

Étude N°2023-05

Spatialisation des impacts en ACV

Synthèse

Décembre 2024

Version	19 décembre 2024	
Rédacteurs	Vérificateurs	Approbateurs
Georg SEITFUDEM	Cécile BULLE	François SAUNIER
Pablo TIRADO SECO	Laure PATOUILLARD	
Ivan VIVEROS SANTOS	Julien PEDNEAULT	

Centre international de référence sur l'analyse du
cycle de vie et la transition durable (CIRAIG)
www.ciraig.org



L'association SCORE LCA 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 :
SCORE LCA, Spatialisation des impacts en ACV, Synthèse, 2024, 17 pages, n°05-2023.
- 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 SCORE LCA.
- 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.

1. Contexte et objectif de l'étude

Depuis les premiers développements de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), l'intégration de la dimension spatiale est un sujet étudié et en développement. ScoreLCA a publié, il y a une dizaine d'années, des travaux sur l'intégration de la dimension géographique en ACV. Cette étude s'inscrit dans la continuité de ces études, ayant pour objectif d'évaluer la spatialisation des impacts en ACV à travers une revue des méthodes existantes, une étude de cas et des recommandations pratiques destinées aux utilisateurs et aux développeurs d'outils d'ACV.

Les objectifs spécifiques du projet incluaient :

- La réalisation d'un état de l'art sur l'intégration des aspects géographiques en ACV ;
- La réalisation d'une étude de cas pour illustrer les défis opérationnels ;
- La formulation de recommandations pour les praticiens et les développeurs ;
- Diffuser les résultats de ces travaux auprès de différentes audiences.

Ce document est la synthèse de l'étude complète disponible en ligne sur le site de ScoreLCA :

SCORE LCA, Spatialisation des impacts en ACV, 2024, 179 pages, n°2023-05.

2. Concepts relatifs à la spatialisation des impacts

Dans la littérature scientifique, divers termes liés à l'intégration de la dimension géographique en ACV sont souvent employés de manière interchangeable, sans une clarification explicite du vocabulaire. Ce document adopte et bonifie les définitions établies dans l'étude ScoreLCA de 2015, réalisée conjointement par le CIRAIG et l'IFP Énergies Nouvelles (Patouillard et al., 2015), lesquelles ont été reprises dans l'article ultérieur de Patouillard et al. (2018).

2.1 Terminologie de base

Unité spatiale : Il s'agit de la définition géométrique d'une entité spatiale, telles que les coordonnées d'une cellule de raster ou d'un polygone, ainsi que toutes les métadonnées spatiales et non spatiales associées (Mutel et al., 2019). Une unité spatiale correspond donc à une région.

Résolution spatiale : C'est l'ensemble des unités spatiales utilisées dans une base de données d'inventaire ou une méthode d'évaluation des impacts (ÉICV). Cette définition diffère légèrement de la définition traditionnelle de la résolution spatiale, qui se réfère généralement aux plus petites unités spatiales distinguables. En effet, dans les méthodes ÉICV, les unités spatiales telles que les bassins versants, peuvent varier considérablement en taille (Mutel et al., 2019).

L'échelle spatiale se définit comme le niveau d'analyse ou de détail auquel les données sont observées ou présentées. Elle détermine la taille et la portée des unités spatiales (régions) utilisées dans l'ACV. Une échelle spatiale plus large pourrait inclure des régions géographiques étendues avec des unités spatiales plus grandes, tandis qu'une échelle spatiale plus fine se concentrerait sur des zones plus petites avec des unités spatiales plus détaillées. Ainsi, l'échelle spatiale influe directement sur la granularité et la portée de la prise en compte de la dimension spatiale en ACV.

Régionalisation : Terme utilisé pour décrire la représentativité des processus et phénomènes d'une région donnée (Patouillard et al., 2018).

Spatialisation : Action d'attribuer un emplacement à quelque chose, par exemple, un flux élémentaire

Régionalisation de l'inventaire : Il s'agit d'améliorer la représentativité géographique des données d'inventaire, en affinant le type et la quantité des flux économiques et élémentaires pour qu'ils correspondent aux zones géographiques spécifiques où les activités ont lieu (Patouillard et al., 2018). Le résultat est un modèle d'inventaire régionalisé, et cette opération est effectuée soit par les concepteurs des bases de données d'ICV, soit par les praticiens ACV.

Régionalisation des impacts : Il s'agit de calculer, pour un même flux élémentaire, des FC régionalisés spécifiques à une zone géographique, en tenant compte de la variabilité spatiale des paramètres et mécanismes environnementaux les plus influents. Cette tâche est effectuée par les développeurs des méthodes d'ÉICV (Patouillard et al., 2018). Par la suite, les développeurs des méthodes d'ÉICV peuvent fournir eux-mêmes ces FC sous des formats compatibles avec les logiciels ou transmettre une version native aux développeurs de logiciels ACV, afin qu'ils les intègrent dans leurs outils.

