

LA METHODE INPUT-OUTPUT ET SON UTILISATION EN ACV

Synthèse scientifique

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.

- ✓ 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.

RESUME

Ce rapport est un document de synthèse 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 aborde les principes de la méthode d'analyse Input-Output économique (IO), de son extension à l'analyse environnementale (EEIO), du positionnement de cette dernière par rapport à l'ACV traditionnelle, et de l'hybridation des approches EEIO et ACV. Il présente ensuite les résultats de deux 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. Les résultats sont présentés et 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, dépendamment des données EEIO utilisées. Un outil d'automatisation a été développé.

MOTS CLES

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

TABLE DES MATIERES

1	Glossaire et Abréviations	5
2	Contexte de l'étude	6
3	L'analyse IO économique.....	6
4	L'analyse IO environnementale (EEIO).....	7
5	L'analyse hybride	8
6	Mise en œuvre de l'hybridation au travers de cas d'étude	9
7	Résultats	11
7.1	Résultats du cas d'étude sur le véhicule électrique	11
7.2	Résultats du cas d'étude sur le bâtiment	11
8	Enseignements.....	13
8.1	L'analyse EEIO	13
8.2	L'hybridation et sa rentabilité.....	13
8.3	Recommandations.....	14
9	Références	15

1 Glossaire et Abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie « processus »
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>
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
L	Matrice de Leontief (Leontief, 1970)
I	Matrice identité
A	Matrice des coefficients techniques (matrice technologique)

2 Contexte de l'étude

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. Les objectifs sont de faire un point sur la méthode d'analyse IO économique, 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 traditionnelle³ et leur facilité de mise en œuvre. Au travers de deux cas d'étude sont tirés des enseignements pratiques, applicables dans les études des membres de SCORELCA. Les bases de données IO et EEIO n'appliquent aucun seuil de coupure ni exclusion dans l'inventaire des échanges économiques (produits, énergies, ou services transigés) au contraire de l'ACV, et se positionnent donc comme offrant un potentiel à des analyses environnementales plus complètes. L'hybridation permet de valoriser la complémentarité des deux méthodes : détail des produits et des technologies, meilleure couverture des enjeux environnementaux pour l'ACV, absence de troncature et d'exclusion pour l'EEIO.

3 L'analyse IO économique

Les analyses IO considèrent l'entièreté de l'économie comme un ensemble d'acteurs regroupés en industries (ou secteurs) qui s'achètent et se vendent des biens et services (produits). Des tableaux entrées-sorties (IO) sont construits à partir des données des agences de statistiques nationales, internationales et de groupes de recherche. Ces tableaux IO sont des inventaires comptables nationaux, et se réfèrent à une année. La consommation «finale» de produits par les ménages et les gouvernements, ainsi que les imports et exports sont représentés dans des tableaux à part. Tout autre flux qui ne peut être considéré comme un échange de produits est représenté dans des extensions; pour une analyse économique, cela se résume typiquement à la valeur ajoutée, notamment le paiement des salaires et les profits.

Les tableaux IO sont généralement construits symétriques de façon à décrire quels produits servent à la production de quels produits (**Z**, Figure 1). Autrement dit, on élimine les industries de la représentation de l'économie, et on se concentre sur *l'interdépendance entre les différents produits*. Ces constructions combinent une étape d'allocation (proche des méthodes typiques de partition et de substitution utilisées en ACV) qui pallie aux situations où une industrie coproduit plus d'un produit, et une étape d'agrégation qui calcule une technologie moyenne globale pour la production de chaque produit.

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

Figure 1: Tableau non normalisé d'entrées-sorties, suivant une classification par produit (exemple fictif simplifié). 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 ($\mathbf{x}=\mathbf{x}'$).

1 en anglais « Input-Output », soit IO.

2 EEIO: *Environmentally Extended Input-Output*.

3 Par la suite, il est entendu par « ACV » la méthode traditionnelle d'analyse du cycle de vie basée sur des processus unitaires qui délivrent des produits et dont l'inventaire est généralement tronqué par l'application d'un seuil de coupure (p.ex. les intrants représentant moins de 1% en masse du total des entrants du processus sont exclus de l'inventaire partant du principe que leur contribution ne sera pas significative à l'impact) ou par l'exclusion de certaines activités (p.ex. le transport des employés sur leur lieu de travail). Ecoinvent est un exemple reconnu de base de données de ce type.

