérablement le niveau d'incertitude associé à cette étape (Strømman et Solli 2008).

Ensuite, une fois que le processus est hybridé et balancé, celui-ci est multiplié par son volume de production pour convertir une description normalisée (p. ex., masse de manganèse par kg de batterie Li-ion) en flux totaux (masse de manganèse pour les batteries Li-ion en 2012).

Une fois ce processus mis à l'échelle, il est ajouté comme nouvelle colonne du tableau IO (colonne verticale bleu foncé, figure 12). Afin de ne pas perturber l'équilibre des marchés, les flux de cette nouvelle colonne sont soustraits de ceux de son secteur économique. Le secteur économique agrégé du tableau IO se trouve donc *subdivisé en deux* : *un nouveau secteur* basé sur la description hybridée et *un résiduel* (colonne bleu pâle, figure 12). Par exemple, le tableau IO aurait un nouveau secteur décrivant la production de batteries Li-ion, et un autre secteur décrivant « machineries électriques, sauf batteries Li-ion ».

Pour conserver le caractère symétrique du tableau, les rangées doivent être désagrégées de la même manière. Par exemple, la consommation intermédiaire de « machinerie électrique » doit être divisée entre la consommation de batteries Li-ion par les différentes productions (rangée bleu foncé, figure 12) et la consommation de « machineries électriques, sauf batteries Li-ion » par les différentes productions (rangée bleu pâle, figure 12). Autant que possible, cette désagrégation devrait se baser sur des données quant aux principaux utilisateurs de batteries Li-ion.¹⁸

Une telle désagrégation permet donc de mieux analyser le rôle d'une technologie spécifique (e.g. batteries Li-ion) dans tous les secteurs de l'économie.

Il importe que cette désagrégation des rangées et colonnes ne perturbe pas l'équilibre du tableau IO et n'altère pas la taille de l'économie. Autrement dit, cette méthode d'hybridation utilise un processus ACV détaillé, des données sur ses prix, et des données sur ses volumes de production afin de produire un nouveau tableau IO un peu plus détaillé mais tout aussi valide.

Cette approche à l'hybridation est formellement décrite sous le nom d'*ACV hybride intégrée* [integrated hybrid LCA] (Suh 2004; Peters et Hertwich 2006; Suh 2006).

Prise au sens large, cependant, toute utilisation de données physiques pour désagréger un tableau EEIO reflète la stratégie d'hybridation de cette section. Cette pratique est assez fréquente, par exemple pour la désagrégation des secteurs énergétiques (Wood, Hawkins, et al. 2014). De même, les analyses entrées-sorties des déchets [waste IO] constituent une autre approche basée sur la désagrégation avec des données physiques (Nakamura et Kondo 2002; Kondo et Nakamura 2004). Ces modèles, qui incluent des éléments d'analyse de flux des matériaux (Nakamura et al. 2008; Nakamura et al. 2014), s'inscrivent dans cette même catégorie d'ACV-EEIO hybrides (Suh et Nakamura 2007).

¹⁸ Faute de données, il devient nécessaire de présumer que chaque secteur utilise les batteries Li-ion et les autres machineries électriques dans le même ratio que leur ratio de production.

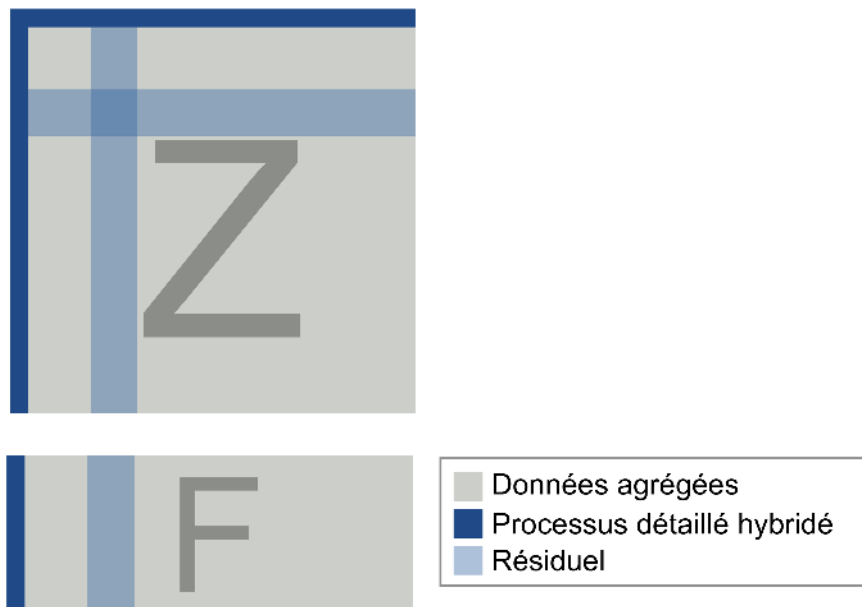


Figure 12: Hybridation par désagrégation, divisant un secteur agrégé de l'économie en deux secteurs: un processus détaillé (bleu foncé) et un résiduel (bleu pâle). Cette approche conserve tous les équilibres du tableau IO, qui se trouve bonifié et peut être réutilisé dans d'autres études.

5.5 Choix de la méthode et du niveau d'hybridation

Le Tableau 7 fait une synthèse des principales caractéristiques des deux grandes catégories d'hybridation présentées en section 5.3 et 5.4. Les deux méthodes permettent de réunir la spécificité de l'ACV et la complétude de l'EEIO dans une analyse cohérente.

L'hybridation par désagrégation (section 5.4) requiert passablement plus de données et d'efforts, et ce, dans le but d'intégrer le processus hybridé au sein d'une description équilibrée de l'économie. Ces efforts ne sont donc utiles que si nos objectifs de recherche s'intéressent à une description cohérente et intégrée de l'ensemble de l'économie. Voici quelques situations où il serait judicieux d'employer cette stratégie :

- On analyse des processus de production à *grande échelle* dont les produits sont *utilisés dans divers secteurs*, et on s'intéresse aux rôles de ces produits dans les autres secteurs. Le secteur énergétique constitue un bon exemple. Une modification de ce secteur a des répercussions dans les cycles de vies de tous les produits (Hertwich et al. 2014).
- On vise à construire une base de données pour une équipe, et chacun contribue à ajouter de la résolution à une description cohérente et commune de l'économie. Un tableau EEIO sert de description initiale, et la spécificité de la base de données croît au fur et à mesure des études.

Pour la majorité des ACV (classiques ou hybrides), la représentation de l'ensemble de l'économie n'est pas une priorité. L'analyse s'intéresse à la chaîne de production d'un produit spécifique, et il est donc plus efficace de n'utiliser un tableau EEIO que pour compléter la description de système.

En ce qui a trait au niveau d'hybridation, il existe *tout un continuum entre deux extrêmes*, c'est-à-dire entre une ACV classique et une EEIO classique. En travaillant de façon itérative, il devient possible de déterminer quel mélange ACV-EEIO convient le mieux aux objectifs et contraintes d'un projet de recherche. Si les résultats sont grandement affectés par chaque nouvelle ronde de collecte de données, il peut s'avérer judicieux de continuer d'augmenter la spécificité de la description de système. Au contraire, si les résultats convergent et se stabilisent, il n'est probablement pas justifiable d'investir de plus amples efforts pour augmenter la portion ACV de l'étude hybride.

Tableau 7: Comparaison des deux grandes catégories d'analyses ACV-EEIO hybrides

	l'EEIO pour compléter l'ACV (méthode simplifiée*)	l'ACV pour désagréger l'EEIO
Prérequis:		
Prix des produits	PEU	BEAUCOUP
Volumes de production	NON	OUI
Temps et efforts	PEU**	BEAUCOUP
Respect de l'équilibre:		
financier (colonnes)	POSSIBLE, mais pas garanti*** avec la méthode simplifiée	OUI
des marchés (rangées)	NON, car l'hybridation se fait avec des tableaux normalisés	OUI
Pour et contre:		
Principaux avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide • simple • collection minimale de données 	<ul style="list-style-type: none"> • description cohérente, désagrégée, et non normalisée de l'économie • réutilisable dans d'autres projets
Principaux inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Le processus hybridé n'est pas intégré dans la description IO ; • pas ou peu réutilisable 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexe et demandant
Principales applications:		
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Produire une ACV plus complète pour un produit 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyser l'importance d'une commodité (produite en grande quantité) dans les cycles de vie de tous les autres produits. • Désagrégation progressive des tableaux EEIO
Noms et modèles	<ul style="list-style-type: none"> • Hybridation directe • Hybridation par paliers 	<ul style="list-style-type: none"> • Hybridation intégrée • désagrégation physique • <i>waste-IO</i>

* Par « méthode simplifiée », on désigne l'absence d'algorithme sophistiqué et l'usage d'une procédure simplifiée pour corriger le double-comptage.

** Peut même faire gagner du temps si utilisé pour mieux orienter la collecte de données de façon itérative.

*** Garantir l'équilibre financier requerrait l'obtention de prix pour tous les flux physiques.

6 Cas d'étude

Deux cas d'étude sont réalisés. L'un concerne l'ACV comparative d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel, l'autre l'ACV d'un bâtiment. Chacun se base sur la réalisation d'une ACV classique, d'une analyse EEIO, et d'une analyse hybride. En dehors de l'objet analysé, les deux cas d'étude diffèrent par les données et outils utilisés pour l'analyse EEIO et l'hybridation, ainsi que par le praticien exécutant. On se positionne ainsi dans un contexte le plus large possible de méthodologie, outils, données et expertises différents pour évaluer l'intérêt, les limitations et la facilité des différentes méthodes (EEIO, ACV, ACV hybride).

Les deux sections suivantes présentent les caractéristiques des cas d'étude, les outils et méthodes utilisés pour l'analyse, et les résultats obtenus sans, puis avec hybridation. Enfin une section commune synthétise les enseignements et les recommandations.

Mise en garde : les résultats, scores d'impact potentiels et contributions issus de ces cas d'étude et présentés par la suite ne doivent pas être utilisés et reproduits en dehors de ce projet et de son contexte, à l'exception de ceux issus des publications sources mentionnées.

6.1 Cas d'étude no.1 : véhicule électrique et conventionnel

6.1.1 Présentation

Objectifs du cas d'étude

Cette étude vise à déterminer l'influence de l'hybridation EEIO-LCA sur une analyse du cycle de vie d'un véhicule électrique, un produit émergent dont les chaînes de production traversent les frontières. Ce cas d'étude est donc particulièrement approprié pour l'illustration d'une hybridation avec un tableau EEIO multirégional.

Puisqu'aucun tableau EEIO n'a à ce jour été intégré dans un logiciel ACV conventionnel, cette section vise tout particulièrement à présenter l'hybridation d'inventaires en format matriciel (selon Miller et Blair, 2009 ou Heijungs et Suh, 2002). L'application de la méthode d'hybridation itérative définie en section 5.3 à un inventaire matriciel y est décrite en détail. Cette démonstration vise à déterminer le niveau d'efficacité avec lequel un inventaire assez complexe, avec quelques centaines de processus, peut être hybridé.

La présente analyse constitue une ACV attributionnelle d'un véhicule électrique et d'un véhicule à essence. L'unité fonctionnelle est une conduite de 150 000 km, par un particulier, en Europe.

Sources et caractéristiques des données d'inventaire

Cette hybridation se base sur les tableaux d'inventaires de deux études récentes, Hawkins et coll. (2013) et Ellingsen et coll. (2013).

L'inventaire de Hawkins et coll. (2013) (environ 470 processus) décrit en détail la phase de production de véhicules électriques et conventionnels de tailles et de performances semblables. Les phases d'usage et de fin de vie sont également décrites, quoique de façon moins détaillée. L'inventaire d'Ellingsen et coll. (2013) (52 processus) vient, quant à lui, raffiner la description de la phase de production de la batterie, notamment avec des données d'industrie sur la consommation d'énergie lors de la production des piles électrochimiques et sur les composantes informatiques et structurelles de la batterie. Ces deux inventaires s'appuient sur la base de données *ecoinvent* v2.2 (environ 4000 processus) comme arrière-plan. La combinaison de ces deux inventaires sera hybridée avec les tableaux entrées-sorties d'Exiobase 2.2 (voir la description à la section 4.3).

Les deux véhicules s'inspirent, pour ce qui est de leurs dimensions et de leurs performances lors de la phase d'usage, de la Nissan Leaf et de la Mercedes A-class. Afin de faciliter la comparaison, les deux véhicules à l'étude sont présumés identiques pour toute pièce qui n'est pas directement reliée au groupe motopropulseur. Le véhicule électrique est doté d'une batterie au lithium-ion, avec une cathode à l'oxyde de nickel-cobalt-manganèse (Li-ion NCM), de 253 kg.

Certaines caractéristiques de ces études influencent tant l'hybridation que l'analyse des résultats. D'abord, l'analyse de Hawkins et coll. est intentionnellement générique; elle ne vise pas un véhicule spécifique ou un pays en particulier, mais plutôt un portrait général des enjeux liés à l'électrification de véhicules en Europe. Cette généralité géographique de l'inventaire d'avant-plan contraste avec la description distincte de 28 pays européens dans Exiobase. Pour faciliter l'arrimage avec l'avant-plan et pour mieux respecter la perspective de recherche de Hawkins et coll., les pays de l'Europe ont été agrégés dans Exiobase avant l'hybridation.

Ensuite, il est à noter que, puisque ces inventaires se réfèrent à la version 2.2 (plutôt que 3.1) d'*ecoinvent*, la description de certains processus peut s'avérer désuète, notamment en ce qui a trait aux bouquets énergétiques et aux marchés de l'électricité en Europe. Ceci n'influence pas la capacité du cas d'étude à illustrer une hybridation rigoureuse, mais ses résultats finaux devraient être interprétés avec précaution.

Enfin, le transport des marchandises est modélisé avec différents niveaux de complétude par les analyses par Hawkins et coll. et Ellingsen et coll.; l'ACV de la batterie inclut systématiquement les transports, tandis que la plupart des processus de l'analyse de Hawkins et coll. les ignorent. Ceci influencera le processus d'hybridation et le traitement du double comptage.

6.1.2 Outils et méthodes

Logiciel

Le logiciel pyMRIO, dont certaines des fonctionnalités furent démontrées lors de la rencontre de lancement du projet, a été développé spécifiquement pour assurer une manipulation aisée d'Exiobase, notamment pour l'analyse de l'empreinte environnementale des différents pays. Malheureusement, la structure de ce logiciel ne se prête pas à une analyse hybride ACV-EEIO efficace.

L'intégration des inventaires de Hawkins et coll. (2013), Ellingsen et coll. (2013), *ecoinvent* et Exiobase nécessite la manipulation de tableaux d'inventaires très volumineux, de sorte qu'une hybridation sans logiciel structurant eût été fort laborieuse et propice à l'insertion d'erreurs. L'utilisation d'un tableur (Microsoft Excel, LibreOffice Calc, etc.) est fortement déconseillée, et même l'utilisation d'une console de calcul (Matlab, IPython, etc.) requerrait du praticien qu'il fasse preuve d'une grande attention lors de manipulations répétitives au cours de l'hybridation. Afin d'automatiser ces manipulations et de démocratiser l'hybridation avec des tableaux EEIO multirégionaux, nous avons publié, sous licence libre et gratuite, un logiciel simple et programmé en Python: pyLCAIO (<https://github.com/majeau-bettez/pylcaio>).

Ce logiciel définit un objet qui:

- Lit des tableaux d'inventaires à partir de fichiers Matlab (.mat)
- Lit des tableaux entrées-sorties à partir d'un objet pyMRIO
- Combine de multiples avant-plans (p. ex., intègre Hawkins et coll. et Ellingsen et coll.)
- Organise et concatène les tableaux d'inventaires, comme illustré à la Figure 11
- Automatise, à partir de paramètres fournis par l'utilisateur, l'hybridation de chaque processus selon la méthode illustrée à la Figure 10
- Calcule la production, les émissions, ou les impacts totaux associés au cycle de vie hybridé
- Enregistre le système hybridé dans un fichier Matlab (.mat)

Ce logiciel pourrait être amélioré et bonifié à bien des égards, notamment en ce qui a trait à sa documentation, mais ce premier cas d'étude démontre déjà son utilité.

Processus itératif d'hybridation

L'hybridation de ce cas d'étude s'est effectuée selon le processus itératif illustré à la Figure 13. Cette section présente, étape par étape, les manipulations effectuées, les hypothèses introduites, et le rôle du logiciel pyLCAIO au cours de l'hybridation. Les numéros des étapes décrites ci-dessous se rapportent à la numérotation utilisée sur la Figure 13.

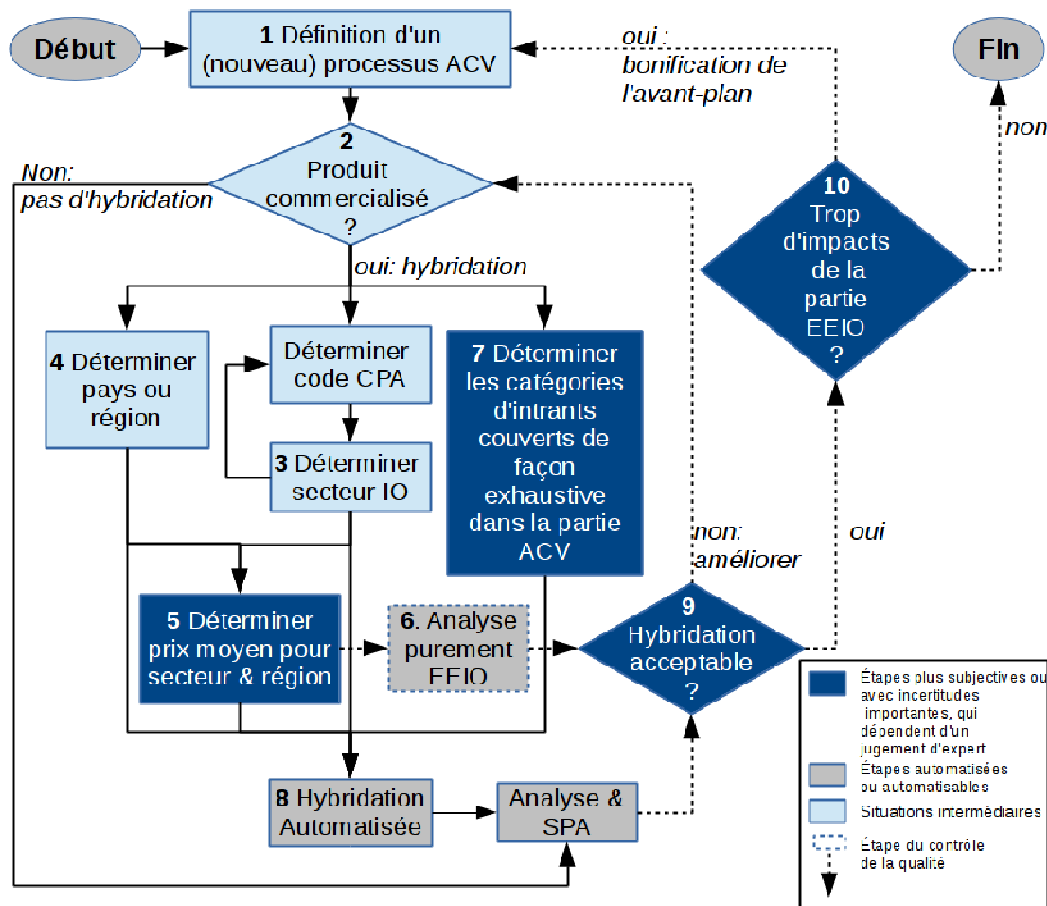


Figure 13: Processus itératif mis en œuvre pour l'hybridation. Notes : L'automatisation réfère à l'hybridation à proprement parler des processus à l'aide de l'outil pyLCAIO ; CPA : code produit selon la 'Classification of Product by Activity' ; SPA :Structure Path Analysis.