Spatialisation de l'inventaire : Ce processus consiste à attribuer une localisation géographique aux flux élémentaires en fonction du lieu d'origine de ces flux. Différentes échelles géographiques peuvent être utilisées, telles que les coordonnées géographiques, les régions administratives ou les archétypes (Patouillard et al., 2018). Le résultat de cette opération est un inventaire spatialisé, qui peut être présenté de différentes façons: soit une liste de flux élémentaires avec l'information spatiale associée, soit sur une carte par flux élémentaire présentant les lieux d'émission ou de prélèvement de ce flux.

Cette tâche peut être effectuée par le praticien ACV lorsqu'il s'agit d'attribuer une localisation au flux élémentaire correspondant à la région du processus en cours de modélisation. Certains logiciels ACV facilitent cette spatialisation en intégrant des algorithmes de systèmes d'information géographique (SIG) qui permettent d'associer une localisation aux flux élémentaires en fonction de leur origine. Cette approche évite la duplication des flux élémentaires et simplifie la spatialisation manuelle, qui reste néanmoins une tâche à la charge du praticien ACV ou des développeurs des bases de données d'ICV.

Spatialisation des impacts : La spatialisation des impacts consiste à distribuer géographiquement les scores d'impact, en fonction de leur origine ou de leur destination. Cette opération est réalisée à l'aide de logiciels spécialisés ACV, ce qui signifie que les analyses intégrant la spatialisation des impacts sont limitées par les fonctionnalités de ces logiciels.

ACV régionalisée : ACV qui calcule des scores d'impact spatialisés en combinant un inventaire spatialisé avec des FC régionalisés.

2.2 Calcul d'ACV régionalisée

2.2.1 Étapes de la spatialisation des impacts

À l'exception des catégories d'impact globales, la spatialisation des impacts nécessite deux conditions fondamentales : un inventaire spatialisé et la disponibilité de FC régionalisés (*Figure 1*).

L'inventaire spatialisé résulte du processus de spatialisation, qui peut être effectué par le développeur de bases de données d'ICV ou par le praticien ACV. Une étape supplémentaire, généralement réalisée soit au sein du logiciel ou par les développeurs des méthodes d'ÉICV, consiste à calculer des FC régionalisés agrégés à l'échelle de l'inventaire à partir des FC régionalisés à leur échelle native (section **Error! Reference source not found.**). Une fois l'inventaire et les FC harmonisés à la même échelle, ils sont associés par des calculs matriciels intégrés dans les logiciels ACV. Il est important de noter que le score d'impact spatialisé sera conforme à l'échelle de l'inventaire (*Figure 1*).

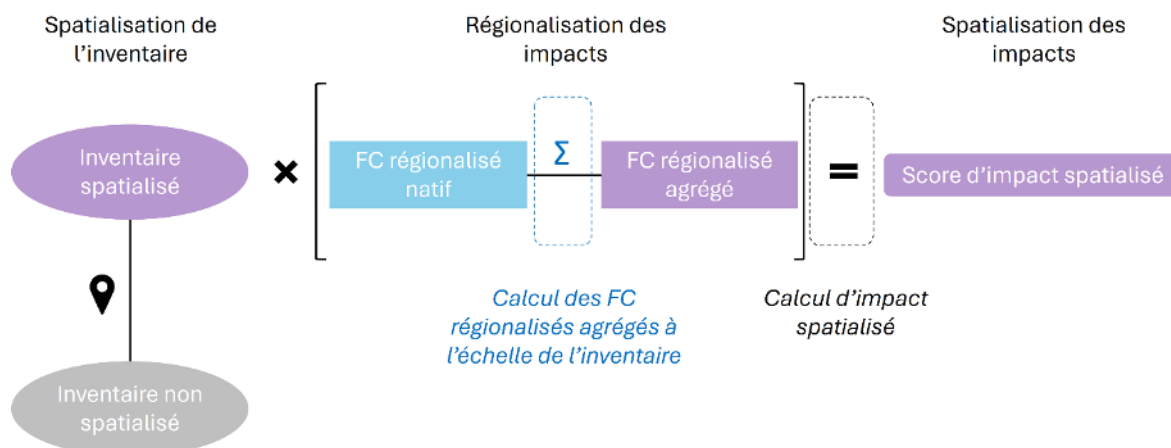


Figure 1. Étapes de la spatialisation des impacts, avec les couleurs indiquant les différentes échelles.