Un tableau IO est ensuite normalisé par rapport à la production totale de chaque commodité. Chaque colonne constitue donc une sorte de « recette de cuisine » pour produire 1€ d'une commodité (Leontief 1970). La matrice des flux **Z** devient alors la matrice des coefficients techniques (**A**). Cette dernière est utilisée ensuite dans les modèles d'analyse IO à l'aide de la matrice de Leontief ($L=(I - A)^{-1}$) qui introduit l'approche cycle de vie. En multipliant un vecteur de demande finale de commodités (p.ex. demande des ménages) par **L**, on calcule la production totale du «berceau au consommateur» requise pour chaque produit pour satisfaire la demande. Ce modèle dit « des quantités » se retrouve au cœur de toute analyse IO ou ACV. L'analyse IO et l'ACV partagent donc les mêmes fondements mathématiques et bon nombre de présuppositions. Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques et simplifications de l'analyse IO et les met en regard de l'ACV.

En combinant les tableaux de tous les pays disponibles, et en réconciliant leurs déclarations d'importations et d'exportations, on peut développer un tableau global du monde entier où chaque pays est représenté explicitement, et chaque industrie utilise des intrants domestiques et importés. La compilation de tableaux IO multirégionaux est une tâche passablement ardue, réalisée par des experts du monde académique, mais leur utilisation n'est pas plus compliquée ensuite que celle d'un tableau IO national. De tels tableaux ouvrent la voie à des analyses où la provenance des produits peut être considérée.

Les tableaux IO sont typiquement disponibles à chaque 5 ans et avec un délai de quelques années. L'utilisateur devra gérer cet aspect de la temporalité à l'aide d'indices de prix pour corriger au besoin l'inflation ou la déflation.

Tableau 1: *Présuppositions inhérentes à l'analyse entrées-sorties (modèle des quantités non contraintes)*

Caractéristiques et simplifications de l'IO	Partagées par l'ACV classique ?	Alternatives et Solutions
Fonctions de Leontief : technologies fixes (la « recette »), aucune substitution entre les intrants.	oui	Autres fonctions de production, avec élasticités ; modèles d'équilibre général calculable (MEGC).
Prix fixes (non affectés par la taille de la demande, ni variable d'un secteur à l'autre), quantités non contraintes quelle que soit la demande.	oui	Modèles de programmation linéaire, recherche opérationnelle, ou MEGC.
Relation 1:1 entre technologie et produit*.	oui*	Programmation linéaire pour travailler avec une matrice technologique (A) non symétrique.
Produits homogènes : un même produit a les mêmes caractéristiques intrinsèques quelle que soit l'industrie qui le produit ou l'utilise.	oui	Désagrégation
Prix homogènes : un même produit a le même prix quelle que soit l'industrie qui l'achète.	--	Désagrégation. Utiliser des tableaux compilés au <i>prix de base</i> réduit de façon significative les disparités de prix entre les secteurs. Sinon, travailler avec des tableaux compilés en unités physiques.

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

4 L'analyse IO environnementale (EEIO)

L'analyse IO calcule la *production* totale (du berceau au consommateur) requise 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* aux données d'inventaire de l'économie. Mathématiquement, on compile et on traite les extensions environnementales de la même manière que la valeur ajoutée présentée plus haut. Les tableaux EEIO sont donc les tableaux IO enrichis d'une matrice de flux environnementaux

exprimés en unités physiques, comme des émissions à l'air de kg CO₂ ou de kg SO₂, des prélèvements de m³ d'eau, de kg de pétrole brut, etc. Chaque colonne, c'est-à-dire chaque processus de production et activité de services (cf. Figure 1) possède donc l'inventaire de ses intrants et émissions directes. Certains tableaux EEIO fournissent également les émissions de la phase d'utilisation des produits, sous forme d'émissions directes des ménages par € d'achat de chaque produit (p. ex., CO₂ émis par € d'achat d'essence automobile).