ÉTAPE 1 - DEFINITION DE L'OBJET ET LECTURE DES TABLEAUX D'INVENTAIRES

L'objet (nommé «ecar» à la Figure 14) se définit en une seule ligne. Puis des méthodes prédéfinies lisent les matrices d'inventaires de l'avant-plan, de l'arrière-plan (*ecoinvent*) et d'Exiobase.

```
# Initialize object
ecar = pylcaio.LCAIO()

# Read in foreground
ecar.extract_background(ecoinvent_path)

# Read ecoinvent background
ecar.extract_foreground(ecar_path, overwrite=False)

# add key MRIO matrices as background to ecar object
ecar.extract_io_background_from_pymrio(pymrio.load_all(mrio_path), [0,1], [0,1])
ecar.extract_exiobase2_characterisation_factors(
    'characterisation_CREEA_version2.2.0.xlsx',
    name_cols=[0])
```

Figure 14: Chargement du modèle d'étude et des données d'inventaire (processus et EEIO) et de caractérisation des impacts avec le logiciel pyLCAIO.

ÉTAPE 2 - DISTINGUER LES PROCESSUS A HYBRIDER: PRODUITS COMMERCIALISES ET NON COMMERCIALISES

En ACV, le praticien jouit d'une grande liberté quant à la façon dont il modélise le système à l'étude et le découpe en processus (étapes, sous-étapes, etc.). La disponibilité des données guide

généralement cette étape, mais également la façon dont il peut vouloir agréger par la suite les résultats et, entre autres, afficher les contributions. Il peut très bien, par exemple, diviser l'assemblage d'une pile électrochimique en deux, dix, ou cent processus intermédiaires reliés les uns aux autres par des flux de produits qui ne sont utilisés qu'à l'interne et ne sont jamais commercialisés. En EEIO, au contraire, seules les transactions (ventes et achats) de produits entre les diverses entreprises sont compilées dans les flux de produits, et donc seuls les produits commercialisés y sont représentés. Ainsi, lors de l'hybridation des tableaux ACV et EEIO, seuls les processus fournissant des produits commercialisés devraient être hybridés.

Les 520 processus de l'avant-plan ont donc été passés en revue pour déterminer lesquels devraient être hybridés.

Avec des données d'industrie, il est aisé de déterminer quels produits sont achetés ou vendus, et quels produits sont générés et utilisés à l'interne. Ainsi, en ce qui concerne l'inventaire par Ellingsen et coll., nous savons que le manufacturier assemble la batterie à partir de piles et de pièces achetées à divers fournisseurs, et que le producteur de piles achète à son tour toutes les pièces et composantes chimiques. Pour l'hybridation d'une analyse générique, au contraire, un certain niveau d'incertitude est nécessairement associé au choix des produits commercialisés ou non. Par exemple, lors de cette analyse, on présume que le constructeur automobile achète toutes les pièces du véhicule à des entreprises spécialisées et des sous-traitants, puis les assemble pour former un véhicule complet. Autrement dit, toutes les pièces de véhicules (composantes) dans l'inventaire de Hawkins et coll. sont considérées comme des produits commercialisés dont les processus de production devraient être hybridés, mais les «groupes de composantes» (p. ex. «châssis et portes») ne sont considérés que comme des «*work in progress*» intermédiaires.

Les «matériaux» dans l'inventaire de Hawkins et coll. sont, par définition, des processus conceptuels qui ne visent qu'à regrouper d'autres processus de façon hiérarchique, afin de faciliter une analyse de flux des matériaux. Ces processus n'ont pas été hybridés.

La phase d'usage n'est pas hybridée non plus, car elle ne se passe pas dans un secteur économique au sein d'une industrie, mais bien avec le consommateur final.

Puisque la phase de fin de vie contribue si peu aux impacts du cycle de vie, il a été jugé plus efficace de ne pas hybrider cette étape du cycle de vie et de concentrer les efforts d'hybridation sur la phase de production.

Enfin, seuls les processus définis dans l'avant-plan de Hawkins et coll. et Ellingsen et coll. ont été hybridés; l'hybridation de l'ensemble de la base de données *ecoinvent* est au-delà des objectifs du cas d'étude.

La Figure 15 illustre la structure du système. Puisque l'inventaire contient trop de processus pour qu'ils puissent être tous représentés, ceux-ci sont regroupés par catégories et leur nombre est indiqué entre parenthèses. Les boîtes blanches représentent les processus non hybridés, tous les autres sont hybridés. Ainsi, le véhicule est assemblé à partir de 110 composantes, chacune fabriquée par un processus distinct qui sera hybridé. Dans le cas où une fraction des processus est hybridée, cette fraction est écrite entre parenthèses. Ainsi, sur les 17 composantes structurelles de la batterie, 13 ont été jugées comme des produits commercialisés et donc hybridées.

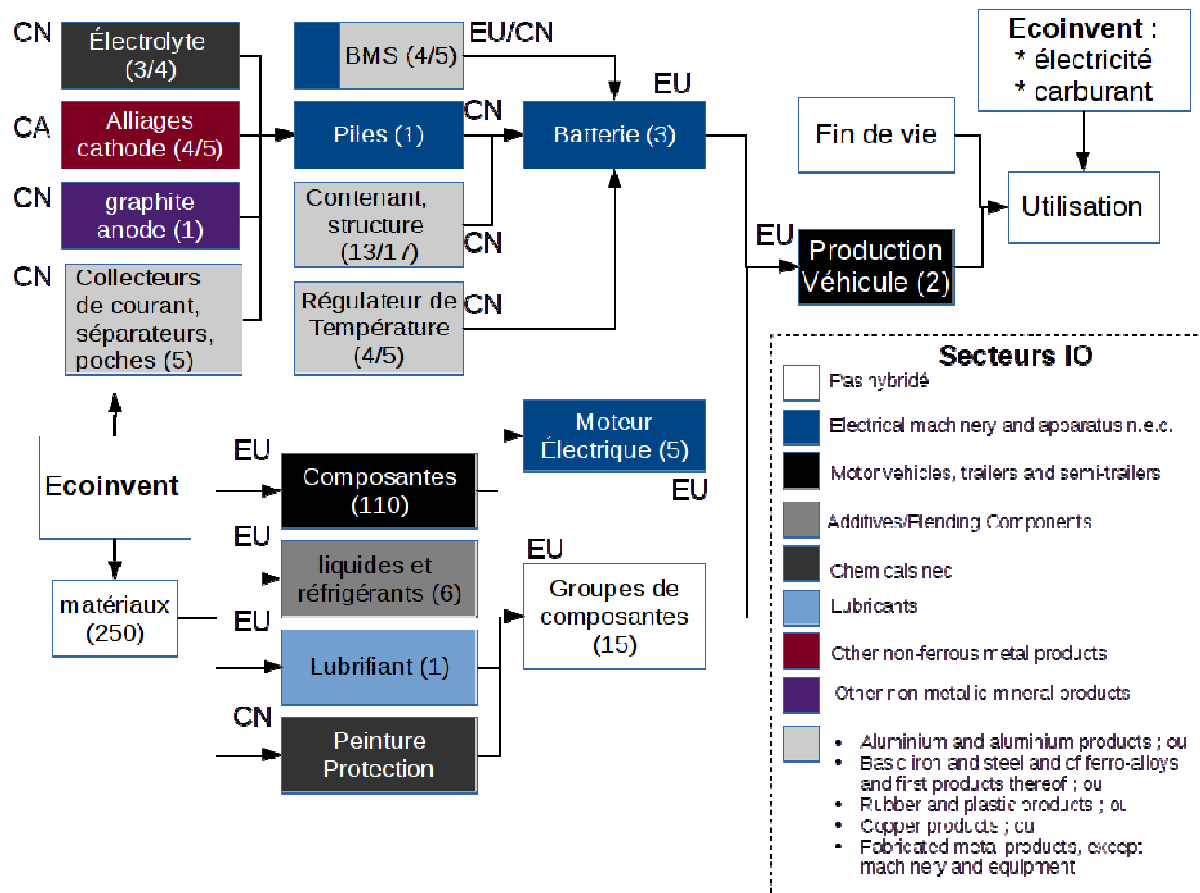


Figure 15: Structure de l'avant-plan du système « véhicule électrique » (CN : Chine, CA : Canada, EU : Union européenne, BMS : Battery Management System).

ÉTAPE 3 - DETERMINER LE CODE CPA ET LE SECTEUR ECONOMIQUE DE CHAQUE PRODUIT FINI

Chaque processus à hybrider doit être associé à un secteur économique du tableau EEIO. Pour ce faire, il est préférable de commencer par déterminer le code CPA (*Classification of Product by Activity*) du produit à partir des définitions de cette classification standard. Il est ensuite aisé, à l'aide d'un tableau de correspondances fourni par les concepteurs d'Exiobase, de déterminer à quel secteur d'Exiobase ce code CPA appartient. Par exemple, une batterie Li-ion appartient au code CPA «31.40.23 - Nickel-cadmium and nickel-iron and other electric accumulators», lequel appartient au secteur IO «*Electrical machinery and apparatus n.e.c.*».

Lors de ce cas d'étude, tous les processus ont pu être associés sans ambiguïté à un secteur IO. Un code de couleur illustre ces associations dans la Figure 15.

ÉTAPE 4 - DETERMINER LA REGION GEOGRAPHIQUE DE CHAQUE PROCESSUS

Afin de pleinement utiliser la couverture multirégionale du tableau EEIO, la localisation géographique de chaque processus de l'avant-plan doit être déterminée. Il est fréquent en ACV que le choix géographique soit très général (global, européen), à dessein pour obtenir des conclusions générales, ou par défaut, par manque d'information.

Pour cette hybridation, les véhicules et les pièces sont tous produits en Europe, tel que présupposé dans l'analyse de Hawkins et coll. et tel qu'indiqué à la Figure 15. Il en va de même pour l'assemblage final de la batterie. Ellingsen et coll. spécifient que les piles électrochimiques sont produites en Asie, et nous présupposons au cours de cette hybridation qu'elles sont produites en Chine. De même, faute d'information ou de choix explicite par Ellingsen et coll., nous présupposons que toutes les pièces entrant dans la fabrication de la batterie sont également faites en Chine. Pour la production des alliages cathodiques au nickel, nous avons décidé d'hybrider ces processus avec le secteur des

métaux non-ferreux du Canada, étant donnée la part importante du marché du nickel que ce pays détient.

Même si une analyse de sensibilité peut pallier un léger manque de cohérence entre les parties ACV et EEIO quant aux localisations géographiques, ces considérations peuvent s'avérer frustrantes lors de l'hybridation à un tableau multirégional. Deux solutions sont envisageables. D'une part, plus la partie ACV sera explicite quant aux pays impliqués dans les flux de produits, plus l'hybridation sera aisée. D'autre part, pour traiter les cas où la représentativité d'un marché mondial est requise, une fonction pourrait être ajoutée au logiciel pyLCAIO pour faciliter l'hybridation d'un processus non pas au secteur économique d'une région en particulier, mais bien au secteur correspondant dans chacun des pays, au prorata de leur part de marché et basé sur un prix global.

ÉTAPE 5 - DETERMINER UN PRIX POUR L'HYBRIDATION

Le choix de prix pour relier les inventaires physiques et monétaires constitue certainement une des étapes les plus incertaines et les plus importantes de l'hybridation. Comme décrit en sections 3.4.3 et 3.4.4, il ne suffit pas de trouver un prix moyen pour un produit, car il faut également convertir ce prix à la bonne évaluation (p.ex. prix de base) et à la bonne année (p.ex. €2007).

Dans le cas présent, les concepteurs d'Exiobase ont compilé une liste de prix moyens déjà convertis à la bonne évaluation et à la bonne année. Certains de ces prix sont calculés de façon endogène: le volume physique total de la production pour un secteur en 2007 est divisé par les ventes totales (en prix de base) de ce secteur dans Exiobase. Dans d'autres cas, notamment lorsque les volumes de production physiques ne sont pas disponibles ou sont trop incertains, ces prix sont sélectionnés à partir d'une base de données sur les prix, BACI (Gaulier et Zignago 2010). BACI est bâtie sur les données sources de commerce international de la base COMTRADE des Nations Unies.

Avec l'aide de ces prix précompilés, la sélection de prix moyens pour chaque secteur économique impliqué dans l'hybridation s'est faite rapidement. Ceci dit, un haut niveau d'incertitude est mis en évidence par les différences de prix entre régions, et une analyse de sensibilité est souhaitable. La compilation de prix homogènes pour chaque secteur demeure le talon d'Achille de l'hybridation ACV-EEIO pour l'analyse de produits.

ÉTAPE 6 - CALCULS D'IMPACTS PUREMENT EEIO

Avant d'entreprendre l'hybridation en tant que telle, il est souhaitable, aux fins d'analyses, de calculer les impacts du cycle de vie de l'unité fonctionnelle à partir des tableaux non hybridés EEIO et des tableaux ACV. Ceci permet une comparaison des perspectives purement ACV et purement EEIO lors du contrôle de la qualité de l'hybridation (étape 9).

Lors du présent cas d'étude, les impacts du berceau à l'usine ont été calculés séparément avec les perspectives ACV et EEIO dès qu'un processus IO et un prix moyen ont été identifiés pour la batterie et pour le reste du véhicule. Tel qu'illustré à la Figure 19, les deux inventaires mènent à des impacts totaux presque égaux en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. Rien ne semble donc indiquer que nous ayons fait des choix déraisonnables en ce qui concerne les prix.

ÉTAPE 7 - DETERMINER LES CATEGORIES D'INTRANTS COUVERTS DE FAÇON EXHAUSTIVE DANS LA PARTIE ACV

Il existe plusieurs algorithmes sophistiqués pour corriger la double représentation de certains intrants dans la partie ACV et EEIO. Ce cas d'étude démontre une approche simple et transparente. Il s'agit de regrouper les 200 secteurs (produits) économiques de Exiobase par catégories. Il sera ensuite possible, lors de l'hybridation, de déclarer quelles catégories d'intrants sont déjà couvertes dans la partie ACV et ne devraient pas être incluses dans le complément EEIO.

Trois catégories ont été choisies: les produits qui servent généralement d'intrants énergétiques (électricité, gaz naturel, etc.); les produits qui servent généralement de matériel à intégrer dans d'autres produits (métaux, plastiques, pièces, etc.); les processus qui servent généralement au transport de marchandises. Il a été jugé que ces catégories regroupaient bien l'ensemble des intrants déjà représentés, de façon plus spécifique, par les différents processus ACV. Si jugé nécessaire après une première ronde d'hybridation (étape 9, plus bas), un plus grand nombre de catégories

(matériaux contribuant à la masse de produits primaires, matériaux organiques contribuant à la masse, infrastructures, etc.) peut être défini afin d'obtenir une correction plus fine du double comptage.

Ces catégories sont aisément définies et préservées dans l'objet pyLCAIO (voir définitions des catégories « transport » et « énergie » à la Figure 16).

```
# list categories of flows that could be expected to be fully covered in the process inventory
ecar.io_categories['transport'] = [
    'Inland water transportation services',
    'Other land transportation services',
    'Railway transportation services',
    'Sea and coastal water transportation services']

ecar.io_categories['energy'] = [
    'Anthracite',
    'Coking Coal',
    'Other Bituminous Coal',
    'Sub-Bituminous Coal',
    'Patent Fuel',
    'Lignite/Brown Coal',
    'BKB/Peat Briquettes',
    'Peat',
    'Crude petroleum and services related to crude oil extraction, excluding surveying',
    'Natural gas and services related to natural gas extraction, excluding surveying',
    'Natural Gas Liquids',
    'Other Hydrocarbons',
    'Uranium and thorium ores',
    'Coke Oven Coke',
    'Gas Coke',
    'Coal Tar',
    'Motor Gasoline']
```

Figure 16: Regroupement de produits en catégories dans le logiciel pyLCAIO pour gérer le double comptage.

ÉTAPE 8 - HYBRIDATION AUTOMATISEE

Tous les paramètres nécessaires ayant été déterminés, il est maintenant facile de demander à l'objet pyLCAIO d'effectuer l'hybridation en tant que telle. Il suffit de fournir à la méthode «*hybridize_process()*» l'identifiant du processus à hybrider, la région, le secteur économique, le prix, et la liste des catégories de secteurs à ne pas inclure pour éviter le double comptage (Figure 17). La méthode complète ensuite les étapes décrites en Figure 10.

```
# Hybridize Electrolytic cell made in Asia (assume China)
#
# process:
#   80005 Battery cell
#
# IO sector:
#   p31 -- Electrical machinery and apparatus n.e.c.
#
#   which includes CPA:
#   31.40.23 - Nickel-cadmium and nickel-iron and other electric
#   accumulators'
#
# Region: China
#
price = 15.331E-6 # in Million Euros per kg
# endogenous price for China

ecar.hybridize_process(80005,
    ('CN', 'Electrical machinery and apparatus n.e.c.'),
    price,
    doublecounted_categories=('material', 'energy', 'transport'))
```

Figure 17: Hybridation dans le logiciel pyLCAIO du processus ACV « Battery cell » avec le processus EEIO « Electrical machinery and apparatus, n.e.c. » de la table chinoise de Exiobase, et exclusion des flux des matériaux, des énergies et des transports pour gérer le double comptage.

Si plusieurs processus doivent être hybridés avec les mêmes paramètres (même région, même secteur, etc.), il est possible de gagner du temps et de tous les hybridier ensemble en mettant la méthode d'hybridation dans une boucle. Ainsi, dans la Figure 18, les processus No 80008, 80011, 80012, etc. sont tous hybridés de la même manière.

```
# HYBRIDIZE IRON AND STEEL PARTS OF BATTERY AND CELLS
#
# processes:
# 80008 Tray w fixings
# 80011 Strap retention
# 80012 Lower retention
# 80013 Heat transfer plates
# 80017 IBIS
# 80020 Clamps & fixings
# 80024 Module fixings
#
# Processes not hybridized because assumed vertically integrated intermediates
#
# IO sector:
# Basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof
# p27.a
#
# Region: CN
#
# Price:
price = 0.756E-6 # Million Euros per kg
          # BACI price for China

for process in (80008, 80011, 80012, 80013, 80017, 80020, 80024):
    ecar.hybridize_process(
        process,
        ('CN',
         'Basic iron and steel and of ferro-alloys and first products thereof'),
        price,
        doublecounted_categories=('material', 'energy', 'transport'))
```

Figure 18: Automatisation de l'hybridation dans le logiciel pyLCAIO de toutes les pièces en acier de la batterie qui sont manufacturées en Chine.

ÉTAPE 9 - CONTROLE ITERATIF DE LA QUALITE DE L'HYBRIDATION

Il peut s'avérer avantageux de travailler de façon itérative lors de l'hybridation, surtout si le processus est flexible et en partie automatisable. À la fin d'une ronde d'hybridation, une analyse des résultats permet d'identifier les aspects de l'hybridation qui nécessitent le plus d'améliorations.

Ainsi, l'hybridation du présent cas d'étude s'est faite de façon très itérative. D'abord des résultats purement ACV et purement EEIO ont été calculés avec les systèmes non hybridés. Leur contraste a mis en lumière une différence déraisonnable entre les impacts de toxicité calculés par les deux modèles, ce qui a permis d'identifier certaines incohérences entre leurs facteurs de caractérisation des deux bases de données. Ensuite, une première ronde d'hybridation a combiné tous les processus de l'avant-plan avec seulement deux secteurs IO ("machineries électriques" et "véhicule à moteur") et corrigé pour le double comptage uniquement pour les entrants énergétiques et les matériaux de production. Une analyse rapide des résultats de cette première hybridation a mis en lumière la double représentation du transport des marchandises dans les parties ACV et EEIO du cycle de vie de la batterie. Une troisième ronde d'hybridation a notamment permis de remédier à ce problème de double comptage, en plus de raffiner la liste de matériaux de production en EEIO qui sont déjà pleinement représentés dans la partie ACV. La quatrième et la plus longue ronde de perfectionnement a grandement raffiné la sélection des produits commercialisés et non commercialisés, le choix des secteurs économiques à hybridier avec chaque processus, et la sélection de prix pour l'hybridation. Une dernière ronde d'amélioration de ces mêmes paramètres n'a pas mené à des résultats très différents.