3. État de l'art sur la spatialisation des impacts en ACV

3.1 Identification des enjeux méthodologiques et limites actuelles

La prise en compte de la dimension géographique est un élément essentiel à l'ACV pour plusieurs raisons : la localisation du système lors de la définition des objectifs et du contexte, la modélisation des chaînes d'approvisionnement qui ont lieu dans différentes régions du monde, le calcul des impacts des émissions qui va dépendre du lieu d'émission, mais aussi de la dispersion depuis ce lieu d'émission et de la sensibilité du milieu récepteur (Patouillard et al., 2015). Le niveau de précision de ces informations géographiques va déterminer la fiabilité et précision des résultats calculés. Le précédent rapport ScoreLCA sur le sujet (Patouillard et al. (2015) faisait un aperçu général de l'état de la prise en compte de la dimension géographique en ACV et identifiait différents enjeux en lien avec cette dimension :

- La prise en compte dans l'inventaire (régionalisation et spatialisation) et les bases de données;
- La prise en compte dans le développement des méthodes d'impact;
- La prise en compte lors de l'interprétation des résultats;
- L'intégration des informations géographiques dans les logiciels d'ACV.

Dans le même sens, Mutel et al., (2019) identifient les principaux défis de la prise en compte de la dimension géographique en ACV, notamment :

- Harmonisation avec les données d'inventaire : Aligner les résolutions spatiales des impacts régionalisés avec les données d'inventaire de cycle de vie qui sont souvent agrégées à un niveau plus général;
- Développement de méthodes d'ÉICV : Nécessité de développement constant pour améliorer la précision des méthodes d'évaluation régionalisées et leur applicabilité à divers environnements géographiques;
- Méthodes d'agrégation spatiale : Développer des approches pour agréger ou détailler les données spatiales de manière à maintenir ou améliorer la pertinence des résultats de l'ÉICV régionalisée;
- Opérationnalisation : Assurer le bon fonctionnement de la régionalisation dans la pratique quotidienne des ÉICV, ce qui inclut l'intégration effective dans les logiciels ACV et la facilitation de son usage par les praticiens;
- Évaluation de l'incertitude : Comprendre et gérer l'incertitude liée aux paramètres d'entrée et à la structure des modèles utilisés dans les évaluations d'impact régionalisées.

3.2 Inventaire de cycle de vie

La création d'inventaires régionalisés peut exiger un effort considérable, selon la disponibilité des données et le niveau de régionalisation envisagé. Toutefois, la disponibilité de données d'ICV avec de l'information géographique associée est un enjeu crucial pour le calcul de résultats d'impact régionalisés et pour réduire l'incertitude inhérente à l'inventaire.

L'information géographique est associée au processus, ce qui affecte deux aspects :

- La nature des entrants et sortants de la technosphère (par exemple le *grid-mix* électrique utilisé, le rendement d'une culture ou le type de transport existant). C'est ce que l'on définit, en adoptant la nomenclature de Patouillard et al. 2015, comme la **régionalisation** de l'inventaire.
- La localisation des flux élémentaires qui feront partie de l'inventaire et seront utilisés pour le calcul des résultats d'impact. C'est ce que l'on définit, en adoptant la nomenclature de Patouillard et al. 2015, comme la **spatialisation des flux** de l'inventaire.

3.2.1 Bases de données

Comme exposé dans l'étude de Patouillard et al. (2015), les bases de données intègrent la dimension géographique au niveau de la régionalisation de l'inventaire, des régions couvertes, et de l'opérationnalisation de la spatialisation des flux élémentaires. En base à ces questions, le *Tableau 1* résume le traitement spatial de différentes bases de données d'ICV.

Tableau 1. La dimension spatiale dans diverses bases de données d'ICV.

Base de données	Régions couvertes	Régionalisation de l'inventaire	Spatialisation des flux
ecoinvent	Plusieurs	Oui	Selon le logiciel (eau et utilisation des terres)
Managed LCA content (GaBi)	Plusieurs	Oui	Seulement eau et utilisation des terres, via LCA for Experts (GaBi)
USLCI	US principalement	Oui	Non
Agribalyse	France (+ecoinvent)	Oui	Selon le logiciel (eau et utilisation des terres)
Agrifootprint	Plusieurs	Oui	Non

3.3 Méthodes d'ÉICV

Après l'inventaire spatialisé, le deuxième élément nécessaire pour le calcul d'impacts régionalisé est une méthode d'impact régionalisé, c'est-à-dire, avec des FC qui modélisent chacun la chaîne de cause à effet d'une intervention environnementale (prélèvement d'une ressource primaire ou d'une émission) à partir d'un point d'origine précis.

3.3.1 Revue des méthodes d'ÉICV les plus récentes

Depuis la parution du dernier rapport commandité par ScoreLCA sur l'intégration de la dimension géographique en ACV (Patouillard et al., 2015), les méthodes d'ÉICV ont connu des avancées significatives, notamment en incorporant les développements relatifs aux catégories d'impact régionalisées. Dans cette section, nous mettons en lumière les principales méthodes d'ÉICV actuellement utilisées: IMPACT World+ (Bulle et al., 2019), ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017), EF3.0 (EPLCA, 2024) et LC-IMPACT (Verones et al., 2020). Bien que la méthode d'ÉICV issue des travaux du projet GLAM (*Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods*) de la *Life Cycle Initiative* ne soit pas encore publiée¹, nous lui consacrons également une sous-section afin de présenter les recommandations du groupe de travail visant à élaborer une méthode consensuelle, conciliant rigueur scientifique et applicabilité (Frischknecht & Jolliet, 2017, 2019).