Les extensions environnementales peuvent être ajoutées aux tables économiques par les agences statistiques elles-mêmes, mais elles sont alors souvent limitées aux GES et à quelques ressources. Les modèles les plus complets sont plutôt développés par le monde académique. Les ressources impliquées sont très importantes, autant pour collecter les données disponibles que pour le travail d'estimation des données manquantes, de mise à l'échelle, et de contrôle qualité (identification de biais, cohérence des totaux, etc.). Ceci explique la disponibilité somme toute réduite de bases de données EEIO (i.e. tableaux EEIO), nationales comme multirégionales. Il est 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. Un modèle EEIO, s'il est jugé comme suffisamment détaillé et complet, peut être utilisé conjointement à une ACV pour guider la collecte de données et la modélisation dans une phase exploratoire préliminaire à l'ACV (*screening*).

5 L'analyse hybride

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 (détail des produits et des technologies, meilleure couverture des enjeux environnementaux pour l'ACV, absence de troncature et d'exclusion pour l'EEIO) peuvent être valorisées par l'hybridation. L'argument théorique en faveur de l'hybridation affirme qu'« *il vaut mieux être exact avec incertitude qu'être biaisé avec précision* ».

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. Et corrige les problèmes de double comptage introduits par la combinaison de descriptions ACV et EEIO.

L'hybridation peut être envisagée selon deux perspectives. La première cherche plutôt à détailler un modèle d'analyse EEIO existant en y introduisant l'information de processus ACV, typiquement pour désagréger des secteurs du tableau et permettre de distinguer différents produits d'un même groupe (p.ex. les produits laitiers) ou différentes technologies (p.ex. électricité éolienne, hydroélectricité, électricité nucléaire, etc.). L'objectif reste 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. L'analyse est donc macro-économique. Cette perspective requiert beaucoup d'efforts et de données (prix, volumes de production), mais bonifie durablement le tableau EEIO tout en lui conservant son caractère équilibré.

La seconde perspective consiste à utiliser un tableau EEIO normalisé pour aller compléter un ou plusieurs processus ACV. Cette approche requiert un minimum de données (un seul prix, soit le prix du produit du processus ACV, soit le prix moyen du secteur auquel il appartient) et d'efforts et vise à pallier aux limitations mentionnées de l'ACV. La Figure 2 schématise le principe d'hybridation à l'échelle du processus ACV et EEIO. Cette perspective est plus adaptée à une analyse spécifique, pour laquelle on souhaite donc en général que la majorité des impacts proviennent des processus ACV détaillés, et que le complément générique soit le plus petit possible. Si, au cours de l'hybridation, il apparaît que la part des impacts provenant de la partie EEIO est jugée trop importante et concerne des opérations modélisables avec des processus ACV, une étape de collecte de données complémentaires (ou de modélisation ACV) devrait être entamée pour étendre la partie ACV et réduire la partie EEIO dans l'analyse hybride. Une analyse de contribution permet de révéler cet aspect et guider le praticien dans le processus itératif d'hybridation.