À chaque cycle d'hybridation, le praticien peut donc:

- Comparer les résultats ACV, EEIO et hybrides. Est-ce que certaines différences semblent surprenantes, démesurément élevées ou basses?
- Comparer les chaînes de valeurs qui contribuent le plus aux impacts du système hybridé. Est-ce qu'il semble y avoir double représentation de certains éléments dans la partie ACV et EEIO (double comptage)?

- En cas de «surprises», identifier les paramètres les plus incertains et voir s'ils peuvent expliquer cette anomalie:
 - Les prix semblent-ils raisonnables?
 - Est-ce que certains secteurs additionnels auraient dû être inclus dans la correction du double comptage?
- Même en l'absence de résultats suspects, est-ce que les différents paramètres de l'hybridation atteignent le niveau de détail et de confiance souhaité?

ÉTAPE 10 - ÉTENDRE L'AVANT-PLAN OU NON?

Une fois l'hybridation jugée acceptable, il reste à déterminer si les objectifs définis au début de l'étude ACV (première étape des « Objectifs et champ de l'étude » au sens ISO 14040) sont atteints. Si oui, l'étude peut alors être considérée comme terminée. Au contraire, si une part trop importante des impacts provient du complément (générique) EEIO, le praticien peut envisager d'ajouter de nouveaux processus à l'avant-plan de son modèle pour accroître la spécificité de son étude et moins dépendre du complément EEIO pour représenter l'ensemble de son système (Figure 13). Ajouter de tels processus impliquera la collecte de nouvelles données. Cette étape boucle le processus itératif d'hybridation.

Il est à noter que, même si le présent cas d'étude a entamé le processus d'hybridation avec déjà quelques centaines de processus précompilés en avant-plan, il peut s'avérer avantageux d'appliquer cette boucle itérative d'hybridation dès la définition du tout premier processus ACV. Ainsi, les caractéristiques du complément EEIO peuvent guider les efforts de recherche et orienter la collecte de données. Pour ce faire, le praticien se basera sur l'identification:

- des processus ou chaînes de valeur du complément EEIO qui contribuent le plus au cycle de vie du produit; et
- des processus ou chaînes de valeur qui ont le plus de chance de distinguer le système à l'étude de la moyenne de son secteur économique. Ici, une certaine expertise est donc requise.

La collecte de nouvelles données d'avant-plan est au-delà des objectifs de ce rapport, mais des priorités de recherche sont néanmoins identifiées lors de l'analyse des résultats.

6.1.3 Résultats et analyse

Résultats non-hybridés

La Figure 19 présente les scores relatifs d'impacts environnementaux potentiels, du berceau à l'usine¹⁹, calculés par l'ACV conventionnelle et l'analyse EEIO d'un véhicule électrique et de sa batterie, le tout sans hybridation. Il est à noter que le tableau EEIO est trop agrégé pour analyser spécifiquement un véhicule électrique ou une batterie; ce sont donc plutôt un «véhicule à moteur» et une «machinerie électrique» de masses comparables qui sont analysés.

Les approches ACV et EEIO mènent à des estimations très semblables pour les changements climatiques. Toutefois, même si l'impact total est presque égal, l'analyse de contribution diffère: l'ACV associe approximativement la moitié des impacts à la production de la batterie, tandis que l'analyse EEIO n'attribue que 20 % des impacts à la «machinerie électrique».

¹⁹ *cradle-to-gate*

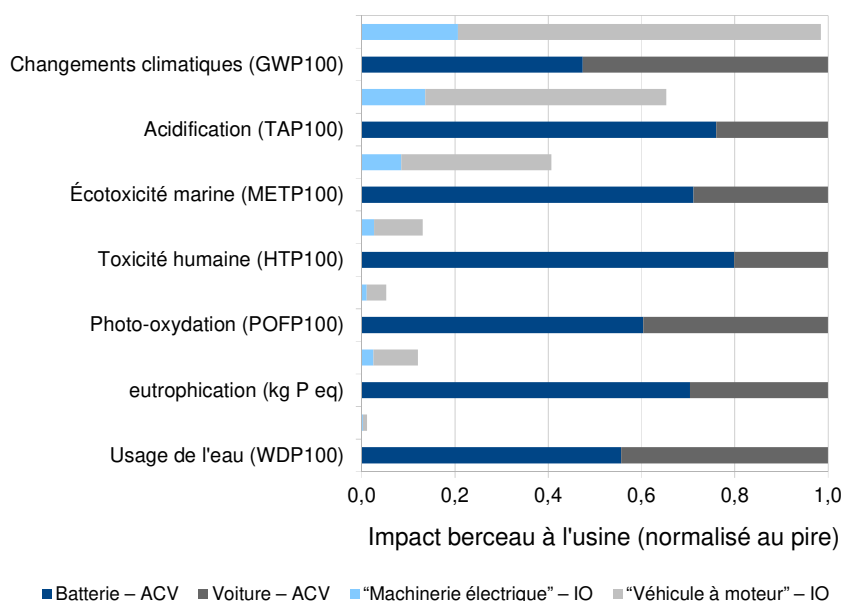


Figure 19: Scores d'impact, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV (ACV) et par EEIO (IO).

Il n'en demeure pas moins rassurant de voir des résultats du même ordre de grandeur pour des impacts généralement bien documentés (i.e. inventoriés et caractérisés) tant en ACV qu'en EEIO, comme c'est le cas pour les émissions de GES et les émissions de substances acidifiantes. Ceci semble confirmer que les différentes bases de données sont adaptées pour une telle analyse et que les prix choisis pour convertir les dimensions physiques en unités monétaires sont dans l'ordre du raisonnable.

Lorsque des différences importantes se présentent entre les impacts ACV et EEIO, celles-ci peuvent indiquer:

1. Une couverture différente des flux élémentaires. Par exemple, le faible nombre d'émissions toxiques inventoriées dans Exiobase explique la différence entre les estimations de la toxicité humaine par l'ACV et l'EEIO.
2. Une réelle différence entre le cycle de vie d'un produit spécifique et le cycle de vie du « produit moyen » du secteur économique auquel il appartient. Par exemple, la quantité importante de nickel dans la cathode de la batterie mène à un cycle de vie différent de celui d'une « machinerie électrique moyenne », ce qui peut expliquer en partie les émissions d'ions nickel et l'écotoxicité marine plus élevées avec le modèle ACV qu'avec le modèle EEIO.
3. Une estimation erronée des prix ou des flux élémentaires. Par exemple, concernant ce dernier point, Ellingsen et coll. reconnaissent que leurs estimations (élevées) de l'utilisation d'eau dans le cycle de vie des batteries se basent sur des données très incertaines.

Par ailleurs, cette analyse comparative est limitée pour certains impacts par le manque de cohérence entre la méthode de caractérisation ReCiPe, utilisée dans la partie ACV, et la matrice de caractérisation compilée par l'Université Leiden (CML) pour Exiobase. Ainsi, même si les deux analyses calculent les émissions de NOx comparables (49 et 23 kg, respectivement), les impacts d'oxydation photochimique qu'elles estiment diffèrent par plus d'un ordre de grandeur, une différence qui semble essentiellement causée par des différences entre les facteurs de caractérisation. En fait, les difficultés associées au manque d'harmonisation des facteurs de caractérisation entre les parties ACV et EEIO ont été une des surprises du présent cas d'étude. Plusieurs corrections ont été nécessaires afin de réconcilier d'importantes différences quant à la caractérisation des impacts de toxicité, mais de tels efforts d'harmonisation pour les autres impacts représentent un défi à long terme pour les communautés ACV et EEIO et va malheureusement au-delà de ressources disponibles dans le cadre de ce projet. Par conséquent, il est fortement conseillé de n'hybrider des analyses ACV et EEIO que si celles-ci utilisent les mêmes méthodes de caractérisation.

Résultats hybridés véhicule électrique

RESULTATS HYBRIDES, DU BERCEAU A L'USINE

Tel qu'illustré à la Figure 20, l'hybridation ACV-EEIO mène à une augmentation de 30% du score sur les changements climatiques, par rapport aux analyses ACV ou EEIO non hybridées. Autrement dit, nos résultats indiquent que les problèmes de troncatures des inventaires de production d'Ellingsen et coll. et Hawkins et coll. mèneraient à une sous-estimation des impacts sur le climat de l'ordre de 23 % par rapport aux impacts totaux.

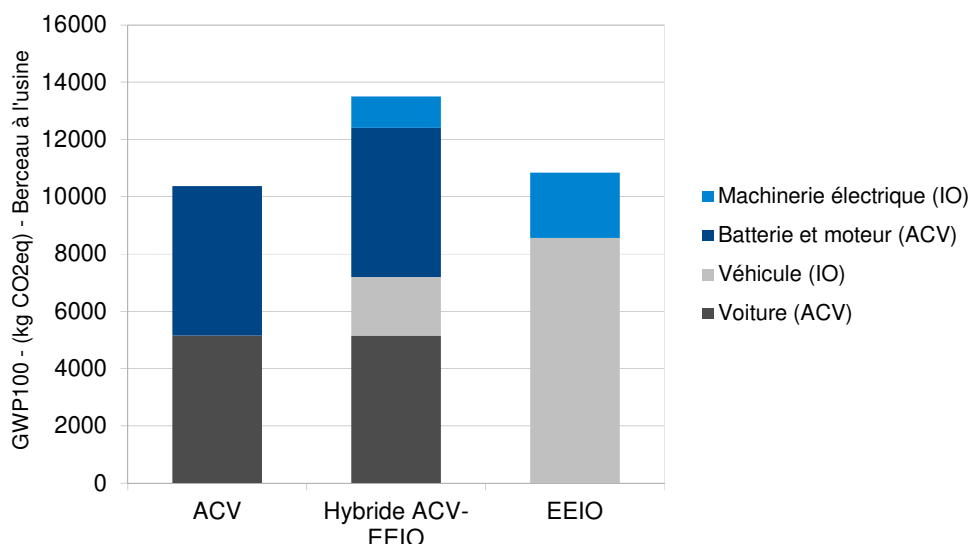


Figure 20: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV, par EEIO et par analyse hybride. Pour l'analyse hybride, les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.

Une troncature de cet ordre de grandeur est en accord avec plusieurs cas d'études qui estiment des niveaux de troncature entre 30% et 50% en ACV conventionnelle (Lenzen et Dey, 2000 ; Williams, 2004 ; Junnila 2006 ; Ferrao et Nhambui 2009; Crawford 2008 ; Zhai et Williams 2010 ; et Acquaye et coll. 2011 ; tel que synthétisé dans la revue de littérature par Majeau-Bettez et coll. 2011). Une part de la troncature du présent cas d'étude s'explique particulièrement par le fait que l'inventaire de Hawkins et coll., contrairement à celui d'Ellingsen et coll., n'inclut pas de transport de marchandises pour la majorité des processus de production. Lors de l'hybridation, le complément EEIO vient donc ajouter des intrants génériques de transport à tous les processus de production du véhicule. Ces intrants additionnels de transports n'expliquent cependant que 6% de la correction totale introduite par l'hybridation.

Le reste de l'augmentation s'explique par une multitude de chaînes de valeurs, qui contribuent toutes individuellement moins de 1% de l'augmentation. Parmi les chaînes de valeurs qui contribuent le plus à l'impact potentiel sur le climat, on retrouve les processus suivants:

- Services d'affaires (*Business services*)
- Commerce de gros et services commerciaux (*Wholesale trade and commission trade services*)
- Vente et entretien de véhicules (*Sale, maintenance, repair of motor vehicles*)
- Vente au détail et services commerciaux (*Retail trade services*)
- Papeterie (*Paper and paper products*)
- Recherche et développement (*Research and development services*)
- etc.

Donc, s'il était jugé prioritaire d'augmenter la spécificité de l'analyse et de diminuer la part des impacts qui émanent de la description EEIO générique, il semblerait opportun de modéliser : 1) un transport de marchandises propre à la production de véhicules électriques et de batteries Li-ion et 2) une commercialisation (vente gros, détail) et un suivi (entretien) qui correspondent aux caractéristiques spécifiques du marché des véhicules électriques.

Pour ce qui est des autres impacts (Figure 21), le complément EEIO représente 15% de l'impact d'acidification total et 12% de l'écotoxicité marine totale. Il est intéressant de constater que l'importance relative du complément EEIO pour ces impacts est à peine plus grande que pour la toxicité humaine (7%) et l'eutrophication (7%), alors que la comparaison des modèles ACV et EEIO non hybridés présentait une bien plus grande différence entre ces impacts (voir Figure 19). Ce réalignement s'explique par la correction pour le double comptage durant le processus d'hybridation: une plus grande part des émissions acidifiantes est reliée aux secteurs des énergies et des matériaux, qui ont tous été retirés pendant l'hybridation pour éviter le double comptage. Au contraire, une plus grande part des émissions eutrophisantes proviennent de secteurs qui se sont retrouvés dans le complément EEIO durant l'hybridation. Autrement dit, la comparaison entre les résultats des ACV et EEIO non hybridés ne donne pas nécessairement une bonne estimation des proportions des parties ACV et IO au sein du système hybridé.

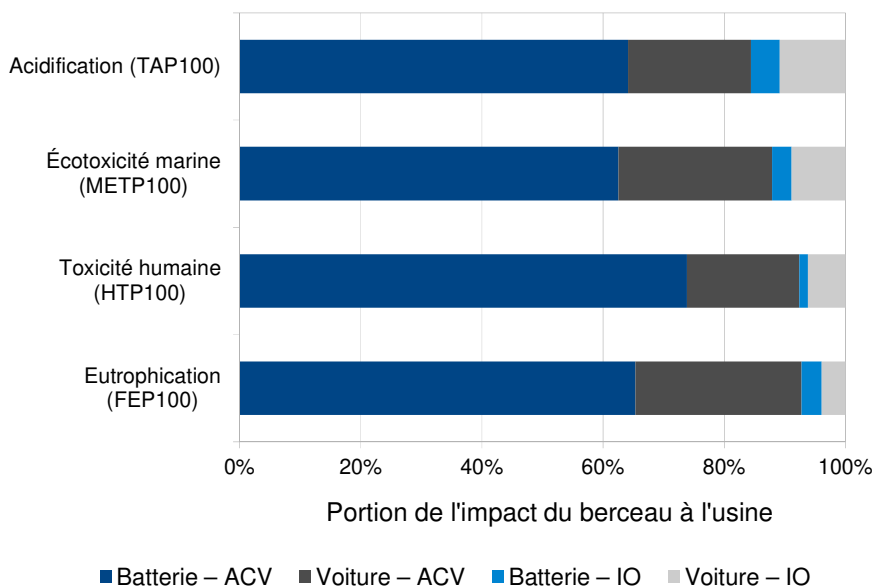


Figure 21: Scores d'impact, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.

Résultats de l'analyse comparative des véhicules, avec hybridation

ANALYSE COMPARATIVE, DU BERCEAU A L'USINE

Les résultats de la section précédente indiquent une troncature d'environ 23% des impacts climatiques lors de l'ACV classique de la phase de production d'un véhicule électrique.

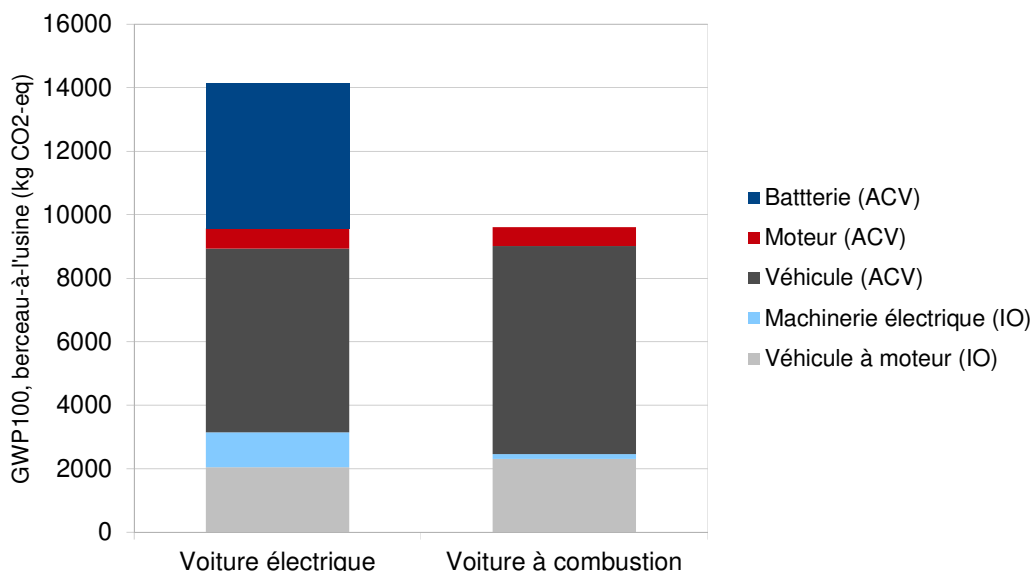


Figure 22: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau à l'usine, d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.

Dans le présent cas d'étude, le véhicule électrique et le véhicule conventionnel sont inventoriés conjointement et partagent la majorité de leurs pièces, et donc l'hybridation de la production du véhicule affecte les deux produits de façon presque égale, sans influencer sur leur comparaison (voir Figure 22, en gris pâle). Cependant la production de la batterie et du moteur diffère pour les deux véhicules et implique des secteurs économiques différents. Leur hybridation affecte donc différemment les deux véhicules (Figure 22, en bleu pâle). L'ACV conventionnelle estimait déjà que la production du véhicule électrique était associée à des impacts potentiels sur les changements climatiques supérieurs d'environ 3800 kg CO₂-eq, et l'hybridation de la production de la batterie et du moteur augmente cette différence d'environ 18%. Autrement dit, le complément EEIO explique 15% de la différence totale d'impact entre les deux véhicules.

De façon plus générale, on trouve deux situations principales où des problèmes de troncature peuvent affecter une ACV comparative.

1. Les produits comparés ont des cycles de vie qui impliquent des secteurs économiques significativement différents. La troncature intervient donc à des niveaux différents. C'est le cas par exemple lorsqu'on compare le travail au bureau (impliquant du navettage) et le télétravail, un meuble en bois et en polymère plastique, etc.
2. Les inventaires des deux produits comparés n'offrent pas le même niveau de complétude, par manque de ressources ou d'accès aux données.

ANALYSE COMPARATIVE, DU BERCEAU AU TOMBEAU

On rappelle que, tel que justifié à la section 6.1.2, seuls les processus de la phase de production ont été hybridés, et non pas la phase d'utilisation (qui ne se passe pas en industrie) ni la fin de vie (qui ne représente qu'une infime partie des impacts selon Hawkins et coll. 2013).