La Figure 2 récapitule l'inclusion de la dimension géographique dans les principales méthodes d'ÉICV et son intégration dans les principaux logiciels ACV.

¹ Une version intérimaire est disponible depuis octobre 2024, mais l'analyse est fait en fonction des informations disponibles avant la publication de cette version.

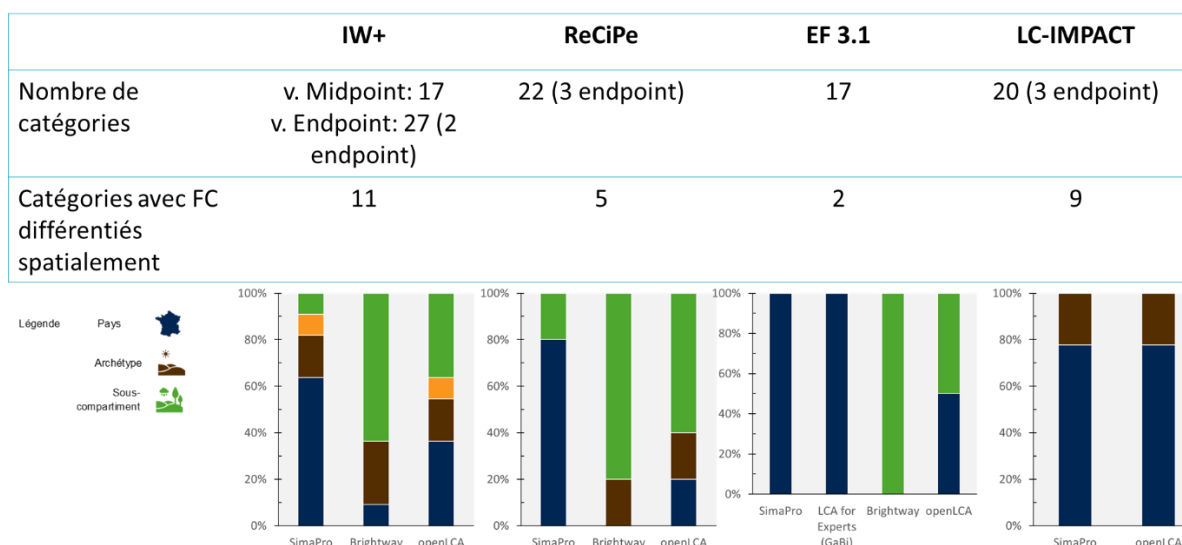


Figure 2. La dimension spatiale dans diverses méthodes d'ÉICV.

3.4 Opérationnalisation

3.4.1 Enjeux sur l'opérationnalisation de l'ACV régionalisée dans les logiciels

Le principal enjeu pour l'ACV régionalisée est la combinaison des deux éléments précédents, c'est-à-dire, la combinaison de l'inventaire spatialisé et les FC régionalisés. Deux principales méthodes de sont utilisées, selon l'approche disponible pour la spatialisé des flux élémentaires:

- **Spatialisation basée sur le nom des flux élémentaires** : Cette méthode suit le calcul matriciel standard de l'ACV, où chaque flux élémentaire est multiplié par son FC pour une catégorie d'impact donnée. La particularité de cette approche réside dans l'intégration de la localisation directement dans le nom du flux, permettant d'associer chaque flux à son FC en fonction de sa région d'origine.
- **Géospatiale** : Cette approche permet d'éviter la duplication des flux élémentaires nécessaire dans la méthode basée sur le nom des flux. Grâce aux algorithmes SIG intégrés dans certains logiciels ACV, il devient possible de gérer efficacement les différences de résolution spatiale entre l'inventaire et les FC régionalisés. Cela simplifie le calcul d'impact spatialisé en adaptant les échelles de calcul aux régions définies par les praticiens.

Les différents logiciels ACV ont intégré l'un ou les deux approches. Le Tableau 2 présente le résumé pour les différents logiciels.

Tableau 2 : Approche de régionalisation implémentée par logiciel ACV

Approche de régionalisation	SimaPro	LCA for experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Basée sur le nom des flux élémentaires	✓	✓	✓	✓
Géospatiale	✗	✗	✓	✓

3.5 Interprétation

3.5.1 Enjeux liés à la phase d'interprétation

L'un des buts de la phase d'interprétation de l'ACV est d'identifier, au moyen de l'analyse de contribution et des analyses de la qualité de données, sensibilité et incertitude, les données qui devraient être améliorées en priorité pour augmenter la fiabilité et la précision des résultats et la robustesse des conclusions.