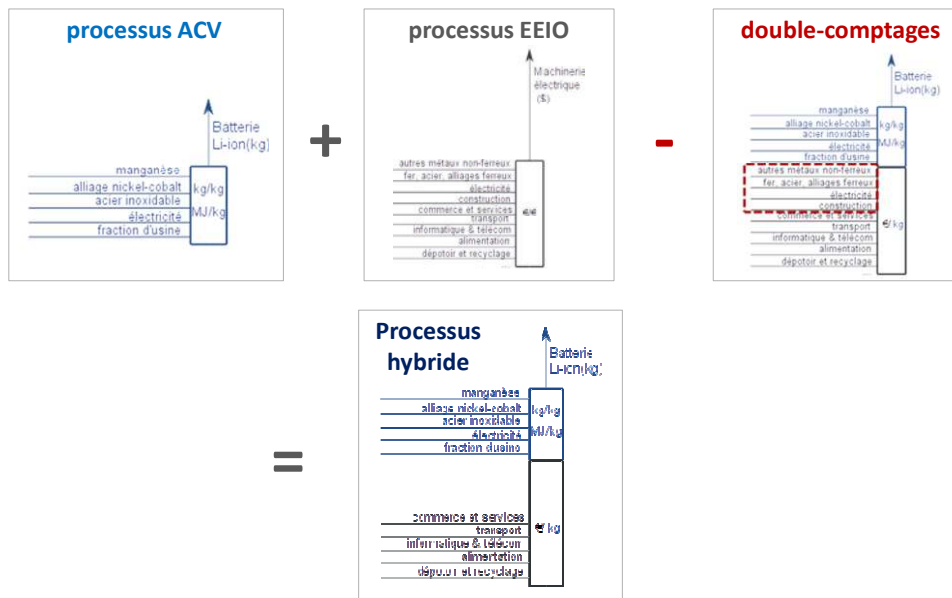


Figure 2: Principe d'hybridation d'un processus ACV par un processus de base de données EEIO. Note : 1) les flux environnementaux des deux processus ne sont pas figurés ; 2) « l'addition » du processus EEIO nécessite la connaissance du prix moyen d'un kg de machinerie électrique ; 3) les flux environnementaux du processus EEIO sont retirés lors de l'addition.

6 Mise en œuvre de l'hybridation au travers de cas d'étude

Le Tableau 2 décrit les deux cas d'étude d'hybridation réalisés, l'un sur un véhicule électrique et sa comparaison avec une automobile conventionnelle, l'autre sur un bâtiment d'habitation collective. Dans les deux cas, le point de départ est une ACV et l'EEIO sert de complément générique aux processus spécifiques du modèle ACV ; l'hybridation est dite par paliers (*tiered hybrid*). Ils ont été mis en œuvre à dessein par deux praticiens différents et à l'aide de données EEIO et d'outils différents. L'utilisation de tableaux EEIO multirégionaux pour le cas d'étude « véhicule » implique de manipuler de grosses bases de données et exclut la possibilité d'utiliser des logiciels ACV ou même un tableur comme Excel. Un outil développé sous le langage de programmation Python a été utilisé. La Figure 3 décrit le processus itératif de l'hybridation.

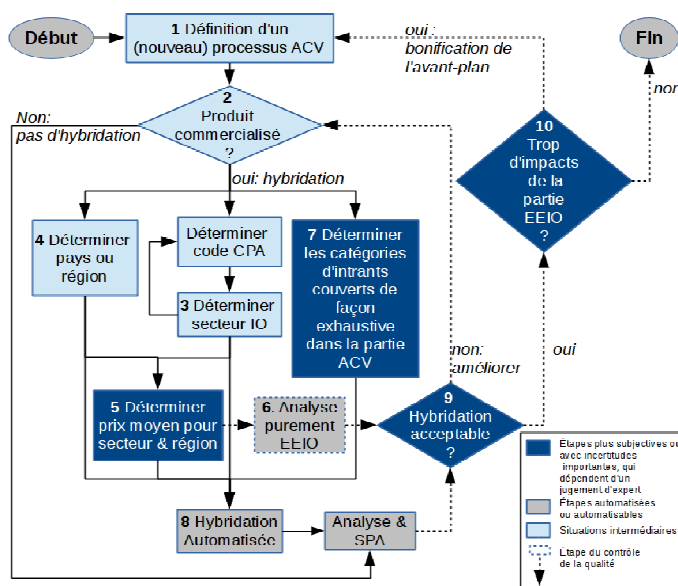


Figure 3: Processus itératif mis en œuvre pour l'hybridation. Notes : L'automatisation réfère à l'hybridation à proprement parler des processus à l'aide de l'outil pyLCAIO ; CPA : code produit selon la 'Classification of Product by Activity' ; SPA : Structure Path Analysis.