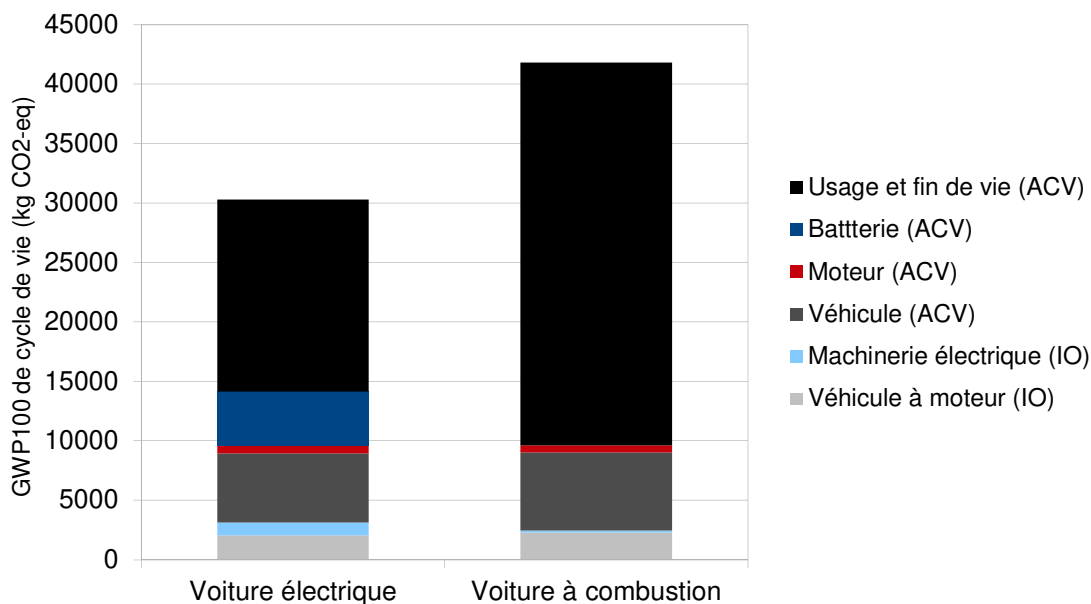


Figure 23: Scores d'impact sur les changements climatiques, du berceau au tombeau, d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel estimés par ACV hybride. Les contributions de la part ACV (ACV) et de la part EEIO (IO) sont distinguées.

Ainsi, une fois rapporté au score du berceau au tombeau, le complément EEIO généré lors de l'hybridation de la phase de production ne représente plus que 10% du score d'impact potentiel sur les changements climatiques pour le véhicule électrique (voir figure 23). Pour ce qui est de la comparaison entre les deux véhicules, l'hybridation des inventaires diminue d'environ 5% l'avantage du véhicule électrique par rapport au véhicule conventionnel.

La question reste toutefois ouverte à savoir quel serait l'impact sur la comparaison des résultats si l'ensemble des processus de la base de données *ecoinvent* était hybridé, et notamment la production d'électricité et de carburant. À ce jour, toutes les analyses hybrides dans la littérature scientifique se limitent à une hybridation de l'avant-plan, tel qu'effectué lors du présent cas d'étude.

6.2 Cas d'étude no.2 : bâtiment

6.2.1 Présentation

Objectifs du cas d'étude

Ce second cas d'étude est choisi pour mettre en œuvre l'analyse :

- Sur une ACV relativement simple, modélisée avec quelques dizaines de processus ;

Il peut s'agir typiquement de la seconde itération d'une ACV, réalisée suite à une première itération très rapide et préliminaire et une collecte de données spécifiques.

- à l'aide du logiciel ACV SimaPro et des bases de données qu'il contient ;

L'objectif est d'utiliser la base de données EEIO américaine CEDA identifiée précédemment comme la plus exhaustive en termes de couverture des flux environnementaux et la plus désagrégée (voir les sections 4.2 et 5.1).

- Sans expertise autre que celle d'un praticien ACV ni connaissance d'outil spécifique.

SimaPro et un tableur (p.ex. Excel) sont les seuls outils requis. Pas d'expertise requise en programmation ni en calcul matriciel.

De plus, le cas d'étude est utilisé également pour mettre en perspective les impacts de certains services d'avant-plan qui sont généralement omis des frontières d'une étude ACV classiques.

Caractéristiques

Le **point de départ de ce cas d'étude est une ACV**, en cours de réalisation au CIRAIG, d'un bâtiment d'habitation collective construit au Québec (Canada) en 2014. Sa structure porteuse est en panneaux de bois massif lamellé-croisé (Figure 24).

L'unité fonctionnelle de l'ACV est d'« **Assurer un espace de vie confortable pour ses habitants, sur une durée de 75 ans, dans un immeuble résidentiel de quatre étages et 20 unités, construit au Québec en 2014** ».

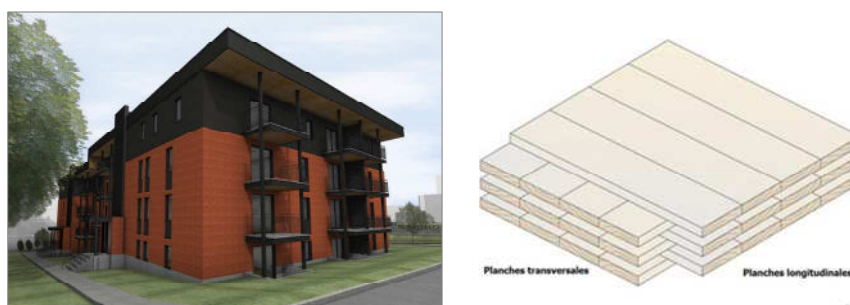


Figure 24: Bâtiment d'habitation collective considéré dans le cas d'étude (gauche), et coupe transversale d'un panneau de bois lamellé-croisé (droite). Crédit photo : Société d'Habitation du Québec.

L'avant-plan du système évalué est composé des étapes et opérations décrites à la Figure 25. Au-delà des matériaux et de l'étape de construction, l'étude considère donc l'utilisation et la maintenance durant 75 années du bâtiment puis sa démolition et la gestion des matières résiduelles générées. Les données primaires d'avant-plan ont été collectées auprès de l'entrepreneur sur la base des devis et plans pour les matériaux (25 matériaux différents), leur distance d'approvisionnement, et la construction du bâtiment, et à l'aide de son expertise pour le remplacement de certains matériaux durant la vie du bâtiment. Les données propres à la consommation d'énergie et d'eau lors de la phase d'utilisation ont été collectées à partir de simulations effectuées sur le bâtiment en phase de conception et également lors de la mise en fonctionnement de la chaudière à granules de bois.

Comme il est d'usage lors d'une ACV, les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles sont complétées par des données secondaires, c'est-à-dire issues de la base de données d'inventaire *ecoinvent*, de la base de données interne du CIRAIG, de bases de données publiques disponibles, d'une revue de littérature et de jugements d'experts. La plupart de ces données secondaires proviennent d'articles scientifiques sur des ACV de bâtiments ainsi que des jeux de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponibles dans la base de données *ecoinvent* v3.1. Il convient de noter que cette dernière contient des jeux de données spécifiques au contexte québécois, développés dans le cadre du projet de base de données d'inventaire du cycle de vie québécoise, mené par le CIRAIG. Ces données, qui concernent par exemple les productions de bois, d'eau potable, de ciment, de bois aggloméré et, bien sûr, d'électricité, ont été utilisées dès que pertinent.

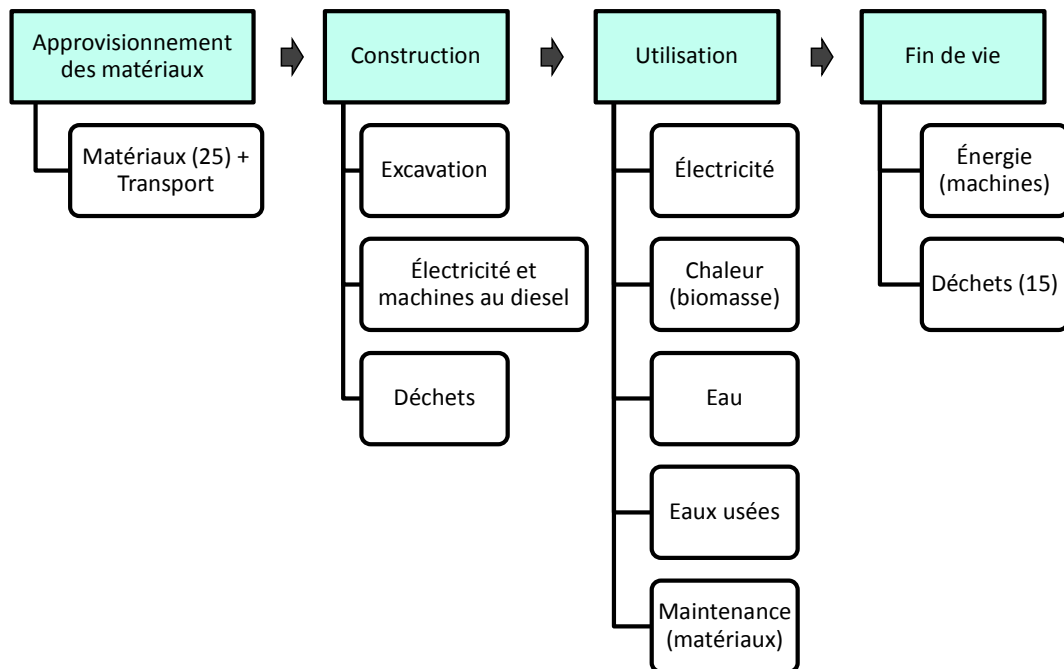


Figure 25: Étapes et opérations d'avant-plan du système évalué.

À la différence du cas d'étude sur le véhicule, ce cas-ci se prête relativement bien à l'utilisation de données IO non régionalisées puisque les opérations considérées, y inclus l'approvisionnement en matériaux, sont majoritairement locales (à l'échelle de la province du Québec et du Canada).

Enfin, au-delà des étapes et opérations décrites ci-dessus, le cas d'étude est mis à profit pour évaluer les impacts causés par les **services** suivants, dont les montants ont été collectés lors du volet économique de l'ACV.

- Dépenses à la construction
 - Coûts de construction – Exigences générales
 - Aménagement - Équipement en lien avec le bâtiment
 - Aménagement - Aménagement extérieur
- Dépenses à l'utilisation
 - Gestion des installations liées au bâtiment
 - Gestion de l'immeuble
 - Assurance
 - Taxes municipales

Tableau 8: Produits/services, processus ACV et processus EEIO utilisés pour le cas d'étude Bâtiment

Matériaux	Processus ACV	Unité	Source	Processus EEIO de CEDA 4
Bois d'œuvre*	Bois d'œuvre {QC}	m ³	adapté	Sawmills and wood preservation
Panneaux de bois lamellé-collé	Panneaux de bois lamellé-collé {QC}	m ³	adapté	Engineered wood member and truss manufacturing
Panneaux de bois lamellé-croisé	Panneaux de bois lamellé-croisé {QC}	m ³	adapté	Engineered wood member and truss manufacturing
Panneaux de bois aggloméré	Panneaux de bois aggloméré {QC}	m ³	adapté	Reconstituted Wood Product Manufacturing
Ciment	Concrete, 25MPa {QC}	m ³	adapté	Ready-Mix Concrete Manufacturing
Acier*	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}	kg	ecoinvent	Steel product manufacturing from purchased steel
Panneaux de gypse*	Gypsum plasterboard {GLO}	kg	ecoinvent	Lime and gypsum product manufacturing
Planchettes en vinyle*	Vinyle {GLO}	kg	adapté	Plastics packaging materials and unlaminated film and sheet mnfg
Feuille d'acétate d'éthyle vinyle*	Ethylvinylacetate, foil {GLO}	kg	ecoinvent	Plastics packaging materials and unlaminated film and sheet mnfg
Dalles de pierre*	Natural stone plate, cut {GLO}	kg	ecoinvent	Cut Stone and Stone Product Manufacturing
Céramique*	Ceramic tile {GLO}	kg	ecoinvent	Brick, tile, and other structural clay product manufacturing
Enduit*	Acrylic filler {GLO}	kg	ecoinvent	Paint and Coating Manufacturing
Vernis*	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {GLO}	kg	ecoinvent	Paint and Coating Manufacturing
Briques*	Brick {GLO}	kg	ecoinvent	Clay and nonclay refractory manufacturing
Cadres de fenêtre*	Window frame, glass fiber	m ²	adapté	Other pressed and blown glass and glassware mnfg
Vitrage*	Glazing, triple, U<0.5 W/m2K {GLO}	m ²	ecoinvent	Flat Glass Manufacturing
Portes extérieures*	Door, outer, wood-aluminium {GLO}	m ²	ecoinvent	Wood windows and doors and millwork
Portes intérieures*	Door, inner, wood {GLO}	m ²	ecoinvent	Wood windows and doors and millwork
Parre vapeur*	Polyethylene, linear low density, extruded {RoW}	kg	adapté	Plastics packaging materials and unlaminated film and sheet mnfg
Laine de verre*	Glass wool mat {GLO}	kg	ecoinvent	Mineral Wool Manufacturing
Panneaux de polystyrène*	Polystyrene foam slab {GLO}	kg	ecoinvent	Polystyrene Foam Product Manufacturing
Isolation de conduites*	Tube insulation, elastomere {GLO}	kg	ecoinvent	Plastics Material and Resin Manufacturing
Scellant au bitume*	Bitumen adhesive compound, cold {GLO}	kg	ecoinvent	Asphalt Shingle and Coating Materials Manufacturing
Système de ventilation	Ventilation system, decentralized, 6 x 120 m3/h, polyethylene ducts {GLO}	p	ecoinvent	Air conditioning, refrigeration, and warm air heating equipment mnfg
Câblage	Cable, three-conductor cable {GLO}	kg	ecoinvent	Communication and energy wire and cable mnfg
Transport des matériaux	<i>inclus via les processus de marché ecoinvent. Pour les processus adaptés, le processus de transport ajouté varie selon le matériau, mais souvent : Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}</i>		ecoinvent	Truck transportation
Construction	Processus ACV	Unité	Source	Processus EEIO de CEDA 4
Excavation	Excavation, hydraulic digger {GLO}	m ³	ecoinvent	Construction Machinery Manufacturing + Petroleum refineries + <u>émissions directes du processus ecoinvent</u>
Électricité	Electricity, low voltage {CA-QC}	kWh	ecoinvent	<u>processus ecoinvent conserve</u> (au lieu du processus EEIO 'Electric power generation, transmission, and distribution')
Machinerie et diesel	Diesel, burned in building machine {GLO}	MJ	ecoinvent	Construction Machinery Manufacturing + Petroleum refineries + <u>émissions directes du processus ecoinvent</u>
Déchets de construction	<i>13 processus de déchets (voir Fin de vie)</i>	-	-	-
Utilisation	Processus ACV	Unité	Source	Processus EEIO de CEDA 4

Électricité	Electricity, low voltage {CA-QC}	kWh	ecoinvent	processus ecoinvent conserve (au lieu du processus EEIO 'Electric power generation, transmission, and distribution')
Chauffage	Heat production, wood pellet, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014 {RoW}	MJ	adapté	Industrial Process Furnace and Oven Manufacturing + Sawmills and wood preservation + Electric power generation, transmission, and distribution + Waste Management and Remediation Services + <u>émissions directes du processus ACV</u>
Eau	Tap water {QC}	m ³	adapté	Water, sewage and other systems
Eaux usées	Wastewater treatment, residential {QC}	m ³	adapté	Water, sewage and other systems
Maintenance des matériaux	<i>renouvellement d'une fraction des matériaux listés ci-dessus avec une *</i>	-	-	-
Fin de vie	Processus ACV	Unité	Source	Processus EEIO de CEDA 4
Machinerie et diesel pour démolition	Diesel, burned in building machine {GLO}	MJ	ecoinvent	Construction Machinery Manufacturing + Petroleum refineries + <u>émissions directes du processus ecoinvent</u>
Déchets de bois	Waste wood, untreated {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchet de ciment	Waste concrete gravel {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchet d'acier (recyclage)	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchet de gypse	Waste gypsum {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de plastiques	Waste plastic plaster, for final disposal {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets inertes	Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de peinture	Waste paint on wall {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de cadre de fenêtre	Used window frame, plastic {RoW} treatment of, collection for final disposal	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de vitrage	Used triple glazing, U<0.5W/m2K {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de porte extérieure en bois	Used door, outer, wood-aluminium {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de porte intérieure en bois	Used door, inner, wood {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets de laine de verre	Waste mineral wool {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Déchets polystyrène	Waste polystyrene isolation, flame-retardant {GLO}	kg	ecoinvent	Waste management and remediation services
Dépenses à la construction				
		Unité	Processus EEIO de CEDA 4	
Coûts de construction – Exigences générales		CA\$	Real estate	
Aménagement - Équipement en lien avec le bâtiment		CA\$	Lawn and Garden Equipment Manufacturing	
Aménagement - Aménagement extérieur		CA\$	Lawn and Garden Equipment Manufacturing	
Dépenses à l'utilisation				
		Unité	Processus EEIO de CEDA 4	
Gestion des installations liées au bâtiment		CA\$	Services to buildings and dwellings	
Gestion de l'immeuble		CA\$	Services to buildings and dwellings	
Assurance		CA\$	Insurance agencies, Brokerages, and Related Activities	
Taxes municipales		CA\$	Accounting, Tax Preparation, Bookkeeping, and Payroll Services	

* matériaux dont une fraction est remplacée lors de la maintenance durant la phase d'utilisation.

6.2.2 Outils et méthodes

Modélisation EEIO

La base de données EEIO des É-U pour l'année 2002 qui est fournie avec le logiciel SimaPro (v8.05.13) est utilisée. Il s'agit du modèle CEDA 4.1 présenté plus haut (section 4.2), dans sa version allocation économique (Suh 2010). Le modèle est basé sur la hiérarchie du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)²⁰. Chaque processus EEIO de la base de données est un secteur de l'industrie, qui délivre un produit « moyen » unique. L'unité fonctionnelle de chaque processus est le US\$2002, prix producteur²¹.

Il est donc fait l'hypothèse de l'économie miroir où le Québec est assimilé aux États-Unis. Acceptable à bien des égards (économies de deux pays développés, pays en accords commerciaux, contexte nord-américain), l'hypothèse est toutefois peu valide pour la production électrique et ses impacts. L'électricité québécoise est à 95% de source hydro, alors que l'électricité américaine est aux deux-tiers d'origine fossile (charbon et gaz naturel), donc significativement plus impactante par kWh au consommateur (changement climatique, acidification, eutrophisation, particules fines, etc.). Cela fait partie des limites inhérentes à l'hypothèse de l'économie miroir, et l'analyste doit en tenir compte dès le début de l'étude. Ainsi, pour la modélisation EEIO comme pour la modélisation hybride, il sera utilisé le processus ACV du marché de l'électricité québécoise ('Electricity, low voltage {CA-QC}') en lieu et place du processus de CEDA ('*Electric power generation, transmission, and distribution*') pour l'électricité d'avant-plan consommée (lors de la construction et durant les années d'utilisation du bâtiment).

La modélisation EEIO a consisté en :

1. Identification des processus d'avant-plan de l'ACV avec des processus de la base de données EEIO (parmi les 424 disponibles)
 - a. L'identification est réalisée pour les 67 processus ACV d'avant-plan.
 - b. Le transport final d'approvisionnement des matériaux est ajouté comme un processus EEIO distinct ('*Truck transportation*') des matériaux eux-mêmes, et considérant la masse totale transportée.
 - c. Le processus ACV de production de chaleur par chaudière à biomasse est désagrégé en sous-processus pour permettre sa modélisation EEIO, considérant les données l'infrastructure de la chaudière, les granules de bois, l'électricité de fonctionnement, et les déchets générés (i.e. cendres). Ainsi, 4 processus EEIO sont utilisés pour ce processus de production de chaleur. De surcroît, les émissions directes du processus ACV sont conservées telles quelles. Cette adaptation du processus relève du principe de l'étape No. 2 du processus itératif représenté sur la figure 13 où l'on cherche à identifier les transactions (achat d'une chaudière, des granules de bois, d'électricité, ou encore paiement pour le traitement des déchets) impliquées pour produire au final des MJ de chaleur.
 - d. *Durée de cette étape : 3.5 h de travail*
 - e. La précision qu'on pouvait avoir dans les processus ACV se perd quelque peu dans la généralité de la base de données EEIO
 - i. Pour les matériaux, elle offre toutefois un niveau de détail très acceptable avec assez peu de regroupements: les 25 matériaux de l'ACV s'apparient avec 20 processus EEIO (voir Tableau 8).
 - ii. Pour la gestion des matières résiduelles surtout, mais aussi l'approvisionnement en eau et le traitement des eaux usées, le niveau de détail est très faible. La base de données EEIO CEDA n'est pas conçue pour modéliser précisément ces étapes. Les 15 processus de traitement de déchets distincts de l'ACV sont tous appariés avec le même processus EEIO (voir Tableau 8).