Dans la pratique courante de l'ACV, les praticiens utilisent souvent des FC agrégés, obtenus par une moyenne ou une pondération des FC régionalisés natifs, mieux adaptés à la résolution de leurs données d'inventaire. Cependant, ces agrégations peuvent masquer d'importantes disparités entre les régions au sein d'un même pays (Patouillard et al., 2015). Différentes approches de priorisation ont été décrites :

- **Jugement d'expert** : Les processus à régionaliser sont identifiés en se référant à la littérature ou à des recommandations d'experts (Patouillard et al., 2015).
- **Contribution à l'impact** : Les processus sont régionalisés s'ils contribuent de manière significative à l'ICV global ou aux résultats finaux de l'ÉICV (Patouillard et al., 2015). Patouillard et al. (2016) proposent une méthode basée sur la contribution à l'impact et du niveau d'incertitude des processus en utilisant la simulation de Monte Carlo (possible juste avec les logiciels qui permettent d'inclure l'incertitude des FC).
- **Global sensitivity analysis** : Les analyses globales de sensibilité déterminent les indicateurs d'impact qui requièrent plus de détail géographique, si l'effort doit être fait pour régionaliser ou spatialiser l'inventaire et identifie quels sont les éléments clés (processus ou flux) à détailler davantage. La possibilité d'inclure l'incertitude liée à la variabilité spatiale des FC est nécessaire pour l'application de cette méthode.

3.6 Revue des exigences réglementaires et normatives

Dans les normes et documents de référence consultés, La dimension géographique est abordée de manière relativement sommaire. Seules des recommandations générales sont fournies concernant les aspects spatiaux de l'ACV, notamment en ce qui concerne la définition du champ d'étude et l'utilisation de données régionalisées. Parmi les enjeux clés identifiés pour les recherches futures figurent le développement de formats de données spécifiques pour les catégories d'impact régionalisées, l'agrégation des FC, et la création de logiciels appropriés. Enfin, le guide PEF traite de la régionalisation de façon limitée, se concentrant principalement sur l'utilisation des mix électriques régionaux et quelques autres catégories spécifiques.

4. Étude de cas

4.1 Description générale de l'étude de cas

Afin d'illustrer les enjeux et limites identifiés, une étude de cas a été développée. Elle a servi à illustrer les effets des différentes combinaisons de niveaux de prise en compte des aspects spatiaux de la phase d'ÉICV avec ceux de la phase d'inventaire. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'amélioration de la régionalisation de l'inventaire sur les résultats de l'ACV, en les comparant avec des méthodes d'impact avec et sans régionalisation.

Le sujet de cette étude de cas est l'utilisation d'un shampoing en France. L'étude est menée en utilisant la base de données ecoinvent 3.9.1, ainsi que les logiciels SimaPro, openLCA et Brightway, afin d'illustrer la manière dont chaque outil traite les enjeux actuels. Différentes méthodes d'ÉICV régionalisées sont testées, notamment EF 3.1, IMPACT World+ 2.0.1 et LC-IMPACT.

La Figure 3 illustre cette analyse à travers une matrice montrant les différentes combinaisons possibles de niveaux de régionalisation de l'inventaire et des méthodes d'ÉICV. Il est à noter que certaines combinaisons ne sont pas présentées dans l'étude pour deux raisons : redondance dans l'approche entre logiciels et présence d'un niveau de régionalisation supérieur par défaut.