Tableau 2: Description des deux cas d'étude utilisés

	Cas d'étude « Véhicule électrique vs. conventionnel »	Cas d'étude « Bâtiment »
Source du cas d'étude	2 publications: ACV batterie (Ellingsen et al. 2013) et ACV comparative des véhicules (Hawkins et al. 2013)	ACV en cours de réalisation au CIRAIG; données collectées
Unité fonctionnelle	« Parcourir 150 000 km en Europe » (véhicule type tourisme)	« Assurer un espace de vie confortable, sur 75 ans, dans un immeuble résidentiel de 4 étages et 20 unités, construit au Québec en 2014 »
Complexité	Berceau au tombeau; Gros détail sur la phase de production du moteur	Berceau au tombeau; ACV simplifiée (p.ex. 2 ^{nde} itération)
Modélisation de l'avant-plan	521 processus; Régionalisation : EU et GLO	66 processus; Régionalisation : Québec et GLO
Arrière-plan	Base de données ICV ecoinvent v2.2	Base de données ICV ecoinvent v3.1
Données EEIO	Exiobase v2.2 (Multirégionale, 2007); 44 pays * 200 secteurs (Exiobase and CREEA 2014)	CEDA v4 (États-Unis, 2002); 424 secteurs
Analyse EEIO	Régionalisation Exiobase de l'avant-plan: CN, EU, CA. Sauf phase d'utilisation et fin de vie: processus ACV ecoinvent conservés	CEDA pour tous les processus de l'avant-plan; Sauf l'électricité et les processus de combustion d'énergie (chauffage, machinerie); processus ACV ecoinvent conservés
Données de prix	Compilation Exiobase (prix de base, €2007)	Compilation Exiobase (prix de base, €2007) Conversions : devises : BCE; déflation : Indices des prix producteurs du Bureau des statistiques É.-U. (https://www.bls.gov)
Hybridation	Hybridation des processus d'avant-plan; approche itérative automatisée	Hybridation des processus d'avant-plan ; approche itérative manuelle
Analyse des impacts	Méthode ReCiPe (compilation CML pour Exiobase)	Méthode ReCiPe v1.12
Outils	Outil spécialisé pyLCAIO: pour organiser/gérer les différents tableaux, extraire les FC pour Exiobase, automatiser l'hybridation et la correction du double-comptage. https://github.com/majeau-bettez/pylcaio	Outils de tout praticien ACV: SimaPro, tableur
Profil du praticien	Analyste A : expertise en EEIO et hybridation, base de données Exiobase, calcul matriciel et outils numériques	Analyste B : expertise en ACV et EEIO; pas d'expertise en hybridation
Autres	-	Le cas d'étude est aussi utilisé pour évaluer l'influence de l'ajout à l'ACV de dépenses (modélisées 100% EEIO) encourues au cours de la vie du bâtiment et relatives à des frais d'aménagement, des taxes, des assurances, et des frais de gestion.

7 Résultats

7.1 Résultats du cas d'étude sur le véhicule électrique

Les approches ACV et EEIO mènent à des estimations très semblables pour les changements climatiques lors de l'analyse du berceau à la porte de l'usine pour le véhicule électrique bien que les contributions diffèrent (Figure 4). Après hybridation, le score est augmenté de 30%. Pour l'acidification, l'analyse hybride ajoute 16% ; 12% pour l'écotoxicité marine et environ 8% pour l'eutrophisation et la toxicité humaine. Les émissions contribuant à ces dernières catégories d'impact sont moins bien inventoriés dans Exiobase que les GES ou les substances acidifiantes

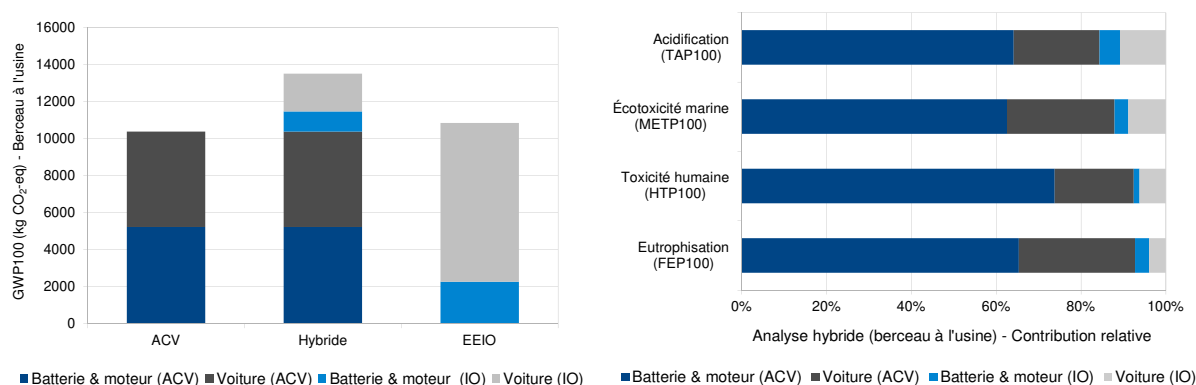


Figure 4: Scores d'impact de la production d'un véhicule électrique, du berceau à l'usine. Gauche : changement climatique évalué par l'ACV, l'EEIO et l'analyse hybride. Droite : autres impacts évalués selon l'analyse hybride. L'analyse hybride présente la contribution relative des processus ACV (ACV) et EEIO (IO).