20 Le modèle a procédé toutefois à certaines agrégations/désagrégations et n'offre pas strictement la même granularité que la classification SCIAN.

21 Pour information, la version académique de CEDA disponible au format Excel est accompagnée d'un fichier de conversion prix acheteur ↔ prix producteurs pour les É-U et pour l'année 2002.

iii. Au total, 26 processus EEIO sont utilisés.

2. Conversion des unités physiques en tonnes métriques (produits) et en MJ (énergies)

- a. Note : cette étape est rendue nécessaire par le choix préalable de la source utilisée pour trouver les prix unitaire. Cette source fournit des prix en €2007 par tonne humide ou par MJ.
- b. Pour ce cas d'étude, la plupart des données nécessaires pour la conversion avaient été compilées lors de la collecte des données pour l'ACV (p.ex. masse volumique des différents matériaux de bois, ciment, etc.) car ce sont des données également nécessaire pour modéliser adéquatement des processus de transport en ACV.
- c. *ecoinvent* est une source complémentaire (voir la description des données ou les rapports du Centre ecoinvent).
- d. *Durée de cette étape : 1 h de travail*

3. Collecte des prix unitaires et appariement

- a. Comme pour le cas d'étude no.1 sur les véhicules, une source unique de prix unitaire a été privilégiée pour réduire le fardeau de cette étape de travail. La même source que celle utilisée pour le cas d'étude No 1 a été utilisée (voir section 6.1.2, étape 5) puisqu'elle contient des prix de base régionalisés, y inclus le Canada. Ils sont exprimés en €2007 par tonne métrique ou par MJ.
- b. Cette source compile des prix selon la classification de produits d'Exiobase (adapté de la classification CPA européenne). La correspondance avec la classification SCIAN est réalisée manuellement.
- c. *Durée de cette étape : 1.5 h de travail*
- d. Le fardeau n'est pas très significatif. Cela est dû au nombre somme toute faible de processus EEIO impliqués (26) et à la granularité de la base de données de prix utilisée. Ce processus serait automatisable à l'aide de tables de correspondance de classification (*crosswalk tables*), à bâtir une fois pour toute ou bien à collecter.
- e. L'étude ACV originale devait contenir un volet économique (analyse du coût du cycle de vie) impliquant la collecte de données économiques. Toutefois cette dernière était incomplète lors de la réalisation du projet

4. Conversion des prix

- a. Conversion de devise
 - i. Conversion €2007 en US\$2007 (prix de base) ; Source : Banque Centrale Européenne (<http://sdw.ecb.europa.eu/>). Pour information, 1 €2007 = 1.3705 US\$2007 (moyenne annuelle)
 - ii. Conversion CA\$2014 en US\$2014 ; Source : Banque du Canada (<http://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/>). Pour information, 1 CA\$2014 = 0.9053 US\$2014 (moyenne annuelle).
- b. Conversion de type de prix
 - i. Conversion US\$2007 prix de base, en US\$2007 prix producteur. Le prix de base correspond au prix producteur sans les taxes et subventions (voir section 3.4.3). Source : Tableaux multirégionaux d'Exiobase (Exiobase and CREEA 2014).
- c. Déflation
 - i. US\$2007 en US\$2002
 - ii. Source : Indices des prix producteurs (IPP) du Bureau des statistiques américain (<http://www.bls.gov/ppi/#data>).
 - iii. Il existe des IPP pour chaque secteur de l'industrie américaine (chaque SCIAN). Ainsi, virtuellement, à chaque processus EEIO de CEDA peut correspondre un

IPP. À moins de développer ici aussi des tables de correspondance pour automatiser le processus de déflation des prix et tenir compte des spécificités en la matière de chaque industrie, la conversion manuelle est fastidieuse et n'a pas été réalisée dans le cadre du cas d'étude. Un PPI agrégé '*Total manufacturing industries*', tel que fournit par Bureau des statistiques américain, a plutôt été utilisé. En annexe, la figure A-1 montre comment la déflation peut être significativement différente d'un secteur à l'autre, voire consister parfois en de l'inflation (prix passé plus élevé).

- iv. Pour information, le taux de déflation 2007 (resp. 2014) vs. 2002 est de 21.8% (resp. 46.2%) aux États-Unis. Autrement dit, il fallait dépenser 1.218 US\$ en 2007 pour acheter autant que ce qu'offrait 1 US\$ en 2002 (prix producteur).

d. *Durée de cette étape : 1.5 h de travail*

La durée totale est donc de **7.5 h de travail pour la modélisation EEIO** pour ce cas d'étude, en ayant une connaissance des tables EEIO.

Hybridation

L'hybridation ne peut être réalisée que suite au gros du travail réalisé pour l'analyse EEIO. La méthodologie consiste à mettre en œuvre les étapes suivantes.

1. Export depuis SimaPro de chaque jeu de données EEIO (secteur identifiés) avec ses échanges avec la technosphère et avec l'environnement (émission/prélèvements directs)
 - a. Il faut avoir réalisé une copie de chaque processus EEIO de la librairie de SimaPro et l'avoir renommé avant l'export au format .csv.
 - b. Les jeux de données peuvent être exportés individuellement (i.e. en autant de fichiers csv que de jeux de données) ou en une seule fois. Toutefois, il est probablement plus simple de travailler avec des fichiers individuels ; le risque d'erreur ultérieur est aussi moins élevé.
2. Ouverture dans Excel du fichier d'export csv et retrait systématique des échanges avec l'environnement.
3. Retrait systématique des échanges économiques suivants qui sont **présents** dans les processus ACV utilisés, pour éviter le double-comptage:
 - a. **Tous les transports** (aérien, terrestre, maritime) **de matériel**. On conservera toutefois le transport de personne (p.ex. '*Transit and ground passenger transportation*' et '*Scenic and sightseeing transportation and support activities for transportation*').
 - b. Les **énergies (électricité, gaz) et l'eau et leur distribution** (y inclus le processus '*Pipeline transportation*').
 - c. Le(les) **produit(s) d'approvisionnement** du cœur d'activité (p.ex. le bois brut d'une scierie dont le produit de référence est des planches, le ciment pour le secteur de la fabrication du béton).
 - d. Les **traitements de déchets et eaux usées**.
 - e. Retrait d'autres processus spécifiques, au cas par cas.
4. Ré-import du jeu de données modifié dans SimaPro et ajout au processus ACV complété.
 - a. Le ré-import peut concerner plusieurs jeux de données EEIO modifiés selon le mode d'export choisi à l'étape 1, et donc l'ajout à plusieurs processus ACV complétés.
5. L'étape 3 ci-dessus de gestion du double-comptage est évidemment une étape cruciale qui nécessite plusieurs passes de vérification.
 - a. Réaliser une analyse d'évaluation des impacts après le ré-import est un moyen de vérification. Elle permet d'identifier des omissions de retrait de flux d'échange

économique dans les processus EEIO modifiés: des impacts supérieurs de 30% ou plus après hybridation sont suspects et méritent que le processus hybridé soit corrigé, i.e. que le processus EEIO modifié qui le complète soit corrigé pour des double-comptage restants.

- b. Avant l'étape 4 de ré-import, chaque processus EEIO modifié peut être manipulé dans Excel pour trier les échanges avec la technosphère par ordre décroissant de valeur monétaire (voir exemple de la figure A-2 en annexes). On peut ainsi parcourir les premières lignes et s'assurer qu'il n'y a pas de résidus d'échange importants (en devise) qui **pourraient** provoquer un double-comptage significatif. Bien sûr, le jugement est basé sur des montants monétaires, ce qui ne présume pas nécessairement d'impacts importants et, à l'inverse, délaissés des échanges de faible valeur ne garantissent pas le double-comptage d'impacts seulement très peu significatifs. La gestion du double-comptage ne doit donc pas se baser sur cette seule technique.

6. Conseils :

- a. Les processus EEIO de CEDA de SimaPro ne présentent pas directement dans leur nom (nom du secteur de l'échange économique) un code SCIAN, ce qui ne facilite pas les manipulations ultérieures dans Excel comme les appariements avec le code produit CPA ou avec des indices IPP sectoriels. Toutefois, les échanges économiques dans chaque processus ont l'avantage d'être classés selon la classification SCIAN. On retrouve donc assez aisément les secteurs lorsqu'on devient familier avec la classification IO.

7. *Durée de l'étape d'hybridation : 14 h de travail (pour 26 processus) + 6 h de travail de raffinement (sans nécessairement impliquer d'autres cycles d'export/ré-import).*

La durée totale est donc de **20 h de travail pour la modélisation hybride** pour ce cas d'étude, partant d'un gros du travail déjà accompli lors de l'analyse EEIO (7.5 h) pour l'identification des processus EEIO, la conversion des données physiques en prix et leur manipulation, la modélisation dans SimaPro. C'est donc un **grand total de 27.5 h de travail** qui a été nécessaire.

6.2.3 Résultats et analyse

ACV

Les figures 26 et 27 suivantes présentent les contributions des différentes étapes du cycle de vie du bâtiment, telles qu'obtenues après l'ACV de départ (évaluation au niveau dommage avec la méthode IMPACT 2002+, v2.15 et au niveau impact avec ReCiPe, v1.12). La phase d'utilisation contribue pour 60% à 70% des impacts potentiels, suivie par la phase de production et d'approvisionnement initial des matériaux pour 25 à 35%.

La phase d'utilisation est dominée par le chauffage, l'eau et le traitement des eaux usées. Le remplacement de certains des matériaux durant les 75 ans de la phase d'utilisation n'est pas négligeable pour les changements climatiques (25%) et les indicateurs ressources et qualité des écosystèmes (environ 30% et 20%, respectivement), d'autant que les dommages liés à la consommation électrique sont très minorés grâce à l'hydroélectricité québécoise. Pour les matériaux d'origine, ce sont surtout le bois, puis les revêtements verticaux (panneaux de gypse surtout, mais aussi briques) et de surface (vinyle et céramique) et le béton qui contribuent aux dommages.

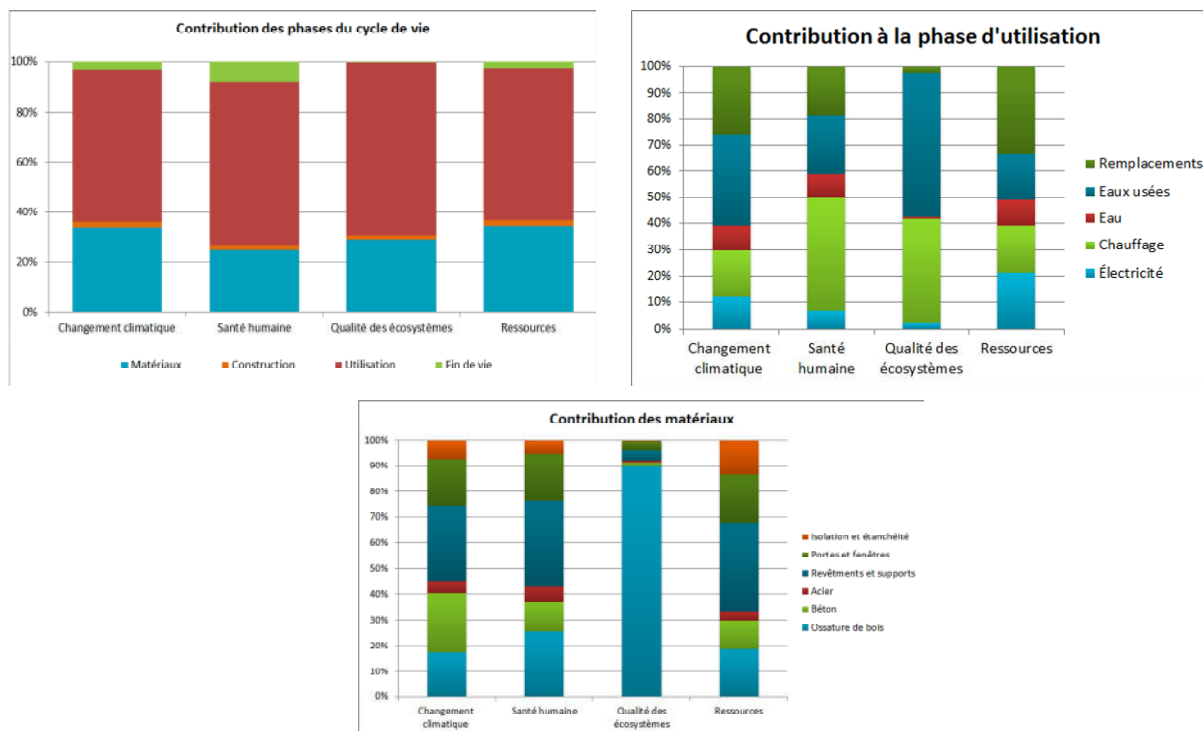


Figure 26: Contributions aux dommages des différentes étapes et sous-étapes/matériaux sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV processus (méthode IMPACT 2002+).

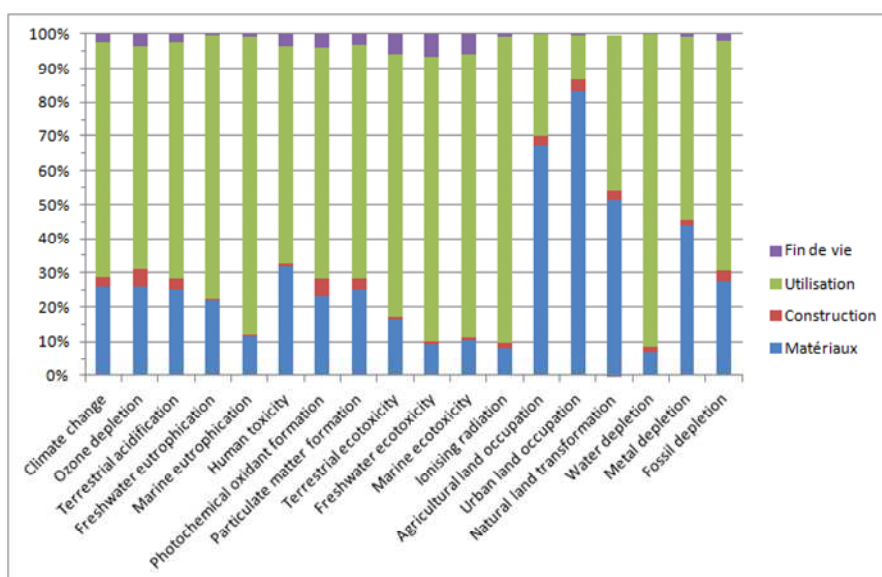


Figure 27: Contributions aux impacts des différentes étapes sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV processus (méthode ReCiPe).

Analyse EEIO

L'évaluation des impacts suite à la modélisation EEIO du cycle de vie du bâtiment (niveau impact avec ReCiPe) est présentée à la figure 28. On rappelle que les deux flux d'électricité d'avant-plan (consommée lors de la construction, mais surtout lors de la phase d'utilisation) sont modélisés avec le processus *ecoinvent* et que les émissions directes lors de la combustion de biomasse pour le chauffage du bâtiment proviennent de l'inventaire du processus *ecoinvent* adapté. Tous les autres flux économiques de l'avant-plan sont donc modélisés avec le tableau EEIO américain de CEDA (Tableau 8) qui logiquement considère les technologies américaines de production, y compris pour ses propres

imports. L'électricité d'arrière-plan devient donc un mix américain, très carboné, et significativement différent du bouquet énergétique québécois (hydroélectricité à plus de 95%) en terme d'impact sur, en particulier, les changements climatique, les ressources fossiles, l'acidification.

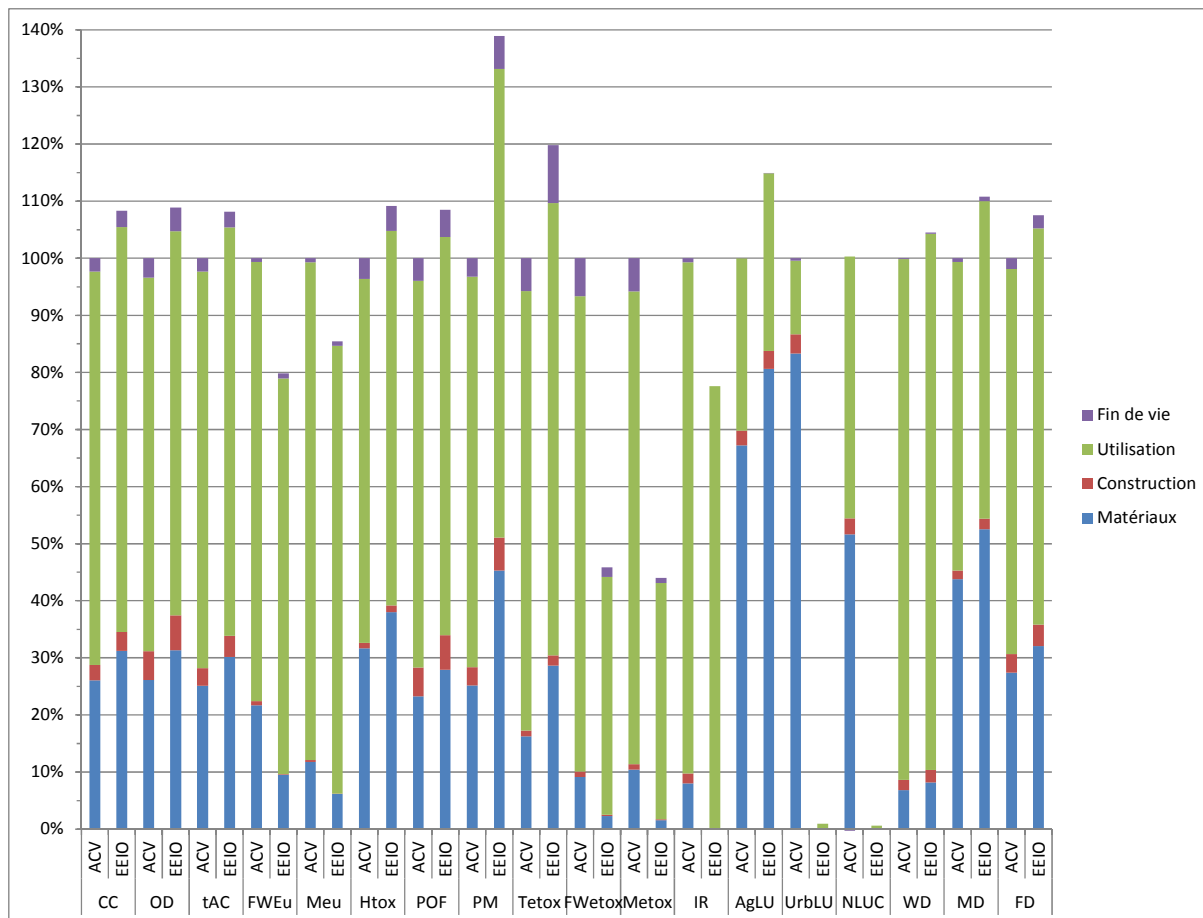


Figure 28: Comparaison des scores d'impacts pour le bâtiment analysé par l'ACV (ACV) et l'analyse EEIO (IO). Méthode ReCiPe; les scores sont normalisés sur ceux de l'ACV.

(CC: Climate change; OD: Ozone depletion; tAC: Terrestrial acidification; FWEu: Freshwater eutrophication; Meu: Marine eutrophication; Htox: Human toxicity; POF: Photochemical oxidant formation; PM: Particulate matter formation; Tetox: Terrestrial ecotoxicity; FWetox: Freshwater ecotoxicity; Metox: Marine ecotoxicity; IR: Ionising radiation; AgLU: Agricultural land occupation; UrbLU: Urban land occupation; NLUC: Natural land transformation; WD: Water depletion; MD: Metal depletion; FD: Fossil depletion).