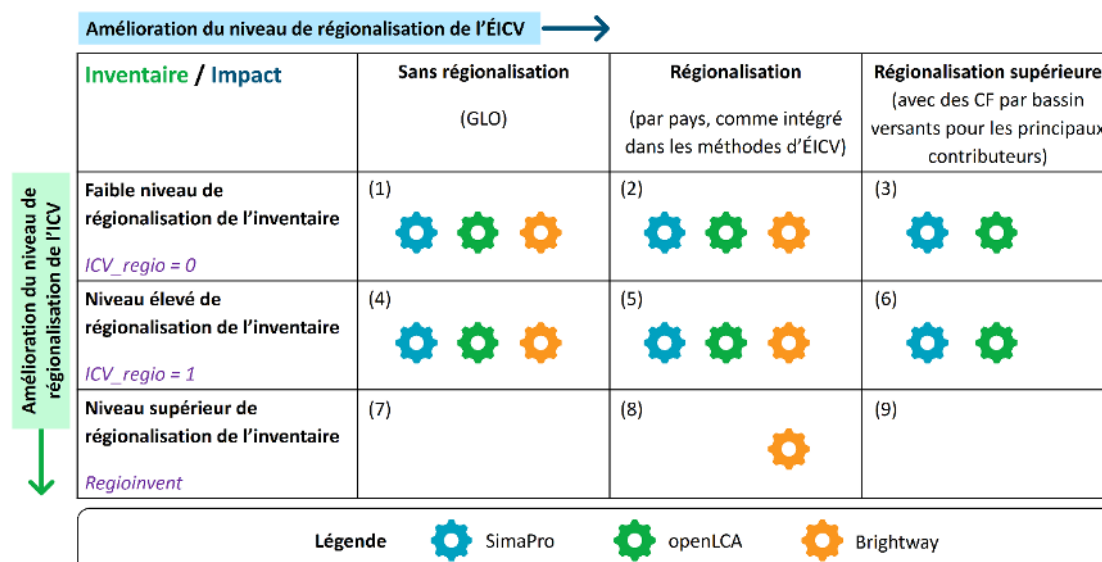


Figure 3. Matrice des analyses possibles pour l'étude de cas. Les colonnes illustrent les niveaux croissants de régionalisation appliqués à la phase d'ÉICV (de gauche à droite), tandis que les lignes reflètent les niveaux d'amélioration de la régionalisation de l'inventaire (de haut en bas). Les icônes d'engrenages indiquent la possibilité de réaliser une analyse avec chaque logiciel. Les numéros entre parenthèses permettent d'identifier les éléments de la matrice.

Pour les différents niveaux de régionalisation de la phase d'ÉICV, trois niveaux ont été considérés :

- **ÉICV sans régionalisation**: Utilisation d'une méthode d'ÉICV avec des FC génériques (globaux), c'est-à-dire, sans différenciation spatiale. Ce cas correspond à l'implémentation des méthodes d'ÉICV dans Brightway où les FC ne présentent pas de différenciation spatiale (voir section 3.3). Dans les cas où la régionalisation est présente par défaut, notamment dans SimaPro, ce niveau de régionalisation n'a pas été inclus dans l'étude de cas.
- **ÉICV avec FC régionalisés** : Utilisation de versions des méthodes d'ÉICV avec des FC régionalisés, notamment pour l'eau et les terres.
- **ÉICV avec FC régionalisés natifs**: Utilisation des FC natifs. Une analyse préliminaire ayant montré l'influence de la spatialisation des impacts liés à la consommation d'eau, seul cet indicateur est considéré pour ce niveau avancé de spatialisation des impacts. Les FC régionalisés natifs de la méthode AWARE telle que publiée originalement par Boulay et al.,

(2017) à leur résolution native par bassin versant ont été utilisés pour évaluer l'impact d'une échelle de résolution plus fine.

4.1.1 Modélisation du système avec SimaPro

Dans logiciel SimaPro, l'intégration de ecoinvent inclut déjà des flux spatialisés pour certaines catégories, notamment celles affectées par les flux d'eau.

L'amélioration de la représentativité géographique des résultats requiert des nombreuses manipulations, à différents niveaux :

- Adaptation des processus pour augmenter la représentativité;
- Création de nouveaux flux élémentaires;
- Modification de flux d'avant plan pour l'inclusion de nouveaux flux;
- Copie et modification de chaines de l'arrière-plan pour leur modification;
- Copie et modification de méthodes d'ÉICV;
- Si l'on veut utiliser des FC régionalisés agrégés à une échelle différente que celle offerte par défaut par les développeurs de méthodes ou déjà disponibles dans le logiciel, le calcul doit être fait à l'extérieur du logiciel.

Certaines de ces modifications peuvent demander beaucoup de manipulations et de temps, mais le gain en représentativité des résultats peut être important. Une approche parcimonieuse est nécessaire pour déterminer les éléments à raffiner, puisque la configuration de SimaPro ne permet pas de faire simplement des modifications qui affectent tout le système.

4.1.2 Modélisation du système avec openLCA

Le logiciel openLCA offre deux approches pour considérer les aspects géographiques lors de la modélisation d'une ACV. L'intégration de ecoinvent dans le logiciel est disponible en deux versions, une qui inclut déjà des flux spatialisés dans leur nom pour certaines catégories, et une deuxième où les flux ne sont pas spatialisés dans le nom qui permet le calcul d'ACV régionalisée avec l'approche géospatiale.

Le raffinement des résultats avec l'approche géospatiale requiert un nombre de manipulations à différents niveaux :

- Adaptation des processus d'inventaire pour augmenter la représentativité;
- Calcul de FC régionalisés à l'aide des cartes *GeoJSON*. Actuellement, seule la méthode LC-IMPACT est disponible pour ce genre de calcul;
- Modification de la localisation des processus les plus contributeurs;
- Création de nouvelles géographies. Ces géographies peuvent correspondre à l'échelle native ou pas, le logiciel permet le calcul de FC agrégés pour différentes géographies. Cependant, l'agrégation n'utilise pas la même base de pondération que celle recommandée par les développeurs de méthodes d'ÉICV;
- Calcul de FC régionalisés pour les nouvelles géographies;

Certaines de ces modifications peuvent demander beaucoup de manipulations et de temps, mais a priori, le potentiel de cette approche est plus grand que celui de l'approche présenté pour SimaPro. Cette approche permet de faire le calcul régionalisé pour tous les flux et les processus du système, selon les catégories d'impact qui disposent de FC régionalisés. L'approche parcimonieuse pour déterminer les éléments à raffiner devient superflue dans ce cas. Cependant, le manque de méthodes implémentées et les failles dans le calcul de FC agrégés (aucune liberté sur l'approche de pondération) fait en sorte que cette approche ne soit pas encore utilisable par tous les praticiens.