L'augmentation s'explique par une multitude de chaînes de valeurs apportées par le complément EEIO, qui contribuent toutes individuellement à moins de 1% de l'augmentation. Parmi les chaînes de valeurs qui contribuent le plus à l'impact potentiel sur les changements climatiques, on retrouve les processus suivants: Services d'affaires, Commerce de gros et services commerciaux, Vente et entretien de véhicules, Vente au détail et services commerciaux, Papeterie, Recherche et développement, etc.

Lors de l'ACV comparative des véhicules, sur le plan des changements climatiques, et du berceau à l'usine, le véhicule conventionnel montre un score plus faible (65%) que le véhicule électrique (100%), en raison de la production de la batterie électrique. Après hybridation, l'écart change peu (68% contre 100%) et la conclusion reste en faveur du véhicule à combustion. Sur le cycle de vie complet toutefois, le score d'impact est en défaveur du véhicule conventionnel en raison de la très forte contribution de la phase d'utilisation (Figure 5). Au final, l'ACV hybride ne change pas les conclusions de l'ACV lors de la comparaison des deux véhicules.

7.2 Résultats du cas d'étude sur le bâtiment

L'analyse EEIO pure élaborée à partir du modèle ACV révèle des scores accrus de l'ordre de 5 à 10% pour les indicateurs changements climatiques, appauvrissement de la couche d'ozone, ressources minérales et fossiles, acidification terrestre, et toxicité humaine par rapport à l'ACV. L'augmentation la plus importante est pour l'indicateur formation des matières particulaires, avec 40% d'impact additionnel. Pour l'eutrophisation et l'écotoxicité aquatique, au contraire, les scores sont plus faibles de 20% à 60%. 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 de production d'électricité ainsi que des émissions directes de la combustion des granules de bois pour le chauffage du bâtiment.

La Figure 6 présente les scores obtenus après l'étape d'hybridation. Les scores sont accrus de 2 à 5%. L'augmentation est somme toute réduite par rapport à ce que pouvait laisser présager l'analyse EEIO pure.

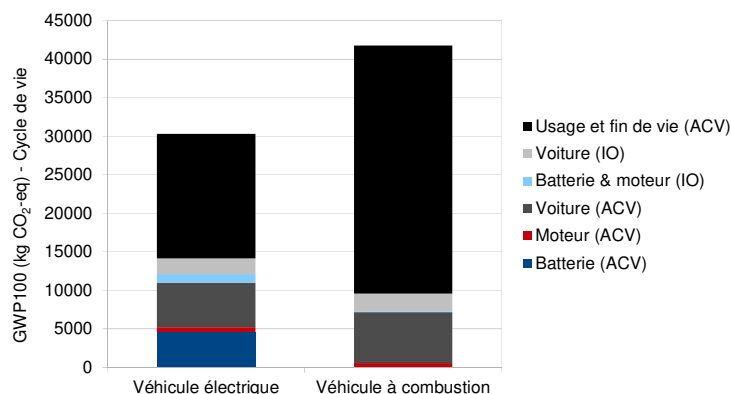


Figure 5: Comparaison sur leur cycle de vie du score d'impact sur les changements climatiques d'un véhicule électrique et d'un véhicule conventionnel selon l'analyse hybride. Note : les phases d'utilisation et de fin de vie des véhicules (agrégées en noir) ne sont pas hybridées.