La conservation pour les deux flux d'électricité d'avant-plan (construction et utilisation) du processus québécois de production d'électricité d'*ecoinvent* réduit la perte de représentativité qu'aurait entraînée l'utilisation du processus américain de CEDA. Ainsi, pour les indicateurs changements climatiques, appauvrissement en ressources fossiles, et acidification terrestre, l'analyse EEIO révèle des scores accrus de l'ordre de 7 à 10% par rapport à l'ACV. Pour tous les indicateurs, les scores propres à la phase d'utilisation sont assez peu différents en comparaison de l'ACV en raison de la conservation des processus ACV d'électricité mais aussi des émissions directes de la combustion des granules de bois pour le chauffage du bâtiment.

Au travers de l'indicateur des radiations ionisantes et suite à une analyse de l'inventaire, on constate que la base de données CEDA ne contient pas de données d'inventaire de ce type d'émissions (issues principalement de la production nucléaire d'électricité). La base de données ne contient pas non plus d'information détaillée sur l'occupation des terres urbaines ni sur la transformation de terres naturelles. Enfin, l'inventaire des émissions caractérisées par la méthode ReCiPe en écotoxicité aquatique (marine et/ou eaux douces) est significativement sous-estimé (impact 50% plus faible), alors que l'écotoxicité terrestre ressort plus élevée. Les émissions à l'air sont les mieux inventoriées dans CEDA (qualitativement parlant, c'est-à-dire en nombre de substances), alors que les émissions à

l'eau le sont moins (la méthode EICV fait ensuite le lien de cause-à-effet de l'air au sol pour l'écotoxicité terrestre). Pour cet indicateur, l'étape de fin de vie ressort plus contributrice avec l'analyse EEIO (toxicité des lixiviats des sites d'enfouissement), mais on rappelle que la forte généralité du processus de traitement des déchets dans CEDA surestime probablement l'impact des déchets inertes de construction. Enfin, on note que l'indicateur de formation des particules (i.e. maladies respiratoires) est significativement plus élevé. Une analyse de contribution révèle que l'impact est majoritairement causé par les particules fines associées aux transports.

Analyse hybride

L'hybridation est menée manuellement selon la méthode décrite plus haut, en procédant à trois cycles d'itération, principalement pour corriger des erreurs de quantité de flux (erreur/raffinement des prix), et pour corriger des erreurs de double-comptage (omission de processus EEIO à retirer). On rappelle que l'étape précédente d'analyse EEIO, que l'on peut considérer comme « l'étape 0 » de l'hybridation, a déjà permis d'élaborer le squelette EEIO du modèle hybride et a impliqué une réflexion sur le choix de certains processus ACV qui ne seront pas modifiés lors de l'hybridation.

La figure 29 présente les contributions des 4 principales étapes du cycle de vie du bâtiment pour chaque indicateur, avec le détail pour chacun d'eux de l'apport des processus EEIO hybridés avec les processus ACV.

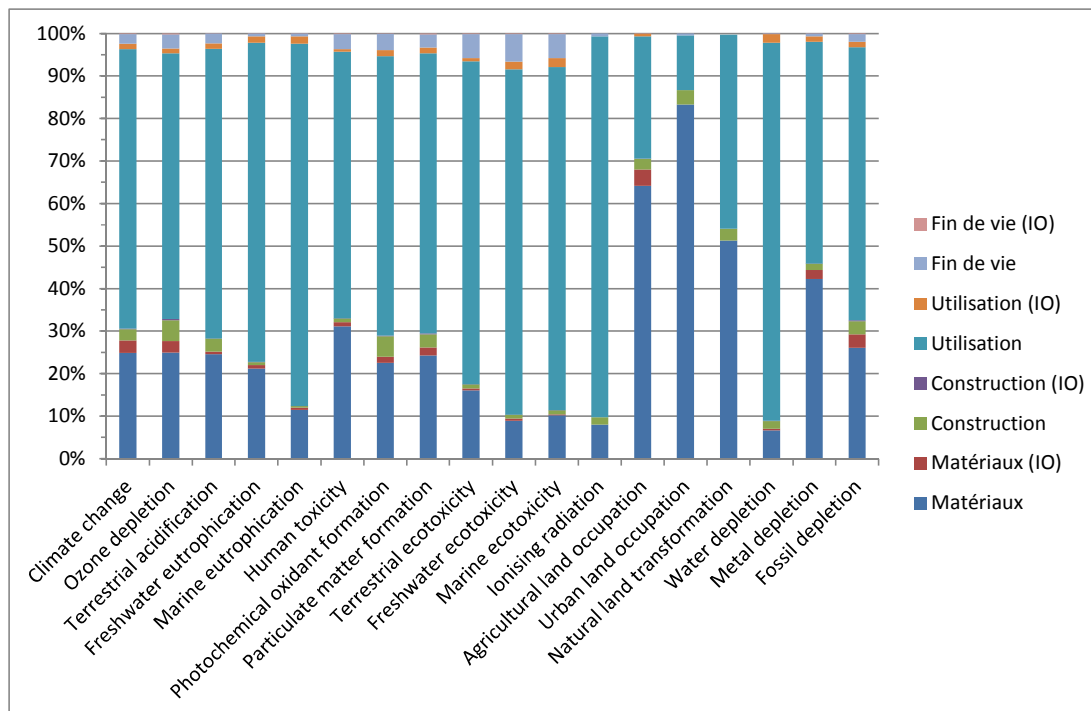


Figure 29: Contributions aux impacts des différentes étapes sur le cycle de vie du bâtiment, selon l'ACV hybride (méthode ReCiPe). La figure distingue la part initiale des impacts évalués avec l'ACV et la part ajoutée par les processus EEIO modifiés (IO) pour les quatre principales étapes.

L'apport grâce à l'hybridation des flux typiquement tronqués génère une augmentation des impacts pour tous les indicateurs, à l'exception de ceux – déjà mentionnés – pour lesquels la base de données EEIO CEDA ne contient pas de substances caractérisées par la méthode EICV. L'augmentation est somme toute limitée et varie entre environ 2 et 5%.

L'apport est maximal pour les indicateurs des changements climatiques, des ressources (fossiles et minérales), de l'appauvrissement de la couche d'ozone et de l'occupation de terres arables. Au vu des résultats EEIO avant hybridation, on aurait pu s'attendre à un apport plus significatif pour l'indicateur de formation des particules. En pratique, ce sont les transports d'avant plan d'approvisionnement des matériaux qui contribuaient pour une part importante à l'impact dans le modèle EEIO. Comme ces derniers sont retirés lors de l'hybridation, leur contribution s'en trouve réduite.

Ajout de services

Dans la perspective d'évaluer un autre apport potentiel de l'approche EEIO à l'ACV, il a été modélisé l'ajout à l'ACV hybride de dépenses liées à la construction du bâtiment (frais d'exigences générales, équipement en lien avec le bâtiment, et aménagement extérieur) et de dépenses annuelles liées à l'utilisation (gestion des installations liées au bâtiment, gestion de l'immeuble, assurance, et taxes municipales).

On rappelle qu'il ne s'agit pas d'hybridation, mais d'une extension des frontières du système pour la considération d'opérations typiquement exclues dans une ACV (comme c'était le cas pour cette étude du CIRAIG utilisée comme cas d'étude). Ainsi, « l'entièreté » de chaque processus EEIO utilisés (voir Tableau 8) est ajoutée au modèle.

Les résultats présentés à la figure 30 montrent que ce sont essentiellement les services annuels, récurrents durant les 75 ans de durée de vie du bâtiment, qui augmentent de façon notable les impacts. L'ensemble de ces opérations contribuent dorénavant pour 10 à 15% des impacts.

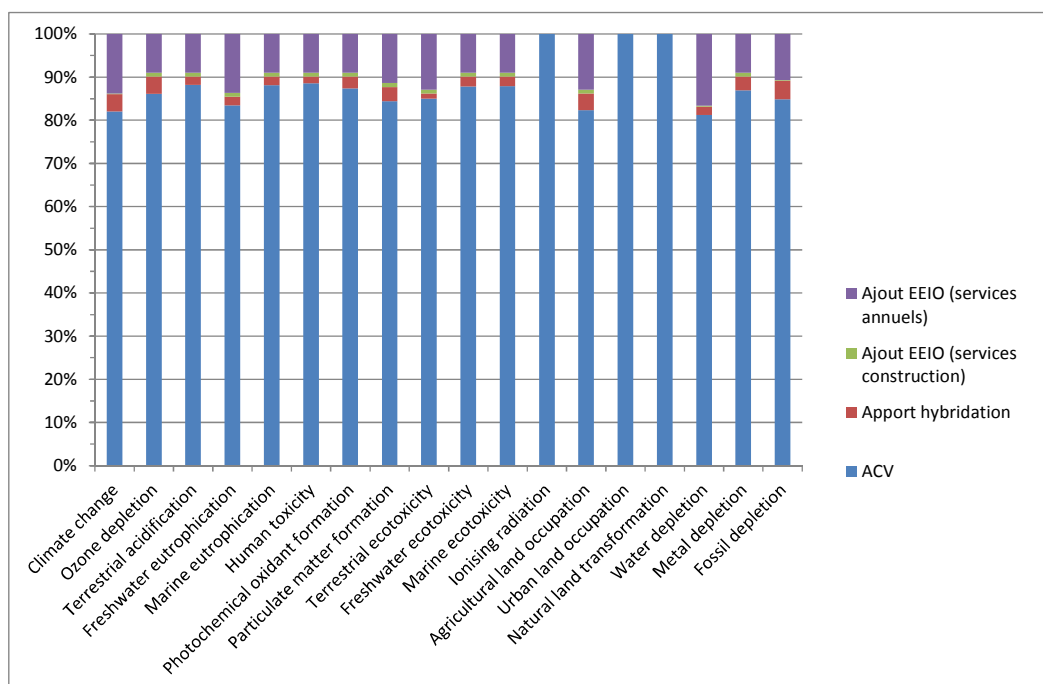


Figure 30: Contributions aux impacts de l'ACV hybride amendée des services modélisés par EEIO (méthode ReCiPe).

7 Enseignements et recommandations

7.1.1 L'analyse EEIO

On a pu démontrer à travers ces deux cas d'étude que l'analyse EEIO était :

- Un **processus d'analyse somme toute rapide** (l'aspect du fardeau temps est discuté plus en détail dans la section suivante).
 - Processus très rapide dans le cas d'étude sur les véhicules car quelques secteurs EEIO à peine ont été utilisés, au détriment de la précision qu'il a fallu introduire plus tard lors de l'hybridation.
 - Un processus plus long dans le cas d'étude sur le bâtiment car, une base de données plus désagrégée (CEDA pour les É.-U., offrant le choix de plus de produits/secteurs) était utilisée et car beaucoup de matériaux ont été impliqués au travers des données déjà collectées.
- Un outil utile pour une **évaluation préliminaire de contribution et d'identification des points chauds**
 - de matériaux, de services (« moyens »)
 - matériaux d'autant plus « moyens » qu'on utilise des tableaux multirégionaux (p.ex. Exiobase) ; matériaux relativement plus spécifiques si une table comme CEDA est utilisée, au détriment de sa restriction géographique).
 - on accordera une **confiance limitée aux indicateurs autres que changement climatique et ressources** car les tableaux EEIO ont une couverture peu exhaustive des flux élémentaires ; La confiance est toutefois accrue avec une base de données comme CEDA.
- Un outil :
 - Inadapté pour un cycle de vie complet avec phases d'utilisation et fin de vie
 - Il faut envisager alors ajouter au modèle EEIO des processus ACV.
 - Trop **imprécis pour**
 - **des études comparatives de produits** ; et d'autant plus que les objets comparés sont semblables.
 - la recherche d'un **score d'impact de produits**.
 - Inadapté pour des cas où sont impliqués des enjeux que l'on sait mal couverts. On pense entre autres à :
 - Production agricole, produits biosourcés et utilisation des terres dans CEDA; émissions toxiques dans Exiobase. Le praticien devra donc prêter attention à ces enjeux lors du choix de la base de données et l'interprétation des résultats.
- Un outil :
 - Tout de même **utile pour ajouter des services** précis du modèle d'avant-plan, si les tableaux les offrent et si des données de dépenses sont disponibles.
 - Qui présente l'avantage **théorique** de la **réactualisation régulière des données**. En pratique toutefois, le champ est large parmi les tableaux EEIO disponibles car tous ne sont pas actualisés chaque année et la fréquence d'actualisation des données environnementales ne suit pas nécessairement (et intégralement) celle des données économiques. Les tableaux 3 et 4 présentent des informations sur la mise à jour des tableaux EEIO nationaux et multirégionaux. À titre d'exemple concret, la base de données CEDA des États-Unis, à ce jour, n'est disponible au praticien ACV qu'en une seule et unique version (année 2002) car elle émane d'une initiative académique ponctuelle.

Au travers de ces d'étude, on a pu également constater:

- Sans surprise, le décalage entre les tableaux EEIO des É.U. (CEDA) et les tableaux multirégionaux en termes de désagrégation des secteurs/produits et aussi de couverture des flux environnementaux. Plus précisément, il est apparu frustrant de ne pas pouvoir mettre en œuvre le potentiel du logiciel pyLCAIO avec la base de données CEDA.

- Que la comparaison entre les résultats des ACV et EEIO non hybridés ne présage pas nécessairement des proportions des parties ACV et IO au sein du futur système hybridé. Autrement dit, on ne peut pas estimer par avance ce que l'hybridation apportera aux scores de l'ACV à la lecture des résultats ACV et EEIO.

La variabilité des prix devrait se ressentir significativement à la fois sur l'estimation EEIO et sur l'hybridation. L'analyse de cette sensibilité n'a pu être réalisée dans le cadre de cette étude, mais il est observé que l'écart-type d'un « prix moyen » est élevée, et que les différentes conversions à mettre en œuvre ensuite introduisent un autre palier d'incertitude. Toutefois, cet enjeu d'incertitude n'a de réel sens pratique que s'il est avéré que chaque produit (matériau, services) auquel on doit attribuer un prix diverge du produit moyen. Autrement dit l'utilisation de prix moyens lors de la conversion en unités physiques d'un secteur EEIO (qui est, par définition, constitue une description *moyenne*), est une pratique appropriée et n'introduit pas d'incertitude additionnelle lors de l'hybridation.

7.1.2 L'hybridation et son fardeau

La mise en œuvre de l'hybridation, en regard de l'analyse EEIO, est significativement plus longue. Mais il faut garder à l'esprit que l'hybridation ne peut faire l'économie de la presque totalité d'une analyse EEIO puisqu'elle doit passer par 1) une mise à l'échelle des processus EEIO utilisés pour l'hybridation ; et 2) la collecte de données de prix et éventuellement d'autres données économiques de conversion de prix. Ces deux étapes sont nécessaires pour une analyse EEIO. L'analyse hybride y ajoute l'étape d'hybridation à proprement parler et son fardeau de gestion du double-comptage.

Dans le cas du véhicule, un temps de travail total de l'ordre de **2 jours** a été nécessaire. Cette durée exclut le temps nécessaire à développer l'outil pyLCAIO ainsi que le temps investi pour harmoniser les matrices de caractérisation d'Exiobase avec la méthode ReCiPe.

Deux heures ont d'abord été nécessaires pour colliger les données et réaliser l'analyse EEIO qui mène à une première estimation des impacts (Figure 31, 3^e point). Deux autres heures ont été requises pour réaliser une première passe d'hybridation (2 secteurs EEIO utilisés pour le modèle et 2 catégories de produits gérés pour le double-comptage) (Figure 31, 4^e point). Cette première hybridation « primitive » est ensuite raffinée pour le double-comptage (1 heure de plus ; Figure 31, 5^e point). La sélection des secteurs EEIO (et des prix pour ces secteurs) est ensuite raffinée, avec pour conséquence un ajustement - à la baisse ici - de l'impact (Figure 31, deux derniers points). Cette dernière et longue étape itérative (il s'agit en pratique de l'étape 9 de bouclage de la Figure 13) double approximativement la durée de travail.

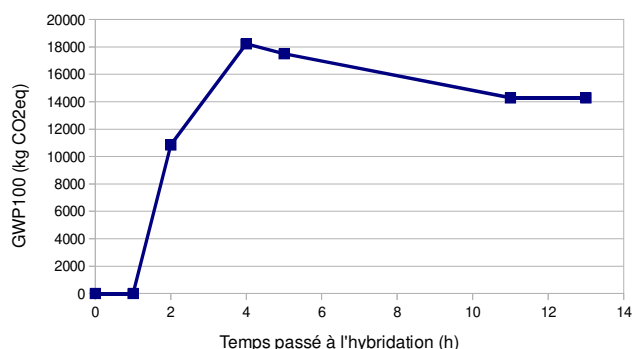


Figure 31: Estimé du score d'impact sur les changements climatiques pour le véhicule électrique (du berceau à l'usine) en fonction des passes d'hybridation.

Il convient de noter que le praticien était ici connaisseur des deux études ACV de départ, ce qui a pu réduire le fardeau du début de l'étude. Toutefois, il est fort probable que ce soit le cas dans toutes les situations où une analyse hybride est envisagée. Aussi, il est expert d'Exiobase, la base de données utilisée, et de l'hybridation en général. **Le fardeau total estimé à deux jours serait probablement à doubler pour une personne plus novice.** Enfin, il faudra y ajouter le temps requis pour l'apprentissage de l'outil pyLCAIO, afin de profiter du gain de temps de l'automatisation qu'il apporte.

Dans le cas du bâtiment, réalisé manuellement dans SimaPro et un tableur (tel Microsoft Excel), un temps total de travail d'environ **4 jours** a été requis. L'hybridation a nécessité 20 h, partant d'un gros du travail déjà accompli lors de l'analyse EEIO (7.5 h) pour l'identification des processus EEIO, la conversion des données physiques en prix et leur manipulation, la modélisation dans SimaPro. Certes, il s'agit du temps requis pour un praticien ACV, connaisseur de l'analyse EEIO, de la base de données CEDA 4 et de *ecoinvent*, de la classification SCIAN et des sources de données connexes (p.ex. pour les prix). On rappelle qu'on se trouve dans un cas d'étude relativement simple, partant d'un modèle ACV élaboré au travers d'une soixante de processus d'avant-plan (pour environ 2/3 de processus *ecoinvent* originels, et 1/3 de processus *ecoinvent* légèrement adaptés au contexte. On peut raisonnablement estimer qu'une personne plus novice devrait investir **une fois et demi à deux fois plus de temps**, probablement, soit **40 à 55 h de travail**. Aussi, il convient de noter que ce temps n'inclut pas le travail d'analyse de contribution détaillée, ni les analyses de sensibilité (p.ex. au prix) et d'incertitude typiquement réalisée lors d'une étude complète.

Le temps de travail requis pour le cas d'étude Bâtiment est deux fois plus long que l'approche automatisée utilisée pour le véhicule, alors que le modèle ACV est beaucoup plus simple. En dehors de l'aspect manuel, le fardeau est principalement causé par le niveau de détail des processus EEIO de la base de données CEDA qui contiennent chacun plusieurs centaines d'entrants de la technosphère, le plus souvent autour de 350 à 400 (virtuellement : toute l'économie, soit les 424 secteurs de la base de données). De fait, il n'est pas aisé ni rapide d'exclure sans aucun doute – manuellement de surcroît – tout processus entrant qui pourrait causer un double-comptage, et d'autant plus que le processus ACV d'origine est lui-même riche au niveau de ses échanges avec la technosphère.