La possibilité d'informer sur l'incertitude des FC des méthodes d'ÉICV peut aussi être intéressante pour réaliser des analyses de contribution à l'incertitude et déterminer les éléments à raffiner dans les systèmes pour améliorer la représentativité des résultats.

4.1.3 Modélisation du système avec Brightway

Le logiciel Brightway propose deux méthodes principales pour intégrer les aspects spatiaux dans la réalisation d'une ACV. La première repose sur la librairie bw2-regional, qui permet d'effectuer des analyses géospatiales basées sur les régions définies par le praticien. Cette approche facilite la spatialisation des inventaires et l'agrégation des FC régionalisés natifs, adaptés à l'échelle de l'inventaire. La seconde méthode consiste à spatialiser l'inventaire en se basant sur les noms des flux élémentaires, une approche similaire à celles implémentées dans SimaPro et openLCA.

Au moment de cette étude, des erreurs informatiques ont empêché l'utilisation de la librairie bw2-regional. En conséquence, seule l'approche basée sur la spatialisation des flux élémentaires a été testée.

- Cette méthode nécessite certaines opérations supplémentaires de la part du praticien ACV. En particulier, il faut générer la base de données Regioinvent à l'aide de la librairie Python éponyme, une opération automatisée qui nécessite la disponibilité de la base de données ecoinvent 3.9.1. Bien que cette génération prenne environ deux heures, la base de données reste disponible pour d'autres projets intégrant des dimensions spatiales dans l'ACV.
- Lors de la génération de Regioinvent, les flux élémentaires liés à l'eau, aux terres ainsi que ceux associés à l'eutrophisation et à l'acidification sont spatialisés automatiquement. Cette automatisation réduit le temps que le praticien aurait à consacrer à la spatialisation des flux élémentaires des processus les plus contributeurs. Cependant, le praticien doit encore spatialiser manuellement les processus de l'avant-plan, comme c'est le cas avec des logiciels tels que SimaPro ou openLCA.
- Actuellement, seuls les FC régionalisés de la méthode IMPACT World+ sont disponibles pour le calcul basé sur cette approche de spatialisation de l'inventaire. L'implémentation de ces FC se fait en parallèle avec la génération de Regioinvent, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des opérations supplémentaires.
 - Il est essentiel d'utiliser une méthode d'ÉICV régionalisée lorsque les flux élémentaires sont spatialisés, afin de garantir la précision des résultats.
- Contrairement à SimaPro ou openLCA, l'intégration de FC régionalisés agrégés à une échelle adaptée à l'inventaire n'est pas simple dans Brightway. Cette tâche nécessite de recourir à des lignes de code pour créer d'abord un flux élémentaire, puis générer son FC régionalisé, ce qui implique de réaliser cette opération d'agrégation en dehors de Brightway.
- Malgré cette contrainte dans la création de flux élémentaires spatialisés et de leurs FC régionalisés correspondants, l'utilisation d'outils complémentaires comme Regioinvent permet de gagner du temps en automatisant la spatialisation des flux élémentaires de l'arrière-plan. Ainsi, l'approche de raffinement utilisée dans la modélisation avec SimaPro devient superflue. Toutefois, la principale limitation de cette méthode réside dans l'absence de disponibilité d'autres méthodes d'ÉICV compatibles avec cette approche de spatialisation.

Enfin, Brightway offre la possibilité d'inclure l'incertitude des FC dans les méthodes d'ÉICV, ce qui peut s'avérer pertinent lors de l'analyse de contribution, en identifiant les éléments à affiner pour renforcer la robustesse des résultats.

5. Conclusions et recommandations

5.1.1 Calcul de FC régionalisés

La différenciation spatiale est la méthode principale pour le calcul des FC régionalisés dans la régionalisation des impacts. Cette approche prend en compte la variabilité spatiale des impacts en fonction du lieu d'émission des flux élémentaires.

Les FC régionalisés natifs, définis à une résolution plus fine, sont regroupés à une échelle d'agrégation plus large (par exemple, nationale ou continentale) en moyennant de manière pondérée. Cette agrégation facilite l'implémentation dans les logiciels et la compatibilité avec les bases de données d'inventaire. La pondération est basée sur plusieurs facteurs dont la probabilité d'occurrence ou la quantité de flux élémentaire dans chaque région native.

Synthèse des recommandations

Calcul de FC régionalisés

Recommandations pour les développeurs de méthodes d'ÉICV

Développer les méthodes à l'échelle native la plus fine possible pour l'indicateur ;

Définir des archétypes dans les cas où un grand nombre de FC présentent une faible variabilité en fonction de certaines caractéristiques ;

Assurer la cohérence entre les indicateurs pour les méthodes d'agrégation utilisées ;

Expliquer l'approche retenue pour le traitement des données manquantes (FC nuls).