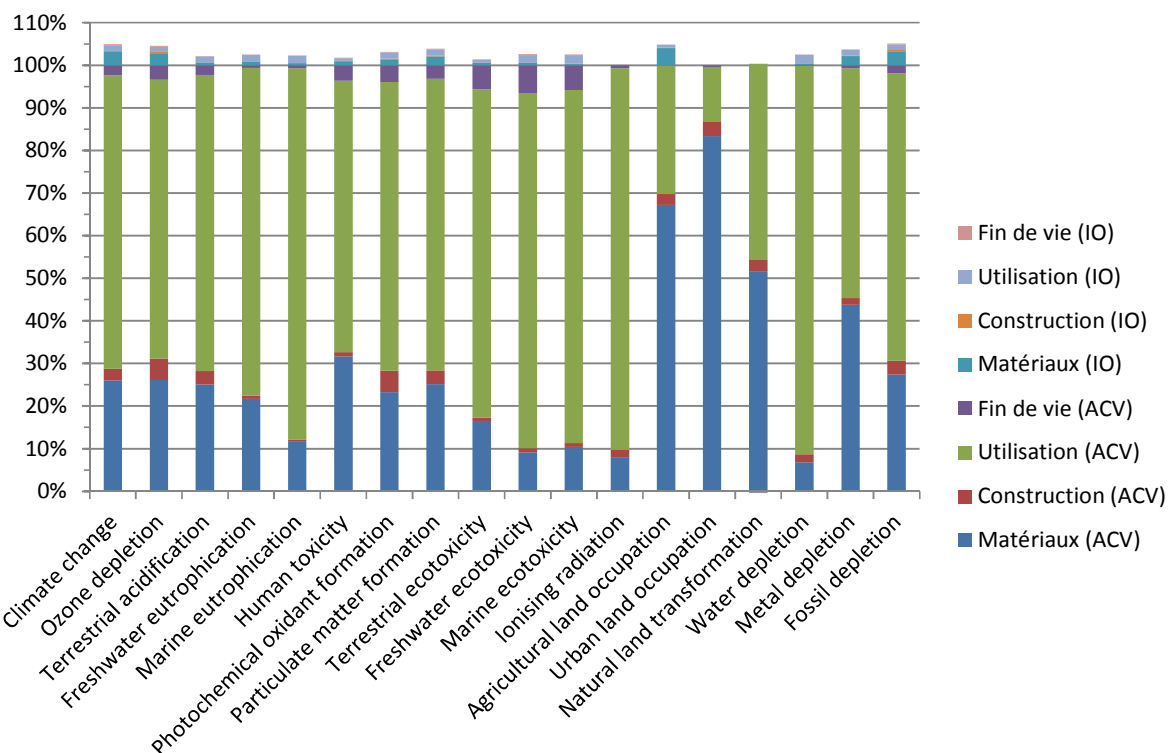


Figure 6: Contribution des étapes du cycle de vie et de la source des processus aux impacts du cycle de vie du bâtiment évalué par analyse hybride. Les scores sont normalisés sur la part des processus ACV (ACV) pour révéler l'apport des processus EEIO (IO) lors de l'hybridation.

Enfin, l'ajout au modèle de dépenses non considérées au travers de l'ACV initiale et modélisées ici à l'aide de processus EEIO purs (i.e. sans hybridation) révèle des impacts additionnels relativement significatifs : les impacts sont augmentés de 11% (p.ex. acidification, écotoxicité aquatique), 17% (p.ex. utilisation des terres, changements climatiques) voire 21% (prélèvement d'eau).

8 Enseignements

8.1 L'analyse EEIO

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

- Un **processus d'analyse somme toute rapide**
 - Qui peut toutefois s'avérer plus long (cas d'étude sur le bâtiment) lorsque la base de données EEIO utilisée est détaillée (i.e. désagrégée, offrant le choix de nombreux produits/secteurs comme CEDA) et que le modèle est également détaillé.
- Un outil utile pour une **évaluation préliminaire de contribution et d'identification des points chauds**
 - de matériaux, et de services
 - qui seront d'autant plus « moyennement » modélisés qu'on utilise des tableaux multirégionaux (p.ex. Exiobase) ; d'autant moins si une base de données comme CEDA est utilisée.
 - 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 ; Il faut être très prudent vis-à-vis des flux liés à la toxicité. Le praticien devra prêter attention aux enjeux mal couverts lors du choix de la base de données et l'interprétation des résultats.
- Un outil :
 - **Le plus souvent inadapté pour un cycle de vie complet** avec phases d'utilisation et fin de vie qui nécessitent l'ajout de processus ACV.
 - Trop **imprécis pour des études comparatives de produits** ; et d'autant plus que les objets comparés sont semblables.
 - Tout de même **utile pour ajouter** au modèle d'avant-plan **des services** précis qu'on ne peut modéliser (processus indisponibles dans les bases de données ACV ou collecte de données trop laborieuse). Il faut toutefois que les tableaux EEIO offrent ces services et que des données de dépenses de dépenses soient collectées. Des services peuvent contribuer significativement (+10 à 20% ici pour le cas du bâtiment).