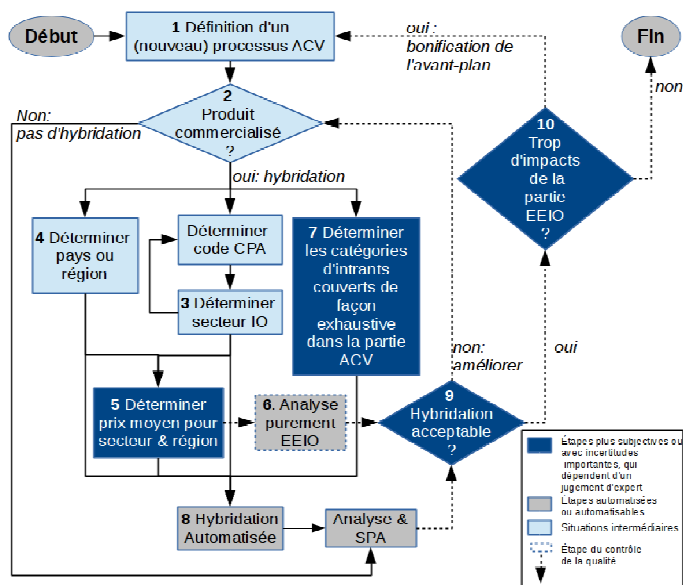
En comparant les deux cas d'études, on voit que l'hybridation faite manuellement dans SimaPro et un tableur peut représenter un fardeau de travail excessif par rapport aux bénéfices. À l'inverse, si la correction pour le double comptage est partiellement automatisée, comme c'est le cas dans pyLCAIO, le processus d'hybridation devient plus accessible et le « retour sur l'investissement » peut s'avérer proportionnellement plus intéressant. Plusieurs intrants difficiles à inventorier sont ajoutés à l'analyse en à peine quelques heures de travail, ce qui minimise les problèmes de troncature. Ceci corrige des biais négatifs affectant les scores d'impacts, tout en augmentant la confiance en l'analyse comparative de produits ayant des chaînes de valeur dans des secteurs économiques différents.

Le plein potentiel opérationnel de l'ACV-EEIO hybride ne sera toutefois atteint que lorsqu'une base de données ACV, telle *ecoinvent*, sera disponible hybridée, comme décrit plus loin à la section 7.1.4.

7.1.3 Recommandations

Le Tableau 9 ci-dessous dresse une liste des principales recommandations pour envisager ou non l'analyse EEIO et l'hybridation dans une étude ACV. Elles sont regroupées selon les phases d'une ACV et considèrent également des questionnements clés à avoir dès le tout début de l'étude. Du point de vue de la méthodologie de mise en œuvre de l'hybridation, la recommandation est de suivre le processus itératif présenté à la figure 13 (reproduite ci-dessous) et décrit étape par étape dans le cas d'étude du véhicule. On rappelle encore une fois qu'une analyse hybride passe par une étape préliminaire de modélisation EEIO avant l'hybridation à proprement parler.

La recommandation de travailler avec des prix de base permet de réduire la sensibilité du modèle EEIO ou hybride qui aura été développé à la fluctuation des prix avec le temps. Cela assure en particulier la capitalisation du modèle développé qui pourra être réutilisé avec les mises à jour éventuelles des tableaux EEIO, pour autant que ces derniers conservent la même devise de base (€2007 pour Exiobase, p.ex.).



Processus itératif de mise en œuvre de l'hybridation. Notes : l'automatisation réfère à l'hybridation à proprement parler des processus à l'aide de l'outil pyLCAIO ; CPA : code produit selon la 'Classification of Product by Activity' ; SPA : Structure Path Analysis.

Tableau 9 : Recommandations pour une analyse EEIO et une hybridation

Étape / Critère	Recommandation
Dès le début de l'étude, lors de la définition du champ et des objectifs de l'étude	
Recherche-t-on un score d'impact pour un produit spécifique ?	Si oui, ne pas considérer l'analyse EEIO seule
Recherche-t-on une estimation des contributions à l'impact d'un matériau ?	Considérer l'analyse EEIO. <i>Ne pas perdre de vue toutefois qu'il peut y avoir un fardeau certain à collecter les données de prix et de conversion nécessaires.</i>
La multi-régionalité est-elle requise ?	Si oui, utiliser des tableaux multirégionaux avec un outil d'automatisation (voir pyLCAIO ci-dessous, combiné à pyMRIO).
Semble-t-il pertinent de considérer dans l'avant-plan des opérations généralement transigées sous forme de services ?	Si oui, ajouter la collecte de données économiques pour ces services lors de l'étape de collecte des données.
Est-on confronté aux enjeux suivant :	- la gestion/le mode de gestion des déchets ? - produits biosourcés ? → la capacité du modèle EEIO à décrire ces enjeux varie grandement entre les bases de données (voir tableaux 3 et 4)
Inventaire	
Si l'hypothèse de l'économie miroir est faite (table EEIO d'une région autre)	Le <i>gridmix</i> électrique de la région autre qui sera utilisé est-il acceptable (peu différent de celui de la région à l'étude) ? Si non, alors pour l'analyse EEIO, ne pas utiliser le processus EEIO (généralement 'Electric power generation, transmission, and distribution') mais préférer un processus ACV Évaluer si d'autres opérations récurrentes de l'économie sont très différentes entre les deux régions. On peut penser à l'approvisionnement en gaz naturel, en chaleur, etc.
Données de prix	Limiter la multiplication des sources pour les prix. Privilégier le travail avec le prix de base moyen, le moins sensible aux fluctuations avec le temps Suggestion: compilation d'Exiobase en Euro2007 (régionale, mais faible désagrégation)

Conversion des prix (acheteurs/producteurs/base)
Suggestion: compilation du CREEA (Exiobase and CREEA 2014)

Évaluation des impacts

Méthode EICV Vérifier qu'il n'y a pas d'inconsistance entre la méthode EICV et l'inventaire pour les noms de substances.
Dans les logiciels commerciaux, les méthodes EICV sont généralement harmonisées avec la librairie *ecoinvent* mais pas nécessairement avec les librairies EEIO (voir ci-dessous)

Outils

SimaPro ou autre logiciel ACV commercial	<p><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none">- Offre la possibilité de vérifier rapidement les flux élémentaires de l'inventaire non caractérisés par la méthode EICV employée (p.ex. fonction 'checks' après une analyse dans SimaPro).- Permet de renommer en série des flux élémentaires (p.ex. fonction 'Append' dans SimaPro). <p>Ces avantages sont pertinents si la base de données d'inventaire EEIO utilisée ne suit pas les lignes directrices d'<i>ecoinvent</i> avec lesquelles les développeurs de méthode EICV sont généralement alignés (p.ex. pour la nomenclature des substances).</p> <p><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none">- Ne permet pas nécessairement l'importation aisée de bases de données EEIO par l'utilisateur.- Ressources limitées lorsque les librairies sont trop volumineuses : le logiciel ne peut utiliser des tableaux multi-régionaux.
pyLCAIO	<p><u>Avantages</u></p> <ul style="list-style-type: none">- automatisation : élimine les étapes répétitives et plusieurs sources potentielles d'erreurs de manipulation- dimension des bases de données et tableaux quasiment illimitée- Processus d'hybridation documenté automatiquement dans un fichier historique [log file] pour plus de transparence.- logiciel libre [open source] et gratuit (voir également Pauliuk et coll. 2015) <p><u>Inconvénients</u></p> <ul style="list-style-type: none">- expertise minimale requise : n'utilise que quelques commandes, mais n'offre pas d'interface graphique- ne dispose pas encore d'une librairie harmonisée de plusieurs méthodes EICV pour les flux élémentaires des diverses bases de données (<i>ecoinvent</i>, <i>Exiobase</i>, <i>CEDA</i>, etc.).

7.1.4 Recherche et développement et possibles améliorations futures

Enfin, quelques aspects qui relèvent du développement à plus ou moins long terme méritent d'être mentionnés.

- pyLCAIO, le logiciel d'hybridation développé pour utiliser Exiobase, pourrait être amélioré sur les aspects suivants :
 - Documentation et interface graphique (court terme)
 - Adaptation pour travailler avec la base de données CEDA 4 des États-Unis et *ecoinvent* v3 (court terme)
 - Développement de fonctions pour faciliter l'analyse des inventaires hybrides (moyen terme)
 - Génération automatique des graphiques les plus courants (moyen terme)
 - Plus de flexibilité au niveau des méthodes d'hybridation et de caractérisation des impacts (moyen terme)
 - Intégration avec SimaPro, OpenLCA, pymrio ou Brightway 2 (long terme)
- L'enjeu des prix a été plusieurs fois mentionné :
 - Dans la version 3.2 de la base de données *ecoinvent* à paraître en automne 2015, les prix et volume de production, pour une géographie, une technologie et une année donnée seront disponibles pour plus de 1200 produits (Lévová 2015). On comprend que ces informations seront une source estimable pour aider le travail d'hybridation.
 - On pourra fortement souhaiter une harmonisation entre les différentes sources qui s'offrent aux praticiens ACV entre les données de *ecoinvent* (disponible avec la version 3.2) et les compilations réalisées par Exiobase.

- La base de données CEDA 4 des États-Unis est intéressante et utile à plus d'un titre :
 - On pourrait souhaiter au moins une version européenne ('RER') et asiatique (ou Chine) du niveau de complétude et de détail de CEDA
 - Ou, à défaut et moyen terme, développer des tableaux multirégionaux « proxy » à partir de CEDA en adaptant des secteurs clés (production d'énergie fossile, d'électricité, etc.)
 - On souhaiterait une amélioration de CEDA pour plus de détail sur des processus de traitement des déchets et matières résiduelles.
- Il était hors du contexte de ce projet d'hybrider l'entièreté (les milliers de processus) d'une base de données ACV telle que *ecoinvent*. Il est certain qu'une hybridation complète de la base de données *ecoinvent* permettrait d'identifier d'autres problèmes de troncature dans la phase de production de matériaux, en plus de ceux identifiés dans ce rapport. Ceci est également vrai pour la phase d'utilisation, où l'inventaire d'avant-plan se réfère directement à *ecoinvent* pour la production d'électricité et de carburants. *Ce ne sont au final qu'une minorité des processus de l'inventaire (les processus d'avant-plan) qui furent hybridés dans les deux cas d'étude de ce rapport*, ce qui peut mener à une sous-estimation des bénéfices potentiels de l'hybridation sur les résultats.
 - Avec la publication dans *ecoinvent* 3 de volumes de production, de prix, et de classifications économiques des différents processus (Lévová 2015), et avec le développement de logiciels comme pyLCAIO, l'hybridation complète de la base de donnée est maintenant envisageable, à court ou moyen terme.

8 Conclusion

Ce rapport a présenté une revue de la littérature couvrant l'ensemble des principes qui sous-tendent l'analyse IO économique et son pendant environnemental, l'EEIO, ainsi que l'intégration de l'EEIO avec l'ACV. Différentes méthodes d'hybridation ACV-EEIO ont été comparées tant du point de vue des objectifs visés que des efforts et des données qu'elles requièrent.

Les principales bases de données EEIO ont été passées en revue et positionnées, notamment en ce qui a trait à leur couverture des différents secteurs économiques, leur inventaire des flux élémentaires, leur fréquence de mise à jour, et leur couverture géographique, nationale ou internationale. Cette comparaison devrait pouvoir guider la sélection d'une base de données EEIO en accord avec les objectifs particuliers de chaque étude.

Afin de mieux refléter l'ensemble des options offertes au praticien ACV, les deux cas d'étude de ce rapport ont été sélectionnés de manière à démontrer différentes manières de mise en œuvre de l'hybridation: tableaux nationaux vs. multirégionaux, logiciels commerciaux vs. expérimentaux, des avant-plans ACV de complexité différente, et enfin des praticiens différents. Ces deux cas d'études consolident néanmoins une seule et même approche itérative de l'hybridation.

Les efforts requis et les bénéfices obtenus lors des deux cas d'études furent ensuite contrastés.

Comme démontré lors du cas d'étude sur l'ACV d'un bâtiment, le choix d'une base de données détaillée comme CEDA, à priori séduisante (complétude des flux élémentaires et désagrégation des secteurs économiques), peut causer un certain fardeau lors de l'hybridation, surtout lors de la correction pour le double comptage si aucun logiciel n'est disponible pour automatiser cette étape. Il apparaît que, dans ce cas d'étude, la valeur ajoutée en terme de score d'impact additionnel justifie peu l'effort supplémentaire requis lors de l'hybridation.

À l'inverse, malgré son avant-plan plus complexe et sa couverture multirégionale, le cas d'étude sur le véhicule électrique s'est effectué beaucoup plus rapidement, en grande partie grâce à une manipulation efficace des données et une automatisation des étapes répétitives par un logiciel fait sur mesure. L'hybridation de ce cas d'étude a permis de compléter, avec relativement peu d'efforts, la description de système jusqu'à augmenter de 30% le score d'impact pour les changements climatiques associés à la phase de production du véhicule électrique. L'influence de l'hybridation s'estompe partiellement lors de la comparaison avec un véhicule conventionnel, vu le grand nombre de pièces et de chaînes de valeurs qui sont communes aux deux véhicules, et lors de l'évaluation d'autres catégories d'impacts que les changements climatiques, vu la couverture partielle des flux élémentaires autres que les GES dans le modèle Exiobase.

Synthétisant les apprentissages des deux cas d'étude, un tableau des principales recommandations a été dressé pour guider un praticien novice dans une démarche de réalisation d'une ACV hybride. Ce rapport devrait pouvoir guider tant le choix des données que des méthodes d'hybridation. La description des cas d'étude a mis l'accent sur la méthodologie pour que la méthode itérative qu'ils illustrent puisse être reproduite dans d'autres sphères de recherche. Finalement, ce rapport a identifié plusieurs pistes de recherche et de développement à moyen et long terme pour une plus grande intégration des principes ACV et EEIO au travers de l'hybridation.

9 Bibliographie

- Acquaye, Adolf A, Thomas O Wiedmann, Kuishang Feng, Robert H Crawford, John Barrett, Johan Kuylensstierna, Aidan P Duffy, S C Lenny Koh, et Simon McQueen-Mason. 2011. « Identification of “Carbon Hot-Spots” and Quantification of GHG Intensities in the Biodiesel Supply Chain Using Hybrid LCA and Structural Path Analysis. » *Environmental science & technology* (février). doi:10.1021/es103410q.
- Arvesen, Anders, Christine Birkeland, et Edgar G Hertwich. 2013. « The importance of ships and spare parts in LCAs of offshore wind power. » *Environmental science & technology* 47 (6) (mars 19): 2948-56. doi:10.1021/es304509r.
- Brandão, Miguel, Roland Clift, Annette Cowie, et Suzie Greenhalgh. 2014. « The Use of Life Cycle Assessment in the Support of Robust (Climate) Policy Making: Comment on “Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation ...”. » *Journal of Industrial Ecology* (mai 26). doi:10.1111/jiec.12152.
- Bullard, Clark W., Peter S. Penner et Pilati, David A. 1976. « Net energy analysis: handbook for combining process and input-output analysis. » CAC document No. 214, Center for Advanced Computation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana (ILL), 70p..
- Burfisher, Mary E. 2011. *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. Cambridge University Press.
- Crawford, Robert H. 2008. « Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. » *Journal of Environmental Management* 88 (3) (août): 496-506. doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.024.
- Dandres, Thomas, Caroline Gaudreault, Pablo Tirado-Seco, et Réjean Samson. 2012. « Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005–2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment. » *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2) (février): 1180-1192. doi:10.1016/j.rser.2011.11.003.
- Duchin, Faye. 2005. « A world trade model based on comparative advantage with m regions, n goods, and k factors. » *Economic Systems Research* 17 (2) (juin): 141-162. doi:10.1080/09535310500114903.
- . 2009. « Input-Output Economics and Material Flows. » Dans *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, édité par Sangwon Suh, 23-42. Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-1-4020-5737-3_2.
- Ecoinvent Centre. 2010. « ecoinvent data and reports v2.2. » Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>
- . 2013. « ecoinvent version 3, data and reports. » Switzerland. <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/ecoinvent-30/ecoinvent-30.html>
- . 2014. « ecoinvent version 3.1, data and reports. » Switzerland. <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/ecoinvent-31/ecoinvent-31.html>
- Ellingsen, Linda, A.-W. et coll. 2013. « Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. » *Journal of Industrial Ecology*, 18(1):113–124.
- European Commission. 2008. *Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables*. Methodologies and working papers. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Exiobase and CREEA. 2014. Multiregional Supply Use tables. April 2014. Données disponibles sur EXIOBASE2 Data Download (<http://www.exiobase.eu>).
- Ferrao, Paulo, et Jorge Nhambiu. 2009. « A Comparison Between Conventional LCA and Hybrid EIO-LCA: Analyzing Crystal Giftware Contribution to Global Warming Potential. » Dans *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, édité par Sangwon Suh, 219-230. Netherlands: Springer.

- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *J. Environ. Manag.* 91(1): 1– 21.
- Fischer-Kowalski, Marina. 1998. « Society's Metabolism: The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part 1, 1860-1970. » *Journal of Industrial Ecology* 2 (1): 61-78. doi:10.1162/jiec.1998.2.1.61.
- Gaulier, Guillaume et Zignago, Soledad. 2010. BACI: International trade database at the product-level the 1994-2007 version. CEPII, Working Paper No 2010 – 23. BACI est librement disponible en ligne pour les utilisateurs de COMTRADE, en différentes nomenclatures produit. <http://www.cepii.fr/anglaisgraph/bdd/baci.htm>
- Geddes, Patrick. 1884. « An Analysis of the Principles of Economics. » *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 12 (1). doi:10.1017/S0370164600001486.
- Hawkins, Troy R. et coll. 2013. « Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. » *Journal of Industrial Ecology*, 17(1):53–64.
- Heijungs, Reinout, et Sangwon Suh. 2002. *The Computational Structure of Life Cycle Assessment. Kluwer, Dordrecht.* The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Hertwich, Edgar G, T. Gibon, E. a. Bouman, Anders Arvesen, Sangwon Suh, G. a. Heath, J. D. Bergesen, A. Ramirez, M. I. Vega, et L. Shi. 2014. « Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. » *Proceedings of the National Academy of Sciences* (octobre 6). doi:10.1073/pnas.1312753111.
- Hoekstra, Rutger, et Jeroen C.J.M. van den Bergh. 2002. « Structural Decomposition Analysis of Physical Flows in the Economy »: 357-378. doi:10.1023/A:1021234216845.
- Jansen, Pieter Kop, et Thijs ten Raa. 1990. « The Choice of Model in the Construction of Input-Output Coefficients Matrices. » *International Economic Review* 31 (1) (février): 213. doi:10.2307/2526639.
- Junnila, Seppo I. 2006. « Empirical comparison of process and economic input-output life cycle assessment in service industries. » *Environmental science & technology* 40 (22) (novembre): 7070-6.
- Koesler, Simon, et Michael Schymura. 2015. « SUBSTITUTION ELASTICITIES IN A CONSTANT ELASTICITY OF SUBSTITUTION FRAMEWORK – EMPIRICAL ESTIMATES USING NONLINEAR LEAST SQUARES. » *Economic Systems Research.* doi:10.1080/09535314.2014.926266.
- Kondo, Yasushi, et Shinichiro Nakamura. 2004. « Evaluating alternative life-cycle strategies for electrical appliances by the waste input-output model. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (4) (juillet): 236-246. doi:10.1007/BF02978599.
- Lahr, Michael L. 1992. « An investigation into methods for producing hybrid regional input-output tables. » University of Pennsylvania.
- . 1993. « A Review of the Literature Supporting the Hybrid Approach to Constructing Regional Input-Output Models. » *Economic Systems Research* 5 (3): 277-293. doi:10.1080/09535319300000023.
- . 2001. « A strategy for producing hybrid regional input-output tables. » Dans *Input-Output analysis: Frontiers and Extensions*, édité par Michael L Lahr et Erik Dietzenbacher. New York: Palgrave Publishers Ltd.
- Lahr, Michael L, et Benjamin H. Stevens. 2002. « A Study of the Role of Regionalization in the Generation of Aggregation Error in Regional Input -Output Models. » *Journal of Regional Science* 42 (3) (août): 477-507. doi:10.1111/1467-9787.00268.
- Lenzen, Manfred. 2000. « Errors in Conventional and Input-Output—based Life—Cycle Inventories. » *Journal of Industrial Ecology* 4 (4) (septembre): 127-148. doi:10.1162/10881980052541981.