Recommandations pour développeurs de logiciels :

Permettre le calcul de FC agrégés avec différentes bases d'agrégation.

5.1.2 Calcul d'ACV régionalisée

La spatialisation des impacts, qu'elle concerne l'origine ou la destination, nécessite deux conditions fondamentales :

- un **inventaire spatialisé** et
- des **FC régionalisés**.

Le calcul régionalisé se base principalement sur **deux méthodes**. La première **méthode, basée sur le nom des flux élémentaires**, implique l'intégration de la localisation directement dans le nom du flux, permettant de multiplier chaque flux par son FC en fonction de sa région d'origine, suivant le calcul matriciel standard de l'ACV. En revanche, la **méthode géospatiale**, qui utilise les SIG, facilite la gestion des différences de résolution spatiale entre l'inventaire et les FC régionalisés.

Synthèse des recommandations

Calcul d'ACV régionalisée

Recommandations générales

Utiliser une nomenclature commune pour les flux élémentaires compatible avec celle utilisée par les développeurs de bases de données ;

Recommandations pour développeurs de bases de données :

Développer des données régionalisées et spatialisées ;

Documenter la résolution spatiale des données développées ;

Fournir des informations incluant la troisième dimension pour les évaluations pertinentes, telles que les impacts des émissions selon l'altitude (par exemple la troposphère) ;

Faciliter la création de données de type archétype ;

Utiliser une nomenclature commune pour les flux élémentaires compatible avec celle utilisée par les développeurs de méthodes d'ÉICV.

Recommandations pour développeurs de méthodes d'ÉICV :

Fournir des facteurs d'agrégation avec la documentation des méthodes et hypothèses utilisées et certains FC agrégés génériques (global, continents, etc.).

Recommandations pour praticiens :

Utiliser les outils les plus adaptés pour l'échelle géographique définie

5.1.3 Opérationnalisation de l'ACV régionalisée

Les logiciels d'ACV utilisent les deux méthodes de calcul d'ACV régionalisée. L'approche la **plus courante** repose sur la spatialisation de l'inventaire **basée sur le nom des flux élémentaires**.

En parallèle, l'opérationnalisation utilisant la **méthode géospatiale** permet une gestion plus intégrée des inventaires et des FC régionalisés. Les logiciels capables d'utiliser cette approche, notamment openLCA et Brightway, peuvent également générer des FC régionalisés agrégés adaptés à chaque région à partir de cartes de FC natifs, simplifiant ainsi le calcul et la gestion des impacts spatialisés.

Synthèse des recommandations Opérationnalisation de l'impact spatialisé

Recommandations pour développeurs de logiciels :

Intégrer l'approche géospatiale pour le calcul d'ICV spatialisés pour tous les flux élémentaires ;

Faciliter l'utilisation de données et méthodes d'ÉICV à leur échelle native ;

Documenter les algorithmes utilisés pour le calcul d'ACV régionalisée ;

Supporter des formats d'échange de données harmonisés tels que *GeoTIFF*, *GeoJSON* ou le *Data Package* de l'*Open Knowledge Foundation*.

Recommandations pour praticiens :

Définir l'échelle géographique nécessaire en fonction des objectifs de l'étude :

L'utilisation d'outils tels que Regioinvent optimise le processus de spatialisation des flux élémentaires des processus en arrière-plan, permettant ainsi des gains de temps significatifs.

5.1.4 Interprétation de l'impact spatialisé

L'interprétation des résultats d'impact spatialisés passe par plusieurs étapes :

- L'analyse des résultats à l'échelle par défaut ;
- L'analyse de contribution, soit à partir des résultats d'incertitude, si disponible, ou aux scores d'impact afin de déterminer les éléments à améliorer ;
- Une approche parcimonieuse et itérative pour améliorer la représentativité des résultats.

Synthèse des recommandations Interprétation de l'impact spatialisé

Recommandations pour développeurs de méthodes d'ÉICV :

Calculer des valeurs d'incertitude pour les FC régionalisés

Recommandations pour développeurs de logiciels :

Intégrer l'incertitude des FC aux analyses d'incertitude.

Permettre le calcul d'Analyses de Sensibilité Globale

Recommandations pour praticiens :

Définir l'échelle géographique nécessaire en fonction des objectifs de l'étude ;

Améliorer la représentativité et la robustesse des résultats à travers une approche itérative, en se concentrant sur les principaux contributeurs aux impacts ou à l'incertitude global des résultats) ;

Prioriser la méthode géospatiale lorsque disponible et fonctionnelle. Cette approche géospatiale permet le calcul d'inventaires spatialisés pour tout type de flux sans avoir un dédoublement des flux élémentaires.