On constate également un fort décalage entre les différents tableaux EEIO utilisés en termes de désagrégation des secteurs/produits et aussi de couverture des flux environnementaux. Le choix initial de la base de données EEIO utilisée est donc un élément de décision important. Si la régionalisation par pays n'est pas un critère, au contraire du détail des produits/matériaux/services, alors une base de données nationale comme CEDA est préférable.

8.2 L'hybridation et sa rentabilité

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 (analyse en partie automatisée) un temps de travail total de l'ordre de 2 jours a été nécessaire. Dans le cas du bâtiment, réalisé manuellement dans SimaPro et un tableur, le temps total de travail est d'environ 4 jours. Dans tous les cas, le fardeau est probablement à doubler pour un analyste novice.

En comparant les deux cas d'études, on peut penser que l'hybridation pour le cas du bâtiment représente un fardeau de travail excessif par rapport aux bénéfices. Si la correction pour le double comptage est partiellement automatisée, comme c'est le cas pour le véhicule à l'aide de l'outil pyLCAIO, le processus d'hybridation devient plus accessible et le « retour sur l'investissement » s'avère proportionnellement plus intéressant. Ainsi, avec l'outil, plusieurs intrants difficiles à inventorier sont ajoutés à l'analyse en à peine quelques heures de travail, ce qui résout rapidement les problèmes de troncature, corrige les biais négatifs sur 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 hybride ne sera toutefois atteint que lorsqu'une base de données ACV (p.ex., *ecoinvent 3*) sera disponible en version hybridée pour corriger l'effet de troncature à l'échelle des milliers de processus de la base de données ACV.

8.3 Recommandations

Le Tableau 3 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. La recommandation de travailler avec des prix de base permet de réduire la sensibilité du modèle EEIO ou hybride qui sera développé à la fluctuation des prix avec le temps. Cela assure en particulier la capitalisation du modèle qui pourra être réutilisé avec les mises à jour éventuelles des tableaux EEIO, pour autant que ces derniers conservent la même devise de base (p.ex. €2007 pour Exiobase).

Tableau 3: 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 (p.ex. pyLCAIO, 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 suivants :	- la gestion/le mode de gestion des déchets ? - produits biosourcés ? La capacité à décrire ces enjeux varie grandement entre les bases de données EEIO disponibles.
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 ' <i>Electric power generation, transmission, and distribution</i> ') mais préférer un processus ACV Évaluer si d'autres opérations récurrentes de l'économie sont très différentes entre les deux régions (p.ex. approvisionnement en gaz naturel, en chaleur).
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 (acheteur/producteur/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 <i>ecoinvent</i> 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.- Permet de renommer en série des flux élémentaires <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. 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 <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.

9 Références

- Ellingsen, L.A.-W. et al. 2013. « Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. » *Journal of Industrial Ecology*, 18(1):113–124.
- Exiobase and CREEA. 2014. Multiregional Supply Use tables. April 2014. Données disponibles sur EXIOBASE2 Data Download (<http://www.exiobase.eu>).
- Hawkins, T .R. et al. 2013. « Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. » *Journal of Industrial Ecology*, 17(1):53–64.
- Leontief, W. 1970. « Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. » *The Review of Economics and Statistics*, 52(3):262–271.
- Suh, S., Weidema, B., Schmidt, J., and Heijungs, R. 2010. « Generalized Make and Use Framework for Allocation in Life Cycle Assessment. » *Journal of Industrial Ecology*, 14(2):335-353.