- . 2002. « Differential Convergence of Life-Cycle Inventories toward Upstream Production Layers. » *Journal of Industrial Ecology* 6 (3-4) (juin): 137-160. doi:10.1162/108819802766269575.
- . 2009. « Dealing with double-counting in tiered hybrid life-cycle inventories: a few comments. » *Journal of Cleaner Production* 17 (15): 1382-1384. doi:10.1016/j.jclepro.2009.03.005.
- Lenzen, Manfred, et Robert Crawford. 2009. « The path exchange method for hybrid LCA. » *Environmental science & technology* 43 (21) (novembre 1): 8251-6. doi:10.1021/es902090z.
- Lenzen, Manfred, et Christopher Dey. 2000. « Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products. » *Energy* 25 (6) (juin): 577-585. doi:10.1016/S0360-5442(99)00088-2.
- Leontief, Wassily W. 1936. « Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. » *The Review of Economic Statistics* 18 (3): 105–125.
- . 1949. « Recent Developments in the Study of Interindustrial Relationships. » *The American Economic Review* 39 (3): pp. 211-225.
- . 1970. « Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. » *The review of economics and statistics* 52 (3): 262-271.
- Lévová, Tereza. 2015. New data in ecoinvent version 3. Ecoinvent User Meeting, Bordeaux, France 31 August 2015. http://www.ecoinvent.org/files/20150830_user_meeting_lcm2015_tl_new_data_in_ecoinvent_v3.pdf
- Majeau-Bettez, Guillaume, Anders Hammer Strømman, et Edgar G Hertwich. 2011. « Evaluation of process- and input-output-based life cycle inventory data with regard to truncation and aggregation issues. » *Environmental Science & Technology* 45 (23) (décembre 1): 10170-7. doi:10.1021/es201308x.
- Majeau-Bettez, Guillaume, Richard Wood, Edgar G Hertwich, et Anders Hammer Strømman. 2015. « When Do Allocations and Constructs Respect Material, Energy, Financial, and Production Balances in LCA and EEIO? » *Journal of Industrial Ecology* (avril): n/a-n/a. doi:10.1111/jiec.12273.
- Majeau-Bettez, Guillaume, Richard Wood, et Anders Hammer Strømman. 2014. « Unified Theory of Allocations and Constructs in Life Cycle Assessment and Input-Output Analysis. » *Journal of Industrial Ecology* (août). doi:10.1111/jiec.12142.
- . 2015. « On the financial balance of input-output constructs: revisiting an axiomatic evaluation. » *Economic Systems Research* (Under review): Forthcoming.
- Miller, Ronald E., et Peter D Blair. 2009. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Second. New York: Cambridge University Press.
- Minx, Jan Christoph, Giovanni Baiocchi, Glen Philip Peters, Christopher Lee Weber, Klaus Hubacek, et Dabo Guan. 2011. « A “Carbonizing Dragon”: China’s fast growing CO2 emissions revisited. » *Environmental science & technology* (septembre 2). doi:10.1021/es201497m.
- Mongelli, Ignazio, Sangwon Suh, et Gjalte Huppes. 2005. « A Structure Comparison of two Approaches to LCA Inventory Data, Based on the MIET and ETH Databases. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10 (5) (décembre): 317-324. doi:10.1065/lca2004.12.198.
- Moriguchi, Y., Kondo, Y. & Shimizu, H., 1993. Analysing the life cycle impacts of cars: the case of CO2. *Industry and Environment* 16(1/2): 42-45
- Morimoto, Yoshinori. 1970. « On Aggregation Problems in Input-Output Analysis. » *The Review of Economic Studies* 37 (1) (janvier): 119. doi:10.2307/2296502.
- Nakamura, Shinichiro, et Yasushi Kondo. 2002. « Input-Output Analysis of Waste Management. » *Journal of Industrial Ecology* 6 (1) (décembre): 39-63. doi:10.1162/108819802320971632.
- Nakamura, Shinichiro, Yasushi Kondo, Shigemi Kagawa, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, et Tetsuya Nagasaka. 2014. « MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling. » *Environmental Science and Technology* 48: 7207-7214. doi:10.1021/es500820h.

- Nakamura, Shinichiro, Kenichi Nakajima, Yasushi Kondo, et Tetsuya Nagasaka. 2008. « The Waste Input-Output Approach to Materials Flow Analysis. » *Journal of Industrial Ecology* 11 (4) (février 8): 50-63. doi:10.1162/jiec.2007.1290.
- Norris, Gregory A. 2002. « Life Cycle Emission Distributions Within the Economy: Implications for Life Cycle Impact Assessment. » *Risk Analysis* 22 (5) (octobre): 919-930. doi:10.1111/1539-6924.00261.
- Olsen, J. Asger. 1993. « Aggregation in Input-Output Models: Prices and Quantities. » *Economic Systems Research* 5 (3): 253-275. doi:10.1080/09535319300000022.
- . 2000. « Aggregation in macroeconomic models: an empirical input-output approach. » *Economic Modelling* 17 (4) (décembre): 545-558. doi:10.1016/S0264-9993(99)00038-3.
- Pauliuk, Stefan, Guillaume Majeau-Bettez, Christopher L Mutel, Bernhard Steubing, et Konstantin Stadler. 2015. « Lifting Industrial Ecology Modeling to a New Level of Quality and Transparency: A Call for More Transparent Publications and a Collaborative Open Source Software Framework. » *Journal of Industrial Ecology* (juin): n/a-n/a. doi:10.1111/jiec.12316.
- Peters, Glen Philip. 2006. « Efficient algorithms for Life Cycle Assessment, Input-Output Analysis, and Monte-Carlo Analysis. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (6) (juin): 373-380. doi:10.1065/lca2006.06.254.
- Peters, Glen Philip, et Edgar G Hertwich. 2006. « A comment on “Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model”. » *Ecological Economics* 59 (1) (août): 1-6. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.08.008.
- Quesnay, François. 1758. *Tableau économique*.
- Rowley, Hazel V., Sven Lundie, et Gregory M. Peters. 2009. « A hybrid life cycle assessment model for comparison with conventional methodologies in Australia. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 14 (6) (juin): 508-516. doi:10.1007/s11367-009-0093-5.
- Rueda-Cantuche, José Manuel, et Thijs ten Raa. 2009. « The Choice of Model in the Construction of Industry Coefficients Matrices. » *Economic Systems Research* 21 (4) (décembre): 363-376. doi:10.1080/09535310903208344.
- Simas, Moana, Laura Golsteijn, Mark Huijbregts, Richard Wood, et Edgar Hertwich. 2014. « The “Bad Labor” Footprint: Quantifying the Social Impacts of Globalization ». *Sustainability* 6 (11) (octobre 24): 7514-7540. doi:10.3390/su6117514.
- Smith, Robert et Joe St. Lawrence (2010). Division des comptes et de la statistique de l'environnement de Statistique Canada. *Communication personnelle le 28 septembre 2010*.
- Stadler, Konstantin, Kjartan Steen-Olsen, et Richard Wood. 2014. « The ‘rest of the world’ – estimating the economic structure of missing regions in global multi-regional input–output tables. » *Economic Systems Research* 26 (3) (juillet 3): 303-326. doi:10.1080/09535314.2014.936831.
- Steen-Olsen, Kjartan, Anne Owen, Edgar G. Hertwich, et Manfred Lenzen. 2014. « Effects of sector aggregation on CO2 multipliers in multiregional input–output analyses. » *Economic Systems Research* 26 (3): 284-302. doi:10.1080/09535314.2014.934325.
- Strømman, Anders Hammer. 2009. « Dealing with double-counting in tiered hybrid life-cycle inventories: a few comments – response. » *Journal of Cleaner Production* 17 (17): 1607-1609. doi:10.1016/j.jclepro.2009.06.007.
- Strømman, Anders Hammer, Edgar G Hertwich, et Faye Duchin. 2009. « Shifting Trade Patterns as a Means of Reducing Global Carbon Dioxide Emissions. » *Journal of Industrial Ecology* 13 (1) (février 29): 38-57. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00084.x.
- Strømman, Anders Hammer, Glen Philip Peters, et Edgar G Hertwich. 2009a. « Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories. » *Journal of Cleaner Production* 17 (2): 248-254. doi:10.1016/j.jclepro.2008.05.003.
- . 2009b. « Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories. » *Journal of Cleaner Production* 17 (2): 248-254. doi:10.1016/j.jclepro.2008.05.003.

- Strømman, Anders Hammer, et Christian Solli. 2008. « Applying Leontief's Price Model to Estimate Missing Elements in Hybrid Life Cycle Inventories. » *Journal of Industrial Ecology* 12 (1) (février 19): 26-33. doi:10.1111/j.1530-9290.2008.00011.x.
- Suh, Sangwon. 2004. « Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model. » *Ecological Economics* 48 (4): 451-467. doi:10.1016/j.ecolecon.2003.10.013.
- . 2005. « Developing Sectoral Environmental Database for Input-Output Analysis: Comprehensive Environmental Data Archive of the U.S. » *Economic Systems Research*, 17 (4), 449-469.
- . 2006. « Reply: Downstream cut-offs in integrated hybrid life-cycle assessment. » *Ecological Economics* 59 (1) (août): 7-12. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.07.036.
- . 2010. « CEDA 4.41 Academic User Guide. », October 2010.
- Suh, Sangwon, et Gjalt Huppes. 2002. « Missing inventory estimation tool using extended input-output analysis. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (3) (mai): 134-140. doi:10.1007/BF02994047.
- . 2005. « Methods for life cycle inventory of a product. » *Journal of Cleaner Production* 13 (7): 687-697.
- Suh, Sangwon, Manfred Lenzen, Graham J Treloar, Hiroki Hondo, Arpad Horvath, Gjalt Huppes, Olivier Jolliet, et al. 2004. « System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. » *Environmental Science & Technology* 38 (3) (février): 657-664. doi:10.1021/es0263745.
- Suh, Sangwon, et Shinichiro Nakamura. 2007. « Five years in the area of input-output and hybrid LCA. » *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (6) (septembre): 351-352. doi:10.1065/lca2007.08.358.
- Suh, Sangwon, Bo Pedersen Weidema, Jannick Hoejrup Schmidt, et Reinout Heijungs. 2010. « Generalized Make and Use Framework for Allocation in Life Cycle Assessment. » *Journal of Industrial Ecology* 14 (2) (mars): 335-353. doi:10.1111/j.1530-9290.2010.00235.x.
- Treloar, G.J. 1997. « Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables: Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method. » *Economic Systems Research* 9(4): 375-391. doi:10.1080/09535319700000032.
- United Nations. 1999. *Handbook of Input-Output Table Compilation and Analysis*. Édité par United Nations. *Studies in Methods Series F, No. 74 - Handbook of National Accounting*. New York, USA: United Nations Department for Economic and Social Affairs Statistics Division.
- United Nations. 2007. *Global Assessment of Environment Statistics and Environmental-Economic Accounting*. Background document prepared by the United Nations Statistics Division for the thirty-eighth session of the Statistical Commission, 27 February - 2 March 2007.
- Vogstad, Klaus-Ole. 2009. « Input-Output Analysis and Linear Programming. » Dans *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, édité par Sangwon Suh, 23:801-818. Eco-Efficiency in Industry and Science. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-5737-3.
- Weisz, Helga, et Faye Duchin. 2006. « Physical and monetary input-output analysis: What makes the difference? » *Ecological Economics* 57 (3): 534-541. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.05.011.
- Wiedmann, Thomas O, Harry C. Wilting, Manfred Lenzen, Stephan Lutter, et Viveka Palm. 2011. « Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis. » *Ecological Economics* (juillet). doi:10.1016/j.ecolecon.2011.06.014.
- Wiedmann, Thomas O, Richard Wood, Jan C Minx, Manfred Lenzen, D B Guan, et R Harris. 2010. « A carbon footprint time series of the uk - results from a multi-region input-output model » 22 (1): 19-42.
- Williams, Eric D. 2004. « Energy Intensity of Computer Manufacturing: Hybrid Assessment Combining Process and Economic Input-Output Methods. » *Environmental Science & Technology* 38 (22) (novembre): 6166-6174. doi:10.1021/es035152j.

- Williams, Eric D, Christopher L. Weber, et Troy R Hawkins. 2009. « Hybrid Framework for Managing Uncertainty in Life Cycle Inventories. » *Journal of Industrial Ecology* 13 (6): 928-944. doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00170.x.
- Wood, Richard. 2011. « CONSTRUCTION, STABILITY AND PREDICTABILITY OF AN INPUT–OUTPUT TIME-SERIES FOR AUSTRALIA. » *Economic Systems Research* 23 (2) (juin): 175-211. doi:10.1080/09535314.2011.564156.
- Wood, Richard, Troy R. Hawkins, Edgar G Hertwich, et Arnold Tukker. 2014. « Harmonising National Input–Output Tables for Consumption-Based Accounting — Experiences From Exiopol. » *Economic Systems Research* 26 (4) (octobre 10): 387-409. doi:10.1080/09535314.2014.960913.
- Wood, Richard, et Manfred Lenzen. 2009. « Structural path decomposition. » *Energy Economics* 31 (3) (mai): 335-341. doi:10.1016/j.eneco.2008.11.003.
- Wood, Richard, Konstantin Stadler, Tatyana Bulavskaya, Stephan Lutter, Stefan Giljum, Arjan de Koning, Jeroen Kuenen, et al. 2014. « Global Sustainability Accounting—Developing EXIOBASE for Multi-Regional Footprint Analysis. » *Sustainability* 7 (1): 138-163. doi:10.3390/su7010138.
- Yamakawa, Asuka, et Glen Philip Peters. 2009. « USING TIME-SERIES TO MEASURE UNCERTAINTY IN ENVIRONMENTAL INPUT-OUTPUT ANALYSIS. » *Economic Systems Research* 21 (4) (décembre): 337-362. doi:10.1080/09535310903444766.
- Zhai, Pei, et Eric D Williams. 2010. « Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems. » *Environmental science & technology* 44 (20) (octobre): 7950-5. doi:10.1021/es1026695.

10 Annexes

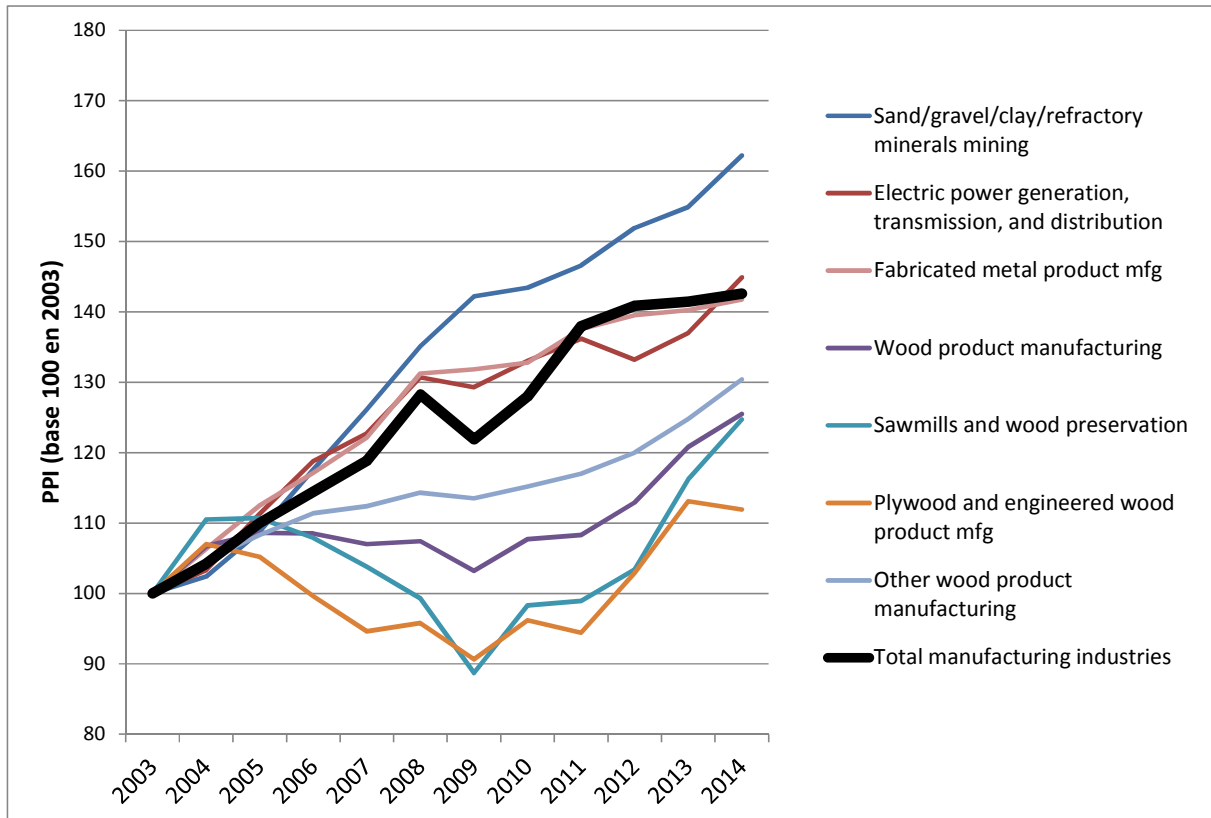


Figure A-1 : Variation 2003-2014 des indices de prix producteurs (Producer Price Index, PPI) de certains secteurs de l'industrie américaine et de l'indice agrégé 'Total manufacturing industries' utilisé dans cette étude (étude de cas Bâtiment).

Process name	Sawmills and wood preservation		
Products			
Sawmills and wood preservation	1	USD2002	<i>(unité fonctionnelle du processus)</i>
Materials/fuels (i.e. échanges avec la technosphère)			<i>rang par montant décroissant</i>
Logging	0.321	USD2002	1
Sawmills and wood preservation	0.1197	USD2002	2
Forest nurseries, forest products, and timber tracts	0.09161	USD2002	3
Wholesale trade	0.04349	USD2002	4
Truck transportation	0.02738	USD2002	5
Management of companies and enterprises	0.02433	USD2002	6
Electric power generation, transmission, and distribution	0.01528	USD2002	7
Rail transportation	0.00714	USD2002	8
Real estate	0.004531	USD2002	9
Nonresidential maintenance and repair	0.004362	USD2002	10
Wood windows and doors and millwork	0.00433	USD2002	11
All other basic inorganic chemical manufacturing	0.004297	USD2002	12
Services to buildings and dwellings	0.004126	USD2002	13
Veneer and plywood manufacturing	0.004057	USD2002	14
Natural gas distribution	0.004051	USD2002	15
Automotive equipment rental and leasing	0.003554	USD2002	16
Accounting, tax preparation, bookkeeping, and payroll services	0.003437	USD2002	17
Advertising and related services	0.0034	USD2002	18
Food services and drinking places	0.003139	USD2002	19
Telecommunications	0.002947	USD2002	20
...			
Gold, silver, and other metal ore mining	2.607E-09	USD2002	359
Household refrigerator and home freezer manufacturing	2.607E-09	USD2002	360
Motorcycle, bicycle, and parts manufacturing	2.607E-09	USD2002	361
Glass container manufacturing	1.304E-09	USD2002	362
Oilseed farming	-1.36E-07	USD2002	363

Figure A-2 : Extrait des échanges avec la technosphère (c'est-à-dire des échanges économiques) du processus EEIO 'Sawmills and wood preservation' de CEDA 4 dans SimaPro. Le processus contient 363 échanges, classés ici dans Excel par ordre de valeur décroissante. Pour 1 US\$ de « produit moyen » de l'industrie de la scierie et du traitement de conservation du bois, 0.321 US\$ est requis de l'industrie de la coupe forestière, etc. (étude de cas Bâtiment).